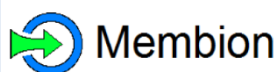


DBU-Abschlussbericht

„Effiziente Energieausnutzung in Membranbioreaktoren durch Einsatz eines innovativen Membranfilters - Verifizierung der Energieeinsparung im technischen Maßstab“

Aktenzeichen AZ 34834-01



Membion GmbH
Dr.-Ing. Klaus Vossenkaul
Schwerzfelder Str. 33, 52159 Roetgen
02471 - 135600, klaus@vossenkaul.net

Inhalt:

1	Zusammenfassung	5
2	Umweltrelevanz der Problemstellung	7
3	Serienproduktion der Membranfilter in einem automatisierten Produktionsprozess.....	8
4	Demonstrationskläranlage Simmerath	11
5	Ergebnisse des technischen Membranmoduls im Betrieb	16
6	Vorbehandlung des Abwassers für die MBR-Anlage.....	20
7	biologische Reinigungsleistung des Membionmoduls	22
8	Chemische Reinigung der Membranmodule	26
9	Begutachtung der Module nach chemischer Reinigung und Modulausbau	32
10	Ausblick: Entwicklung der „Jet-Splash“-Geysir-Belüftung	34

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

- Bild-01: ... Vergleich Kläranlagentechnologien
- Bild-02: ... Fußelement des Membionmoduls
- Bild-03: ... Einlegen der Membranfaser in die Kleberschicht
- Bild-04: ... Verschließen der freien Faserenden
- Bild-05: ... Rechteckrohre mit Membranen für den ersten Demonstrations-Modul
in Simmerath
- Bild-06: ... Montage der Rechteckrohre in einem Modul-Rack
- Bild-07: ... Technischer Modul von Membion mit 500 m² Membranfläche
- Bild-08: ... Luftbildaufnahme Kläranlage Simmerath
- Bild-09: ... Einbindung der Demonstrationskläranlage in die konventionelle
Großkläranlage
- Bild-10: ... Feinrechen im Zulauf der MBR-Demonstrationsanlage
- Bild-11: ... Belebungsbecken der MBR-Demonstrationsanlage
- Bild-12: ... DBU-Demonstrations-Projekt (AZ 34834-01)
- Bild-13: ... Einbau des technischen Membionmoduls
- Bild-14: ... Belüftung des Membionmoduls in Klarwasser
- Bild-15: ... Betriebsdaten Membion-MBR Simmerath
- Bild-16: ... Betriebsdaten Membion-MBR Simmerath August 2020
- Bild-17: ... Problem der Verzopfung und Abhilfe durch Feinsiebe
- Bild-18: ... Defekter während des Anlagenbetriebs
- Bild-19: ... Kohlenstoff-Abbau (CSB) im Projektzeitraum
- Bild-20: ... Stickstoff-Abbau (Nges) im Projektzeitraum
- Bild-21: ... Leistungsmindernde Effekte
- Bild-22: ... Etablierung einer chlorfreien Variante nach *Wang et al.* 2020
- Bild-23: ... Oxone[®] Aktivierung mit Hilfe von Eisensulfat
- Bild-24: ... Beginn der chemischen Zwischenreinigung im Februar 2020
- Bild-25: ... Chemische Zwischenreinigung mit NaOCl
- Bild-26: ... Chemische Zwischenreinigung mit Eisen-aktiviertem Oxone[®]
- Bild-27: ... Chemische Zwischenreinigung mit der Kombination von
Reinigungschemikalien
- Bild-28: ... Intensivreinigung mit NaOCl und Zitronensäure
- Bild-29: ... Ausbau des Moduls nach der Intensivreinigung

- Bild-30: ... REM-Aufnahmen Membranalterung Oberfläche
- Bild-31: ... REM-Aufnahmen Membranalterung Querschnitt (Bruch) der Membran
- Bild-32: ... Geysir-System von Membion
- Bild-33: ... Funktionsweise Geysir-System von Membion patentiert
- Bild-34: ... Pilotanlage Konzen mit Geysir-Belüftung
- Bild-35: ... Membion „Jet-Splash“ durch Geysir-Puls
- Bild-36: ... Langzeitbetrieb Pilotanlage Konzen mit „Jet-Splash“-Geysir
- Bild-37: ... Critical-Flux-Text mit Jet-Splash-Geysir bei 3,0 Nm³/h
- Bild-38: ... Pilotanlage Konzen mit 2 Rechteckrohren
- Bild-39: ... Pilotanlage Konzen mit 2 Rechteckrohren
- Tabelle-01: ... Auslegungsparameter der Demonstrationskläranlage Simmerath
- Tabelle-02: ... Auslegungsparameter der Demonstrationskläranlage Simmerath
- Tabelle-03: ... Betriebstechnische Daten des Membion-Moduls in Simmerath bei den unterschiedlichen Leistungsstufen
- Tabelle-04: ... Energiebedarf ausgeführter MBR-Anlagen in Deutschland als Benchmark
- Tabelle-05: ... mikrobiologische Untersuchungen auf Wasserqualität nach Trinkwasserverordnung
- Tabelle-06: ... Betriebstechnische Auslegungsdaten des technischen Membion Moduls mit „Jet-Splash“-Geysir für den Demonstrationsbetrieb in Simmerath

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des DBU geförderten Projektes mit dem Titel „Effiziente Energieausnutzung in Membranbioreaktoren durch Einsatz eines innovativen Membranfilters - Verifizierung der Energieeinsparung im technischen Maßstab“ AZ 34834-01 wurde ein neuartiger Membranmodul der Firma *Membion GmbH*[®] erstmalig im technischen Maßstab auf der MBR-Demonstrationskläranlage in Simmerath getestet. Dabei war es das Ziel, die positiven Ergebnisse eines zuvor durchgeführten Gebrauchsmustertests (DBU-Projekt AZ-32805) insbesondere bezüglich des Energiebedarfs für die Modulbelüftung im technischen Maßstab zu verifizieren.

Die erste Herausforderung des Vorhabens lag in einer erstmaligen Umsetzung einer Serienproduktion der Membranmodule. Dabei sollten die Herstellungsschritte des Einlegens der Membranfasern in die Membraneinheiten sowie das Verschließen der freien Fasern mit einem Harz erstmalig in den automatisierten Produktionsprozess der Membranen implementiert werden. Um diese Aufgabe umzusetzen, musste die runde Form des Hüllrohres der Membranen gegen eine rechteckige ausgetauscht werden, da dann alle Membraneinheiten eine einheitliche Größe aufweisen, was für die Serienproduktion ein entscheidender Vorteil ist. Dies bedeutete jedoch eine komplette Überarbeitung des Modulkonzeptes. Diese Aufgabe sowie auch die automatisierte Produktion der Membranblöckchen, inklusive der beiden Produktionsschritte des Fasereinlegens und des Verschließens der freien Faserenden konnten zufriedenstellend umgesetzt werden.

Bei der Gestaltung der technischen Membranfilter lag besonderes Augenmerk auf die strömungstechnische und produktionstechnische Optimierung der Membion-Membranfilter. Zu den relevanten Parametern zählen insbesondere die Gleichmäßigkeit der Luftverteilung, das Schlamm-Management im Modul, die Packungsdichte der Modulrohre im technischen Modul und die sich daraus ergebende Dimensionierung der Schlamm-Abström-Zonen. Da die Einflüsse der Realfaktoren bei der Skalierung des Modulprinzips auf den technischen Maßstab vor Beginn des Projektes nur schwer abzuschätzen waren, wurde bei der Beantragung des Projektes erwartet, dass die Konfiguration des Moduls gegebenenfalls (ggf.) nochmals geändert werden muss, um die positiven Ergebnisse des Gebrauchsmustertests zu verifizieren. Deshalb war der Bau eines zweiten, modifizierten technischen Moduls vorgesehen mit optimierten Parametern auf Basis der Betriebsergebnisse des ersten technischen Moduls.

Bei der Inbetriebnahme der Demonstrationsanlage in Simmerath traten dann zudem einige Schwierigkeiten mit der alten Anlagentechnik zu Tage, die sich erst in einem Dauerbetrieb der Anlage bemerkbar machten. So fiel schon wenige Tage nach Inbetriebnahme der Anlage aus zunächst unerklärlichen Gründen das komplette Bus-System der Anlage aus. In einer aufwendigen Fehleranalyse aller technischen Aggregate konnten die Fehler und Probleme der Alttechnik innerhalb von ca. 3 Wochen behoben werden.

Bei dem danach realisierten Betrieb des ersten technischen Moduls zeigte sich jedoch, dass die Verifizierung der Energieeinsparung auch schon mit der Installation dieses ersten Moduls erreicht wurde, der schon nach kurzer Einfahrphase eine Energieeinsparung bis zu 37 % für die Modulbelüftung zeigte, bezogen auf den als Referenzwert zugrunde gelegten optimierten Energiebedarf für die Modulbelüftung auf der Kläranlage Kaarst-Nordkanal. Dieser Wert entstammt dem Ende 2015 veröffentlichten Abschlussbericht eines Projekts, das im Rahmen eines BMU-Innovationsprogramms gefördert wurde.

Parallel zu dem Betrieb der Demonstrationsanlage in Simmerath hat Membion in der Pilotanlage in Konzen eine neuartige Belüftungstechnik entwickelt, die sogenannte „JetSplash“-Technologie, deren Pilotierungsergebnisse in Kapitel 11 vorgestellt werden. Diese Ergebnisse lassen erwarten, dass durch Verwendung eines neuartigen Geysirs als Herzstück der „JetSplash“-Technologie eine noch erheblich größere Energieeinsparung in MBR-Anlagen realisierbar wird: eine Energieeinsparung von 56 – 79 % bezogen auf den Referenzwert der o.g. Kläranlage Kaarst-Nordkanal, bzw. eine Energieeinsparung von 84 – 92 % bezogen auf den Energiebedarf der derzeit in der MBR-Anlage Konzen eingesetzten Plattenmodule.

Da einerseits die Ergebnisse des ersten technisch installierten Moduls in Simmerath auf Anhieb die Erwartungen des Gebrauchsmustertests gut erfüllten und andererseits die Daten der Pilotierung des neuen Belüftungssystems mit „JetSplash“-Technologie in Konzen noch sehr viel erfolgversprechendere Ergebnisse in Aussicht stellten, wurde ein Teil der Ressourcen aus diesem Projekt in die Umsetzung und Weiterentwicklung der neuen „Jet-Splash“-Technologie gesteckt. Daher wurde auch im Rahmen des hier dokumentierten Projektes zunächst kein 2. technischer Modul ohne „JetSplash“-Technologie in Simmerath eingebaut. Stattdessen wurde die Planung gestartet, den 2. Modul im Rahmen eines Ergänzungsprojektes mit „JetSplash“-Technologie auszurüsten.

Dieser Ergänzungsantrag zum gleichnamigen Projekttitel mit dem Aktenzeichen AZ 34834-02 befindet sich seit 01.05.2021 in der Umsetzung. Der Betrieb der Demonstrationsanlage im Rahmen des hier dokumentierten ersten Projektteils wurde daher bis zum 30.04.2021 verlängert, um einen nahtlosen Übergang in das Ergänzungsprojekt zu gewährleisten. Die Projektdauer des hier dokumentierten Vorhabens (AZ 34834-01) wurde daher von ursprünglich veranschlagten 17 Monaten auf 24 Monate ausgedehnt.

In dem Ergänzungsprojekt (AZ 34834-02) werden derzeit im direkten Vergleich der beiden Modulsysteme die Unterschiede in der Energieeinsparung ohne und mit „JetSplash“-Technologie dokumentiert. Zusätzlich plant Membion im Rahmen des beantragten Ergänzungsprojektes die Durchführung einer ETV-Verifizierung („environmental technical verification“) für das Membransystem mit „JetSplash“-Technologie.

Interessant an den Auslegungswerten mit „JetSplash“-Technologie ist, dass die größte Energieeinsparung nicht wie im Falle der Energie-Optimierung in Kaarst bei den höchsten Durchsatzleistungen liegt, sondern dass die Energieeinsparung über den kompletten Betriebsbereich der Membranfilter in der gleichen Größenordnung liegt und bei geringeren Durchsatzleistungen sogar noch steigt. Dies kommt dem üblichen Betrieb kommunaler Kläranlagen sehr entgegen, da dann die Chance besteht, die Membranen tatsächlich zulaufproportional zu fahren und dabei insgesamt in einem sehr günstigen Energiebereich zu liegen.

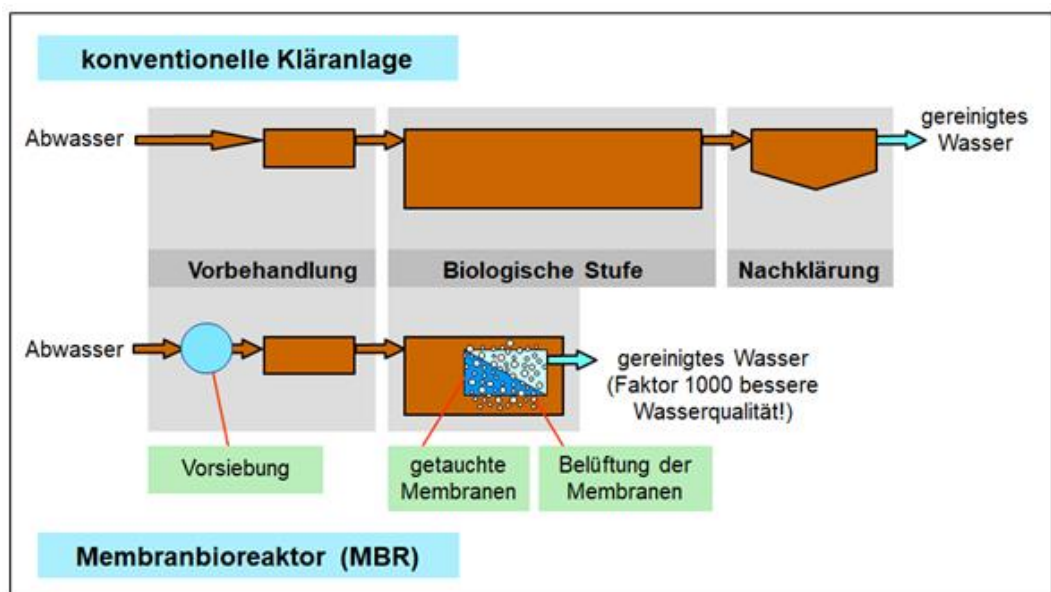
2 Umweltrelevanz der Problemstellung

Das beantragte Projekt mit dem Titel „Effiziente Energieausnutzung in Membranbioreaktoren durch Einsatz eines innovativen Membranfilters - Verifizierung der Energieeinsparung im technischen Maßstab“ ordnet sich ein in die Gruppe der Verfahren zur Abwasseraufbereitung mit Membranen. Dabei werden nach dem sogenannten Membranbioreaktor (MBR) - Verfahren Membranfilter in die Belebungsbecken einer biologischen Kläranlage eingetaucht. Über Anlegung eines geringen Unterdrucks auf der Permeatseite der Membranen wird gereinigtes Filtrat aus den Membranen abgezogen. Regelmäßig eingetragene Luft dient zur Spülung der Membranfilter und Austragung der abfiltrierten Stoffe. Für den Prozess der biologischen Abwasserreinigung ergeben sich dadurch folgende Vorteile:

- Wegfall der Nachklärung, die bei konventionellen Kläranlagen üblicherweise durch Sedimentation erfolgt,
- eine etwa um den Faktor 1000 bessere Wasser-Hygenisierung im Vergleich zur konventionellen Technik, da die Membranen aufgrund der Größenordnung ihrer Poren eine echte Barriere für Bakterien und Mikroorganismen bilden,
- Aufkonzentrierung der Biomassenkonzentration in den Belebungsbecken um einen Faktor 2 bis 5 im Vergleich zur konventionellen Technik. Dadurch verringert sich die biologische Stufe der Kläranlage deutlich.
- insgesamt um etwa 50 % reduzierter Platzbedarf von Membranbelebungsanlagen im Vergleich zu konventionellen Kläranlagen bei deutlich verbesserter Wasserqualität.

Bild-01

Vergleich Kläranlagentechnologien



Dem Einsparpotential durch den Wegfall der Nachklärung und der Verkleinerung der biologischen Stufe stehen höhere Investitionskosten der Membranfilter gegenüber. Bei größeren Anlagen liegen die Investitionskosten beider Verfahren jedoch mittlerweile in einem ähnlichen Bereich. Der Preis für die beschriebenen Vorteile des Membranbioreaktor-Verfahrens liegt daher überwiegend in den höheren Betriebskosten im Vergleich zur konventionellen Technik. Dabei sind an erster Stelle der höhere Energiebedarf zu nennen sowie die Kosten für den etwa alle 7 bis 10 Jahre anstehenden

Wechsel der grundsätzlich als Verschleißteile anzusehenden Membranen und die Kosten für deren regelmäßig erforderliche chemische Reinigung.

Die Firma Membion hat einen neuartigen Membranfilter für den Einsatz in Membranbioreaktoren entwickelt mit signifikanter Reduzierung des Energiebedarfs.

Die Umweltrelevanz des vorliegenden Projektes liegt insbesondere in der Verbesserung von Membranbioreaktoren hinsichtlich einer Reduzierung des Energiebedarfs.

3 Serienproduktion der Membranfilter in einem automatisierten Produktionsprozess

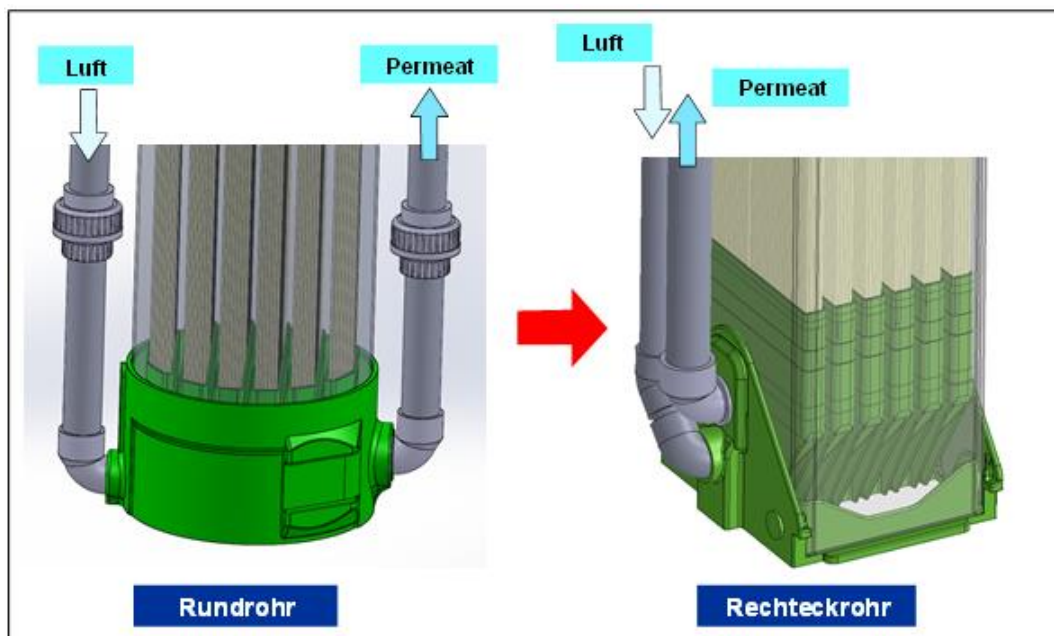
Ziel des Projektes war nicht nur der Betrieb eines ersten technischen Membion-Moduls auf der MBR-Demonstrationskläranlage in Simmerath sondern auch die Umsetzung der Schritte der Serienproduktion der Membranfilter in einem automatisierten Produktionsprozess.

Dabei zeigte sich als eine der ersten Hürden, dass das bis dahin bestehende Modulkonzept aufgrund der runden Form des Modul-Rohres drei verschiedene Größen der Membraneinheiten in einem Fußelement aufwies mit unterschiedlicher Anzahl an Hohlfasermembranen und stark unterschiedlicher Geometrie. Dies erwies sich als großer Nachteil bei der Umsetzung der Konzepte zur automatisierten Serienproduktion.

Daher war es einer der ersten Schritte im Rahmen der Serienproduktions-Entwicklung des Moduls, die runde Form des Membranrohres gegen eine rechteckige auszutauschen. Dadurch haben alle 6 Membraneinheiten eines Fußelementes die gleiche Größe, was für die Automatisierung der Modulproduktion eine enorme Vereinfachung darstellt (Bild-02).

Bild-02:

Fußelement
des Membion-
moduls



Beim automatisierten Fixieren der offenen Membranenden in den Membraneinheiten wird auf eine offene Halbschale der Membraneinheit zunächst eine erste Schicht eines Klebers aufgetragen, in die dann kontinuierlich die aus der Membranproduktion kommenden Membranfaser abgelegt

werden. Nachdem eine erste Reihe der Membranen in die Kleberschicht eingelegt ist, wird nass in nass eine zweite Schicht des Klebers auf die eingelegten Membranen aufgetragen, so dass die beiden Kleberschichten die Membranen ringsum mit Kleber einbetten. Auf diese Art werden 5 Reihen der Membranen in einer Membraneinheit nacheinander eingelegt, bevor mit Auflegen eines Deckels die Fertigstellung der Membraneinheit abgeschlossen wird. Bild-03 zeigt den Prozess des Einlegens der Membranfasern in die Kleberschicht zur Fixierung der offenen Membranenden im Modul und Bild-04 den Prozess des automatisierten Verschließens der Membranfaser mit Hilfe eines Harzes.

Bild-03:

Einlegen der Membranfaser in die Kleberschicht

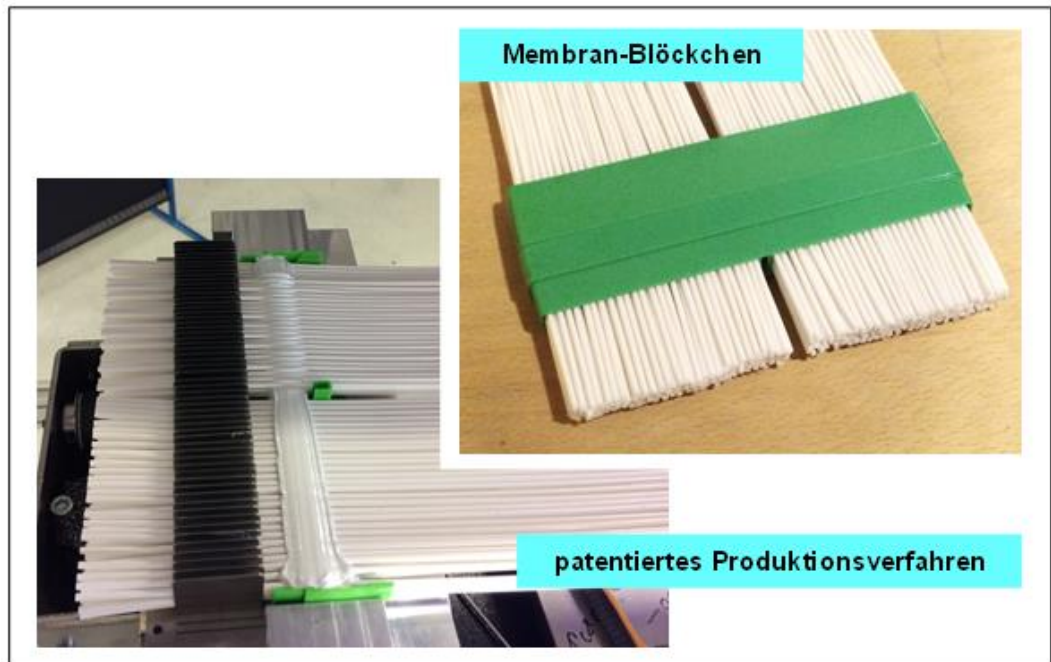


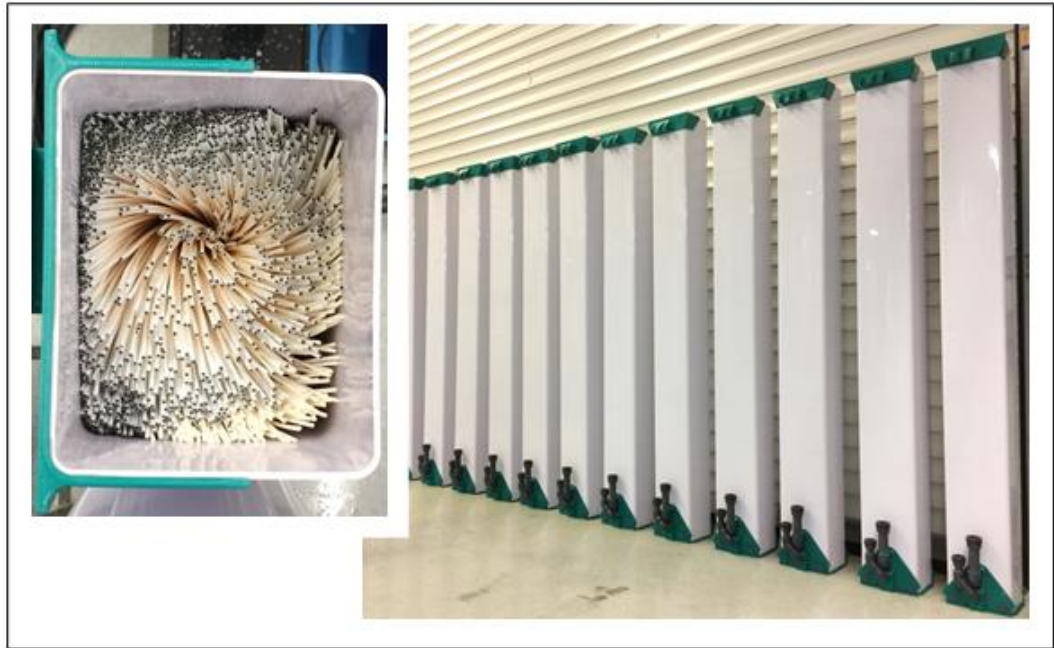
Bild-04:

Verschließen der freien Faserenden



Bild-05:

Rechteckrohre mit Membranen für den ersten Demonstrations-Modul in Simmerath



Der technische Modul von Membion ist aus Modul-Racks aufgebaut (Bild-06). Jedes dieser Racks hat einen Edelstahlrahmen, der unten einen Querträger aufweist zur Aufnahme der statischen Kräfte durch das Gewicht der bestückten Rechteckrohre. An den Querträger sind Holme zur Aufnahme der Rechteckrohre angeschweißt. Dabei wird jeweils zwischen zwei von diesen Holmen ein Rechteckrohr über Einschiebe-Aussparungen im Fußelement seitlich eingeschoben. Zu beiden Seiten des Edelstahlrahmens eines Modulracks werden auf diese Art und Weise jeweils 7 Rechteckrohre montiert. Der technische Modul von Membion mit 500 m² Membranfläche besteht aus zwei der genannten Racks zuzüglich einer gemeinsamen Traverse sowie Sammelleitungen für Permeat und einer gemeinsamen Luftverteilung (Bild-07).

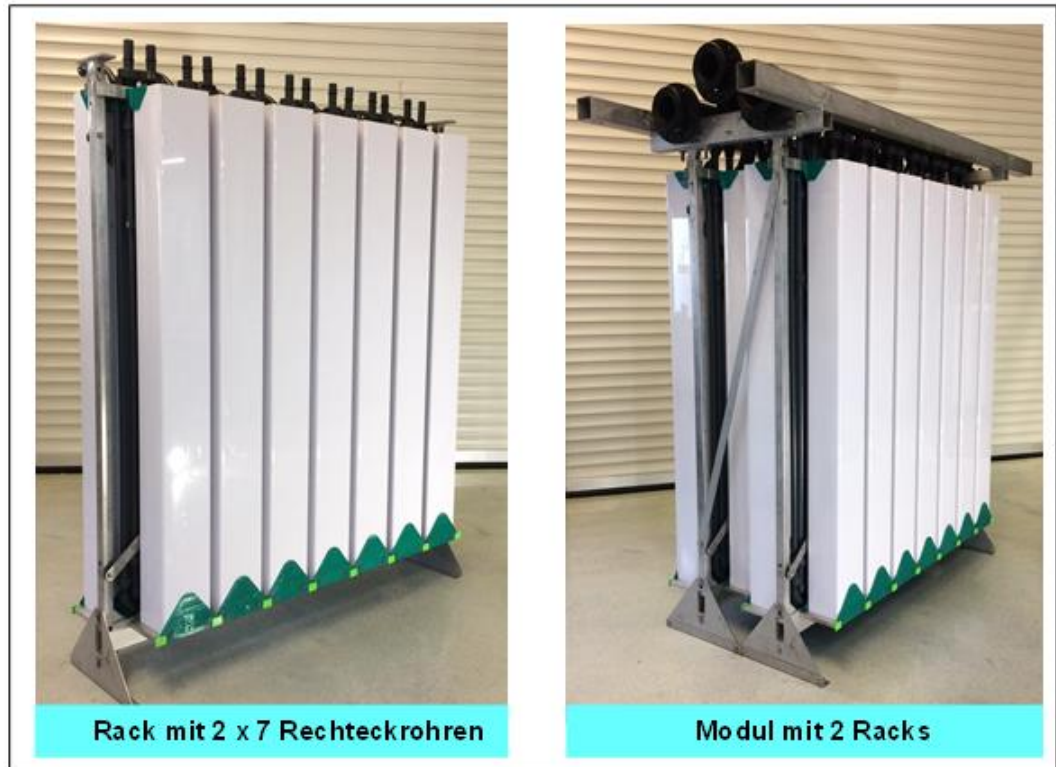
Bild-06:

Montage der Rechteckrohre in einem Modul-Rack



Bild-07:

Technischer
Modul
von Membion
mit 500 m²
Membran-
fläche

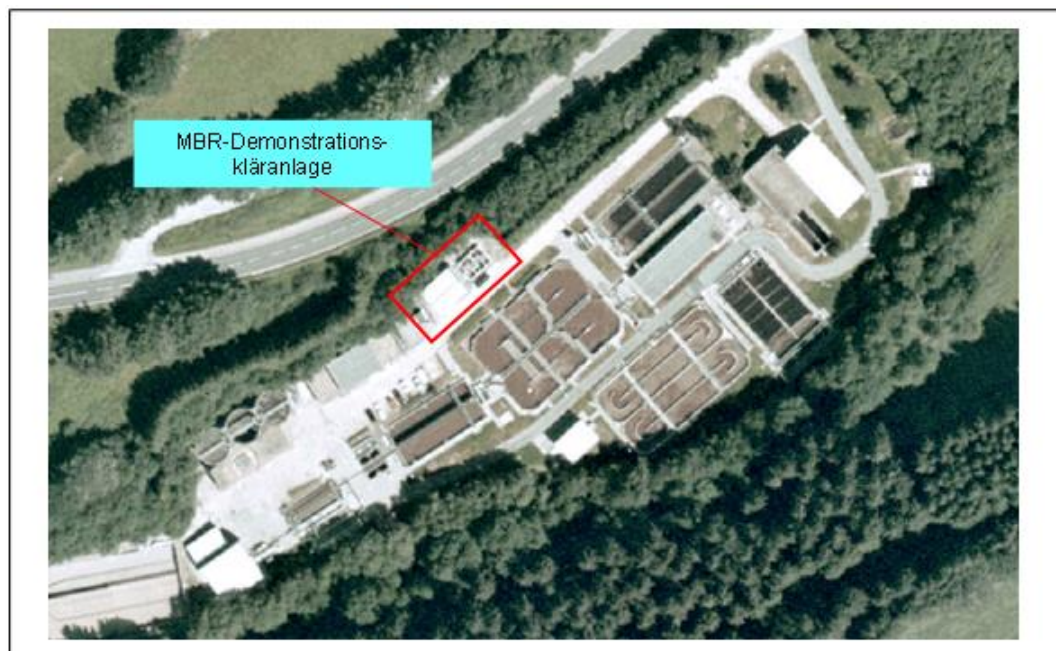


4 Demonstrationskläranlage Simmerath

Die MBR-Demonstrationskläranlage ist konzipiert als eine komplett ausgestattete eigene Membrankläranlage für eine Anschlussgröße von 750 EW. Sie ist Eigentum des Wasserverbandes Eifel-Rur (WVER) und befindet sich auf dem Gelände der konventionellen Kläranlage Simmerath (Bild-08), die eine Anschlussgröße von 15.000 EW aufweist.

Bild-08 :

Luftbild-
aufnahme
Kläranlage
Simmerath



Die MBR-Demonstrationskläranlage wurde im Jahr 2002 im Rahmen eines vom damaligen NRW-Umweltministeriums (MUNLV) mit etwa 2,5 Mio. Euro geförderten Projektes von den Firmengründern von Membion geplant und gebaut, um dort zum ersten Mal die damals neuartigen PURON-Membranfilter im MBR-Betrieb zu testen, die mittlerweile von der Firma KOCH vermarktet werden. Da die Firma KOCH seit Anfang 2017 ihre Entwicklungstätigkeiten in Deutschland eingestellt hat, stand die MBR-Demonstrationskläranlage in Simmerath seitdem ungenutzt still. Diese Anlage wurde nun im Rahmen des vorliegenden Projektes reaktiviert und für den Demonstrationsbetrieb der Membion-Membranfilter genutzt.

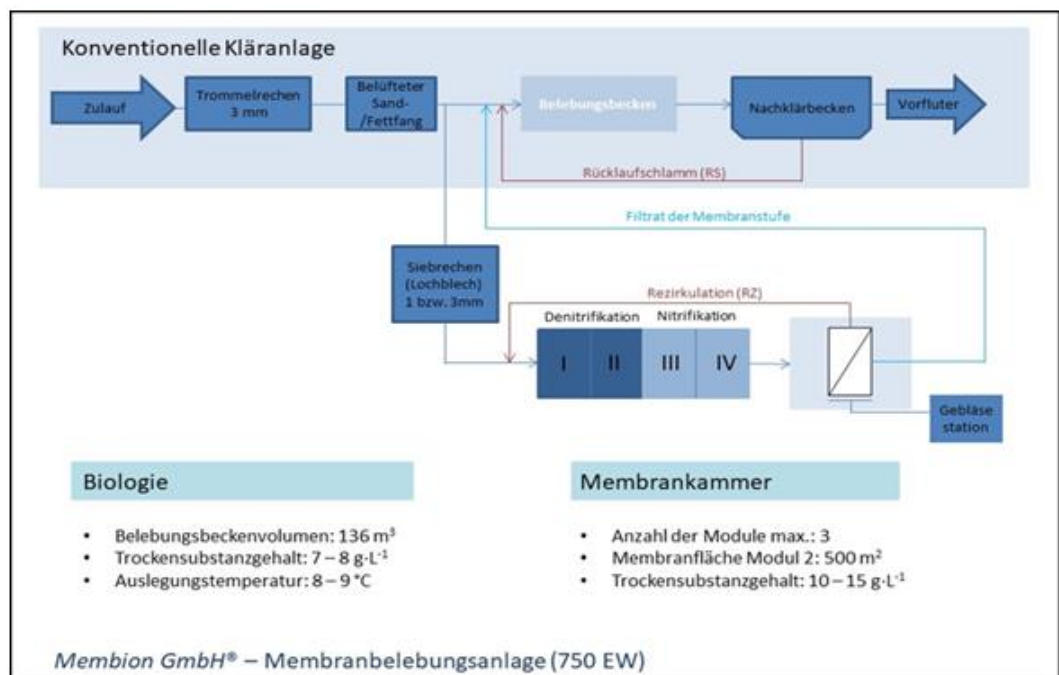
Bild-09 zeigt die verfahrenstechnische Einbindung der Demonstrationskläranlage in den Betrieb der großen konventionellen Kläranlage. Der Zulauf zur MBR-Demonstrationskläranlage wird dem Ablauf der bestehenden mechanischen Vorreinigung der konventionellen Kläranlage in Simmerath entnommen.

Die Demonstrationskläranlage besteht aus einer separaten biologischen Stufe und einer externen Membrankammer, ausgelegt für getauchte Membranmodule mit insgesamt 1000 m² Membranfläche. Da die MBR-Demonstrationsanlage in Simmerath einige Jahre vor Projektbeginn nicht mehr in Betrieb war, waren vor Wiederinbetriebnahme noch eine Reihe an Wartungs-, Instandsetzungs- und Umbauarbeiten durchzuführen.

Die Anlage wird 24 h am Tag vollautomatisch betrieben. Lediglich die chemischen Zwischenreinigungen werden manuell durchgeführt.

Bild-09

Einbindung der Demonstrations-Kläranlage in die Konventionelle Großkläranlage



Die biologische Stufe (Gesamtvolumen von 136 m³) der Anlage wird mit Hilfe einer vorgeschalteten Denitrifikation mit anschließender Nitrifikation in Form eines Kaskadenbeckens betrieben. Der Zulauf der MBR-Anlage wird dem Zulauf der konventionellen Anlage durch eine Tauchpumpe entnommen. Verwendet wird das Abwasser nach mechanischer Reinigung durch Trommelrechen (3 mm) sowie Sand- und Fettfang. Da sich der vorhandene Rechen der Großanlage bei Regenwetterereignissen häufig in Dauerspülung befindet und dadurch häufig die

Rechenwirkung verloren geht, besitzt die Demonstrationskläranlage einen Siebrechen mit einer Lochblechweite von 3 mm (Bild-10).

Bild-10:

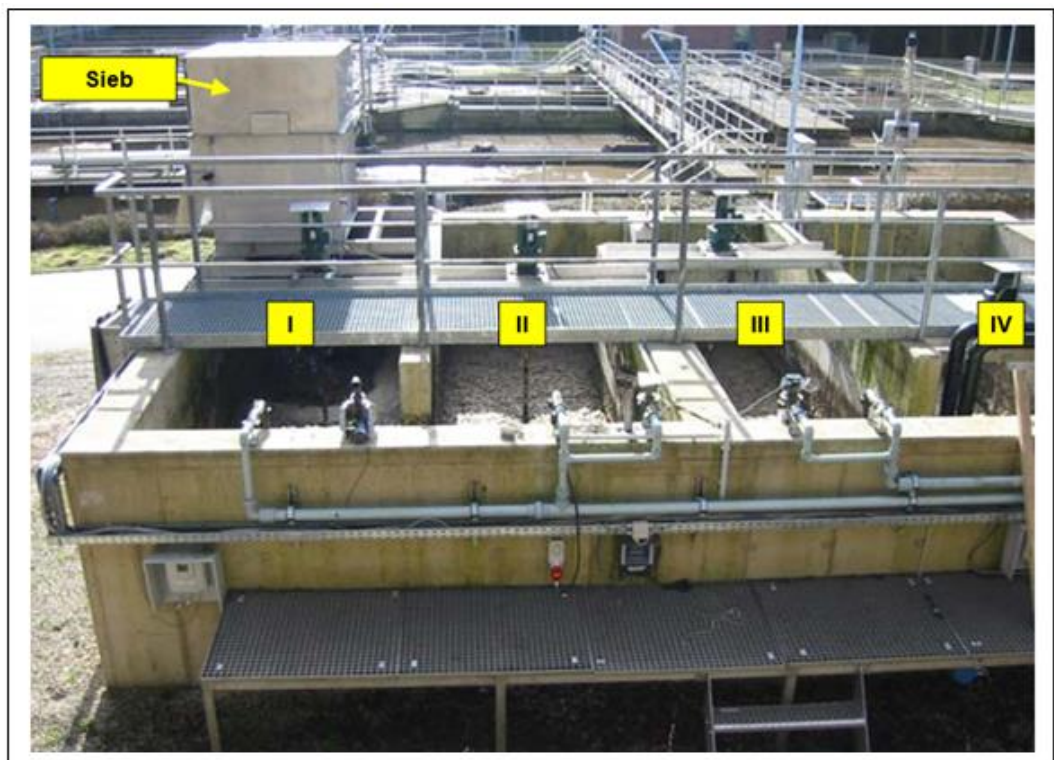
Feinrechen im
Zulauf der
MBR-Demon-
strationsanlage



Der Zulauf zur Demonstrationskläranlage gelangt nach der Passage des Siebrechens in die Belebungsbecken der MBR-Demonstrationskläranlage, durchläuft anschließend die Membranstufe und wird schließlich als gereinigtes Permeat aus der Membranstufe in die Belebungsstufe der konventionellen Anlage eingeleitet. Das Belebungsbecken der Demonstrationskläranlage besteht aus vier Zonen. Jede Zone ist mit einem Rührwerk und einer Belüftungseinrichtung ausgestattet (Bild-11).

Bild-11:

Belebungsbecken
der MBR-Demon-
strationsanlage



Geregelt wird die Zulaufpumpe zur Biologie durch den Füllstand im Belebungsbecken. Nach Bemessungsprogramm ARABER (Version 4.26) ist bei einer Anschlussgröße von 750 Einwohnern ein Zufluss-Anteil von 5 % vom Zufluss der Kläranlage Simmerath realisierbar. Das Belebungsbecken ist für einen Trockensubstanz (TS)-Gehalt von 12 g/l ausgelegt. Je nach Füllstand wird die Zulaufpumpe aktiviert bzw. deaktiviert. Der zulässige Füllstand der Biologie liegt bei minimal 355 cm und maximal 435 cm. Außerdem besteht das Belebungsbecken aus vier Reaktoren, die jeweils mit einem Belüfter und einem Rührwerk ausgerüstet sind. Durch die Installation der Sauerstoffsonde in Reaktor IV wird das Gebläse geregelt. Dadurch kann die Demonstrationskläranlage flexibel gefahren werden, um unterschiedliche Betriebsweisen realisieren zu können. Allerdings haben frühere Ergebnisse gezeigt, dass die Betriebsweise der vorgeschalteten Denitrifikation die sinnvollste Betriebsweise darstellt und wird deswegen angewendet. Reaktor I und II werden als Denitrifikationsstufen unbelüftet betrieben. Reaktor III und IV dienen in diesem Fall als belüftete Nitrifikationsstufen. Eine Übersicht über wesentliche Bemessungsparameter, Volumenströme und Beckenvolumina sind in Tabelle-01 dargestellt. Auf Grund der sehr niedrigen Temperaturen im Winter wird der Bemessungsansatz nach Böhnke et al. und Dohmann et al. verwendet.

Tabelle-01: Auslegungsparameter der Demonstrationskläranlage Simmerath

Anschlussgröße		750	Einwohner
Bemessungstemperatur	$t_{\text{Bemessung}}$	5	°C
Mischwasserzufluss	Q_M	26,1	m ³ /h
	$T_{\text{Durchfluss,MW}}$	5,7	h
Trockenwasserzufluss	Q_T	14,3	m ³ /h
	$T_{\text{Durchfluss,TW}}$	10,3	h
Schmutzwasserzufluss	Q_S	7,2	m ³ /h
Zulauffrachten	CSB	90,0	kg/d
	BSB	45,0	kg/d
	NH ₄ -N	5,3	kg/d
	N _{anorganisch}	3,0	kg/d
	P _{ges}	1,4	kg/d
	AFS	53,0	kg/d
Reinigungsziel	CSB	40,0	mg/l
	BSB ₅	8,0	mg/l
	NH ₄ -N (bei 7 °C)	4,0	mg/l
	N _{anorganisch} (bei 12 °C)	18,0	mg/l
	P _{ges}	1,0	mg/l
	pH-Wert	6,0-8,5	
	AFS	50,0	µg/l
Beckenvolumina	V _{ges}	128	m ³
	V _{Nitrifikation}	102	m ³
	V _{Denitrifikation}	26	m ³

Der Zulauf der externen Membrankammer (Gesamtvolumen: 20 m³) wird aus Reaktor IV mit Hilfe einer Tauchpumpe entnommen und rezirkuliert. Dabei wurde eine zulaufproportionale

Betriebsweise des Membranbelebungsverfahrens mit Hilfe einer Gangliniensteuerung realisiert. Dadurch ist es möglich, den Volumenstrom der Membranstufe direkt proportional zum Zulauf zu betreiben oder den Volumenstrom über das Volumen des Belebungsbeckens zu regulieren, um eine Membranstufe mit konstanten Volumenströmen betreiben zu können (Tabelle-02). Im Projektzeitraum sind vier Ganglinienstufen für den Betrieb der Membrankammer verwendet worden.

Tabelle-02: Auslegungsparameter der Demonstrationskläranlage Simmerath

Filtrationszeit:

Ganglinie	Dauer [s]	Volumenstrom [m ³ /h]	Fluss [l/m ² /h]	Luft		
				Aus [s]	An [s]	Zyklus [s]
0	1300	0	0	400	15	415
1	600	7	14	45	15	60
2	600	15	30	15	15	30
3	600	17,5	35	12	12	24

Rückspülung:

0	3	0	0	2	1	3
1	40	15	30	30	30	60
2	40	15	30	30	30	60
3	45	15	30	25	20	45

Dabei stellt Ganglinie 0 einen „Stand-by“ Modus des Moduls dar, bei dem innerhalb von 1300 Sekunden (s) alle 400 s ein 15 s langer Luftpuls ausgeführt wird. In dieser Ganglinie filtert der Modul nicht und es kommt zu keiner Rückspülung. Ganglinie 2 wird oft bei Trockenwetterereignissen bzw. sehr niedrigen Zulaufwerten betrieben. In Ganglinie 1 - 3 wird die Membrankammer mit unterschiedlichen Volumenströmen beaufschlagt und der Modul filtert jeweils für 600 s mit unterschiedlichen Flüssen. Anschließend erfolgt eine 40 - 45 s lange Rückspülung mit Permeat. Der vorhandene Filtrationszyklus besteht aus Filtrationszeit und Modulrückspülung. Während beider Zyklus-Abschnitte erfolgt eine zyklische Modulbelüftung. In Ganglinie 1 wird der Permeatfluss auf 14 l/m²/h durch einen Volumenstrom von 7 m³/h eingestellt. Alle 45 s erfolgt eine 15 s lange Luftpülung, das heißt, Belüftungspause und Luftpuls wechseln zyklisch. Ganglinie 2 wird mit einem Volumenstrom von 15 m³/h betrieben, um einen Permeatfluss von 30 l/m²/h zu gewährleisten. Hier folgt alle 15 s ein 15 s langer Luftpuls. Der maximale Volumenstrom des Moduls wird bei Ganglinie 3 auf 17,5 m³/h eingestellt, um einen maximalen Permeatfluss von 35 l/m²/h zu erreichen. Hier folgt alle 12 s ein 12 s langer Luftpuls. Diese Ganglinie wird häufig bei Regenwetterereignissen bzw. hohen Zulaufströmen verwendet. Die Rückspülung jeder Gangliniensteuerung wird mit einem konstanten Fluss von 30 l/m²/h durchgeführt. Auch hier findet eine zyklische Belüftung mit unterschiedlich langen Luftpulszeiten statt.

Während der Durchströmung der Membrankammer mit Belebtschlamm, durchströmt Belebtschlamm auch den Membranmodul und gelangt am Ende über einen Überlauf zurück in die Biologie. Der Rücklaufschlamm kann so aus jeder Membrankammer entnommen werden und fließt entweder in den ersten (Denitrifikation) oder dritten (Nitrifikation) Reaktor der Biologie zurück. Die Membranstufe besteht aus zwei separaten Membrankammern, die eine insgesamt installierte

Membranfläche von circa 1000 m² besitzen. In der ersten Kammer kann ein technischer Modul mit einer Membranfläche von 500 m² betrieben werden (Modul 3).

In der zweiten Kammer kann neben einem weiteren technischen Modul mit 500 m² (Modul 2) zusätzlich ein Versuchsmodul mit 27 m² Membranfläche (Modul 1) eingebaut werden. Durch einen permeatseitig angelegten Unterdruck wird Permeat als gereinigtes Abwasser aus den Membranmodulen abgeführt. In Simmerath ist jeder Modul mit einer eigenen Permeatpumpe ausgestattet. Das Filtrat von allen drei Membranmodulen wird in einem Sammel tank zwischengespeichert und für die in Intervallen betriebene Rückspülung der Module genutzt. Das restliche Filtrat wird dem Belebungsbecken der konventionellen Kläranlage Simmerath zugeführt. Die Rückspülpumpe erzeugt eine permeatseitige Flussumkehr, sodass Permeat von innen nach außen durch die Membran gepumpt werden kann. Des Weiteren dient der Permeatbehälter auch als Permeatvorlage für die chemische Reinigung. Bei der chemischen Reinigung wird mit Hilfe der Reinigungspumpe die Reinigungslösung in den Permeatkanal und durch Rückspülung durch die Membran gepumpt.

5 Ergebnisse des technischen Membranmoduls im Betrieb

Mitte November 2019 wurde im Rahmen des DBU-Projektes (AZ 34834-01) der erste technische Modul von Membion in der Demonstrationskläranlage in Simmerath mit Belebtschlamm in Betrieb genommen (Bild-12). Bild-13 zeigt den Einbau des Membion-Moduls mit transparenten Rechteckrohren in die MBR-Demonstrationskläranlage.

Bild-12:

DBU-
Demonstra-
tions-Projekt
(AZ 34834-01)



Bild-13:

Einbau des
Technischen
Membion-
Moduls



Die Anlage lief nach Behebung der anfänglichen Schwierigkeiten mit Altkomponenten der gebrauchten Maschinenteknik im gesamten Untersuchungszeitraum mit stabilem Betriebsverhalten und sehr guten Ablaufwerten. Diese werden in den folgenden Kapiteln genauer erörtert. Bild-14 zeigt die Draufsicht des Moduls bei Belüftung in Klarwasser.

Bild-14:

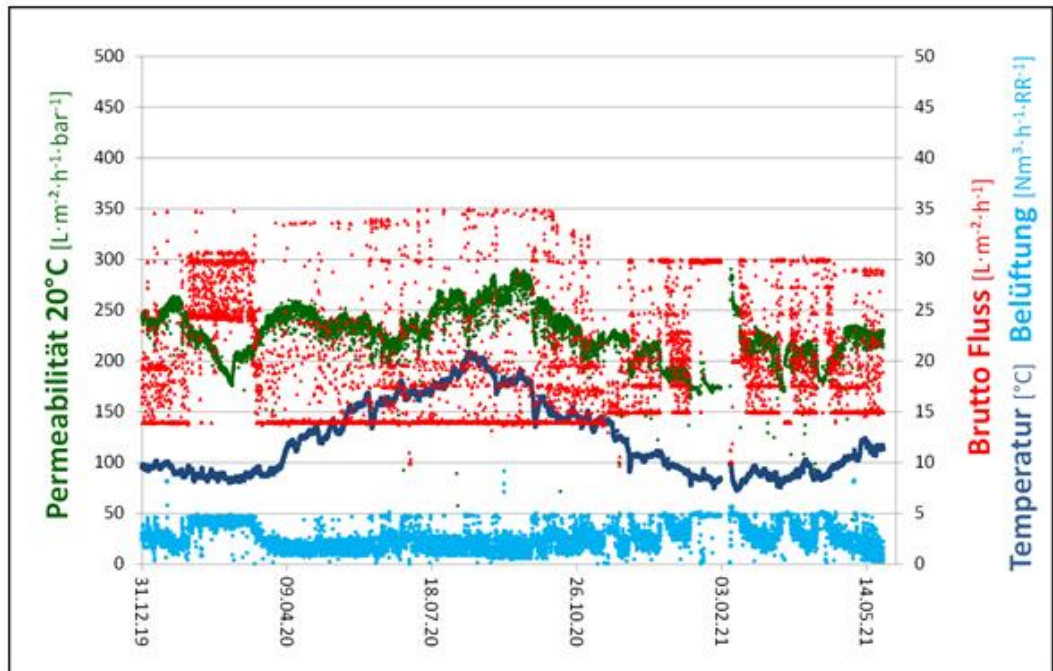
Belüftung des
Membion-
Moduls in
Klarwasser



Bild-15 dokumentiert die Betriebswerte der Online-Datenerfassung der Anlage über den gesamten Betriebszeitraum. Dabei wurde der Zeitraum des Projektes von den ursprünglich veranschlagten 17 Monaten auf 24 Monate ausgedehnt.

Bild-15:

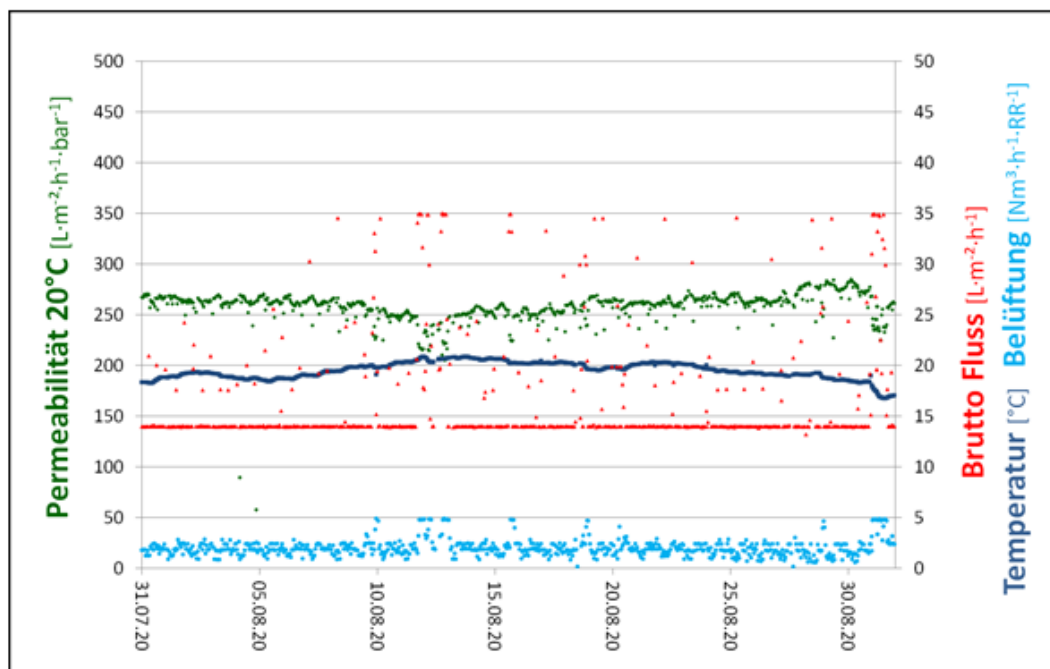
Betriebsdaten
Membion-MBR
Simmerath



Seit Ende 2019 wird die Anlage Zulauf-proportional zur großen Kläranlage Simmerath gefahren. Dabei kamen in den beiden Winterperioden die kalten Abwasser-Temperaturen, die lange Zeit deutlich unter 10 °C lagen, kombiniert mit gleichzeitig lang anhaltenden Regenwetterereignissen als besondere Herausforderung hinzu. Durch Optimierung der Betriebsparameter und Einführung einer optimierten in-situ-Zwischenreinigung konnten sowohl die Durchsatzleistung als auch die Permeabilität gesteigert werden. Bild-16 zeigt die optimierten Betriebsdaten der Anlage für den kompletten August 2020.

Bild-16:

Betriebsdaten
Membion-MBR
Simmerath
August 2020



Derzeit wird die Anlage je nach anliegender Zulaufmenge (Trocken- oder Regenwetter) auf drei unterschiedlichen Leistungsstufen gefahren, deren betriebstechnische Details in Tabelle-03 dargestellt sind. Dabei wird der Modul auf der niedrigsten Leistungsstufe (Stufe-01) intervallmäßig nur in 25 % der Zeit belüftet, was bei einer während der Belüftung eingestellten Gebläse-Leistung von 8,0 Nm³/h RR einer resultierenden Luftmenge von 2,0 Nm³/h RR entspricht - wobei „RR“ bedeutet, dass sich die Luftmenge auf ein Rechteckrohr bezieht. Diese Stufe ist mit der Ganglinie 2 aus Kapitel 4 gleichzusetzen. Bei den höheren Leistungsstufen ist die Belüftung zu 50 % der Zeit eingeschaltet. Aus der resultierenden Luftmenge, der Einblastiefe und dem Gebläse-Wirkungsgrad berechnet sich der spezifische Energiebedarf für die Modulbelüftung bei den einzelnen Leistungsstufen. Diese Stufen entsprechen den Ganglinien 3 und 4 (Tabelle-02). Die grün unterlegten Felder in Tabelle-03 zeigen die Energieeinsparung im Vergleich zu den MBR-Referenzanlagen Kaarst (energieoptimiert) und Konzen. Bei der Stufe der höchsten Filtrationsleistung (Stufe-03) ist die Energieeinsparung am höchsten mit 37 % bezogen auf die MBR in Kaarst und 77 % bezogen auf die MBR in Konzen. Dies ist gleichzeitig der Peakflux der Anlage mit 35 l/m²/h.

Tabelle-03: Betriebstechnische Daten des Membion-Moduls in Simmerath bei den unterschiedlichen Leistungsstufen

Energieeinsparung Membion in Simmerath ohne Geysir					
		Leistungsstufen:	Stufe-01	Stufe-02	Stufe-03
Permeatfluss (brutto)	[l/m ² h]		14,0	30,0	35,0
Permeatfluss (netto)	[l/m ² h]		11,9	27,0	31,5
resultierende Luftmenge pro Rechteckrohr (RR)	[Nm ³ /h RR]		2,0	4,0	4,0
Luftmenge pro m² Membranfläche	[Nm ³ /m ² h]		0,11	0,23	0,23
Wasserüberstand über Modul	[cm]		2	2	2
Einblastiefe	[m]		1,87	1,87	1,87
Wirkungsgrad der Membranbelüftungs-Gebäse	[%]		50,5%	50,5%	50,5%
spezifischer Energiebedarf Membion	[kWh/m ³]		0,16	0,14	0,12
Energie-Einsparung bezogen auf MBR-Nordkanal	[%]		-17%	-27%	-37%
Energie-Einsparung bezogen auf MBR-Konzen	[%]		-70%	-74%	-77%
Referenzwerte:	Zenon in Kaarst	0,19 kWh/m³			
	Kubota in Konzen	0,53 kWh/m³			
für Konzen:	Gesamtenergiebedarf			0,74 kWh/m ³	
	Anteil für Membranegebläse			71,50%	

Tabelle-04: Energiebedarf ausgeführter MBR-Anlagen in Deutschland als Benchmark

Energiebedarf ausgeführter MBR-Anlagen in Deutschland								
MBR-Anlage:		Nordkanal	Eitorf	Xanten-Vynen	Konzen	Woffelsbach	Seelscheid	Glissen
Gesamtenergiebedarf	[kWh/m ³]	0,97	0,80	1,83	0,74	1,60	0,73	0,96
Energiebedarf Modulbelüftung	[kWh/m ³]	0,48	0,50	1,01	0,53	0,76	0,37	0,33
optimiert laut BMU-Projekt	[kWh/m ³]	0,19						
Anteile:								
Membranebläse	[%]	49,2	62,7	55,2	71,5	47,6	50,6	34,0
Belebungsgebläse	[%]	12,1	6,8	-	1,7	2,4	22,1	k.A.
Permeatabzug	[%]	2,7	8,0	2,1	6,2	4,1	-	6,9
Externe Rezirkulation	[%]	-	9,4	-	5,6	9,4	13,1	8,4
Interne Rezirkulation	[%]	1,3	9,4	6,4	0,3	-	-	-
Rührwerke	[%]	11,5	3,7	28,7	-	6,7	2,4	2,6
Sonstiges	[%]	23,2	0,0	7,6	14,7	29,8	11,8	48,1

QUELLE: [KREBBER, K. \(2013\): Optimierung der Energiebilanz von Membranbioreaktoren.](#)

Hrsg: [Pinnekamp, J. – Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.](#)

Hintergrund der Vergleichsdaten zum Energiebedarf für die Modulbelüftung sind die in Tabelle-04 aufgeführten Daten zum Energiebedarf ausgeführter MBR-Anlagen in Deutschland. Dabei wurde für die Kläranlage Nordkanal in Kaarst neben dem nicht optimierten Energiebedarf aus 2013 von 0,48 kWh/m³ auch der optimierte Wert von 0,19 kWh/m³ aufgeführt, der dem Ende 2015 veröffentlichten Abschlussbericht eines Projektes entnommen wurde, das im Rahmen eines BMU-Innovationsprogramms gefördert wurde.

Verglichen mit diesem Wert liegen die Einsparungen durch Membion im bisherigen Projektverlauf zwischen 17 % und 37 % - also im Bereich der Erwartungen aufgrund der zuvor durchgeführten Pilotierung im Rahmen des ersten Funktionsmustertests (DBU-Projekt AZ-32805).

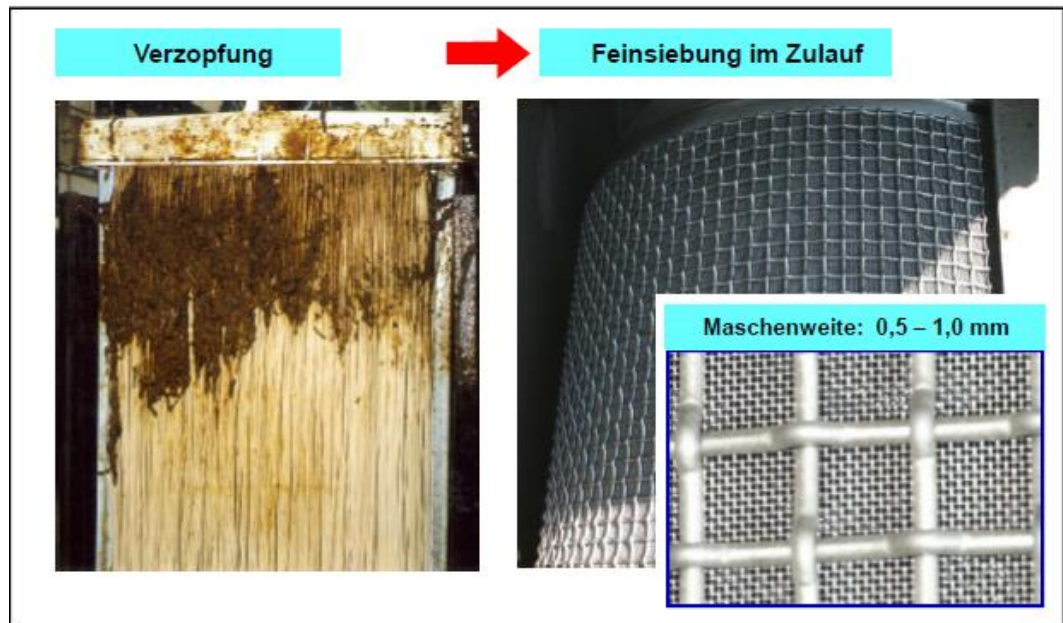
6 Vorbehandlung des Abwassers für die MBR-Anlage

Die meisten Hohlfasermembran-Module sind sogenannte „Double-Header-Systeme“, bei denen die Hohlfasermembranen unten und auch oben in einem Befestigungselement (Header) fixiert sind. Diese haben jedoch das Problem, dass der Schlamm von Kläranlagen häufig Haare und faserige Verbindungen enthält, die mit den aufsteigenden Luftblasen in Folge der Modul-Belüftung nach oben transportiert werden. Dabei kommt es nicht selten vor, dass sich derartige faserige Verbindungen teilweise um die dicht nebeneinander angeordneten Membranröhrchen schlingen und beim Aufwärtsströmen unterhalb des oberen Headers festsetzen. Dieser wirkt dabei ähnlich wie ein Feinst-Rechen, der einen Großteil der Haare und faserigen Verbindungen aus dem

Schlamm herausfiltert und im Modul anreichert. Man spricht von sogenannten Verzopfungen (Bild-17), die im Laufe der Zeit weiter anwachsen und die zur Filtration zur Verfügung stehende Membranfläche und dadurch die Durchsatzleistung der Membranfilter verringern.

Bild-17:

Problem der Verzopfung und Abhilfe durch Feinsiebe



Dieses Problem der Verzopfung kann bei derartigen Systemen nur über eine sehr feine und aufwendige Vorsiebung des kompletten Abwassers begrenzt werden, wobei häufig Loch- oder Maschensiebe zum Einsatz kommen mit einer Loch- bzw. Maschenweite von weniger als 1 mm (Bild-17). Derartige Aggregate haben jedoch nicht nur den Nachteil, dass sie die Investitionskosten der Gesamtanlage deutlich erhöhen, sondern auch einen Großteil der Organik aus dem Abwasser entfernen, die für den biologischen Prozess erforderlich ist, sowie häufig bereits gereinigtes Permeat zur Spülung der Siebe erfordern. D.h. eine derart feine Vorsiebung erzeugt ihrerseits einen nicht unerheblichen Kostenanteil. Im Membion-Modul sind die Hohlfasermembranen am oberen Ende einzeln verschlossen und schweben frei im zu filtrierenden Schlamm, während das untere Ende in einem Fußelement fixiert ist („single-header“) und den Abzug des gereinigten Filtrats ermöglicht. Da die oberen Enden nicht fixiert sind, können sich hier auch keinerlei Haare oder faserige Verbindungen festsetzen, d.h. die beschriebene Problematik der Verzopfung wird systembedingt vermieden. Vorteil des „single-header“-Systems ist, dass Haare und faserige Verbindungen frei nach oben ausgetragen werden können und dadurch die Anforderungen an die Vorsiebung des Abwassers deutlich reduziert werden. So reichen ein Lochsieb von 3 mm Lochweite oder alternativ ein Rechen von 0,5 mm Spaltabstand völlig aus, um einen sicheren Betrieb der Membion-Module zu gewährleisten.

Die Demonstrationskläranlage Simmerath wird zusätzlich zu einer mechanischen Reinigung durch einen Trommelrechen (3 mm) in der Großkläranlage mit einem Siebrechen mit einer Lochblechweite von 3 mm betrieben. Bei hohen Zulaufströmen besonders bei Regenwetterereignissen verliert der Trommelrechen der Großkläranlage an Reinigungskapazität und befindet sich in Dauerspülung. Die Rechenwirkung des Trommelrechens geht in diesen Fällen verloren. In diesem Fall wird die Rechenwirkung durch den eigenen Siebrechen der Demonstrationskläranlage gewährleistet.

Im Januar 2021 nach ca. 14 Monaten Dauerbetrieb der Membranmodule wurde der Siebrechen der Anlage erstmalig ausgebaut und gewartet. (Bild-18).

Bild-18:
Defekter
während des
Anlagen-
Betriebs



Dabei zeigte sich, dass der eingebaute Siebrechen zwischenzeitlich defekt geworden war: Bild-18 zeigt mehr als Faust-große Löcher im Lochblech des Siebrechens. Daher konnte die Rechenwirkung im Projektzeitraum nicht gewährleistet werden. Das heißt, bei Regenwetterereignissen konnte eine undefinierte Menge unbehandelten Rohabwassers mit faserigen Verbindungen und anderen größeren Bestandteilen problemlos in den Modul gelangen. Nach einer Intensivreinigung im Februar 2021 wurde der Modul erstmalig außer Betrieb genommen und optisch auf Verzopfungen und Verschlammungen geprüft. Von den vielen Verunreinigungen und Störstoffen im Schlamm haben sich jedoch lediglich ein paar gröbere Äste im Modulsystem verfangen und zu kleineren Verschlammungen im Fußelement geführt. Verzopfungen, wie in Bild-17 dargestellt, gab es keine im Single-header System von Membion. Trotz der großen Löcher im Lochblech konnte der Modul ohne nennenswerte Leistungsminderung betrieben werden. Das neuartige Membion-System ist also deutlich resistenter gegenüber Störstoffen im Schlamm als alternative Hohlfasersysteme. Dies bedeutet, dass Membion keine Feinsiebung von 1 mm im Zulauf benötigt, wie sie bei alternativen Hohlfaser-Modulsystemen erforderlich ist. Aufgrund der bisherigen Ergebnisse wird erwartet, dass der Membion-Modul mit einer groberen Vorsiebung mit einem Lochblech von 5 – 6 mm betrieben werden kann. Daher wird derzeit im Rahmen des Ergänzungsantrags ein Lochblech von 6 mm Lochgröße in der Demonstrationskläranlage eingebaut, um diese Erwartung zu untermauern.

7 biologische Reinigungsleistung des Membionmoduls

Neben der Leistungsfähigkeit des technischen Moduls im Hinblick auf die Permeabilität, ist auch die Ablaufqualität der Permeats für die Betriebsweise des technischen Moduls in Simmerath von Bedeutung. Dabei ist die eigentliche Reinigungsleistung des Abwassers hauptsächlich auf die

Stoffwechselfähigkeit von Bakterien zurückzuführen. Gegliedert wird der Abbau von Abwasserinhaltsstoffen in drei Hauptreinigungsziele:

1. Abbau von Kohlenstoffverbindungen,
2. Stickstoffabbau,
3. Phosphatentfernung

Die Schmutzfrachten wurden im gesamten Projektzeitraum wöchentlich vom Zu- und Ablauf erhoben. Bild-19 zeigt den Abbaugrad der organischen Fracht für die Demonstrationskläranlage Simmerath gemessen in Form von wöchentlichen Stichproben. Gemessen wird die Abbauleistung der organischen Fracht in Form des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB).

Bild-19:

Kohlenstoff-
Abbau (CSB)
Im
Projektzeitraum

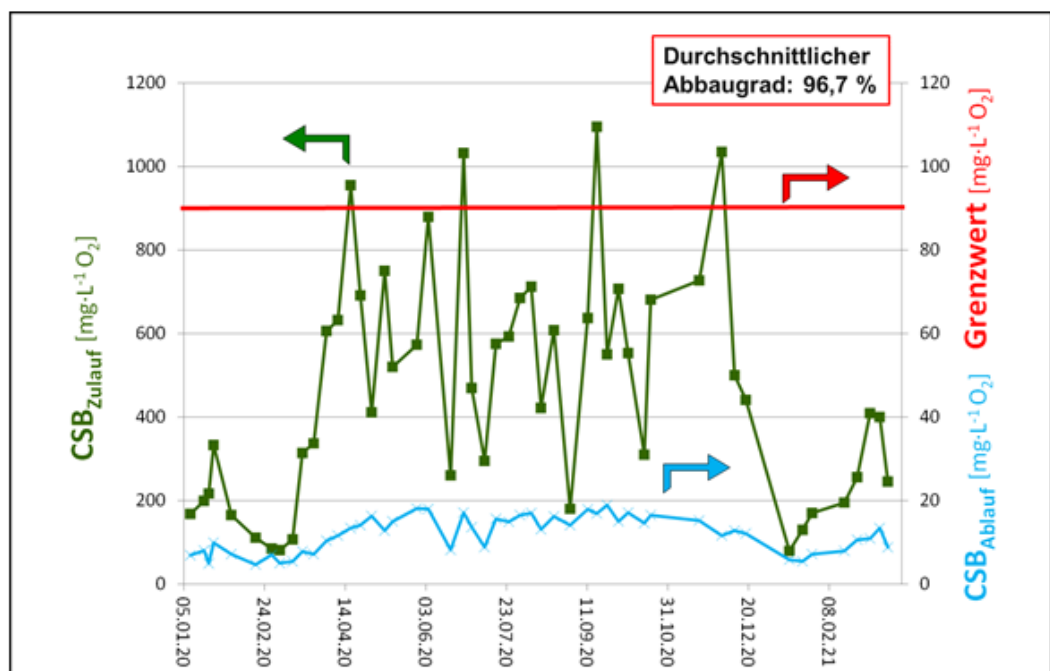
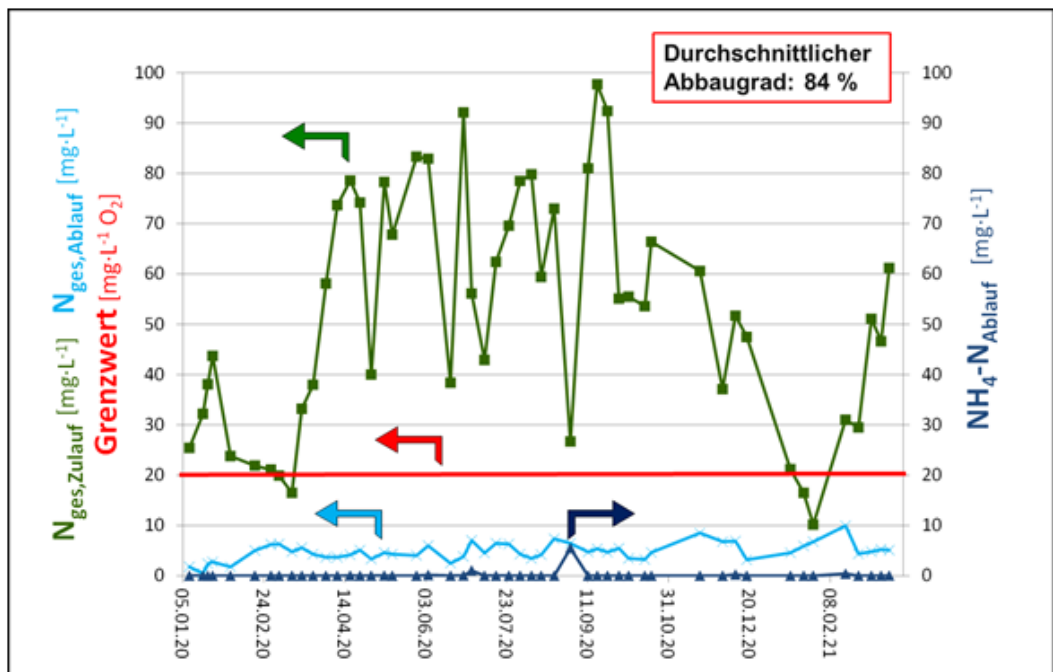


Bild-19 zeigt einen schwankenden Verlauf der CSB-Konzentrationen im Zulauf. So werden bei Trockenwetterereignissen deutlich höhere CSB-Zulaufkonzentrationen (1000 mg/l O₂) beobachtet als bei Regenwetter (50 mg/l O₂). Der Kurvenverlauf der CSB-Ablaufkonzentrationen ist nahezu konstant und schwankt zwischen 8 - 20 mg/l O₂. Die durchschnittliche Permeatkonzentration liegt um das Achtfache niedriger als der Grenzwert nach Abwasserverordnung Anhang 4 von 90 mg/l. Auch das Reinigungsziel nach Bemessungssatz von Böhnke et al aus Tabelle-01, welches für diese Anlage bei 40 mg/l angesetzt wurde, wird jederzeit unterschritten. Somit liegt der durchschnittliche Abbaugrad der organischen Fracht bei 96,7 %. Folglich ist eine deutliche Reduktion der organischen Belastung des Abwassers erkennbar. Der Restanteil an CSB im Permeat könnte hauptsächlich schwer bis nicht abbaubar sein. Eine genaue Analyse des organischen Anteils im Permeat wurde nicht durchgeführt. Grundsätzlich liefern die Barriere-Wirkung der Membran, sowie der vollständige Rückhalt von Feststoffen eine zuverlässig niedrige Belastung an organischen Schmutzfrachten im Ablauf. Dies ist sowohl unabhängig von Zulaufschwankungen als auch von der Belastungssteigerung des Zulaufs oder der Belebtschlammbeschaffenheit.

Die Demonstrationskläranlage Simmerath wurde während des gesamten Projektzeitraums mit einer vorgeschalteten Denitrifikation betrieben. Um eine möglichst vollständige Stickstoffelimination zu erreichen, war es notwendig, einen Teilstrom des belebten Schlammes von der Nitrifikation in die Denitrifikation zurückzuführen (Bild-09). Im Folgenden wird auf die Abbauleistung von Stickstoff genauer eingegangen (Bild-24).

Bild-20:

Stickstoff-
Abbau (N_{ges}) im
Projektzeitraum



Die Stickstoffkonzentrationen im Zulauf in Bild-20 zeigen, ähnlich wie zuvor bei dem Kohlenstoffabbau in Form von CSB, einen schwankenden Verlauf. Auch hier ist eine Abhängigkeit der gemessenen Konzentrationen von Trocken- und Regenwetterphasen erkennbar. Während der Regenwetterphase zu Beginn schwanken die Stickstoffzulaufkonzentrationen zwischen 16 - 40 mg/l. Anschließend steigt mit zunehmenden Außentemperaturen und geringeren Zulaufmengen die Stickstoffkonzentration im Zulauf auf bis zu 100 mg/l an. Die im Beobachtungszeitraum gemessenen Ablaufkonzentrationen des Gesamtstickstoffs schwanken zwischen 3 - 12 mg/l und liegen damit jederzeit unterhalb des Überwachungswerts von 18 mg/l N_{ges} . Selbst in der Zeit von Oktober bis Mai, bei dem kein Überwachungswert nach Abwasserverordnung existiert, wird der Grenzwert eingehalten. Für N_{ges} ist der Wert für das Reinigungsziel der Anlagenauslegung gleich dem Grenzwert nach Abwasserverordnung Anhang 4. Der Gesamtstickstoffanteil setzt sich aus verschiedenen Stickstoffformen sowohl organisch als auch anorganisch zusammen. So stellt Ammonium als Teil des Gesamtstickstoffgehalts ein Belastungsfaktor dar und wird ebenfalls nach Abwasserverordnung mit einem Grenzwert von 10 mg/l im Ablauf begrenzt. Die gemessenen Ammoniumkonzentrationen (NH_4-N) im Ablauf sind nahezu immer 0 und halten den Grenzwert durchgehend ein. Am 31.08.2020 ist der höchste Ausreißer von Ammonium im Permeat erkennbar. An diesem Tag wurde die Analyse im Anschluss an eine Störung durchgeführt. Innerhalb dieser Störung wurde die Nitrifikationsstufe für mehrere Stunden nicht belüftet. Anzunehmen ist, dass es zu einem teilweisen Absterben der Mikroorganismen in der Biologie kam. Die Nitrifikation lief nur vermindert ab und Ammonium konnte nicht vollständig aus dem Ablauf entfernt werden. Die durchschnittliche Stickstoffabbauleistung liegt bei 84 % und somit geringer als für die Kohlenstoffelimination.

Zusätzlich zu Ammonium wurde im Permeat Nitrit- und Nitratkonzentrationen gemessen. Nitrit wird genauso wie Ammonium vollständig aus dem Abwasser abgebaut. Der Restanteil der Gesamtstickstoffkonzentration im Permeat entspricht den Nitratwerten im Ablauf. Das Funktionsprinzip der vorgeschalteten Denitrifikation scheint eine stabile Stickstoffelimination zu gewährleisten, da Nitrit und Ammonium, die als umweltbelastend gelten, vollständig aus dem Abwasser entfernt werden.

Grundsätzlich ist die Abbauleistung der Biologie in Kombination mit der Abtrennung der Feststoffe vom gereinigten Wasser im Projektzeitraum zufriedenstellend gelaufen. Es wurden sehr hohe Abbaugrade der einzelnen Parameter erzielt. Die MBR-Anlage erfüllt größtenteils, ohne dass gereinigtes Wasser in einen Vorfluter geleitet wird, alle Rahmenbedingungen gemäß des Bemessungssatzes in Tabelle-01 und auch die Grenzwerte nach Abwasserverordnung Anhang 4 werden eingehalten. Optimierungsbedarf besteht lediglich für die Abbauleistung von Phosphat.

Da im technischen Betrieb der Demonstrationskläranlage keine externe Phosphatfällung etabliert wurde, kann Phosphat ohne Fällung nicht vollständig aus dem System eliminiert werden. Bakterien sind nur begrenzt in der Lage Phosphor aus dem Rohabwasser zu entfernen. Die Grenzwerte für Phosphat im Ablauf können allein durch den biologischen Abbau nicht eingehalten werden. Deswegen wurden die Ergebnisse für Phosphat nicht betrachtet.

Für *Escherichia coli* gibt es nach Abwasserverordnung Anhang 4 keinen wirklichen Grenzwert. Dabei zählen *E.coli* Arten wie beispielsweise enterohämorrhagische *E.coli* (EHEC) nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zu den bakteriellen Krankheitserregern, die zum Teil schwerwiegende wasserbedingte Epidemien auslösen können. Abläufe von konventionellen Kläranlagen können zahlreiche humanpathogene Mikroorganismen enthalten und stellen somit eine potentielle Kontaminationsquelle für genutztes Oberflächengewässer dar. So befindet sich in 1 ml Kläranlagenablauf (entspricht ungefähr einem Teelöffel) bis zu 10.000 Bakterien.

Durch die Entwicklung von Membranen innerhalb von MBR-Anlagen wird die Wasserqualität signifikant verbessert. Aufgrund der Porengröße der eingesetzten Membranen (i.d.R. 0,04 - 0,1 µm) wird ein quasi feststofffreier Ablauf erzielt, der sehr wenige bis keine Schlammflocken, Mikroplastikpartikel oder (Antibiotika)-resistente Bakterien enthält. Untersuchungen am Klärwerk Nordkanal des Erftverbandes zeigen im Ablauf des MBR durchschnittliche Werte für *E.coli* und intestinale Enterokokken <1/100mL, die somit weit unterhalb der Grenzwerte der EU-Badegewässerrichtlinie für eine ausgezeichnete Qualität von 200 bzw. 500/100mL liegen. Bezüglich der antibiotikaresistenten Bakterien konnte ein weitestgehender Rückhalt von MRSA (Methicillin-Resistenter Staphylococcus Aureus), VRE (Vancomycin-Resistente Enterokokken) und ESBL (Extended Spectrum Beta-Lactamase, β-Lactam-Antibiotikaspaltendes Enzym) -bildende Bakterien beobachtet werden. In der Regel können bereits Mikrofiltrationsmembranen Bakterien zurückhalten. Auch im Rahmen des Projektzeitraumes sind mehrfach mikrobiologische Analysen des Permeats durchgeführt worden. So dienen besonders *E.coli* und coliforme Bakterien im Trinkwasserbereich als Marker für eine hervorragende Wasserqualität. Tabelle-05 zeigt stichprobenartige mikrobiologische Untersuchungen des Permeats.

Tabelle-05: mikrobiologische Untersuchungen auf Wasserqualität nach Trinkwasserverordnung

Mikroorganismenanalyse im Filtrat						
	14.05.2020	17.09.2020	01.02.2021 vor der Intensiv.	09.02.2021 nach der Intensiv.	Trinkwasser- verordnung	Vergleichswert Kläranlage (Abschl. Swistl)
Escherichia coli colilert [/100 mL]	0	<1	0	<1	0	10.000 - 20.000
coliforme Bakterien colilert [/100 mL]	9	2	8	1	0	1.000 - 10.000
Koloniezahl bei 22 °C [KBE/mL]	60	28	232	143	100	100.000 - 200.000
Koloniezahl bei 36 °C [KBE/mL]	7	8	80	2	100	1.000 - 5.000

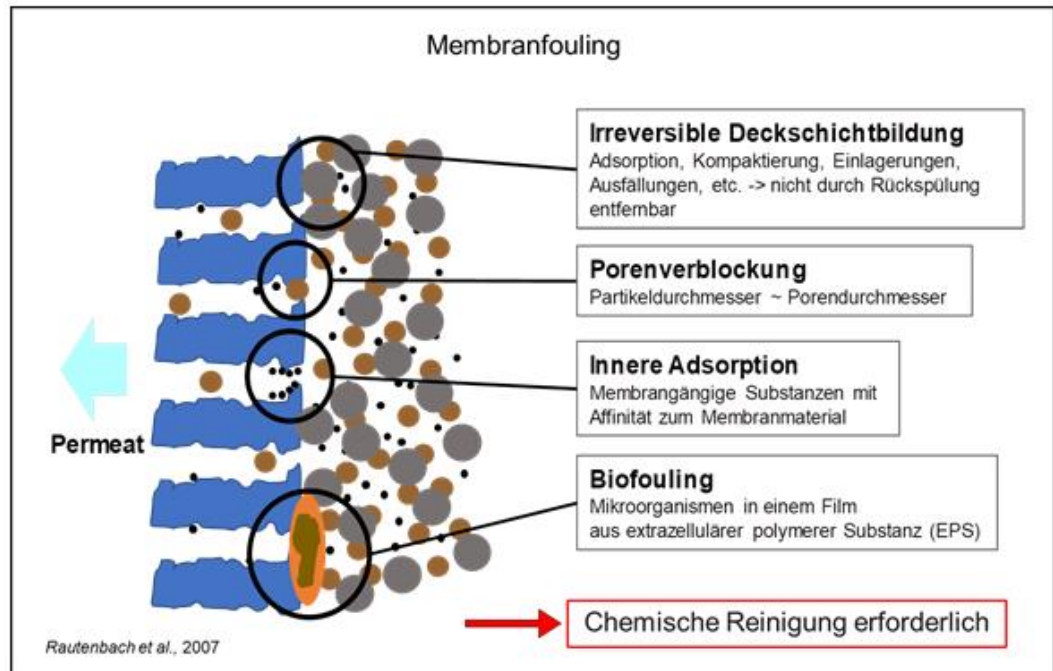
Auch bei der Analyse des Permeats der Membion-Membran ist festgestellt worden, dass *E.coli* die Membran nicht passieren kann. So erreichen die Permeat-Stichproben für die Grenzwerte von *E.coli* Trinkwasserqualität. Coliforme Bakterien colilert sind zwischen 1 - 9 Bakterien pro 100 ml im Ablauf der MBR-Demonstrationskläranlage Simmerath vorhanden. Auf normalen Kläranlagen sind Werte von 1.000 – 10.000 coliforme Bakterien pro 100 ml detektierbar. Trinkwasserqualität erreichen die Stichprobenwerte des Permeats nicht. Dies kann auch mit den älteren Leitungen zusammenhängen, wo es nicht unwahrscheinlich ist, dass sich Bakterien in den Rohrleitungen vermehren. Die Kolonienzahlen bei 22 und 36 °C liegen deutlich unterhalb der üblichen Kläranlagenabläufe. Auch hier wird die Trinkwasserqualität bei 36 °C erreicht. Bei 22 °C ist der Wert zum Teil leicht erhöht was ebenfalls mit Bakterien in den Rohrleitungen in Zusammenhang stehen kann. Die Membion-Membran ist also in der Lage, die erwartete Qualität im gereinigten Wasser zu erreichen. *E.coli* Bakterien sind nicht in der Lage die Barriere der Membranen zu passieren. Die 1000fach bessere Wasser-Hygienisierung kann bestätigt werden. Der Ablauf der MBR-Demonstrationskläranlage Simmerath ist daher als nahezu keimfrei zu bewerten.

8 Chemische Reinigung der Membranmodule

Üblicherweise wird für die Bemessung der Leistungsfähigkeit eines Modulsystems die Permeabilität eines Membranmoduls gemessen, d.h. der auf die transmembrane Druckdifferenz bezogene Permeatfluss. In realen MBR-Anlagen sinkt die Permeabilität in der Regel im Laufe der Zeit ab. Dies kann verschiedene Ursachen haben, die häufig auf unterschiedliche Formen der Ablagerung von Abwasser bzw. Schlamminhaltsstoffen im Modul, bzw. auf der Membran zurückzuführen sind (Bild-21). Bei diesen leistungsmindernden Effekten ist Membranfouling eins der wichtigsten operativen Probleme bei der Anwendung von MBR-Anlagen.

Bild-21:

Leistungs-
mindernde
Effekte



Eine Strategie, leistungsmindernde Effekte zu minimieren, ist die Anwendung von chemischen Reinigungen, wie beispielsweise die chemisch verstärkte Rückspülung der Membranen. Diese sind in der Lage, Biofilme auf Membranen zu entfernen und daher essenziell für MBR-Anlagenbetreiber. In der Regel kann nur mit Hilfe von chemischen Reinigungen die Filtrationsleistung langfristig aufrechterhalten und die hydraulische Kapazität gewährleistet werden.

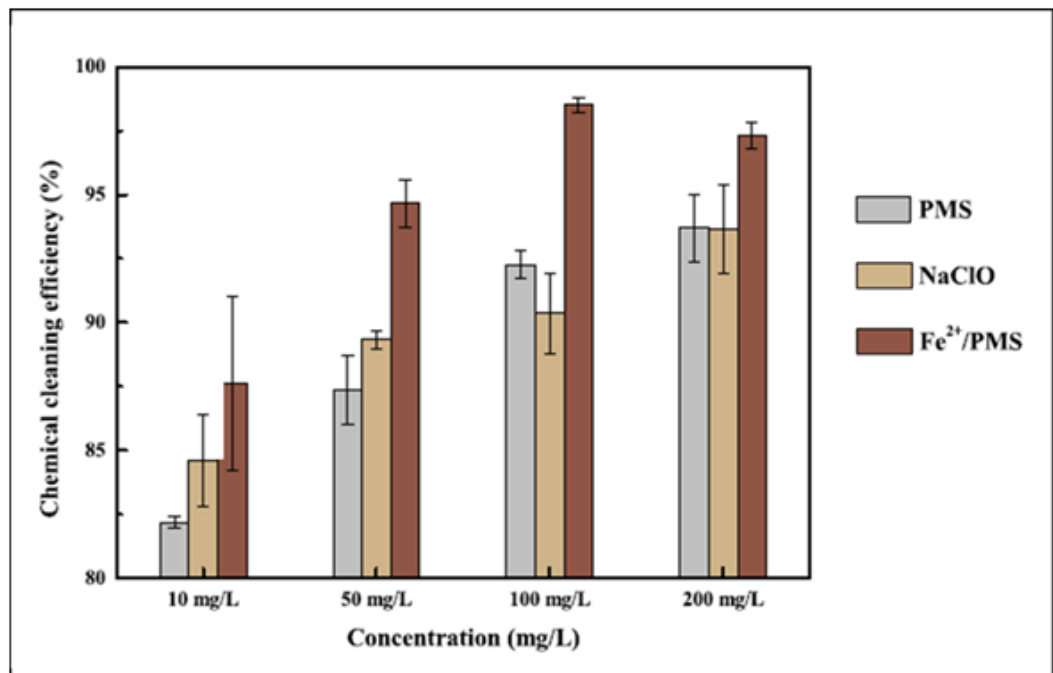
Die Wirksamkeit einer chemischen Reinigung ist von der Reinigungschemikalie und der Durchführung der Reinigung abhängig. Chemische Reinigungen können entweder in Form von Zwischenreinigungen („in-situ“) in kurzen Abständen mit geringen Konzentrationen, oder in Form von Intensivreinigungen mit höheren Konzentrationen und längeren Einwirkzeiten von mehreren Stunden durchgeführt werden. Dabei erfolgt die Zwischenreinigung in relativ kurzen Intervallen (zum Beispiel (z.B.) einmal wöchentlich) und in der Regel automatisiert mit geringem Personal- und Chemikalienaufwand. Die Chemikalien werden durch Rückspülung über die Permeatseite zugegeben, während der Membranmodul sich im belebten Schlamm befindet. Meist ist jedoch eine vollständige Wiederherstellung der Ausgangspermeabilität nicht möglich. Daher können zusätzliche Intensivreinigungen erforderlich werden, die häufig einmal im Jahr ex-situ in einem externen Tauchbad mit höheren Konzentrationen der Reinigungschemikalien über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden.

Bei chemischen Reinigungen von MBR-Membranen werden in der Regel Natriumhypochlorit (NaOCl) zur Entfernung von organischen Belägen und Zitronensäure zur Entfernung von anorganischen Belägen eingesetzt. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass NaOCl adsorbierbare organisch gebundene Halogen-Verbindungen (AOX) erzeugt, die extrem umweltschädlich sind und daher die Ablaufqualität negativ beeinflussen. Daher müssen oftmals strenge AOX-Grenzwerte eingehalten werden. Lösungen gegen die Umweltschädlichkeit von NaOCl sind entweder das Auffangen der AOX-belasteten Reinigungslösungen mit anschließender Neutralisierung, oder die Verwendung von chlorfreien Reinigungschemikalien. In der Literatur (Forschungsgruppe um Wang et al.) wird eine chlorfreie Variante für chemische Reinigungen vorgestellt, die eine mögliche

AOX-freie Alternative zu NaOCl darstellt. Bild-22 zeigt die Ergebnisse aus der Literatur für den Vergleich der unterschiedlichen Reiniger im Labormaßstab.

Bild-22:

Etablierung einer chlorfreien Variante nach Wang et al. 2020



Der neue Reiniger basiert auf Kaliumperoxomonosulfat, oder auch Oxone® genannt, das in der Lage ist, Sulfatradikale zu bilden, die organische Verbindungen abbauen können. Dabei dient Oxone® als thermodynamisch starkes Oxidationsmittel. Allerdings ist die direkte Reaktion zu langsam, sodass Aktivatoren verschiedenster Art verwendet werden. Neben photokatalytischen Aktivierungen (Ultraschall, Ultraviolett (UV), Wärme) werden auch homogene oder heterogene Übergangsmetallkatalysatoren verwendet.

Wang et al. untersuchte die Wirkung von Eisen (Fe²⁺) in Form von Eisensulfat (FeSO₄) als Aktivator, um geringe chemische Konzentrationen für in-situ Reinigungen zu gewährleisten (Bild-23). Die Untersuchungen im Labormaßstab zeigten eine deutlich bessere Effizienzsteigerung von MBR-Membranen nach Fe²⁺ aktiviertem Oxone® als nach NaOCl (Bild-22), sodass aktiviertes Oxone® als umweltfreundliche Alternative zur Diskussion steht.

Mit dem Ziel, die AOX-Problematik langfristig zu vermeiden, wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes die Wirkung der neuartigen Reinigungschemikalie zunächst im Labormaßstab an Membranen aus dem MBR-Betrieb eingesetzt. Nachdem diese Untersuchungen die Reinigungswirkung belegten, wurden im Februar 2020 erstmalig chemische Zwischenreinigungen in-situ durchgeführt (Bild-24).

Bild-23:

Oxone®
Aktivierung
Mit Hilfe von
Eisensulfat

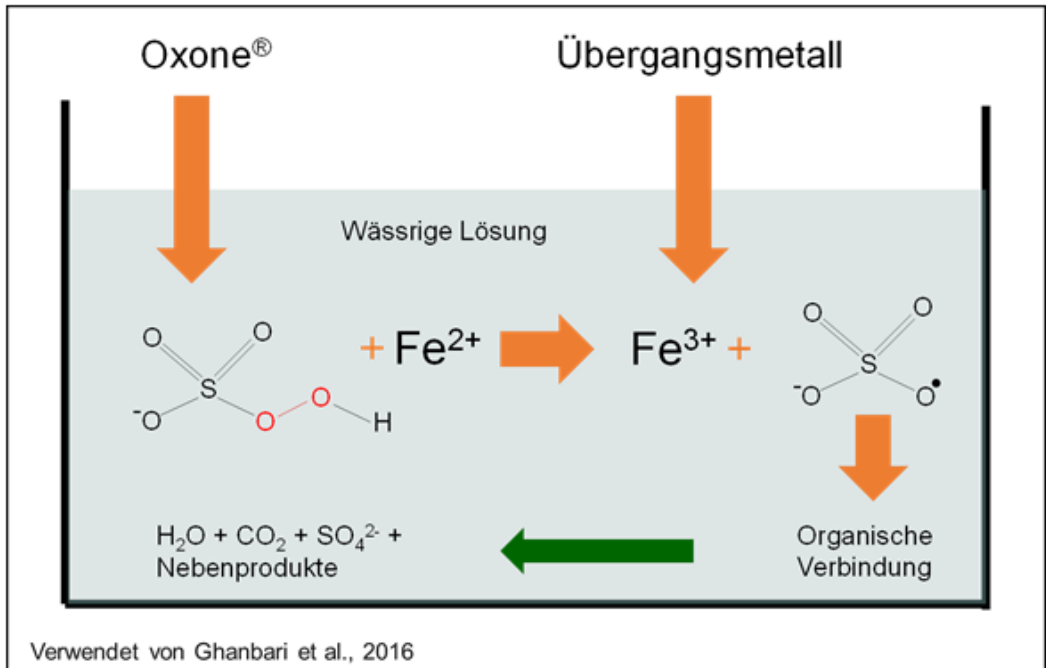
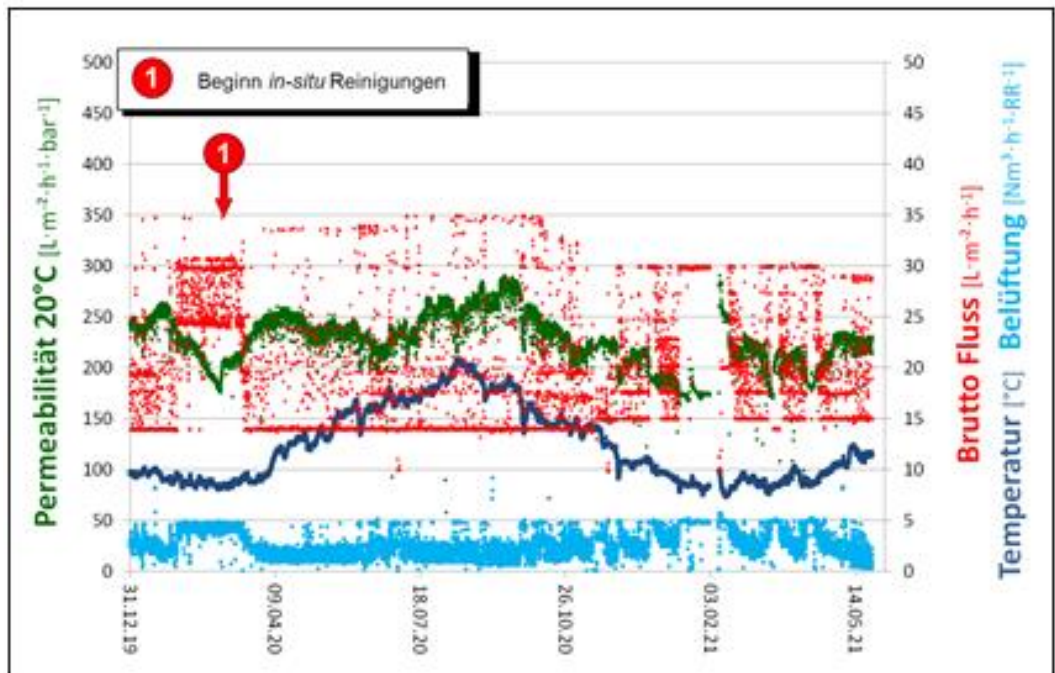


Bild-24:

Beginn der
Chemischen
Zwischen-
reinigung
Im Februar 2020



Hierbei werden die Membranen im Modul mit Permeat und geringen Chemikalienkonzentrationen in wöchentlichen Abständen zurückgespült, wobei die Durchführung der Reinigung zu Optimierungszwecken variiert wurde.

Nach Optimierung der In-situ Reinigungen konnte die Permeabilität der Membranen in den Sommermonaten zwischen 200 und 250 l/m²h stabilisiert werden (Bild-24). In den Wintermonaten von November bis März ist die Leistungsfähigkeit des Moduls aufgrund der höheren Zulaufmengen und kälteren Temperaturen in der Regel geringer. Auch hier konnten die chemischen Zwischenreinigungen die Permeabilität auf einem Niveau von durchschnittlich über 200 l/m²/h/bar stabilisieren.

Die Wirksamkeit von chemischen Zwischenreinigungen ist neben den Einflussfaktoren Konzentration, Durchführung und Temperatur, auch von dem Verschmutzungsgrad der Membran sowie äußeren Bedingungen abhängig. Um die Reinigungsleistung der neuen Chemikalie einordnen zu können, wurden im Rahmen des Projekts auch einzelne Zwischen-Reinigungen mit NaOCl durchgeführt. Dabei lag die Reinigungseffizienz der NaOCl Zwischenreinigungen zwischen 5 - 13 % (Bild-25). Bild-26 zeigt zum Vergleich die Reinigungseffizienz von Zwischen-Reinigungen mit eisenaktiviertem Oxone®, die zwischen 4 – 15 % vergleichbar bis geringfügig besser lag.

Bild-25:

Chemische Zwischenreinigung mit NaOCl

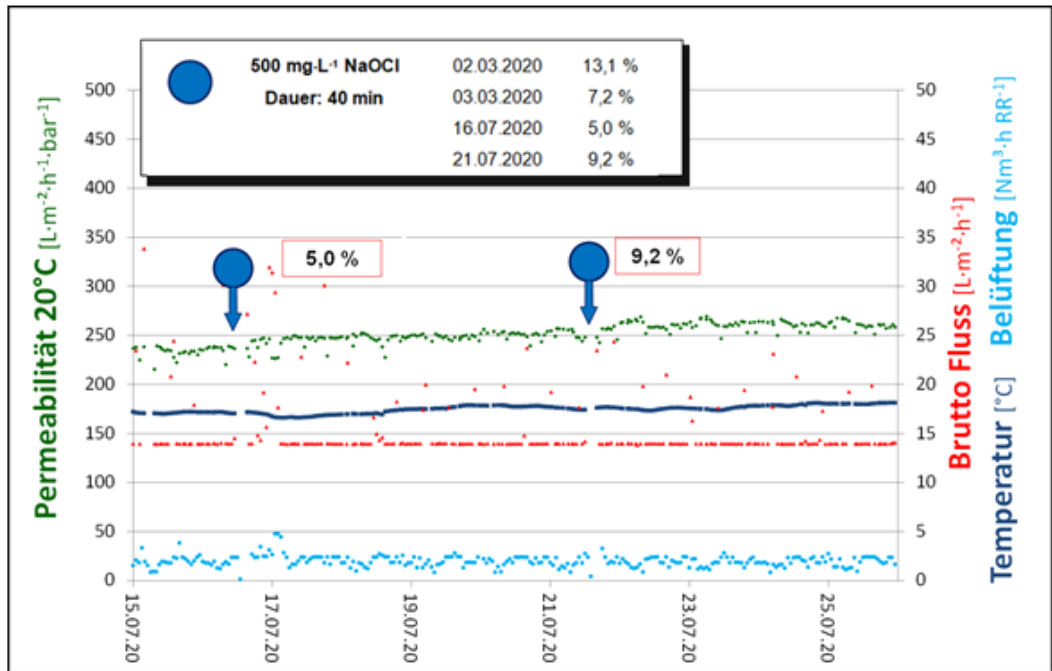
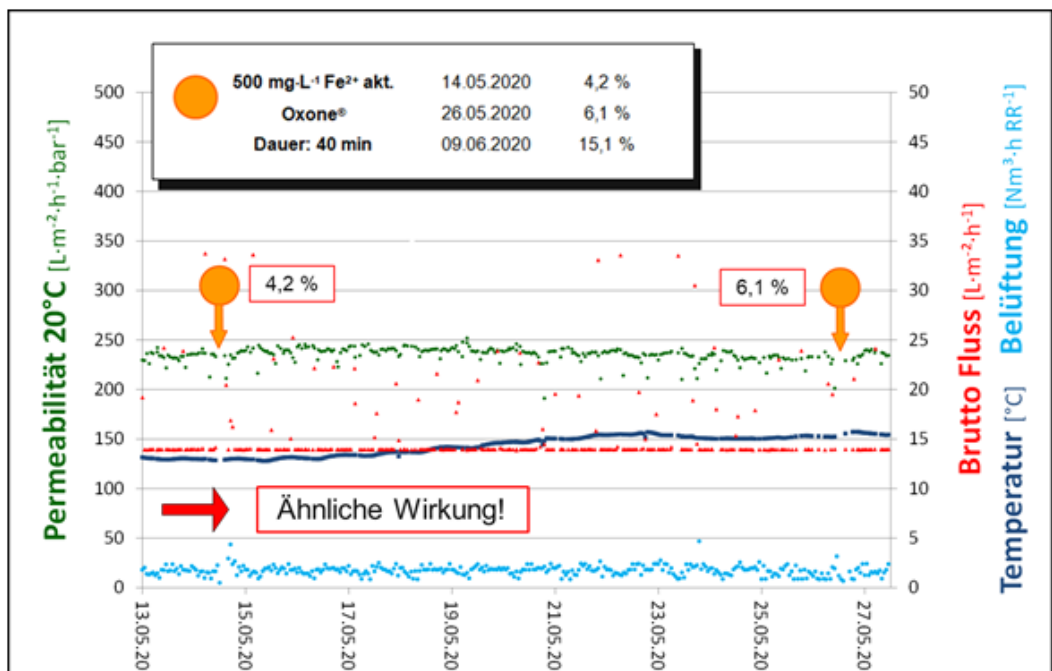


Bild-26:

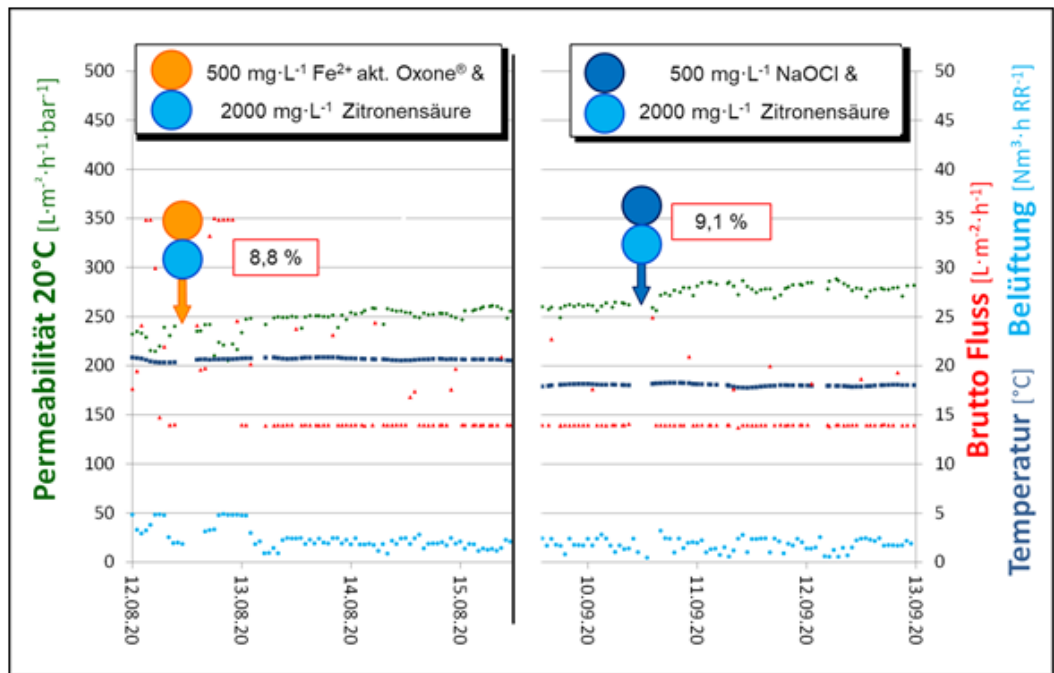
Chemische Zwischenreinigung mit Eisenaktiviertem Oxone®



Eine weitere wirksame Alternative für Zwischenreinigungen erwies sich die Kombination aus oxidativen und sauren Reinigungschemikalien. Auch bei dieser Kombination wurde für den oxidativen Reinigungsschritt die Wirkung von NaOCl mit der von Oxone[®] verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs (Bild-27) zeigen auch hier, dass Oxone[®] eine wirkungsvolle, AOX-freie Alternative zu NaOCl bietet auch im Rahmen von Kombinationsreinigungen mit Zitronensäure.

Bild-27:

Chemische
Zwischen-
Reinigung mit
der Kombination
von Reinigungs-
chemikalien



Im Rahmen des Projektes konnte der neuartige Reiniger auf Oxone[®] Basis insgesamt als umweltfreundliche Alternative für Zwischenreinigungen anstatt des üblichen NaOCl sowohl für Einzelanwendungen als auch für Kombinationsanwendungen mit Zitronensäure etabliert werden.

Da im DBU-Ergänzungsantrag AZ-34834-02 ein neues Modul mit „JetSplash“-Technologie zum Einsatz kommen sollte, ist ein vorheriges Erreichen der Ausgangspermeabilität des bereits im Betrieb befindlichen Moduls wünschenswert, um beide Module besser miteinander vergleichen zu können. Da die Ausgangspermeabilität trotz der Zwischenreinigungen im gesamten Betriebszeitraum von etwa 14 Monaten leicht abgesunken war, wurden im Februar 2021 ein erstmaliger Ausbau des Moduls sowie eine Intensivreinigung mit NaOCl-Zitronensäure vorgenommen. In der Literatur sind Reinigungserfolge dieser Kombinations-Intensivreinigung auf ein Niveau von 70 - 80 % der Ausgangspermeabilität aufgeführt. Derartige Kombinationsreinigungen mit höheren Konzentrationen (bis zu 3000 mg·L⁻¹) werden von führenden Unternehmen wie Mitsubishi, GE Water, Evoqua und Kubota als Intensivreinigungslösungen häufig ein bis zweimal im Jahr empfohlen.

Die Intensivreinigung in dem vorliegenden Projekt wurde mit 1000 mg/l NaOCl und 2000 mg/l Zitronensäure sowie einer Einwirkzeit über Nacht durchgeführt.

Bild-28:
Intensiv-
Reinigung mit
NaOCl und
Zitronensäure

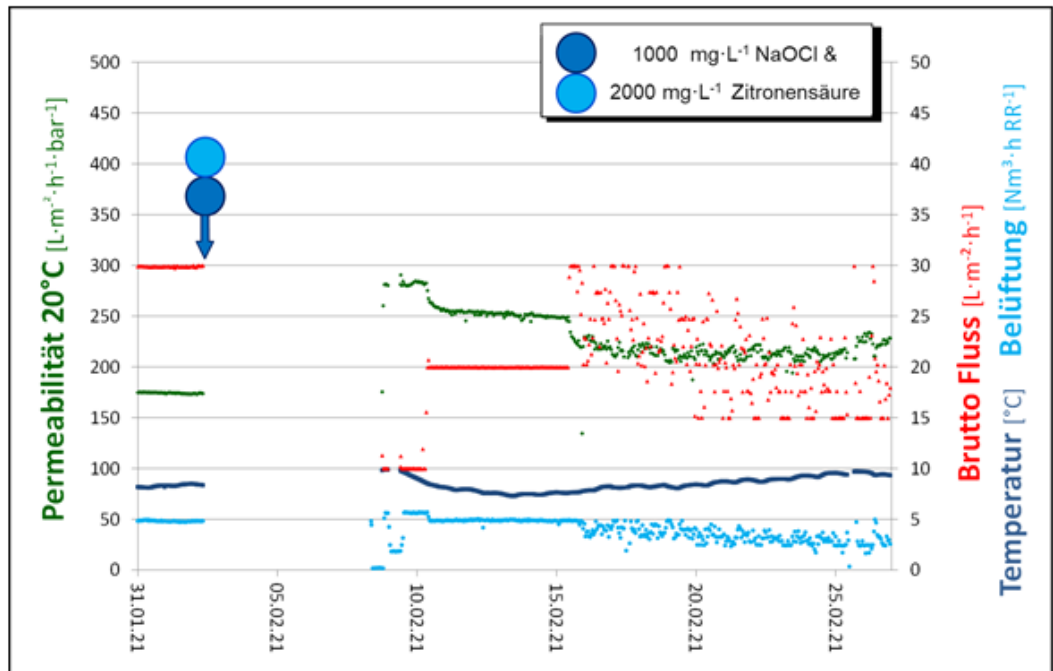
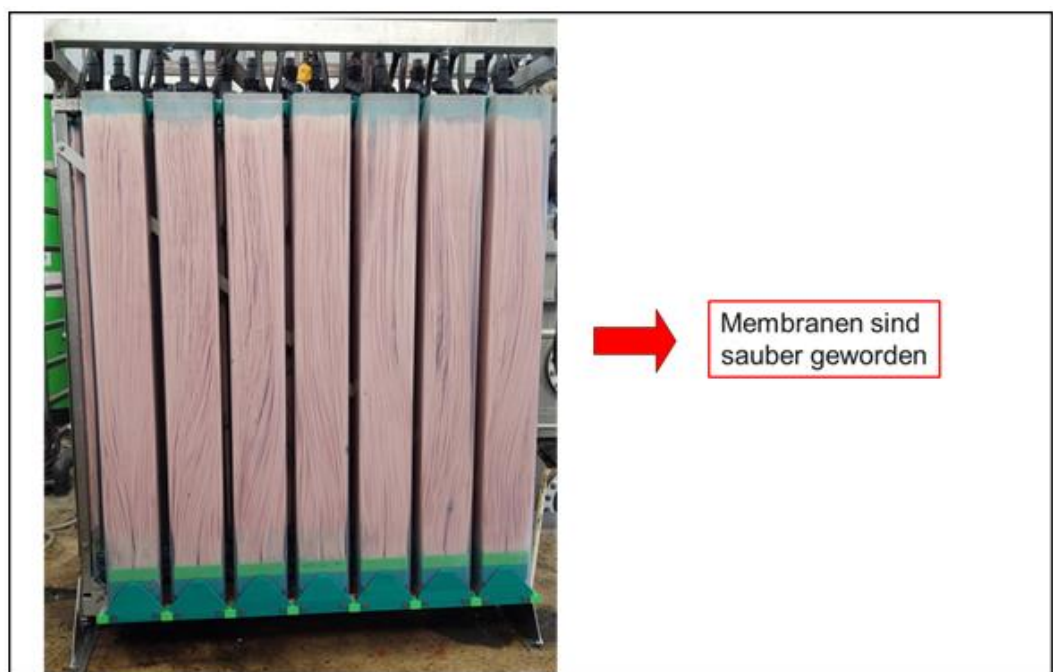


Bild-28 zeigt die Wirksamkeit der Intensivreinigung deutlich. Während der Modul vor der Reinigung eine Permeabilität von ca. 175 $\text{l}/\text{m}^2/\text{h}/\text{bar}$ bei einem Fluss von 30 $\text{l}/\text{m}^2/\text{h}$ hatte, stieg diese Permeabilität nach der Intensivreinigung auf ca. 250 $\text{l}/\text{m}^2/\text{h}/\text{bar}$ bei einem Fluss von 20 $\text{l}/\text{m}^2/\text{h}$, bzw. auf etwa 210 $\text{l}/\text{m}^2/\text{h}/\text{bar}$ bei 30 $\text{l}/\text{m}^2/\text{h}$.

9 Begutachtung der Module nach chemischer Reinigung und Modulausbau

Bild-29 zeigt den ausgebauten Modul nach Durchführung der oben beschriebenen Intensivreinigung.

Bild-29:
Ausbau des
Moduls nach
der Intensiv-
reinigung

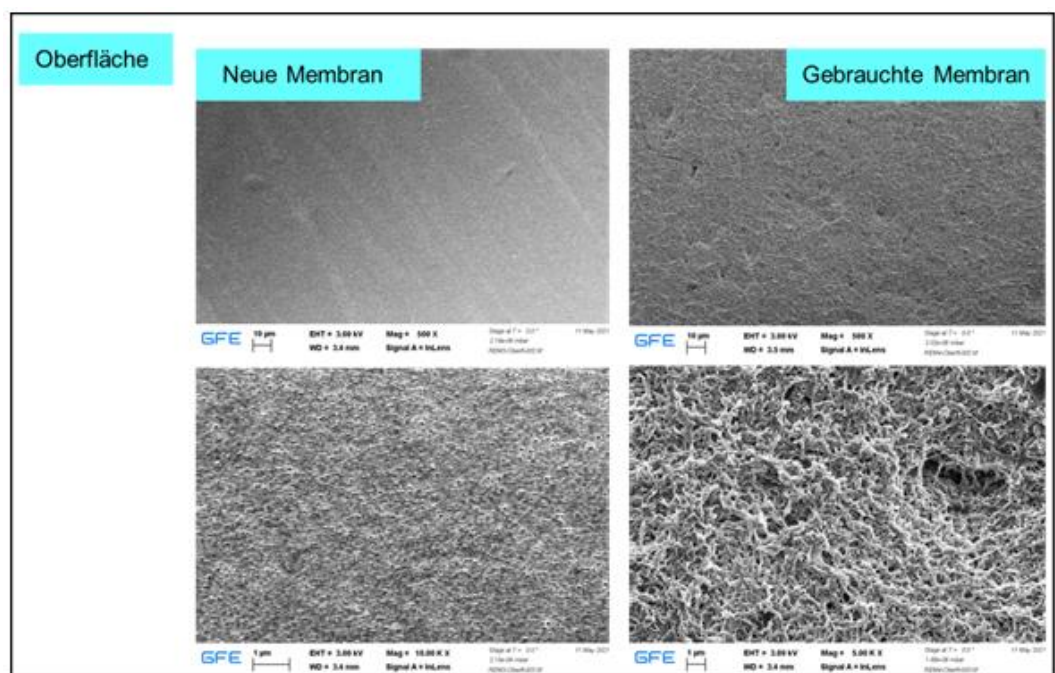


Die Module sind optisch sauber geworden, d.h. der Modul ist von Dezember 2019 bis Februar 2021 ohne nennenswerte Verunreinigungen betrieben worden. Lediglich einige größere Äste hatten sich unten im Modul-Einlaufbereich verfangen und führten dort zu geringfügigen Verschlammungen. Diese sind vermutlich auf die großen Löcher im Zulaufsieb zur MBR-Anlage zurückzuführen. Verzopfungen konnten nicht festgestellt werden. Die leichte Rosafärbung der Membranen nach der Intensiv-Reinigung mit NaOCl ist üblich für PVDF-Membranen.

Um eine Aussage über das Alterungsverhalten der Membranen nach 14 Monaten Betriebszeit zu erhalten, wurden Morphologie-Untersuchungen von gebrauchten und neuen Membranen mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen (REM) durchgeführt. Membranalterung lässt sich in der Regel auf eine irreversible Veränderung der Membranstruktur zurückführen, die sich negativ auf die Filterleistung auswirkt. Häufig hervorgerufen werden Strukturveränderungen der Membran durch permanent hohe mechanische und chemische Belastungen. Dabei werden meist hydrophile Membranbestandteile ausgewaschen, wodurch in der Folge die Membranstruktur geschwächt und kompaktiert wird. Derartige Veränderungen lassen sich dann in der Regel über Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen (REM) detektieren. Im Zuge des Modulausbaus im Februar 2021 wurden Proben der gebrauchten Membran aus dem Modul entnommen und mit neuen Membranen über REM-Aufnahmen verglichen.

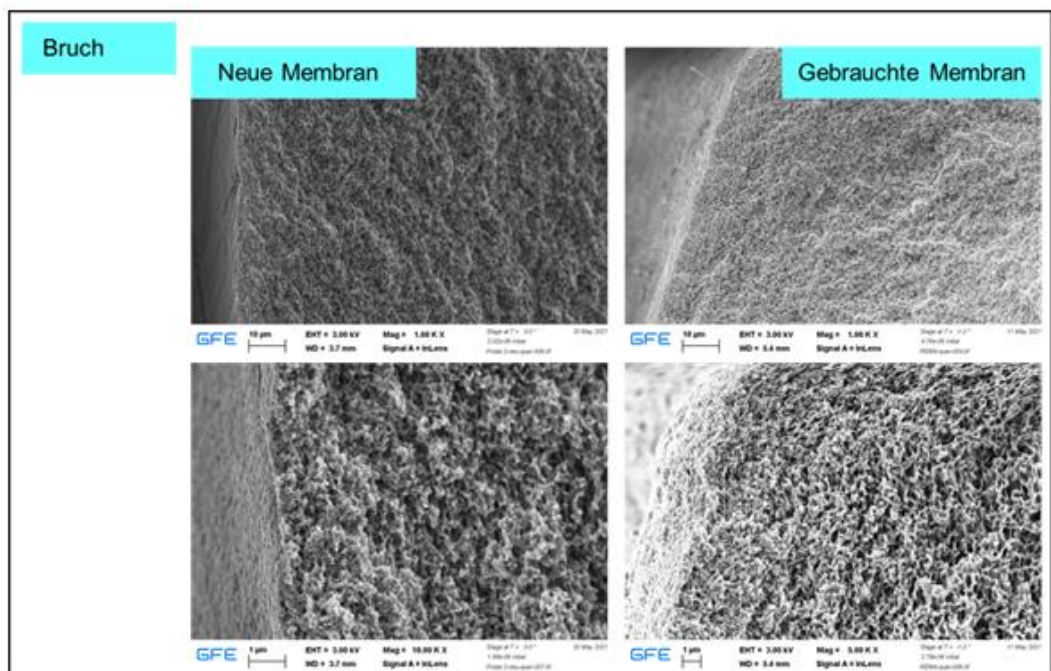
Bild-30:

REM-Aufnahmen
Membranalterung
Oberfläche



Dabei zeigten sich keine wesentlichen strukturellen Veränderungen der Membran-Morphologie der Membion Membran nach 14-monatiger Betriebszeit (Bild-30). Lediglich die Oberfläche weist neben groben Resten von Ablagerungen eine geringfügig offenere Porenstruktur auf. Dies liegt jedoch vermutlich an der Tatsache, dass die Membranen am Ende des Produktionsvorgangs mit Glycerin benetzt werden, um sie gegen Austrocknung zu schützen. Dieses Glycerin bleibt eine ganze Zeit in den Poren und verfälscht häufig die REM-Aufnahmen der neuen Membran dahingehend, dass die Oberfläche geringfügig dichter erscheint. Bei den gebrauchten Membranen ist das Glycerin der Membran-Benetzung vollständig ausgewaschen, wodurch die Oberfläche geringfügig offener erscheint.

Bild-31:
REM-Aufnahmen
Membranalterung
Querschnitt
(Bruch) der
Membran



Die Querschnittsaufnahmen der Membranen (Bild-31) liefern einen stabilen, schwammartigen Aufbau der Membranen, wodurch eine mechanisch belastbare Morphologie der Membranen gewährleistet wird. Die Membranen zeigen bisher keinerlei Kompaktierungs-Erscheinungen, wie sie häufig bei Membranen mit Fingerstrukturen auftreten. Insgesamt machen die Membranen nach 14 Monaten Betriebszeit einen sehr guten Eindruck ohne wesentliche Alterungserscheinungen.

10 Ausblick: Entwicklung der „Jet-Splash“-Geysir-Belüftung

Parallel zur MBR-Demonstrationsanlage in Simmerath hat Membion auch die Pilotanlage in Konzen weiterbetrieben, um weitere betriebstechnische Optimierungen durchführen zu können. Es ist bekannt, dass eine intermittierend betriebene Belüftung zur Spülung der Module effektiver ist als eine kontinuierliche Belüftung. Bei den Versuchen in Konzen konnte zudem gezeigt werden, dass die Effektivität der Spülung durch kürzere Intervalllängen der Belüftungs- bzw. Pausenphasen gesteigert werden kann. Das bedeutet, wenn die gleiche Luftmenge in einer kürzeren Zeit zugeführt wird, d.h. mit höherem Luftvolumenstrom während der Belüftung, steigt die Effektivität der Spülung. Optimal erscheinen Betriebsweisen mit sehr kurzem aber hohem Volumenstrom der Luft. Wird die An- und Ausschaltung der Luft in einem Modul anlagentechnisch über Ventile realisiert, so hat die Betriebsweise mit nur sehr kurzen Luftzufuhrpulsen jedoch technische und wirtschaftliche Grenzen:

Um die Gebläse nicht bei jedem Spülintervall an- und ausschalten zu müssen, wird der kontinuierliche Luftstrom eines Gebläses über Ventile getaktet auf unterschiedliche parallel geschaltete Membraneinheiten (z. B. Membranstraßen oder Gruppen von Membranmodulen) geschaltet. Dieses Betriebskonzept liegt auch den Belüftungsintervallen des bisherigen Demonstrationsbetriebs in Simmerath mit Belüftungsanteilen wie in Kapitel 5 beschrieben von 25% bzw. 40% zugrunde. Dies entspricht einem wechselseitig getakteten Betrieb von 4 bzw. 2 Membraneinheiten.

Soll der Luftzufuhrpuls zur Effektivitätssteigerung jedoch noch kürzer im Vergleich zur Luftpause eingestellt werden, so bedeutet eine derartige Taktung, dass die Anzahl der parallel geschalteten Membraneinheiten recht hoch sein muss. In der Realität ausgeführter Anlagen ist die Zahl der parallelen Membraneinheiten jedoch aus wirtschaftlichen und technischen Gründen limitiert. Dies reduziert die Flexibilität des Betriebs der Gesamtanlage, d.h. sehr kurze Luftpulse sind über getaktete Ventilschaltungen ohne Abschaltung der Gebläse in der Regel nicht realisierbar.

Zudem wird die Kürze des Luftzufuhrintervalls begrenzt durch die Zeit für den Druckaufbau im Modul- und Leitungssystem. Hinzu kommt, dass die schnell schaltenden Ventile oftmals verschleißanfällig sind und daher öfter getauscht werden müssen.

Um diese Probleme zu vermeiden, hat Membion einen speziellen Luft-Geysir entwickelt, der unterhalb des Membranrohres installiert wird und kontinuierlich mit Luft beschickt wird. Der Geysir hat ein definiertes Volumen, das durch kontinuierlich eingetragene Luft gefüllt wird und sich nach Überschreiten eines Maximalwertes schlagartig entleert. Dadurch wird der kontinuierlich in den Modul eingetragener Luftvolumenstrom im Modul in eine getaktete Belüftung umgewandelt. Eine Ansicht des unterhalb der Rechteckrohre installierten Luft-Geysirs ist in Bild-32 dargestellt. Die Funktionsweise des Membion-Geysirs ist in Bild-33 in den einzelnen Schritten dargestellt.

Bild-32:

Geysir-System
von Membion

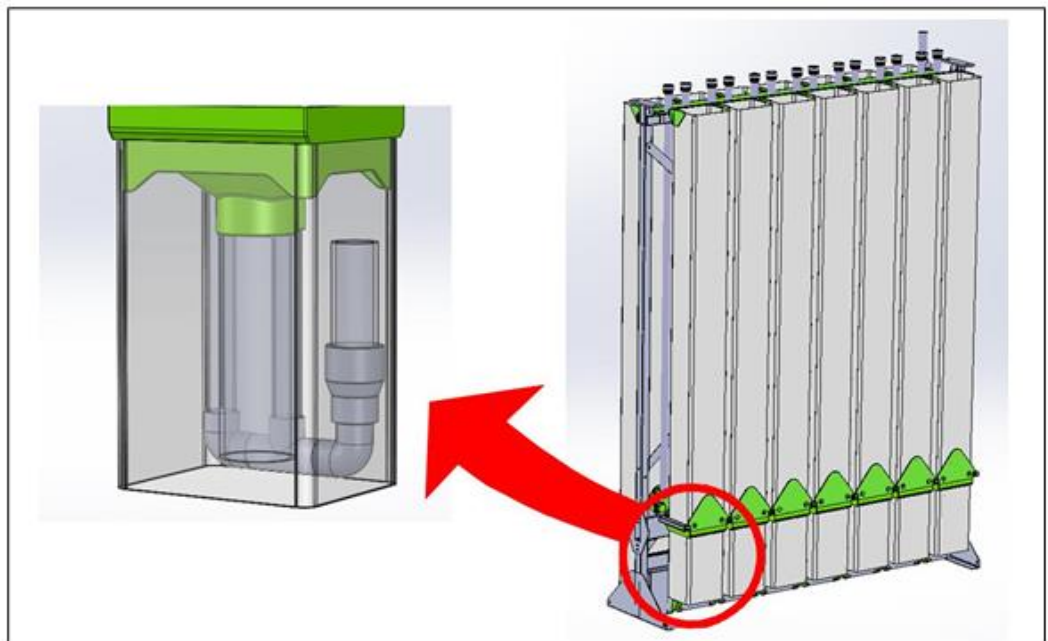
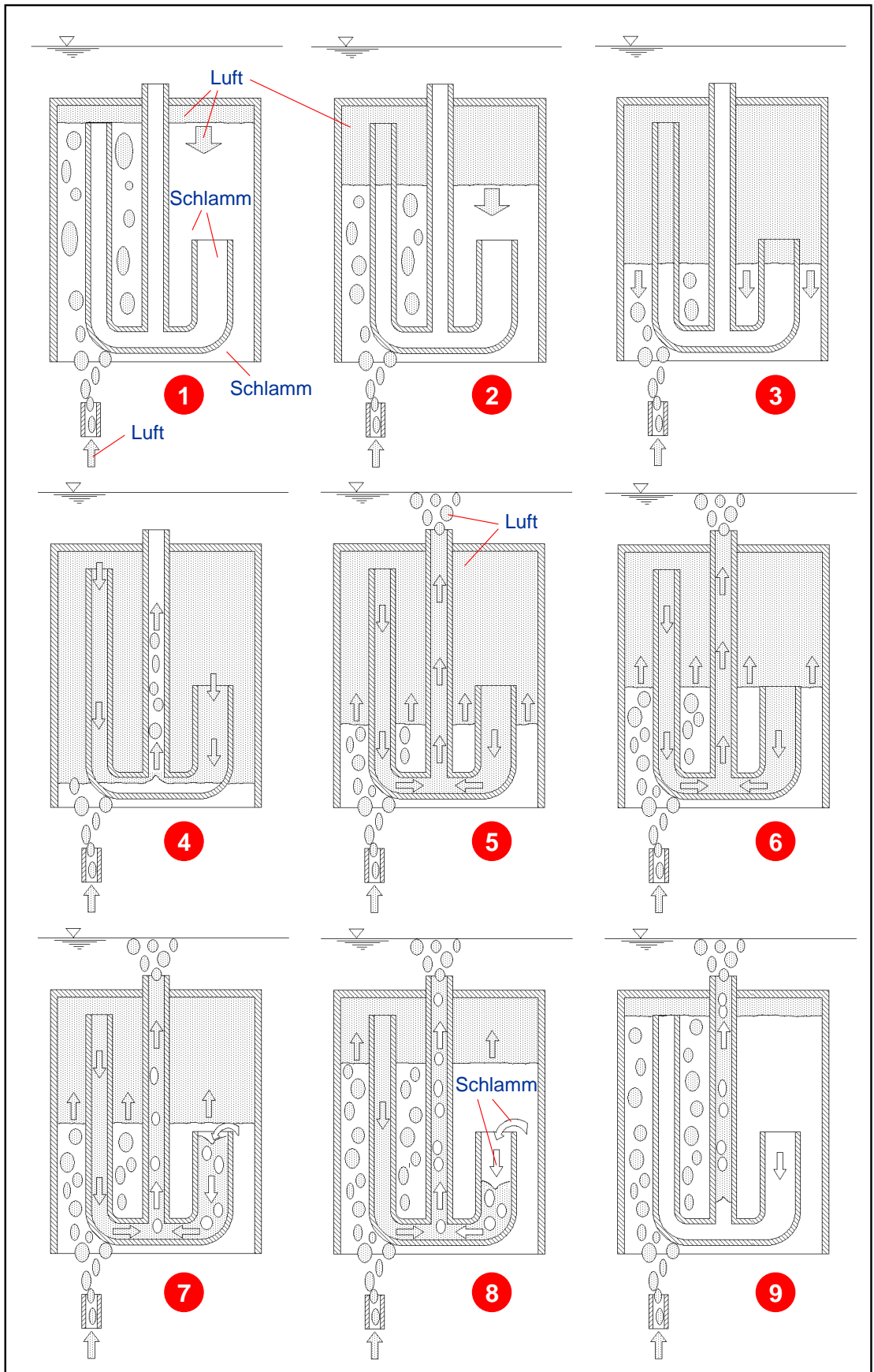


Bild-33:
 Funktionsweise
 Geysir-System
 von Membion
 patentiert



Das Luftvolumen des Geysirs wird von unten kontinuierlich mit Luft beaufschlagt. Diese füllt den Luftsammelraum und verdrängt dabei den Schlamm nach unten. Nach dem Prinzip kommunizierender Röhren steigt auch der Luftspiegel in den zum Luftraum hin nach oben offenen Rohrleitungen des Geysirs. Erst mit Überschreiten der unteren Umlenkung dieser Rohrleitungen durch die Luft (Teilbild-4), gelangt Luft in das mittlere Ausströmrohr, so dass die Luft aus diesem nach oben in den darüber liegenden Membranmodul ausströmen kann. Der links gezeigte Gasheberkanal sorgt dafür, dass sich das Luftvolumen nahezu komplett in den Membranmodul entleert. Dabei steigt der Schlamm-Spiegel im Geysir wieder an und übersteigt auch die Öffnung des rechten Ausgleichsrohres, durch das Schlamm bis zur unteren Umlenkung der Rohre strömt und diese für die Luftdurchströmung verschließt. Dadurch kommt der Luftvolumenstrom wieder zum Erliegen, der Luftpuls ist beendet und die Befüllung des Geysirs kann erneut beginnen. Durch das Ausgleichsrohr wird sichergestellt, dass auch bei höheren Luftzufuhr-Volumenströmen der Geysir immer noch stabil pulst.

Belüftungssysteme nach einem Geysir-Prinzip sind auch von anderen Modulsystemen her bekannt. Die bestehenden Systeme haben jedoch hydrodynamisch gesehen Limitierungen in der Flexibilität hinsichtlich der Luftvolumenstrom-Variation. Bei zu niedrigen oder zu hohen Luftvolumenströmen führen sie häufig zu Dauerbelüftung ohne Pulsation. D.h. sie können in der Regel nur in einem kleinen Variationsfenster der Luftzufuhr betrieben werden. Membion hat das System der Geysir-Belüftung erweitert über das in den Luftsammelraum mündende Ausgleichsrohr, wodurch die Luftvolumenstromvariation um den Faktor 3 gesteigert werden kann im Vergleich zu konkurrierenden Geysir-Systemen. Dadurch wird für die komplette Zufluss-Bandbreite von Kläranlagen eine pulsierende Belüftung sichergestellt. Das neue Geysir-System wurde von Membion im Oktober 2019 zum Patent angemeldet.

Das neue Geysir-System wird von Membion seit Dezember 2019 erfolgreich in der Pilotanlage in Konzen getestet (Bild-34). Zur Detail-Optimierung des Geysirs im Parallelbetrieb hat Membion zwischenzeitlich ein zweites Rechteckrohr in die Pilotanlage in Konzen eingebaut.

Bild-34:

Pilotanlage
Konzen mit
Geysir-Belüftung

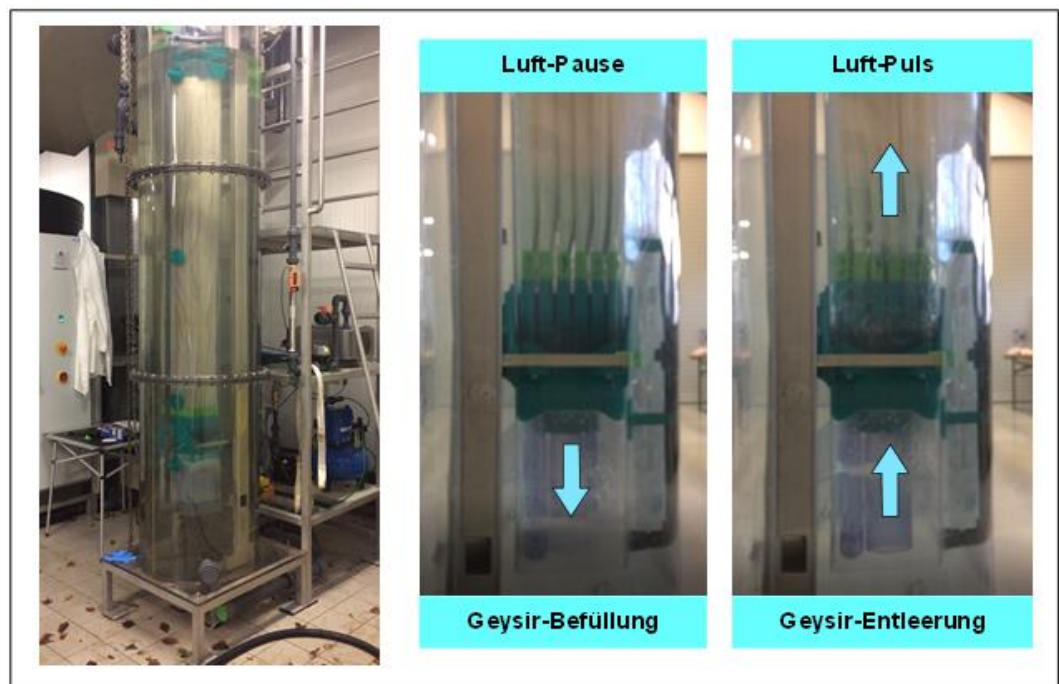
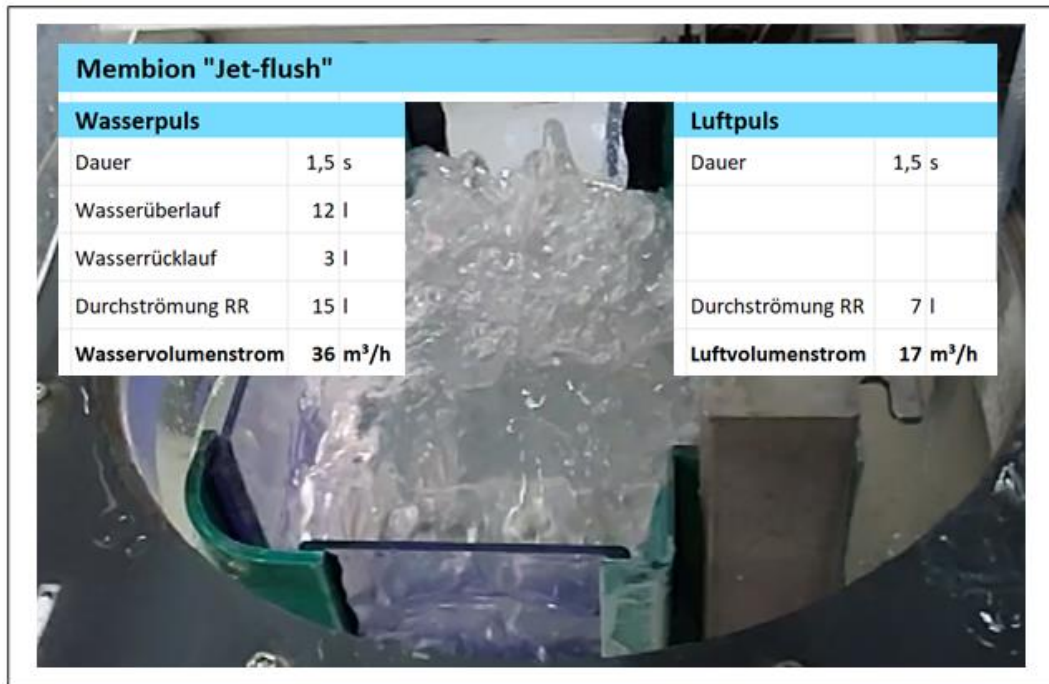


Bild-35:

Membion
„Jet-Splash“
Durch
Geysir-
Puls

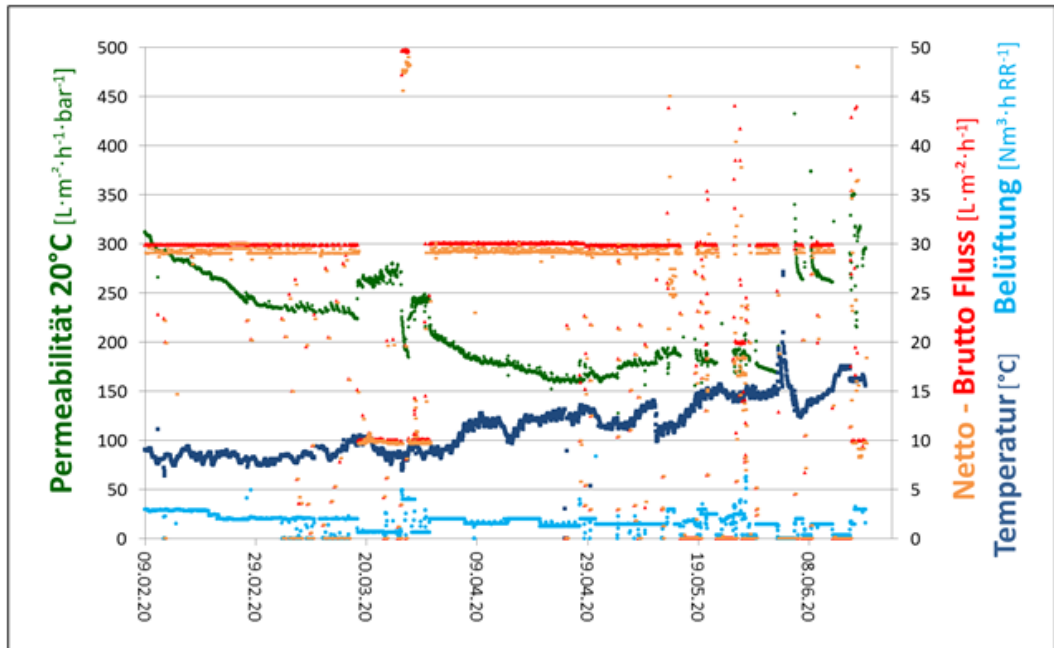


Die Entleerung des Geysirs erfolgt in nur ca. 1,5 Sekunden, was zu einem kräftigen Luft-Volumenstrom während des Pulsens von etwa 17 m³/h führt. Das ist mehr als doppelt so hoch wie der Luftvolumenstrom im Falle der intermittierenden Version des Membion Moduls ohne Geysir. Hinzu kommt, dass der Luftpuls unten in das Modul-Rechteckrohr eingeleitet wird, das ohne Lücke direkt oben an den Geysir anschließt. Dadurch kann der Luftpuls nicht nach außen entweichen und entfaltet seine Energie komplett nach oben in den Membranmodul. Der Impuls nach oben wird noch einmal verstärkt durch eine im Geysir befindliche Prallplatte, die eine Rückströmung des Luftpulses nach unten verhindert. Der hohe Druck beim Austritt des Luftpulses führt dazu, dass die im Modul-Rechteckrohr befindliche Schlammmenge spontan und sehr kräftig beschleunigt wird. Somit bewirkt nicht nur der aufsteigende Luftpuls sondern auch die beschleunigte Wassersäule eine hohe Spülwirkung auf die Membranen. Die kombinierte Luft-Wasser-Spülung aufgrund des Geysir-Pulses wird von Membion als „Jet-Splash“ bezeichnet (Bild-35). In einem Versuch mit Xanthan in Wasser wurde gezeigt, dass bei einem Luftpuls etwa 15 Liter Schlamm durch den Modul strömen, was einem Schlamm-Volumenstrom von 36 m³/h entspricht.

Im Vergleich zur über Ventile getakteten Belüftung ermöglicht die Belüftung mit dem neuen „Jet-Splash“-Geysir von Membion einen deutlich höheren Impuls des Lufteintrags (kürzere Luftzufuhrzeit mit höherem Luftvolumenstrom und gleichzeitigem Wasservolumenstrom = „Jet-Splash“), was zu einer Steigerung der Spüleffektivität und einer weiteren Reduzierung des Energiebedarfs führt. So konnte der Energiebedarf für die Modulbelüftung in der Pilotanlage in Konzen mit Geysir-Betrieb deutlich reduziert werden. Die Pilotanlage wurde über den Zeitraum von über einem halben Jahr mit konstant 30 l/m²h betrieben, ohne Permeatrückspülung, d.h. mit hoher Ausbeute. Dabei konnte die Belüftungsrate auf nur 1,5 Nm³/h bezogen auf ein Rechteckrohr gesenkt werden. Dies entspricht einem Energiebedarf von 0,06 kWh/m³ Filtrat für die Modulbelüftung. Dieser Wert liegt 69 % niedriger als der Referenzwert von Kaarst mit 0,19 kWh/m³. Bild-36 zeigt den Verlauf der Betriebsdaten der Pilotanlage in diesem Zeitraum. Aufgrund des Verzichts auf eine Permeatrückspülung zeigt die Anlage mit 29 l/m²h Netto-Permeatfluss eine hohe Ausbeute.

Bild-36:

Langzeitbetrieb
 Pilotanlage
 Konzen mit
 „Jet-Splash“-
 Geysir



Um die Grenzen der Leistungsfähigkeit des Membion-Moduls mit „Jet-Splash“-Geysir ausloten zu können, wurden im Rahmen einer Masterarbeit Critical-Flux-Tests in der Pilotanlage Konzen durchgeführt. Dabei wurde bei einem festgelegten Luftvolumenstrom der Permeatfluss in Stufen erhöht und das Betriebsverhalten der Membranfilter dokumentiert. Jede Permeatfluss-Stufe wurde ohne Pause für die Dauer von 30 Minuten betrieben, gefolgt von einer 5 minütigen Pause. Der Permeatfluss bei dem der Transmembrandruck innerhalb dieser halben Stunde um mehr als 10 % ansteigt wird als Critical-Flux bezeichnet. Die Auslegung eines Anlagenbetriebs sollte immer im subkritischen Bereich erfolgen, d.h. unterhalb des Critical-Fluxes. Bild-37 zeigt die Ergebnisse des Critical-Flux-Tests in Konzen bei 3,0 Nm^3/h Belüftungsrate und 8 g/l TS-Gehalt. Der Critical-Flux liegt dabei bei etwa 55 $\text{l}/\text{m}^2/\text{h}$. Daraus wurde ein sicherer Auslegungswert von 42 $\text{l}/\text{m}^2/\text{h}$ abgeleitet.

Bild-37:

Critical-Flux-Test
 mit Jet-Splash-
 Geysir bei
 3,0 Nm^3/h

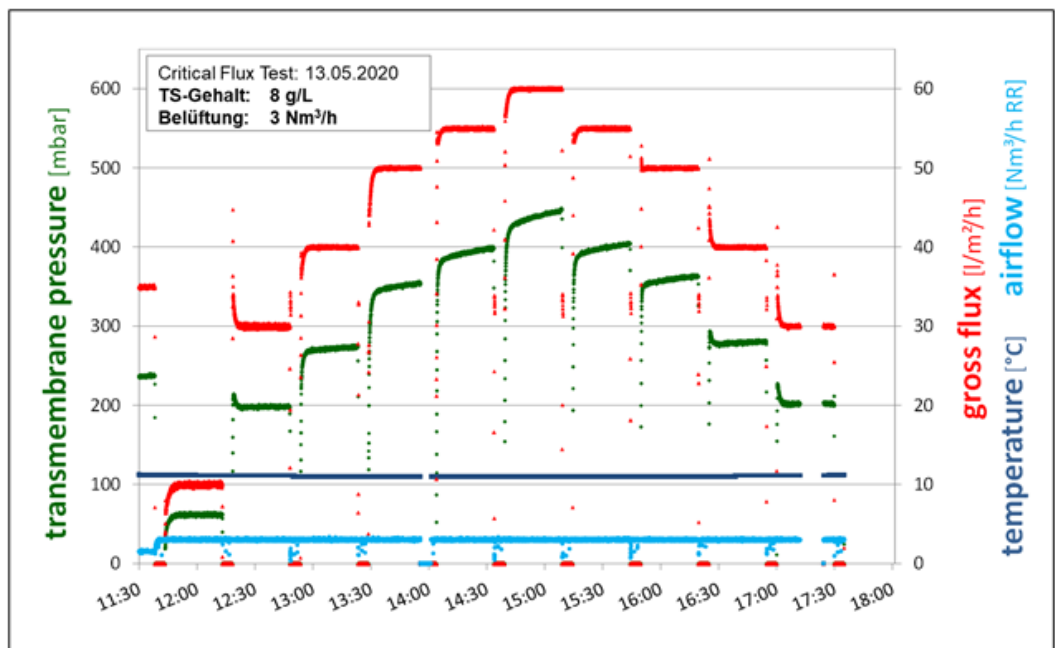
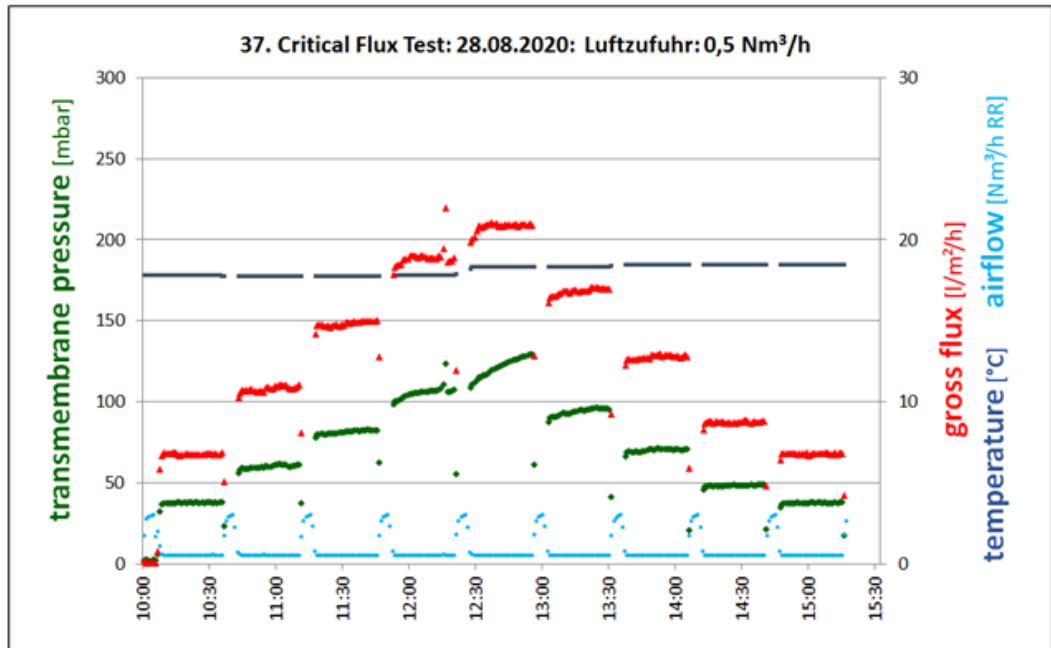


Bild-38:

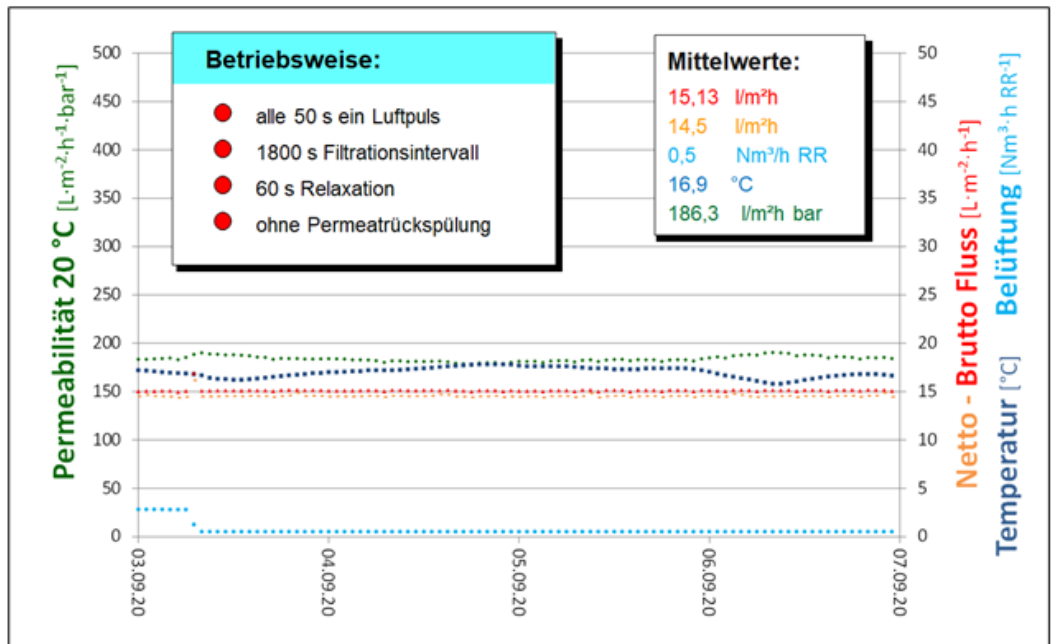
Pilotanlage
Konzen mit
2 Rechteck-
rohren



Da die meisten MBR-Anlagen während der überwiegenden Zeit nur mit niedrigen und mittleren Durchsatzleistungen gefahren werden, war eine interessante Fragestellung, wie der Critical Flux bei niedrigen Luftmengen aussieht. Bild-38 zeigt die Dokumentation des entsprechenden Critical-Flux-Tests bei nur 0,5 Nm³/h Luftzufuhr pro Rechteckrohr und einem TS-Gehalt von ebenfalls 8 g/l. Die Daten in Bild-38 zeigen, dass bei dieser Belüftungsrate der Critical-Flux bei etwa 21 l/m²h liegt. Als Subkritischer Bereich für die Auslegung eines stabilen Anlagenbetriebs wurde ein Brutto-Permeatfluss von 15 l/m²h festgelegt, der danach im Dauerbetrieb gefahren wurde. Dabei ist die Belüftung derart gering, dass nur etwa alle 50 Sekunden ein Luftpuls für etwa 1,5 Sekunden erfolgt. Das Filtrationsintervall wurde auf 1800 Sekunden festgelegt mit einer anschließenden Relaxation von 60 Sekunden. Auch hier wurde auf eine Permeatrückspülung verzichtet. Die Betriebsdaten in Bild-39 dokumentieren einen stabilen Anlagenbetrieb bei einem Energiebedarf von nur 0,04 kWh/m³.

Bild-39:

Pilotanlage
Konzen mit
2 Rechteck-
rohren



Aus den Werten der Langzeiterfahrung bei 30 l/m²h Brutto-Permeatfluss, sowie aus den Critical-Flux-Text für geringere und höhere Luftvolumenströme wurden die in Tabelle-06 dargestellten Auslegungsdaten für den Betrieb eines technischen Moduls mit „Jet-Splash“-Geysir-Belüftung in Simmerath für drei verschiedene Leistungsstufen entwickelt. Dabei zeigt sich, dass anders als beim Betrieb ohne Geysir der geringste Energiebedarf bei der geringeren Durchsatzleistung besteht. Dies ist ein Vorteil für die Auslegung von kommunalen MBR-Anlagen, da diese im Durchschnitt mit niedrigeren Filtrationsleistungen betrieben werden. So liegen die jährlichen Durchschnittswerte sowohl für die MBR Kaarst-Nordkanal als auch für die MBR-Konzen bei kleiner 10 l/m²h.

Tabelle-06: Betriebstechnische Auslegungsdaten des technischen Membion Moduls mit „Jet-Splash“-Geysir für den Demonstrationbetrieb in Simmerath

Auslegung Membion mit Geysir für Simmerath				
TS-Gehalt der Biologie	8,5 g/l	Sustainable Flux		
	Leistungsstufen:	Stufe-01	Stufe-02	Stufe-03
Permeatfluss (brutto)	[l/m ² h]	15,00	30,00	42,00
Permeatfluss (netto)	[l/m ² h]	14,00	29,00	40,00
resultierende Luftmenge pro Rechteckrohr (RR)	[Nm ³ /h RR]	0,50	1,50	3,00
Luftmenge pro m ² Membranfläche	[Nm ³ /m ² h]	0,03	0,08	0,17
Luftpuls-Intervall	[s]	50,4	16,8	8,4
Wasserüberstand über Modul	[cm]	2	2	2
Zusatz-Tiefe wegen Geysir	[cm]	30,0	30,0	30,0
Zusatz-Tiefe wegen Geysir-Luftverteiler	[cm]	8,0	8,0	8,0
Einblastiefe	[m]	2,25	2,25	2,25
Wirkungsgrad der Membranbelüftungs-Gebäse	[%]	51%	51%	51%
spezifischer Energiebedarf Membion	[kWh/m ³]	0,04	0,06	0,08
Energie-Einsparung bezogen auf MBR-Nordkanal	[%]	-79%	-69%	-56%
Energie-Einsparung bezogen auf MBR-Konzen	[%]	-92%	-89%	-84%
Referenzwerte:	Zenon in Kaarst	0,19 kWh/m ³		
	Kubota in Konzen	0,53 kWh/m ³		

Nach erfolgreichem Abschluss des Projektes ist vorgesehen, die Vorteile des Membion-Moduls mit „Jet-Splash“-Geysir in einer kompletten Straße einer laufenden MBR-Großanlage durch Austausch konkurrierender Hohlfaser-Membranmodule unter Wettbewerbsbedingungen zu demonstrieren. Besonders geeignet für diese Demonstration ist die Kläranlage Kaarst-Nordkanal, in der neben den Suez-Modulen (Zenon) seit August 2020 auch eine Straße mit chinesischen Modulen der Firma *Litree* betrieben wird, die ebenfalls ein Geysir-System in ihrem Modul integriert haben. Die Module der Firma *Litree* sind wie auch die von Suez Double-Header-Hohlfasermodule, bei denen die Membranen oben und unten eingespannt sind. Der Erftverband verfolgt mit Interesse die Entwicklungen des neuen Moduls bei Membion und ist interessiert, bei erfolgreichem Projektverlauf, zunächst eine Pilotierung von Membion in Kaarst zu starten.