

DBU-Abschlussbericht

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

Aktenzeichen AZ 37220/01



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

Inhalt:

	Seite
1. Zusammenfassung	5
2. Umweltrelevanz der Problemstellung	7
3. Erste Entwicklungen eines neuartigen Moduldesigns in Simmerath	9
4. Entwicklungsphase der neuartigen JetSplash®-Technologie	10
5. Demonstrationskläranlage Simmerath	14
6. Ergebnisse des technischen Membranmoduls MSG500 im Betrieb	20
7. Biologische Reinigungsleistung in Simmerath	25
8. Chemische Reinigung der Membranmodule	27
9. Vergleich von MSG-500 und MSH-500	34
10. Verifizierung und Ausblick	36

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

- Bild-01: Vergleich Kläranlagentechnologien
- Bild-02: MBR-Demonstrations-Projekt Simmerath (DBU-AZ-34834-01)
- Bild-03: Betriebsergebnisse des Membion MSH-500 Moduls in Simmerath
- Bild-04: Geysir-System von Membion
- Bild-05: Konzeptionierung Modulrahmen
- Bild-06: Aufbau des Geysirs
- Bild-07: Prüfen des neuartigen Luftverteilsystems in der Produktion
- Bild-08: Membion Baukastensystem
- Bild-09: Luftbildaufnahme Kläranlage Simmerath
- Bild-10: Einbindung der Demonstrationskläranlage in die konventionelle Großkläranlage
- Bild-11: Feinrechen im Zulauf der MBR-Demonstrationsanlage
- Bild-12: Belebungsbecken der MBR-Demonstrationsanlage
- Bild-13: DBU-Demonstrations-Projekt (AZ 34834-02)
- Bild-14: Einbau des technischen Membion Moduls
- Bild-15: Go-Pro Aufnahme der Belüftung des Membion-Moduls in Klarwasser zur Prüfung des neuartigen Luftverteilkanaals
- Bild-16: Betriebsdaten Membion-MBR Simmerath
- Bild-17: Betriebsdaten Membion-MBR Simmerath November 2021
- Bild-18: Kohlenstoff-Abbau (CSB) im Projektzeitraum
- Bild-19: Stickstoff-Abbau (N_{ges}) im Projektzeitraum
- Bild-20: Leistungsmindernde Effekte
- Bild-21: Etablierung einer chlorfreien Variante nach *Wang et al.* 2020
- Bild-22: Oxone[®] Aktivierung mit Hilfe von Eisensulfat
- Bild-23: chemische Zwischenreinigung mit Eisen aktiviertem Oxone[®] und Zitronensäure
- Bild-24: Intensivreinigung mit Eisen aktiviertem Oxone[®] und Zitronensäure
- Bild-25: nachgeschaltete Intensivreinigung nur NaOCl
- Bild-26: MSG-500 nach Intensivreinigung mit allen 3 Reinigungschemikalien
- Bild-27: MSG-500 Intensivreinigung mit NaOCl und Zitronensäure
- Bild-28: MSG-500 nach Intensivreinigung mit NaOCl und Zitronensäure
- Bild-29: Ausbau des Moduls nach der Intensivreinigung

- Bild-30: Beschreibung der ETV-Verifizierung
- Bild-31: Förderprojekt Double Membion 02WQ1549A
- Bild-32: Energieverbrauch der Doppeldecker Module im Projektzeitraum
- Bild-33: Energieverbrauch im August bis September 2021 nach Optimierung von Prozessparametern
-
- 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

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 34834-02 wurde ein neuartiger Membranmodul mit JetSplash®-Technologie der Firma *Membion GmbH* erstmalig im technischen Maßstab auf der MBR-Demonstrationskläranlage in Simmerath getestet. Dabei war es das Ziel, die positiven Ergebnisse einer zuvor durchgeführten Pilotierung der neuartigen Belüftungstechnologie auf der Kläranlage Konzen insbesondere bezüglich des Energiebedarfs für die Modulbelüftung im technischen Maßstab zu verifizieren und ein Vergleich der beiden Modulsysteme mit und ohne JetSplash®-Belüftung zu dokumentieren.

Die erste Herausforderung des Vorhabens lag in der Konzeptionierung eines neuartigen Modul-Designs für eine sinnvolle und kompakte Etablierung der Membran- und Geysir-Elemente. Es erfolgte eine Optimierung des ursprünglichen Moduldesigns durch die Elimination der zuvor verwendeten, einzelnen Luft- und Permeatleitungen an den Membranelementen. Dies vereinfachte nicht nur den Aufbau und Einbau des Moduls vor Ort, sondern erleichterte ebenfalls den Zusammenbau der Membranelemente während der Produktion. Nach erster Funktionsprüfung des neuartigen Edelstahlrahmens, folgte die Umsetzung einer Serienproduktion der Membran- und Geysir-elemente. Dabei wurde die Herstellung der Membranfilter erstmalig in einer vollautomatischen 24/5 Produktion visualisiert und optimiert. Beide Aufgaben, die Konzeptionierung des neuartigen Moduldesigns sowie auch die automatisierte Produktion im 24/5 Betrieb der Membranblöckchen konnten zufriedenstellend umgesetzt werden.

Bei der Inbetriebnahme der Demonstrationsanlage in Simmerath traten zunächst einige Schwierigkeiten hinsichtlich der Steuerungstechnik zu Tage, die sich erst in einem Dauerbetrieb der Anlage bemerkbar machten. Eine besondere Herausforderung lag in der neuen Implementierung einer automatisierten Geysirpuls-Messung auf der Anlage sowie die Einbindung in die Steuerungstechnik. Es stellte sich heraus, dass durch Schiefelage des Modulgestells eine ungleichmäßige Pulsation der Geysire stattfand. Eine waagerechte Ausrichtung des Edelstahlrahmens ist essenziell, um eine gleichmäßige Luftverteilung im Luftverteilkanal zu gewährleisten.

Bei dem danach realisierten Betrieb des ersten technischen Moduls MSG-500 zeigte sich erfreulicher Weise, dass die Verifizierung der Energieeinsparung auch im technischen Maßstab erreicht werden konnte: nach kurzer Einfahrphase wurde eine Energieeinsparung von bis zu 70 % für die Modulbelüftung erreicht bezogen auf den als Referenzwert zugrunde gelegten optimierten Energiebedarf für die Modulbelüftung auf der Kläranlage Kaarst-Nordkanal von 0,19 kWh/m³. Dieser Wert entstammt dem Ende 2015 veröffentlichten Abschlussbericht eines Projekts, das im Rahmen eines BMU-Innovationsprogramms gefördert wurde. Vergleichend zu den Plattenmodulen auf der MBR-Anlage Konzen wird im technischen Maßstab eine Energieeinsparung von bis zu 90 % erreicht.

Interessant an den hier dargestellten Ergebnissen 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 geringfügig 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.

Um einem vorwiegend adsorptiven Membranfouling entgegenzuwirken, werden die Membranen in MBR-Anlagen regelmäßig einer chemischen Reinigung unterzogen. Dabei kommt üblicherweise neben Zitronensäure vor allem auch Natriumhypochlorit zum Einsatz, das jedoch aufgrund der damit verbundenen AOX-Bildung aus Umweltgesichtspunkten als kritisch einzustufen ist. Im Rahmen des Betriebs der Demonstrationsanlage wurde daher nach Vorversuchen aus AZ34834-01, die Verwendung eines alternativen, umweltverträglichen Reinigungsmittels auf Oxone®-Basis implementiert. Des Weiteren wurde erstmalig eine Intensivreinigung mit dem neuartigen Reiniger durchgeführt. Hiermit konnten vergleichbare Reinigungserfolge wie mit Natriumhypochlorit erzielt werden.

Ursprünglich war eine ETV-Verifizierung („environmental technical verification“) für das Membransystems mit JetSplash®-Technologie geplant. Jedoch war zu Projektbeginn nicht klar, dass für eine erfolgreiche Verifizierung ein standardisierter, technischer Modul mit allen Serienteilen vorhanden sein muss, inklusive aller technischen Detailzeichnungen, die dann auch im Nachhinein nicht mehr geändert werden dürfen, da ansonsten die Verifizierung ungültig wird. Vor diesem Hintergrund zeigte sich im Laufe des Projektes immer mehr, dass eine ETV-Verifizierung während des Projektes noch nicht sinnvoll war, da einzelne, kleinere Details im MSG500-Modul noch einer finalen Optimierung unterlagen. Aus diesen Gründen sollte die ETV-Verifizierung auf das Projekt-Ende verschoben werden. Doch im letzten Halbjahr des Projektes wurde uns dann von Seiten der Verifizierungsinstitution mitgeteilt, dass das ETV-Programm aufgrund von Einsparmaßnahmen nicht mehr von der EU finanziert wird, so dass sich eine weitere Verfolgung der ETV-Verifizierung erübrigte.

Der Schwerpunkt des Projektes wurde stattdessen auf die betriebstechnische Optimierung gelegt und hier zusätzlich auf eine Optimierung der chemischen Reinigung.

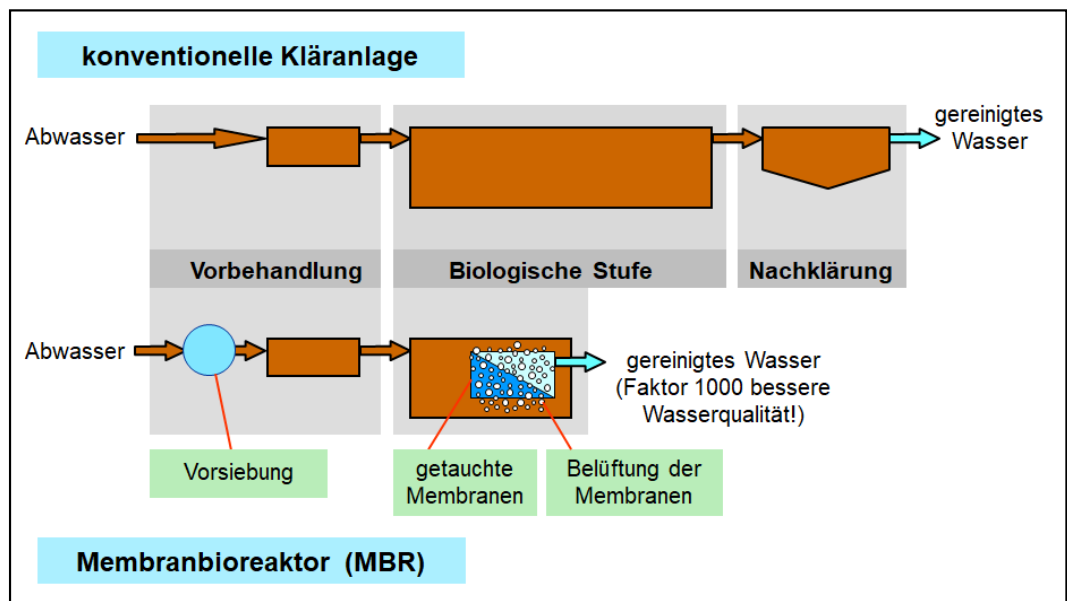
2. Umweltrelevanz der Problemstellung

Das beantragte Projekt mit dem Titel „Effiziente Energieausnutzung in Membranbioreaktoren durch Einsatz eines innovativen Membranfilters - Verifizierung der Energieeinsparung im technischen Maßstab“ (AZ34834-02) 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 Größe der biologischen Stufe der Kläranlage deutlich.
- insgesamt um etwa 50 % reduzierter Platzbedarf von Membranbelebungsanlagen im Vergleich zu konventionellen Kläranlagen bei deutlich verbesserter Wasserqualität.

Bild-01

Vergleich
Kläranlagen-
technologien



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. Doch obwohl in den letzten Jahren mit steigender Umsetzung der MBR-Technologie die Membranpreise und damit auch die Investitionskosten von MBR-Anlagen deutlich gesunken sind, liegen die Gesamtkosten in den

meisten Fällen noch immer über denen von konventionellen Kläranlagen. Grund dafür sind zwei konstruktionsbedingte Kostentreiber bisheriger Membranfilter für MBR-Anlagen:

- deren hoher Energiebedarf für die Luftspülung der Membranfilter und
- deren Erfordernis einer intensiven Vorbehandlung des Abwassers.

Diese Nachteile sind bei den verschiedenen am Markt etablierten Modulbauformen unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei Plattenmodulen wird eine Vielzahl an Membranplatten mit definiertem Abstand in einem Modulgehäuse untergebracht und in den Schlamm der Kläranlagen abgetaucht. Dadurch entstehen separate, parallel geschaltete, innendurchströmte Strömungskanäle für den Schlamm, die sich jedoch im Betrieb als „verfahrenstechnisch instabiles System“ erweisen, da eine beginnende Verblockung in einem der Strömungskanäle in diesem zu einer Senkung der Strömungsgeschwindigkeit und infolge dessen zu einer Beschleunigung der Verblockung führt. Um diesem Problem entgegenzuwirken, sind generell konstant hohe Strömungsgeschwindigkeiten erforderlich, die in der Regel durch eine konstante, relativ hohe Luftzufuhr realisiert werden, was einen vergleichsweise hohen Energiebedarf für Plattenmodule zur Folge hat.

Hohlfasermodule sind strömungstechnisch grundsätzlich anders aufgebaut. Das gereinigte Abwasser wird auf der Innenseite von dünnen Hohlfasermembranen abgeführt, die zu Bündeln oder Reihen zusammengefasst und in den Schlamm abgetaucht werden. Im Außenbereich der Hohlfasermembranen entsteht dadurch ein zusammenhängender Strömungsraum, wodurch das Problem der „verfahrenstechnischen Instabilität“ konstruktiv vermieden wird. Dies hat zur Folge, dass bei der Modulspülung die dauerhafte Luftzufuhr durch eine deutlich energiesparendere intermittierende Luftzufuhr ersetzt werden kann. Die einfachste Form der Herstellung von Hohlfasermodulen ist es, die Membranen oben und unten im Modul zu fixieren. Man spricht in diesem Fall von Double-Header-Modulen, die den weitaus größten Teil der kommerziell erhältlichen Hohlfasermodule ausmachen. Diese haben jedoch konstruktiv bedingt einen anderen gravierenden Nachteil: Durch die Belüftung der Module wird regelmäßig Schlamm von unten nach oben durch die Membranbündel gepumpt. Dabei wirkt die obere, in der Regel dicht gepackte Fixierung der Membranen wie ein Feinst-Rechen, in dem sich alle Haare und faserigen Verbindungen aus dem Schlamm festsetzen. Man spricht von sogenannten „Verzopfungen“, ein fortschreitendes Problem, durch das die freie Membranfläche im Filter irreversibel abnimmt. Um die Verzopfungs-Problematik zu beherrschen, ist bei doppelseitig eingespannten Hohlfasermodulen daher in der Regel eine Feinsiebung des Abwassers mit Maschen- oder Lochweiten von ca. 1,0 Millimeter oder kleiner erforderlich. Dies führt zu deutlichen erhöhten Betriebs- und Investitionskosten.

Plattenmembran-Systeme haben in der Regel konstruktiv eine deutlich geringere Verzopfungs-Neigung und benötigen daher nur eine geringere Vorbehandlung des Abwassers. Darum können bisherige MBR-Anlagen mit Plattenmodulen nicht ohne Implementierung einer zusätzlichen Feinsiebung durch Hohlfasermodule ersetzt werden.

Die Firma Membion hat einen neuartigen Membranfilter für den Einsatz in Membranbioreaktoren entwickelt der beide Vorteile der Hohlfaser- und Plattenmodule vereint und gleichzeitig eine signifikante Reduzierung des Energiebedarfs ermöglicht.

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

Damit der hier dargestellte Abschlussbericht auch eigenständig ohne den Abschlussbericht des vorherigen Projekts AZ-34834-01 stehen kann, werden einzelne Wiederholungen wie die Entwicklung des MSH-500 Moduls, der Aufbau von Simmerath und die Erklärung der chemischen Zwischenreinigung erneut wiedergegeben.

3. Erste Entwicklungen eines neuartigen Moduldesign in Simmerath

Die Firma *Membion GmbH*® hat einen neuartigen Hohlfasermodul entwickelt, der die beschriebenen Nachteile bisheriger Membranfilter vermeidet. Nach dem „Single-Header“-Prinzip werden die einzelnen Hohlfasern nur noch an ihrer unteren Seite in einem Fußelement (Header) fixiert, über das gleichzeitig das Filtrat abgezogen wird, während sie oben einzeln verschlossen, frei im zu filtrierenden Schlamm schweben. An das Fußelement oben anschließend wird ein Rechteckrohr aufgesetzt, das die Hohlfasermembranen eines Bündels umgibt. Dadurch entsteht bei Belüftung des Bündels eine ausschließlich nach oben gerichtete Strömung des Schlamms und alle Haare sowie faserigen Verbindungen werden frei nach oben von den Membranen abgestreift und sicher aus dem Modul ausgetragen. Gleichzeitig ist der gesamte Strömungsraum des Moduls unempfindlich gegen Verblockungen durch Schlammteilchen oder Störstoffe gestaltet. Dadurch wird der Aufwand für die Vorbehandlung des Abwassers auf Lochbleche mit einer Lochgröße von 5 - 6 mm erheblich reduziert, wodurch die einzusetzenden Aggregate deutlich kleiner und preisgünstiger werden. Bild-01 zeigt den ersten technischen Betrieb des Membion Moduls MSH-500 in einem DBU geförderten Demonstrationsprojekt AZ37220-01.

Bild-02:

MBR-
Demonstrations-
Projekt
Simmerath
(DBU-AZ
34834-01)

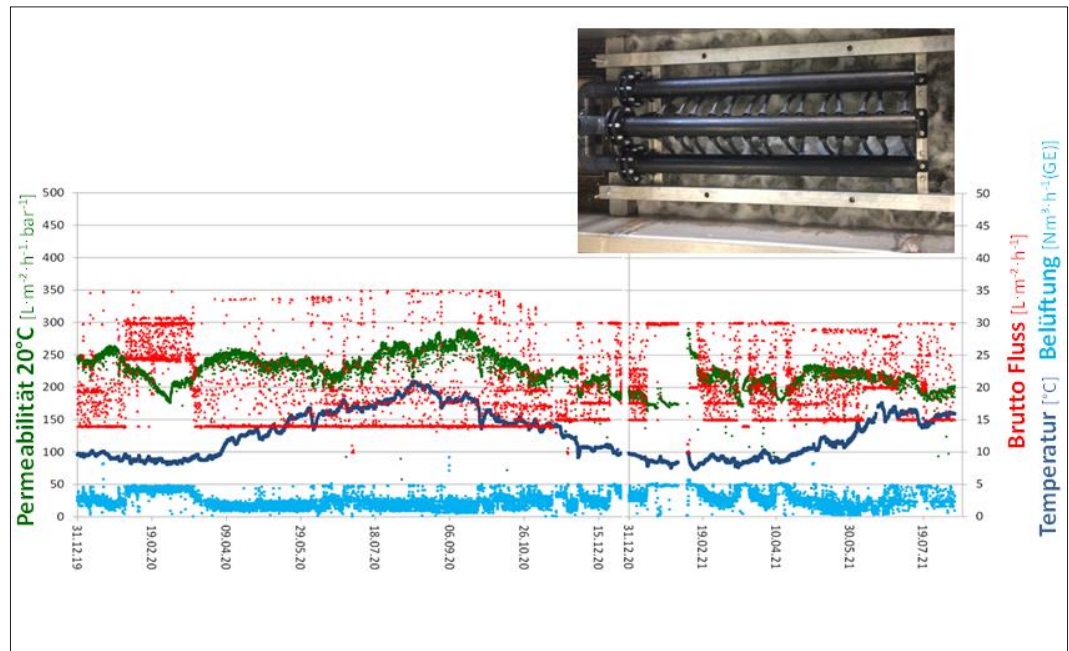


Seit Ende 2019 ist der Membion MSH-500 Modul in Simmerath in Betrieb, um die Vorteile des Modulsystems im technischen Maßstab zu verifizieren. Der erste Entwurf von MSH-500 besitzt ein

Fußelement mit zwei Rohrleitungen, eines für die Luftzufuhr und das zweite für den Permeatabzug. Der technische Modul hat eine Membranfläche von 500 m² und besteht aus zwei Modulgestellen mit jeweils 14 Membranelementen. Bild-03 zeigt eineinhalbjährige Betriebsergebnisse des technischen Moduls von Dezember 2019 bis September 2021.

Bild-03:

Betriebs-
ergebnisse
des Membion
MSH-500
Moduls
in Simmerath



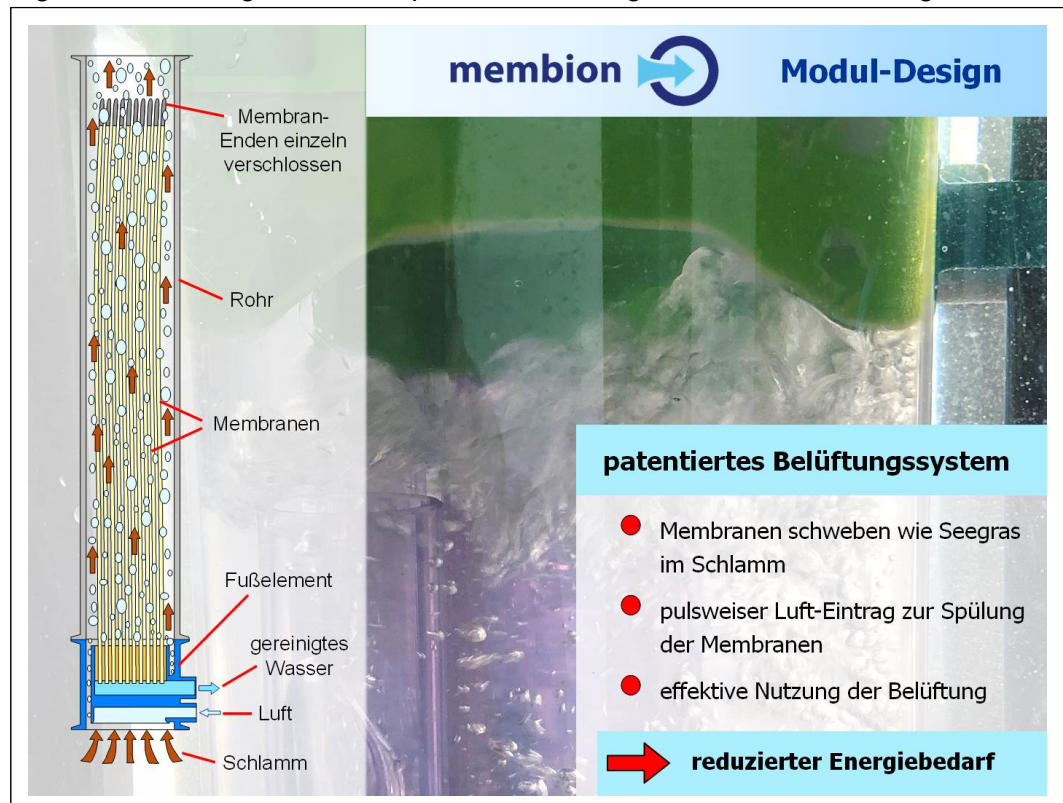
Die Betriebsweise des MSH-500 Moduls erfolgt mittels zyklischer Belüftung. Bei Spitzenflüssen wird ein 12/12 Sekunden an und aus Zyklus der Belüftung gefahren. Bei niedrigen Flüssen ist das Belüftungsintervall kleiner, hier wird alle 36 Sekunden der Modul für 12 Sekunden belüftet. Nach 15 Monaten Betriebsdauer ist der Modul einmalig intensiv gereinigt worden und anschließend weiterhin stabil gelaufen. Der Betrieb des MSH-500 Moduls zeigt eine Energieeinsparung zwischen 17 % und 37 % im Vergleich zu den „Double-Header“-Hohlfasermodule in Kaarst-Nordkanal mit 0,19 kWh/m³ und eine 74 - 77 % Steigerung des Energiebedarfs im Vergleich zu den Plattenmodulen in der Großkläranlage Konzen. Als Referenzwert wurde der Energiebedarf für die Belüftung der Membranmodule auf der Kläranlage Nordkanal herangezogen, der einem Ende 2015 veröffentlichten Abschlussbericht eines im Rahmen des BMU-Innovationsprogramms geförderten Projektes über die Optimierung des Energiebedarfs auf der MBR-Kläranlage-Nordkanal entnommen wurde (DRENSLA, K, 2015).

3. Entwicklungsphase der neuartigen JetSplash®-Technologie

Der Durchbruch hinsichtlich einer weiteren Reduktion des Energiebedarfs gelang dann durch die Entwicklung einer völlig neuen Spültechnik der Membion-Membranmodule, der sogenannten „JetSplash®“-Technologie auf der Pilotanlage Konzen, Eifel. Während klassische MBR-Module – wie auch die erste Version des Membion-Moduls - lediglich die Scherwirkung von Luftblasen im Schlamm zur Spülung der Membranen ausnutzen, arbeitet die „JetSplash®“-Technologie zusätzlich mit einer durch einen spontan expandierenden Luftpuls beschleunigten Wassersäule und generiert

dadurch eine deutlich effektivere und energiesparendere Spülung der Membranen. Der allgemeine Aufbau des neuartigen Modul-Designs mit „JetSplash®-Technologie“ wird in Bild-04 dargestellt.

Bild-04:
Geysir-
System von
Membion

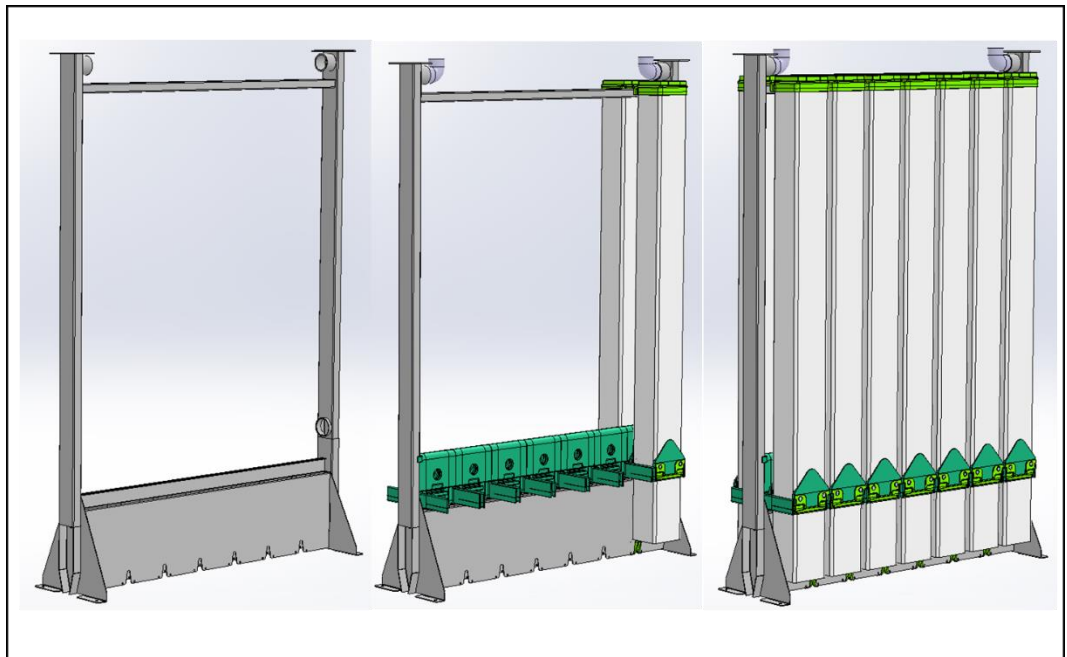


Dabei wird zunächst ein konstanter Luftvolumenstrom in ein Luftreservoir unterhalb des Membranfilters, einen sogenannten „Geysir“, eingeleitet, der unten direkt an das Fußelement des Membranfilters anschließt (Bild-04). Sobald der Geysir gefüllt ist, entleert er sich über das Prinzip kommunizierender Röhren schlagartig in das seitlich geschlossene Hüllrohr des Membranbündels. Durch die spontane Expansion des Luftpulses innerhalb des ummantelten Membranbündels wird die komplette Flüssigkeit im Außenbereich der Hohlfasermembranen innerhalb von ca. 1,5 Sekunden massiv nach oben beschleunigt, bevor der aufsteigende Luftpuls die Membranen abschließend reinigt. Diese Kombinations-Spülung aus beschleunigter Wasser-(Schlamm)-Säule und anschließendem Luftpuls hat einen extrem effektiven Spüleffekt auf die Membranen.

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 sicherstellt. Das neue Geysir-System wurde von Membion im Oktober 2019 zum Patent angemeldet.

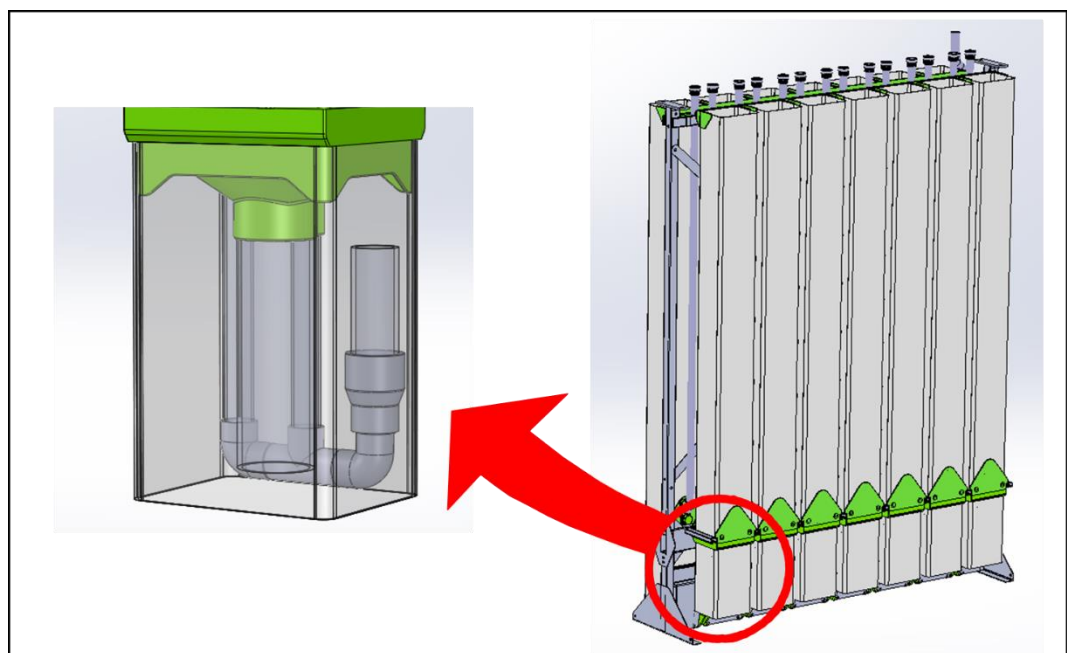
Der erste Modul MSH-500 ohne JetSplash®-Technologie besitzt am Fußelement zwei Rohrleitungen, eines für die Luftzufuhr und das zweite für den Permeatabzug. Eine Herausforderung innerhalb des Projektes war die Konzeptionierung eines neuartigen Membion-Designs angepasst an die Jetsplash®-Technologie. Mit Hilfe des neuen Designs sollte eine einfachere Montage der Module im Betrieb ermöglicht werden. So kam es zu einer Elimination der einzelnen Rohrleitungen an jedem Membranelement. Stattdessen werden nun Luft- und Permeatleitungen aller Membranelemente gesammelt und im Edelstahlrahmen verbaut.

Bild-05:
Konzeptionierung
Modulrahmen



Im Zuge der Entwicklungen wurde ein erster Prototyp des neuartigen Edelstahlrahmens mit integrierten Permeatsammel- und Luftverteilkämen für die Anwendung in Simmerath realisiert. Der konstruierte Permeatsammelkanal dient gleichzeitig als Halterung der Membranelemente und der Geysirelemente am Edelstahlrahmen. Die Membranelemente werden mit Hilfe eines im Fußelement integrierten Permeatkanal-Anschlusselements-Prototypens in den Permeatsammelkanal angedockt (Bild 05).

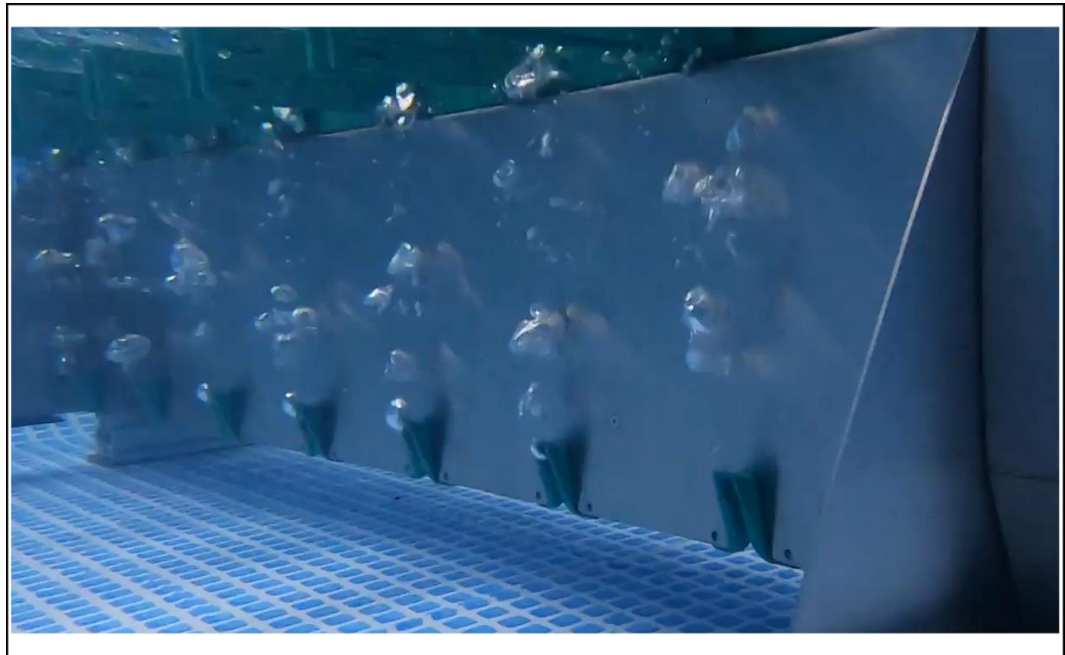
Bild-06:
Aufbau des
Geysirs



Auch die Montage des Geysir-Elementes erfolgt mit Hilfe eines Klickmechanismus unterhalb der Membranelemente am Permeatsammelkanal und damit im Edelstahlrahmen (Bild-06). Durch diese Entwicklung konnte eine kostengünstigere und platzsparendere Alternative zum alten Design geschaffen werden. Die Funktionsweise der Luftverteilung im Luftverteilkanal des neuartigen Edelstahlrahmens wurde vor dem Einbau in Simmerath in der Produktion erstmalig getestet. Bild-07 zeigt die blasenförmige Belüftung der Luftverteiler im Edelstahlrahmen ohne Geysireinbau beim Versuch in der Produktionshalle. Jede Position im Edelstahlrahmen wird gleichmäßig mit Luft beaufschlagt.

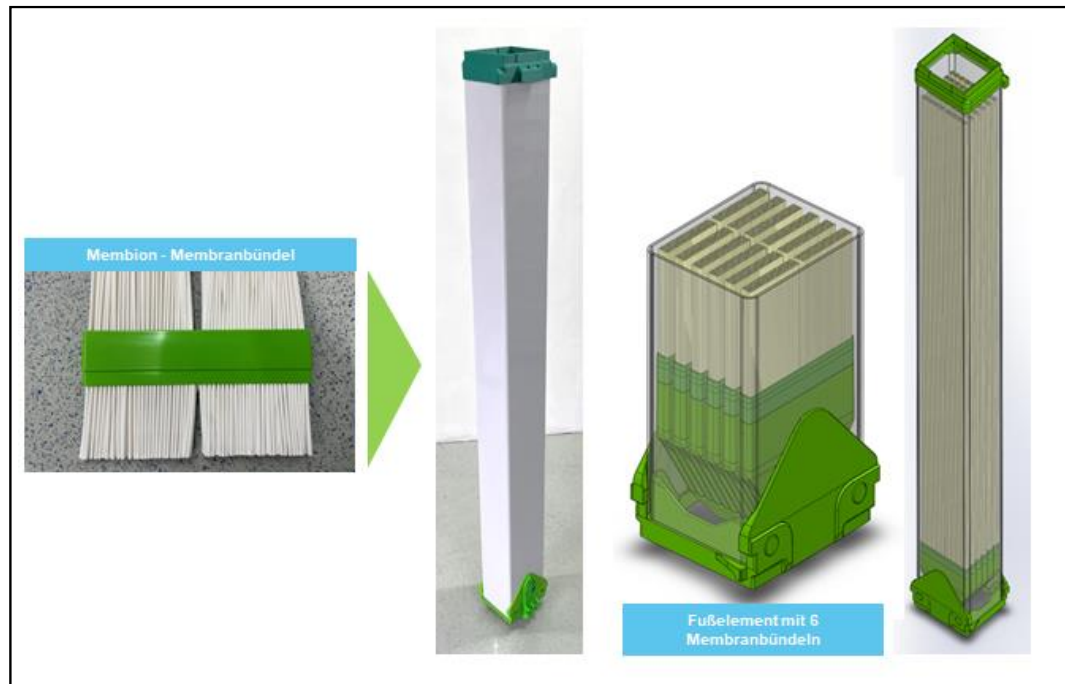
Bild-07:

Prüfen
des neuartigen
Luftverteiler-
Systems
in Produktion



Eine besondere Herausforderung parallel zur Konzeptionierung des Membion-Moduls mit „JetSplash®“-Technologie lag in der Entwicklung einer automatisierten Produktionstechnologie der Membraneinheiten, bei der neben der Endlos-Produktion der Membranen insbesondere das Potting der Membranen sowie das einseitige Verschließen der freien Faserenden automatisiert erfolgen. Auch diese Produktionstechnologie wurde von Membion patentiert. Sie ermöglicht schon bei geringen Produktionskapazitäten eine platzsparende und automatisierte Produktion der Membranelemente und ist damit geeignet für eine einfache Skalierung der Produktion. Mittlerweile läuft ein erster Prototyp einer solchen, von Membion entwickelten und automatisierten Produktionsanlage im 24/5-Betrieb. Bild-08 veranschaulicht die Entstehung eines Membranelements aus dem automatisierten Produktionsprozess.

Bild-08:
Membion
Baukasten-
system

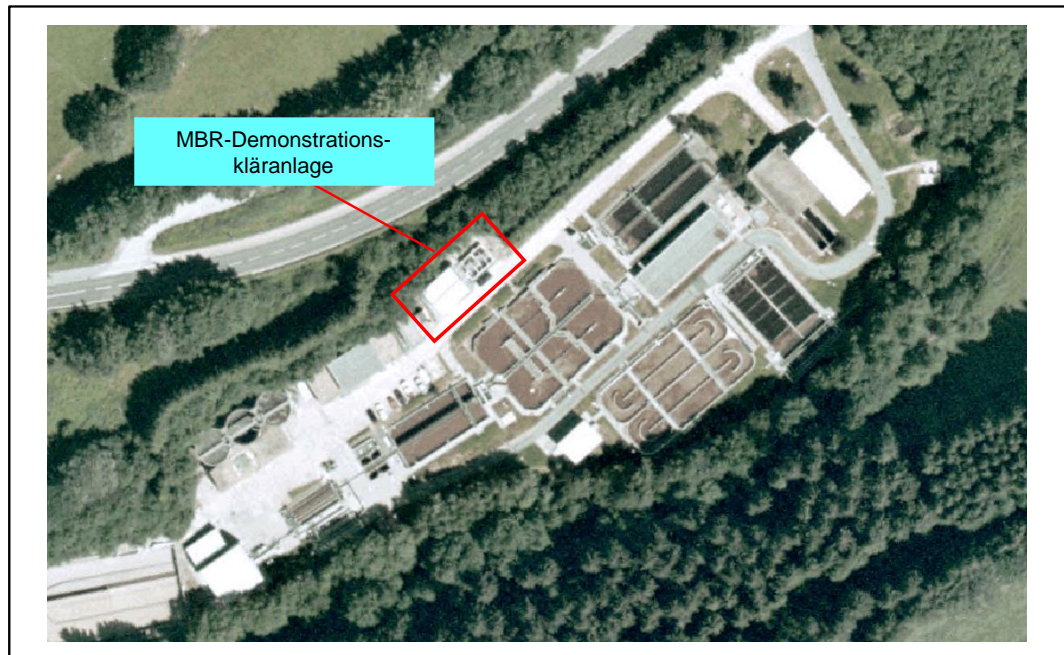


Die für die Projekte verwendeten Membranelemente aus der automatisierten Produktion haben alle die gleiche Größe. Eine Höhe von 1,8 m mit einer Membranfläche von 18 m². Die hergestellten Membranbündel werden zu sechst in ein Fußelement zusammengefasst, dem Membranelement. Alle Membranmodule von Membion sind nach einem Baukastensystem aus diesen Membranelementen aufgebaut. Das Geysir-Element der neuartigen „JetSplash[®]“-Technologie wird im Single-decker Prinzip unter einem Fußelement fixiert. Für den Erbau des neuartigen Membion-Moduls mit JetSplash-Technologie wurden im Projektzeitraum 30 Membranelemente mit einer Membranfläche von 18 m² im 24/5-Betrieb vollautomatisch hergestellt. Anschließend erfolgte der manuelle Zusammenbau der Membranelemente und der Verklebung der Geysire in der Produktion und die abschließende Vereinigung dieser in den neu konstruierten Edelstahlrahmen.

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-09), die eine Anschlussgröße von 15.000 EW aufweist.

Bild-09:
Luftbild-
aufnahme
Kläranlage
Simmerath



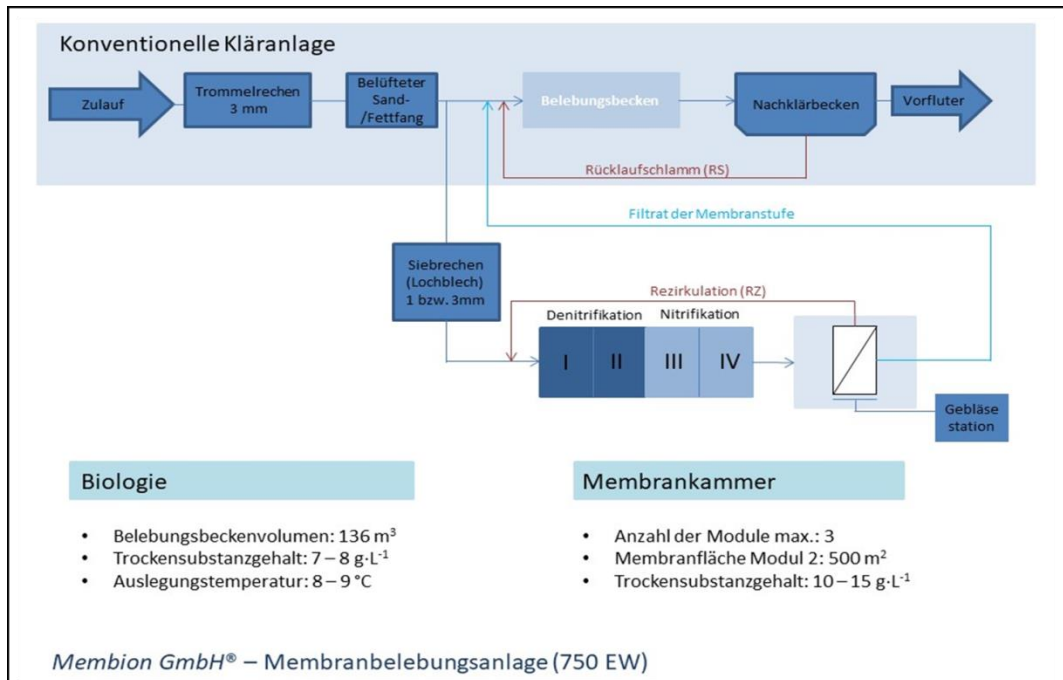
Die MBR-Demonstrationskläranlage wurde im Jahr 2002 im Rahmen eines vom damaligen NRW-Umweltministeriums (MUNLV) mit etwa 2,5 Mio. Euro geförderten Projektes von den Firmengründern von Membion geplant und gebaut, um dort zum ersten Mal die damals neuartigen PURON-Membranfilter im MBR-Betrieb zu testen, 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 bis 2019 ungenutzt still. Im Rahmen des vorherigen Projekts ist die Anlage reaktiviert und ein erster technischer Modul (MSH-500) geprüft worden

Bild-10 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 zwei Membranmodule mit insgesamt 1000 m² Membranfläche. Die Anlage wird 24 h am Tag vollautomatisch betrieben. Lediglich die chemischen Zwischenreinigungen werden manuell durchgeführt.

Bild-10

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-11).

Bild-11:

Feinrechen im Zulauf der MBR-Demonstrationsanlage

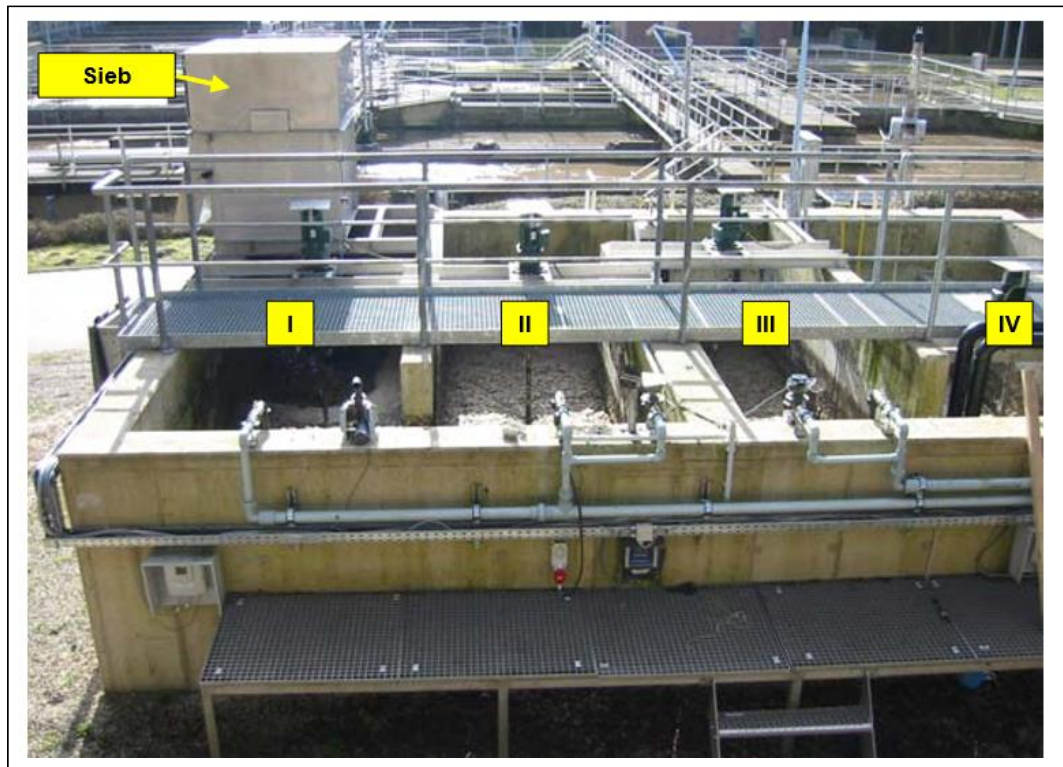


Der Zulauf zur Demonstrationskläranlage gelangt nach der Passage des Siebrechens in die Belebungsbecken der MBR-Demonstrationskläranlage, durchläuft anschließend die Membranstufe

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-12).

Bild-12:

Belebungs-
becken
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 der großen, konventionellen Kläranlage zu betreiben oder den Volumenstrom über das Volumen des Belebungsbeckens zu regulieren, um eine Membranstufe mit konstanten Volumenströmen betreiben zu können. Der neuartige MSG-500 Modul mit JetSplash®-Technologie wird parallel zu dem bereits bestehenden MSH-500 Modul zulaufproportional betrieben.

Aus den Werten der Pilotierung des Geysir-Systems ab Mitte 2019 auf der Pilotanlage Konzen bei 30 l/m²h Brutto-Permeatfluss, sowie aus den Critical-Flux-Tests für geringere und höhere Luftvolumenströme wurden die in Tabelle-02 dargestellten Auslegungsdaten für den Betrieb eines technischen Moduls mit „JetSplash®“-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-02: Auslegungsparameter der Demonstrationskläranlage 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-Luftverteiler	[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		

In Stufe 1 - 3 soll die Membrankammer mit unterschiedlichen Volumenströmen beaufschlagt werden und jeweils für 1800 s filtrieren. Anschließend erfolgt eine 60 s lange Relaxationsphase. Der vorhandene Filtrationszyklus besteht aus Filtrationszeit und Modulrelaxation. Während beider Zyklus-Abschnitte erfolgt eine kontinuierliche Modulbelüftung mit Hilfe der JetSplash®-Technologie. In Stufe-01 erfolgt die Auslegung des Moduls mit einem Permeatfluss von 15 l/m²/h, was einem Volumenstrom von 7 m³/h entspricht. Hier wird alle 50 s ein Geysir-Puls zur Spülung der Membran mit Luft eingetragen. Stufe-02 wird mit einem Volumenstrom von 15 m³/h ausgelegt, was einem Permeatfluss von 30 l/m²/h entspricht. Hier folgt alle 17 s ein Geysir-Puls. Der maximale Volumenstrom des Moduls wird bei Stufe 3 auf 21 m³/h bzw. auf einen maximalen Permeatfluss von 42 l/m²/h festgelegt. Hier soll das Geysir-Puls Intervall bei 8 s liegen. Diese Ganglinie soll bei Regenwetterereignissen bzw. hohen Zulaufströmen verwendet werden. Entsprechend der verschiedenen Volumenströme und Belüftungsintensitäten ist ein spezifischer Energiebedarf von 0,04 – 0,08 kWh/m³ denkbar.

Während der Durchströmung der Membrankammer mit Belebtschlamm, durchströmt der 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, in denen eine Gesamt-Membranfläche von circa 1.000 m² installiert werden kann.

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 beiden Membranmodulen wird in einem Sammel tank zwischengespeichert und für die chemische Reinigung 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.

Für die Installation des neuartigen MSG-500 Moduls parallel zu MSH-500 ist im Rahmen des Projektes eine Anpassung der Mess- und Regelungstechnik erfolgt. So wurde in den ersten Projektmonaten eine Messtechnik installiert, um das Geysir-Pulsverhalten dokumentieren zu können. Coronabedingt kam es hier jedoch aufgrund von Lieferschwierigkeiten und personellen Engpässen zu Verzögerungen.

5. Ergebnisse des technischen Membranmoduls MSG500 im Betrieb

Ab April 2020 wurden als Vorarbeiten für die Installation eines zweiten technischen Moduls auf der Kläranlage Simmerath der Sollzulauf von 2,5 % langsam in 0,3 % Schritten auf 5 % gesteigert. Diese schrittweise Erhöhung des Zulaufvolumens sollte eine Adaption der Biologie auf die zusätzliche Belastung erleichtern. So konnte bei Betriebsbeginn des zweiten Moduls in Simmerath ein zulaufproportionaler Betrieb für beide Module aufrechterhalten werden. Ohne Belastungssteigerung der Biologie würden beide Module oft im Stand-By Modus verweilen und nicht die Schmutzwassermengen nach Bemessungssatz erreichen.

Im Rahmen des hier vorgestellten DBU-Projektes (AZ 34834-02) wurde ab Mai 2021 der MSG-500 Modul mit Geysir-Belüftung und einer Membranfläche von 500 m² installiert und in Betrieb genommen (Bild-13). Bild-14 zeigt den Einbau des Membion-Moduls mit transparenten Rechteckrohren in die MBR-Demonstrationskläranlage.

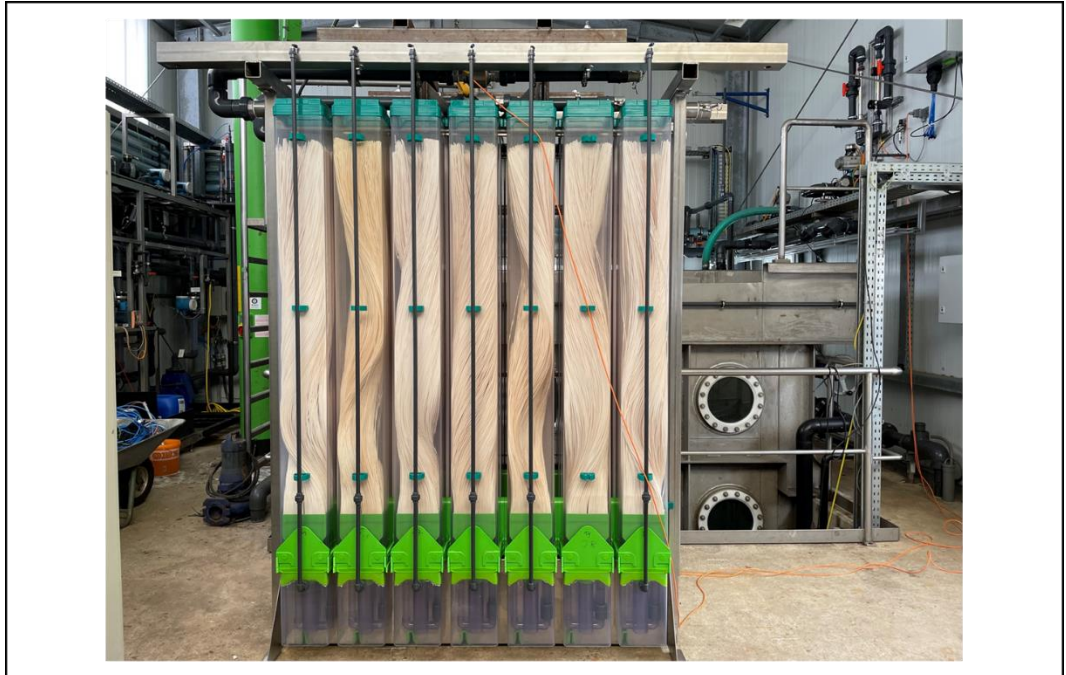
Bild-13:

DBU-
Demonstra-
tions-Projekt
(AZ 34834-02)



Bild-14:

Einbau des
technischen
Membion-
Moduls



Mit Hilfe des Deckenkrans auf der Kläranlage konnte der Modul in die externe Membrankammer abgelassen werden und mit Brauchwasser auf eine erste Funktion und die Dichtigkeit aller Anschlüsse geprüft werden. Bild-15 zeigt die Draufsicht des Moduls bei Belüftung in Klarwasser.

Bild-15:

Go-Pro Aufnahme
Der Belüftung des
Membion-
Moduls in
Klarwasser zur
Prüfung des
Neuartigen Luft-
verteilkanals



Zunächst wurde erneut die Funktionsweise des neu konstruierten Luftverteilkanals in Klarwasser getestet. Besonders die Luftverteilung in die einzelnen Geysire ist hierbei entscheidend. Wichtig war, dass alle Geysire regelmäßig pulsen und keine Undichtigkeiten der 3D-Druck-Teile innerhalb des

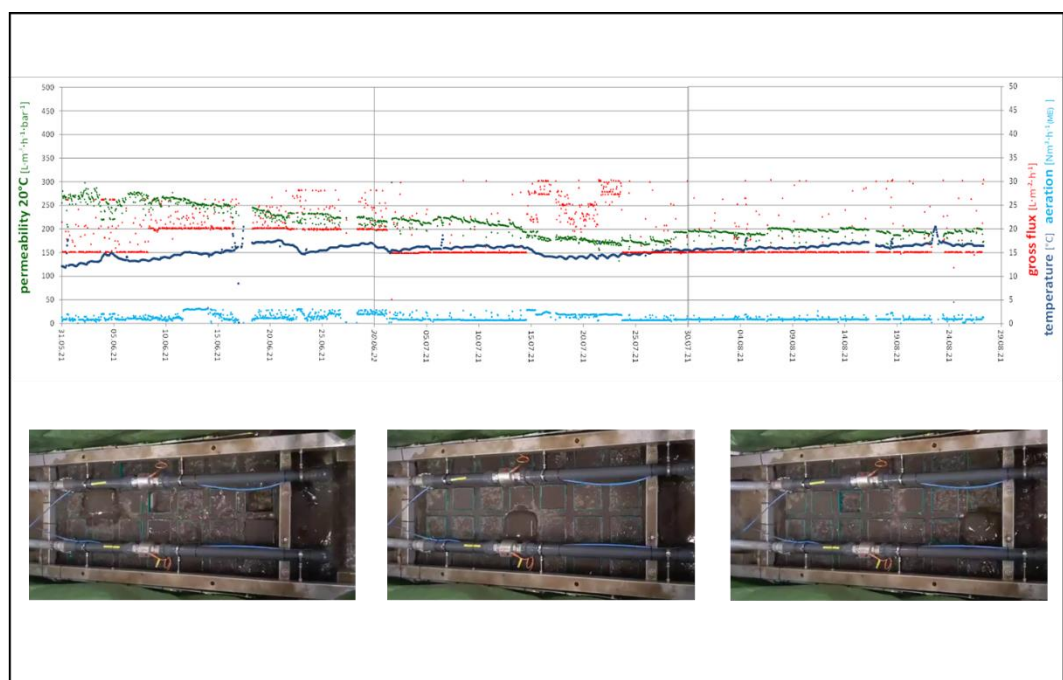
Kanals bestehen. Als Hilfsmittel wurde eine Gopro inklusive Teleskoparm verwendet, um Aufnahmen unter Wasser vom Luftverteilsystem zu machen.

Anschließend erfolgte die Inbetriebnahme-Phase der Module mit Belebtschlamm der Demonstrationskläranlage. Innerhalb der ersten beiden Monate (von Mai bis Juli) sinkt die Permeabilität und damit die Leistungsfähigkeit des Moduls auf eine Betriebspermeabilität von $200 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ ab. Dieser Abfall ist unter Membranherstellern bekannt und lässt sich entweder auf Einfahreffekte oder der Quellung der Membran zurückführen. Des Weiteren setzen sich vermutlich kleinere Poren am Anfang zu und nehmen nicht mehr am Filtrationsprozess teil.

Die Anlage lief nach Behebung der anfänglichen Schwierigkeiten mit der Steuerungstechnik im gesamten Untersuchungszeitraum mit stabilem Betriebsverhalten und sehr guten Ablaufwerten. Die Ablaufwerte werden in einem separaten Kapitel genauer erörtert. Bild-16 dokumentiert beispielhaft die Betriebswerte der Online-Datenerfassung hinsichtlich Fluss, Temperatur, Belüftungsintensität und Permeabilität des MSG-500 Moduls von Juli 2021 bis August 2021.

Bild-16:

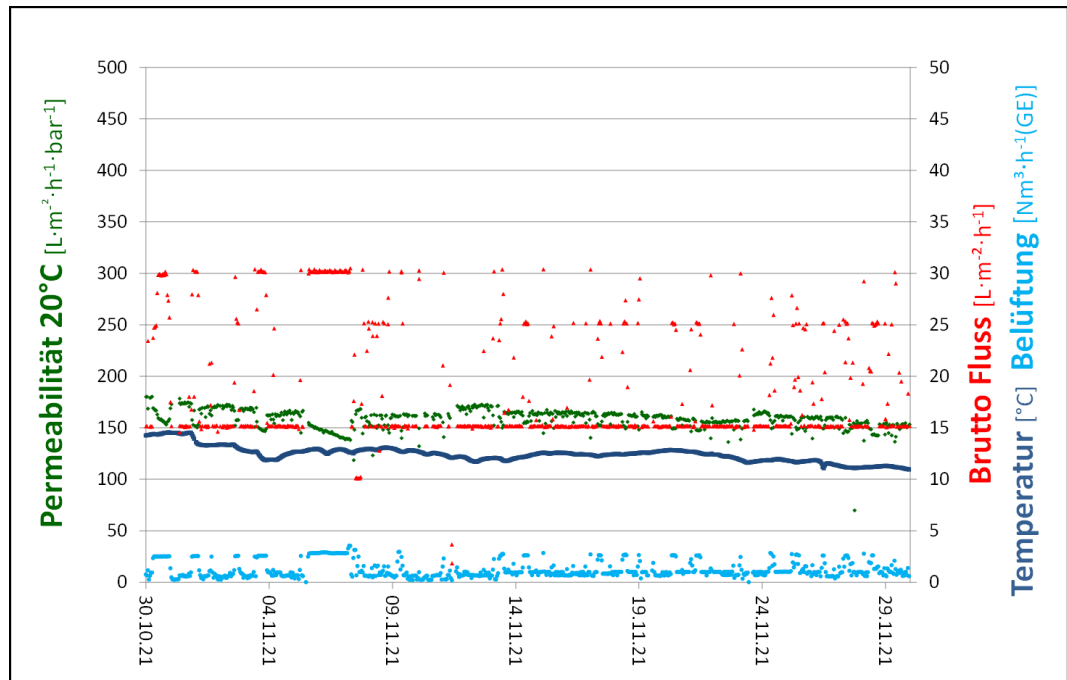
Betriebsdaten
Membion-MBR
Simmerath



Seit Mitte 2021 wird die Anlage dann zulauf-proportional, d.h. 5% des Zulaufs der großen Kläranlage Simmerath, gefahren. In den Sommermonaten dargestellt in Bild-16 kann die Betriebspermeabilität von $200 \text{ l}/\text{m}^2/\text{h}/\text{bar}$ sichergestellt werden. Selbst nach Regenwetterereignissen wie im Juli 2021 konnte der Modul sich vollständig erholen. Im späteren Projektverlauf kamen in den Winterperioden die kalten Abwasser-Temperaturen, die lange Zeit deutlich unter $10 \text{ }^\circ\text{C}$ lagen, kombiniert mit gleichzeitig lang anhaltenden Regen-/ Schneewetterereignissen als besondere Herausforderung hinzu. Durch Optimierung der Betriebsparameter und Einführung einer optimierten in-situ-Zwischenreinigung konnten sowohl die Durchsatzleistung gesteigert als auch die Permeabilität stabilisiert werden. Bild-17 zeigt Daten aus kälteren Monaten im November 2021. Trotz sinkender Permeabilität kann der Modul sich nach einer längeren Regenwetterphase erholen.

Bild-17:

Betriebsdaten
Membion-MBR
Simmerath
November 2021



Da der MSG-500 Modul einen ersten technischen Maßstab der neuartigen JetSplash®-Technologie darstellt, kam es im Laufe der Projektlaufzeit zu weiteren Anpassungsarbeiten besonders hinsichtlich der Modulgestaltung und Geysir-Belüftung durch Auffälligkeiten während des 24/7 vollautomatischen Betriebs. So wurden direkt zu Beginn die mittels 3-D Druck hergestellten Luftdüsen durch Spritzgussdüsen ausgetauscht. Außerdem wurde die Länge und die Form des Schlammzufuhrrohrs im Geysir durch verschiedene 3-D Druckaufsätze im Projektzeitraum variiert, um eine regelmäßige Geysirpulsung zu ermöglichen. Eine Variation von verschiedenen Prallplatten sowie unterschiedliche Luftverteiler innerhalb des Moduls waren Bestandteil der Untersuchungen. Durch Anpassungsarbeiten ist in der gesamten Projektlaufzeit ein optimaler Geysir für großtechnische Anwendungen realisiert worden. Aufgrund von geplanten bzw. aktuell laufenden Patentanmeldungen sowie Wahrung von firmeninternen Betriebsgeheimnissen können die Optimierungen nicht im Detail erläutert werden. Um die Geysirpuls-Zählung zu visualisieren und eine Unregelmäßigkeit der Pulsation innerhalb des Moduls festzustellen, sind regelmäßig manuelle Geysirpuls-Zählungen durchgeführt worden. Im Zuge dieser Entwicklungen wurde festgestellt, dass der Edelstahlrahmen im Betrieb absolut in Waage sein muss, da bei geringer Veränderung der Ausrichtung die Pulsation der Geysire innerhalb des Moduls stark variieren. So pulsen Module am Ende des Luftverteilkanaals bei Schiefelage deutlich öfters als Geysire direkt am Anfang des Luftverteilsystems. Durch die waagerechte Ausrichtung konnte das Problem behoben werden.

Im Projektverlauf wird die Anlage je nach anliegender Zulaufmenge (Trocken- oder Regenwetter) auf drei unterschiedlichen Leistungsstufen gefahren, deren betriebstechnische Auslegung in Tabelle-02 dargestellt sind. Je nach verwendeten Filtrationsfluss, wird eine unterschiedliche Belüftungsintensität zwischen 0,9 – 1,7 Nm³/h RR verwendet - wobei „RR“ bedeutet, dass sich die Luftmenge auf ein Rechteckrohr, d.h. auf eine Moduleinheit bezieht. Aus der resultierenden Luftmenge, der Einblastiefe und dem Gebläse-Wirkungsgrad berechnet sich der spezifische Energiebedarf für die Modulbelüftung bei den einzelnen Leistungsstufen. Dieser liegt bei niedrigen Flüssen von 15 l/m²/h bei 0,05 kWh/m³ und bei höheren Flüssen um bis zu 0,06 kWh/m³. Dabei unterscheiden sich die Energieeinsparungen nicht großartig bei unterschiedlich verwendeten

Flüssen. Die höchste Energieeinsparung liegt bei 15 l/m²/h und einer Belüftungsrate von 0,9 Nm³/h RR (Tabelle-03). Hier erreicht die Anlage vergleichend zu der MBR-Nordkanal 72 % Energieeinsparung. Vergleichend zu den Daten mit den Doppeldecker-Plattenmodulen in Konzen wird eine 91 % Energieeinsparung erreicht.

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

operational results MBR Simmerath with JetSplash		03.06.'21	20.06.'21	28.07.'21	
permeate flux (gross)	[l/m ² h]	27,3	15,0	25,1	
permeate flux (net)	[l/m ² h]	26,0	14,0	24,0	
air flowrate per rectangular tube	[Nm ³ /h pro RR]	1,79	0,90	1,70	
SAD _m - air flowrate per membrane area	[Nm ³ /m ² h]	0,10	0,05	0,09	
waterlevel above module	[cm]	5	5	5	
depth of air injection	[m]	2,15	2,15	2,15	
blower efficiency rate	[%]	0,65	0,65	0,65	
specific energy demand	[kWh/m ³]	0,057	0,053	0,059	
energy savings compared to ...					
... MBR-Konzen (plate module)		[%]	90%	91%	90%
... MBR-Nordkanal (hollow fibre module)		[%]	70%	72%	69%
benchmark value ...					
... MBR-Konzen		[kWh/m ³]	0,57	0,57	0,57
... MBR-Nordkanal		[kWh/m ³]	0,19	0,19	0,19

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

Energiebedarf ausgeführter MBR-Anlagen in Deutschland								
MBR-Anlage:		Nordkanal	Eitorf	Xanten-Wynen	Konzen	Woffelsbach	Seelscheid	Glessen
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						

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 des erwähnten BMU-Projektes entnommen wurde. Verglichen mit diesem Wert liegen die Einsparungen durch Membion im bisherigen Projektverlauf zwischen 70 % und 90 % - also im Bereich der Erwartungen aufgrund der zuvor durchgeführten Pilotierung der JetSplash-Technologie auf der Kläranlage Konzen.

7. biologische Reinigungsleistung in Simmerath

Die Betriebsleistung von MBR-Anlagen wird in der Regel anhand der Permeabilität, des Transmembrandrucks (TMP), der Fouling-Raten der Membranen, der Wasserqualität und in jüngerer Zeit auch anhand der Schlammfiltrierbarkeit bewertet. Im Folgenden wird genauer auf die Wasserqualität eingegangen. Dabei ist die eigentliche Reinigungsleistung des Abwassers hauptsächlich auf die Stoffwechseltätigkeit 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 mehrfach vom Zu- und Ablauf erhoben. Bild-18 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). Im Projektzeitraum wurde entweder MSH-500 oder MSG-500 beprobt. Die MSG-500 Stichproben sind als orange Punkte dargestellt. Da jedoch die biologische Reinigung oft im Zusammenhang mit der Biologie und weniger im Zusammenhang mit der Belüftung der Module steht, können die Ablaufwerte von MSH-500 genauso für die Beurteilung verwendet werden, wie die von MSG-500. Die Durchführung der Abwasseranalysen und damit ein Großteil der Arbeiten zur Beurteilung der biologischen Reinigungsleistung erfolgte nicht wie ursprünglich geplant durch das FIW sondern durch Membion.

Bild-18:
Kohlenstoff-
Abbau (CSB)
Im Projekt-
zeitraum

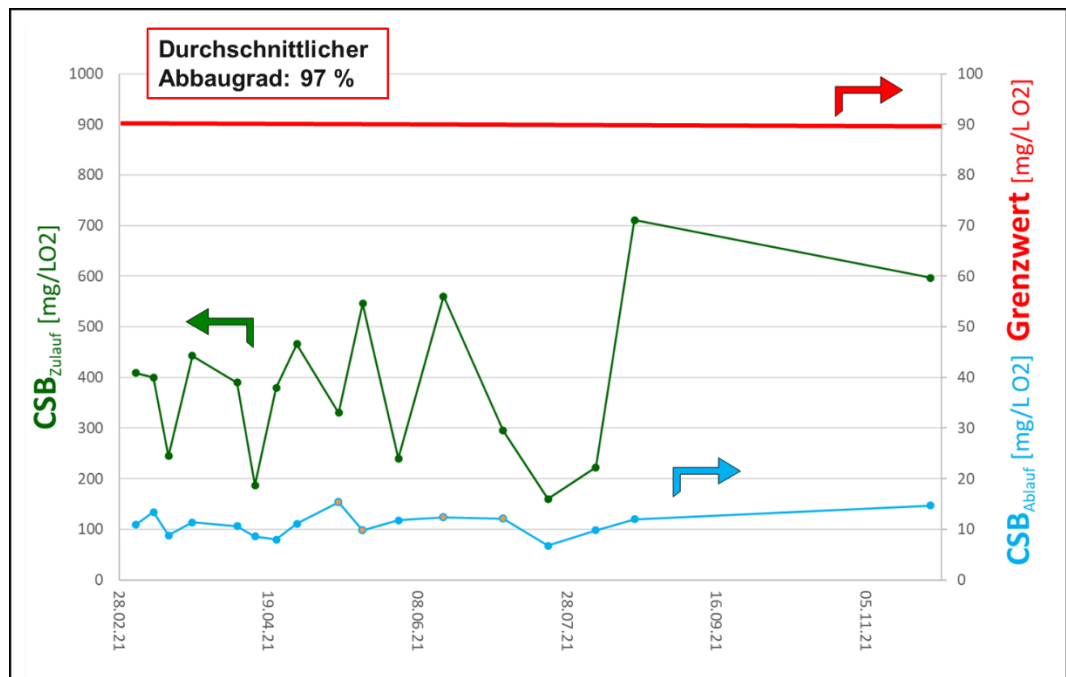
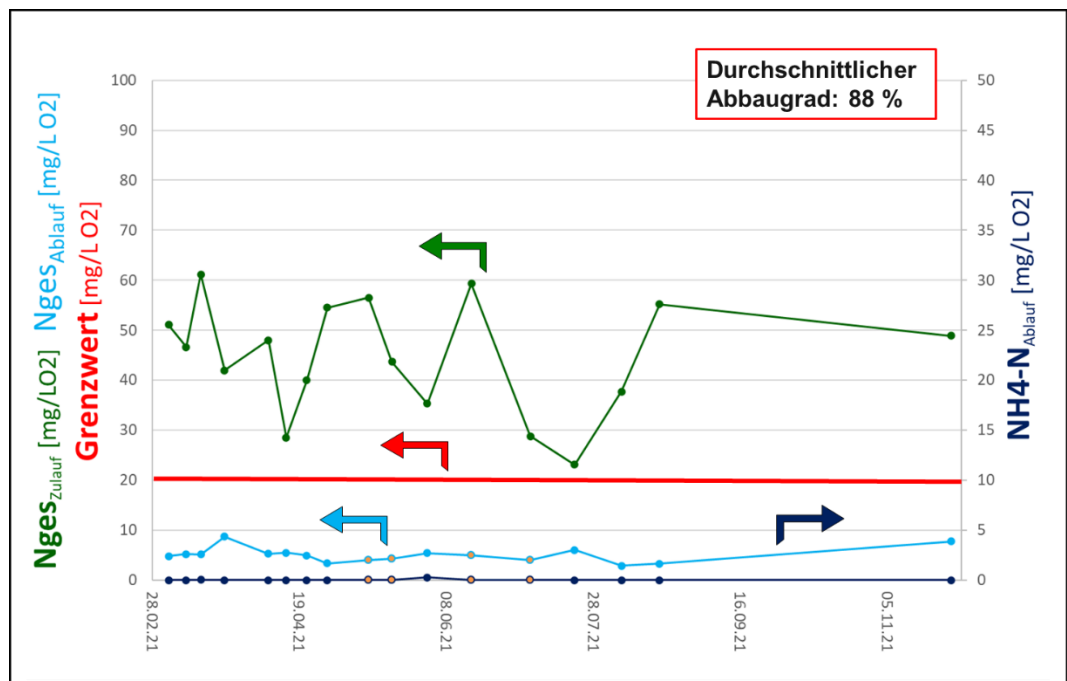


Bild-18 zeigt einen schwankenden Verlauf der CSB-Konzentrationen im Zulauf. So werden bei Trockenwetterereignissen deutlich höhere CSB-Zulaufkonzentrationen (700 mg/l O₂) beobachtet als bei Regenwetter (200 mg/l O₂). Aufgrund der personellen Engpässe seitens Membion in der Corona-Pandemie wurden die Analysen ab August 2021 pausiert. Um auch die kalten Temperaturen mit häufig verminderter Abbauleistung der Mikroorganismen in der Biologie beurteilen zu können, wurde Anfang November ein Referenzwert bei deutlich kälteren Temperaturen visualisiert. Hier zeigte sich jedoch keine schlechtere Abbauleistung als in den Sommermonaten. Der Kurvenverlauf der CSB-Ablaufkonzentrationen ist im Projektzeitraum nahezu konstant und schwankt zwischen 8 - 15 mg/l O₂. Die durchschnittliche CSB-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 97 %. 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 beider Module. Dies ist sowohl unabhängig von Zulaufschwankungen als auch von der Belastungssteigerung des Zulaufs oder der Belebtschlamm-Beschaffenheit.

Hinsichtlich des Stickstoffabbaus wurde die Demonstrationskläranlage Simmerath 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-10). Im Folgenden wird auf die Abbauleistung von Stickstoff genauer eingegangen (Bild-19).

Bild-19:
Stickstoff-
Abbau (N_{ges}) im
Projektzeitraum



Die Stickstoffkonzentrationen im Zulauf 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 schwanken die Stickstoffzulaufkonzentrationen zwischen 20 - 30 mg/l. Anschließend steigt mit zunehmenden Außentemperaturen und geringeren Zulaufmengen die Stickstoffkonzentration im Zulauf auf bis zu 60 mg/l an. Die im Beobachtungszeitraum gemessenen Ablaufkonzentrationen des Gesamtstickstoffs schwanken zwischen 3 - 9 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 aufgrund der geringen Abwassertemperatur kein Überwachungswert nach Abwasserverordnung existiert, wird der Grenzwert eingehalten (siehe Messung vom 10.11.2021). 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. Die durchschnittliche Stickstoffabbauleistung liegt bei 88 % 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 gewährleistet in Simmerath eine stabile Stickstoffelimination, da Nitrit und Ammonium, die als umweltbelastend gelten, vollständig aus dem Abwasser entfernt werden.

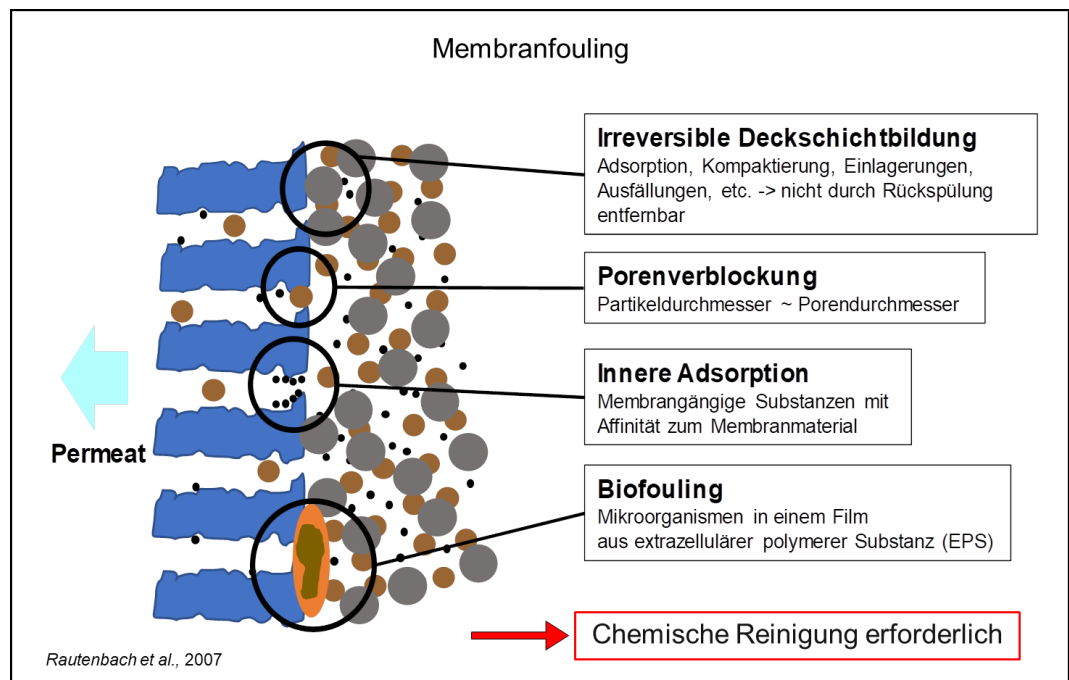
Grundsätzlich ist die Abbauleistung der Biologie in Kombination mit der Abtrennung der Feststoffe vom gereinigten Wasser im Projektzeitraum zufriedenstellend gelaufen. Es wurden sehr hohe Abbaugrade der einzelnen Parameter erzielt. Die MBR-Anlage erfüllt bis auf Phosphor, ohne dass gereinigtes Wasser 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.

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-20). Bei diesen leistungsmindernden Effekten ist Membranfouling eins der wichtigsten operativen Probleme bei der Anwendung von MBR-Anlagen.

Bild-20:
Leistungsmindernde
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.

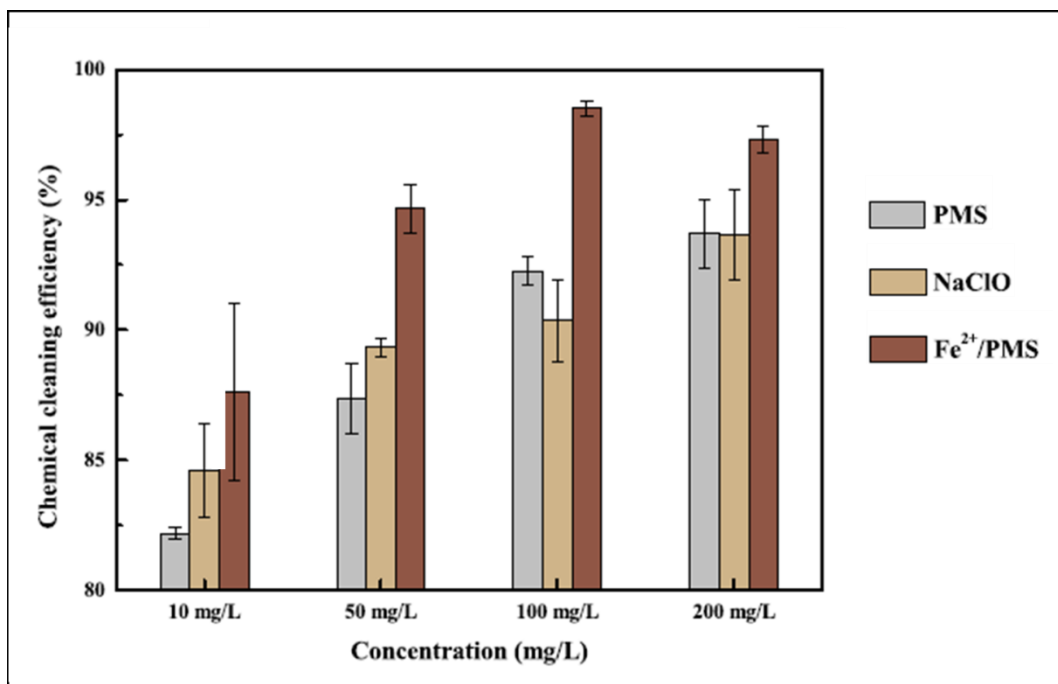
Die Wirksamkeit einer chemischen Reinigung ist unter anderem von der Reinigungschemikalie, der Temperatur, der Konzentration und der Durchführung der Reinigung abhängig. Chemische Reinigungen können entweder in Form von Zwischenreinigungen („in-situ“) in kurzen Abständen mit geringen Konzentrationen, 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 chlorefreien 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-21 zeigt die Ergebnisse aus der Literatur für den Vergleich der unterschiedlichen Reiniger im Labormaßstab.

Bild-21:

Etablierung einer chlorfreien Variante nach Wang et al. 2020

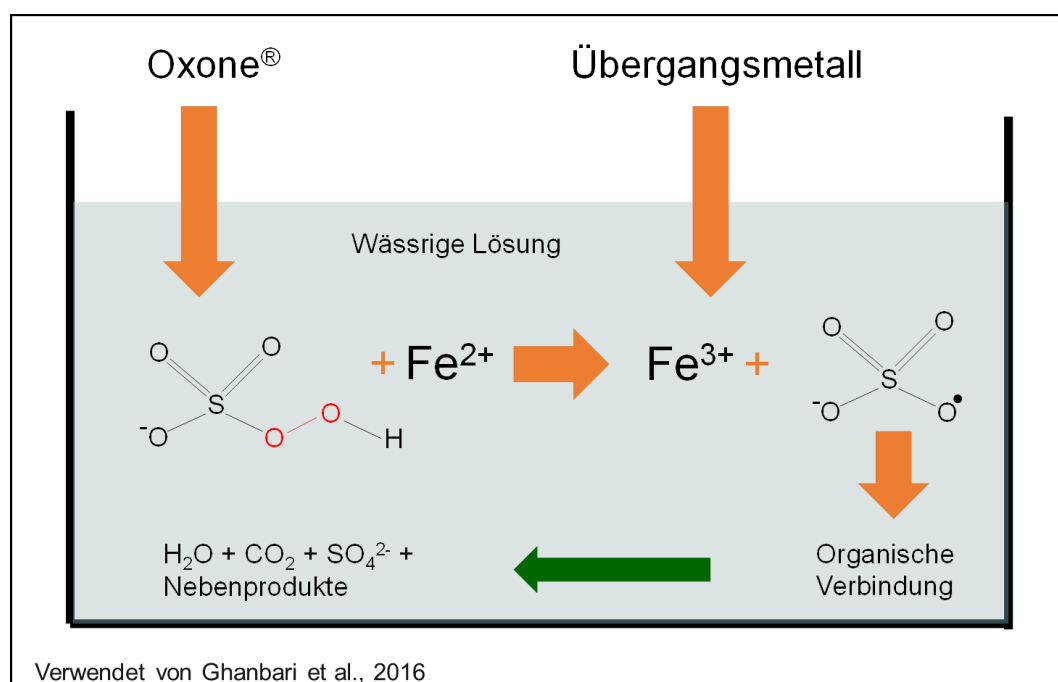


Der neue Reiniger basiert auf Kaliumperoxomonosulfat, oder auch Oxone® genannt, das in der Lage ist, Sulfatradikale zu bilden, die organische Verbindungen abbauen können. Dabei dient Oxone® als thermodynamisch starkes Oxidationsmittel. Allerdings ist die direkte Reaktion zu langsam, sodass Aktivatoren 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-22).

Bild-22:

Oxone® Aktivierung Mit Hilfe von Eisensulfat



Die Untersuchungen im Labormaßstab zeigten eine deutlich bessere Effizienzsteigerung von MBR-Membranen nach Fe²⁺ aktiviertem Oxone[®] als nach NaOCl (Bild-23), sodass aktiviertes Oxone[®] als umweltfreundliche Alternative zur Diskussion steht. Im vorherigen Projekt AZ34834-01 wurde der Reiniger als Anwendung auf die Membion-Membranen erfolgreich in Simmerath etabliert.

Die Wirksamkeit der Reinigungschemikalie wurde im Laufe des hier dargestellten Projekts ebenfalls geprüft. Bei chemischen Zwischenreinigungen werden die Membranen im Modul mit Permeat und geringen Chemikalienkonzentrationen in wöchentlichen Abständen zurückgespült, wobei die Durchführung der Reinigung zu Optimierungszwecken variiert wurde.

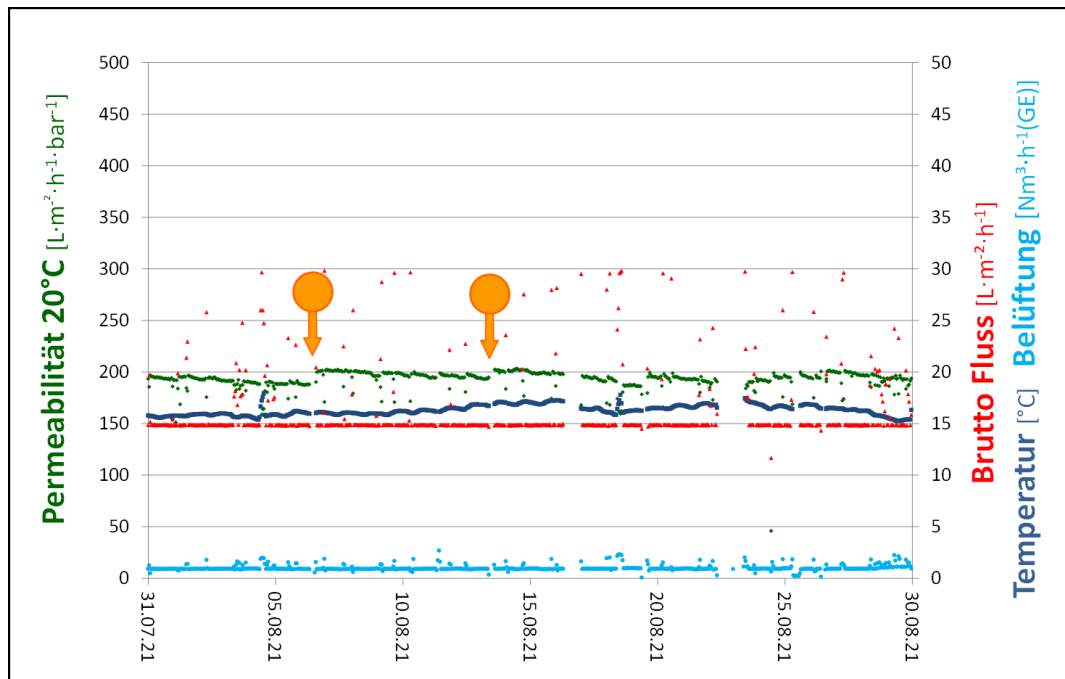
Innerhalb der ersten beiden Monate von Mai bis Juli sinkt die Permeabilität auf eine Betriebspermeabilität von 200 L·m⁻²·h⁻¹·bar⁻¹ ab (siehe Bild-16). In diesen Monaten ist die chemische Zwischenreinigung des Moduls nicht so effektiv, wie im späteren Verlauf der Projektlaufzeit. Die Reinigung wird verwendet, um vorbeugend die Verblockung der an der Filtration beteiligten Poren zu verhindern.

Um eine Vergleichbarkeit beider Module bei höheren Durchsatzleistungen zu bekommen, wurde ab Juni 2021 Permeat aus dem Permeatsammelkanal rückgeführt, um höhere Flüsse beider Module und deren Verhalten zu simulieren. Dies ist in Bild-16 durch die Erhöhung des Flusses von 15 l/m²/h auf 20 – 25 l/m²/h ersichtlich. Ab diesem Zeitpunkt war die Etablierung der chemischen Zwischenreinigung essenziell. Durch die Etablierung konnte eine Stabilisierung der Permeabilität über einen längeren Zeitraum gezeigt werden.

Ab Ende Juli wurden die Module ohne Permeatrückführung betrieben. In Bild-23 ist der Permeabilitätsverlauf im August 2021 mit einzelnen Zwischenreinigungen erkennbar.

Bild-23:

Chemische
Zwischen-
reinigung
Mit Eisen
Aktiviertem
Oxone[®] und
Zitronensäure



Durch die Kombination von PMS und Zitronensäure, sowie die Variation von unterschiedlichen Reinigungsintervallen und Reinigungszeiten konnte die Permeabilität der Membranen in den Sommermonaten um die 200 l/m²/h/bar stabilisiert werden (Bild-23). In den Wintermonaten von November bis März ist die Leistungsfähigkeit des Moduls aufgrund der höheren Zulaufmengen und

kälteren Temperaturen in der Regel geringer. Erschwerend kam hinzu, dass die Anlage aufgrund eines Ventildefekts für den Zulauf nicht mehr zulaufproportional, sondern dauerhaft mit maximalen Zulauf beschickt wurde. So behandelte die Anlage circa 20 – 30 % Zulauf der Kläranlage anstelle von 5 %. Trotz dieser enormen Belastungssteigerung der Biologie und letztlich auch der Membranmodule konnten chemische Zwischenreinigungen die Permeabilität auf einem Niveau von durchschnittlich über 150 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.

Da die Ausgangspermeabilität trotz der Zwischenreinigungen im gesamten Betriebszeitraum besonders in den Wintermonaten bei hohen Durchsätzen von 30 l/m²/h und Temperaturen < 10 °C leicht abgesunken war, wurden im Februar 2021 ein erstmaliger Ausbau des Moduls sowie eine Variation der Intensivreinigung zum einen mit PMS und Zitronensäure in höheren Konzentrationen und zum anderen auch 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 mit PMS und Zitronensäure in höheren Konzentrationen ist im Laufe des Projekts für den MSG-500 erstmalig angewandt worden. Hierfür wurden 1000 mg/L Fe²⁺/PMS und 2000 mg/L Zitronensäure verwendet und über Nacht eingewirkt (Bild-24).

Bild-24:
Intensiv-
Reinigung mit
Eisen aktiviertem
Oxone® und
Zitronensäure

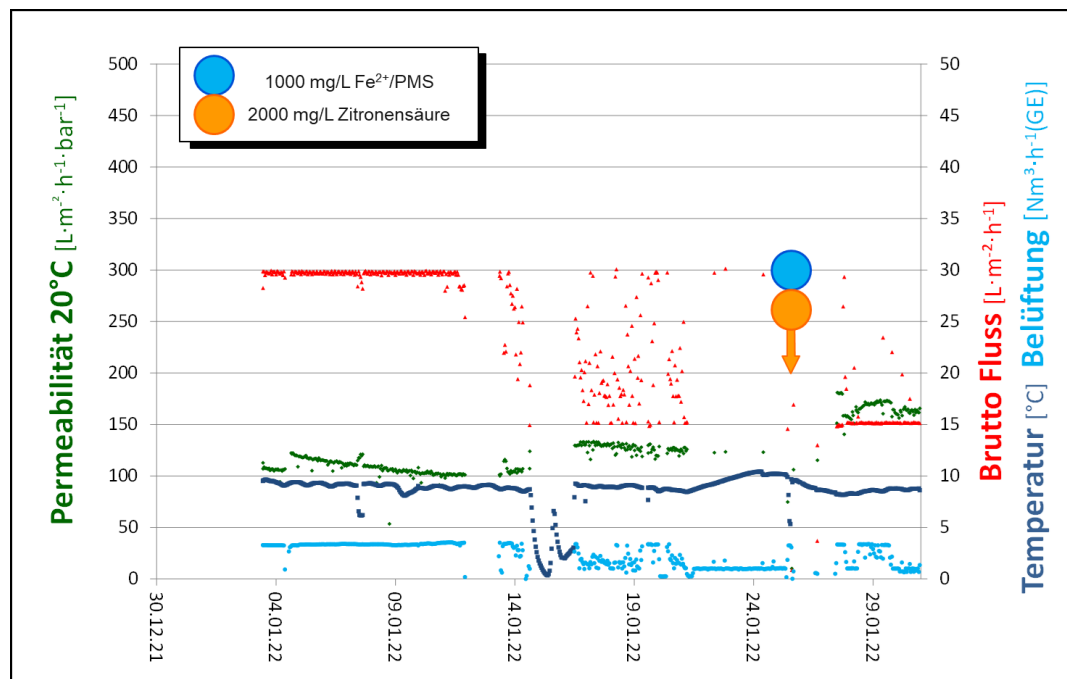


Bild-24 zeigt die Wirksamkeit der Intensivreinigung. Während der Modul vor der Reinigung eine Permeabilität von ca. 120 l/m²/h/bar bei einem Fluss von 30 l/m²/h hatte, stieg die Permeabilität nach der Intensivreinigung auf ca. 170 l/m²/h/bar bei einem Fluss von 15 l/m²/h an. Durch Filtration im Handbetrieb wurde eine Steigerung von 42 % bei gleichem Fluss visualisiert. Die Intensivreinigung

von PMS und Zitronensäure ist mit 42 % deutlich geringer als erwartet. Aus diesen Gründen wurde eine weitere Inkubation des Moduls mit 1000 mg/L NaOCl ergänzt (Bild-25).

Bild-25:
Nachgeschaltete
Intensivreinigung
nur NaOCl

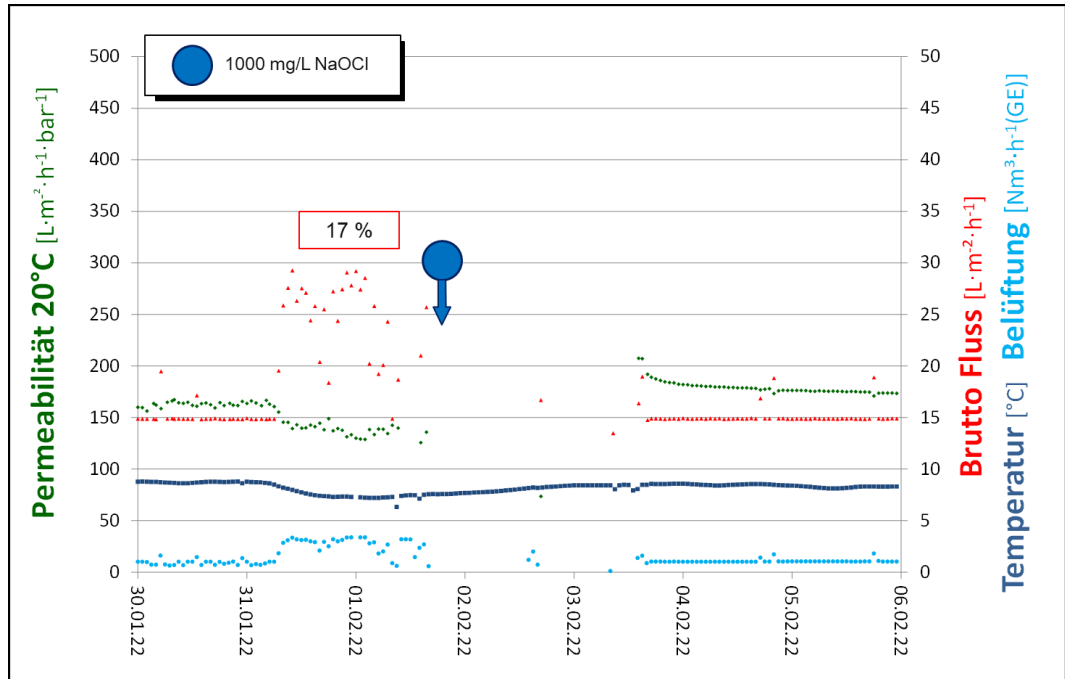
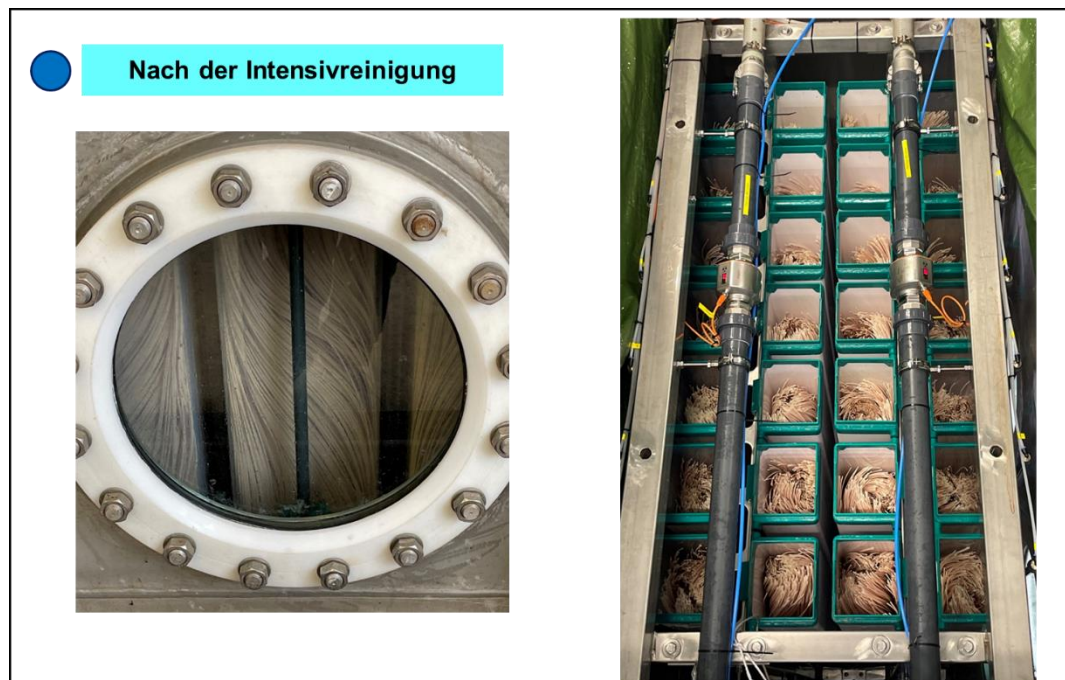


Bild-25 zeigt, dass die NaOCl Reinigung eine zusätzliche 17 %ige Effizienzsteigerung bewirkt. Wie in vorherigen Projekten bereits erläutert, ist eine Kombination von PMS und NaOCl für Anlagenbetreiber, die nicht in der Anwendung von NaOCl eingeschränkt sind, in geringem Maße vorteilhaft. Eventuell lösen die beiden Oxidationsmittel aufgrund ihrer verschiedenen pH-Werte unterschiedliche Komponenten in den Membranporen. Bild-26 zeigt die Module nach der Intensivreinigung mit allen drei Komponenten.

Bild-26:
MSG-500
nach
Intensiv-
reinigung
mit allen 3
Reinigungs-
chemikalien



Um einen Vergleich der Intensivreinigung von PMS/Zitronensäure mit NaOCl/Zitronensäure zu schaffen, wurde im August 2022 eine weitere Intensivreinigung des MSG-500 Moduls nur mit NaOCl und Zitronensäure durchgeführt (Bild-27).

Bild-27:
MSG-500
Intensivreinigung
mit NaOCl
und
Zitronensäure

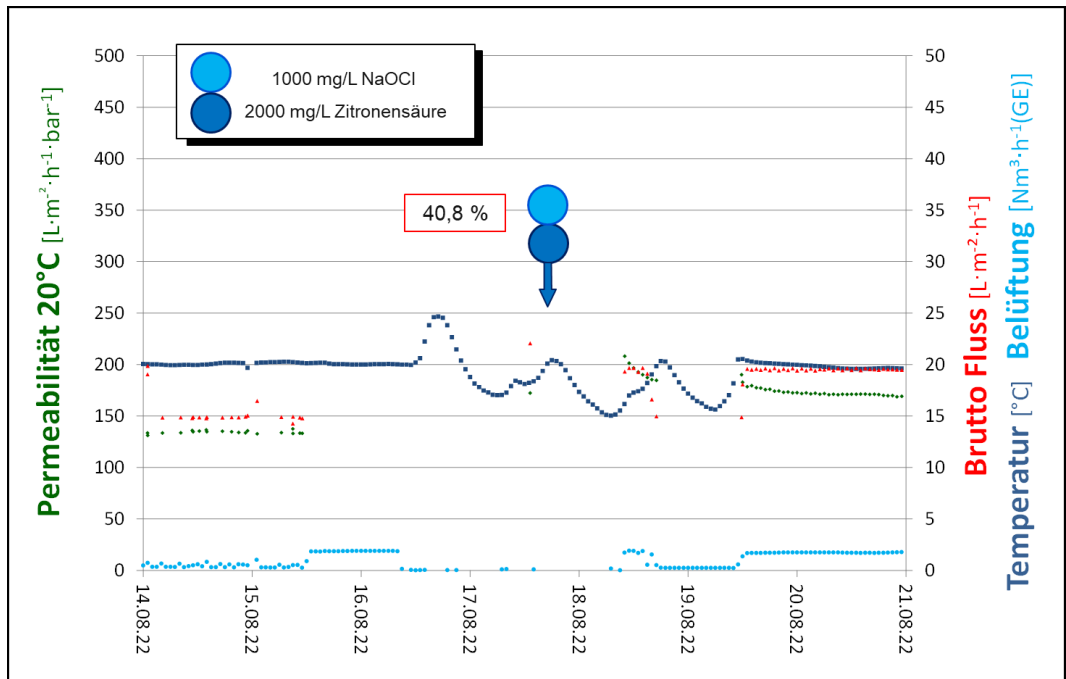


Bild-27 beweist, dass auch hier durch Verwendung der Standardreinigungskemikalien eine vergleichbar niedrige Effizienzsteigerung mit 41 % erreicht wurde. D.h. beide Reinigungsverfahren besitzen eine ähnliche Permeabilitätssteigerung und sind vergleichbar miteinander.

Bild-28:
MSG-500
nach
Intensiv-
reinigung
Mit NaOCl
und
Zitronensäure



Auffällig war, dass nach der Intensivreinigung mit NaOCl und Zitronensäure das Wasser sehr gelblich erschien (Bild-28). Möglicherweise liegt die Ursache in dem Zusatz von Eisen für die Aktivierung von PMS. Eventuell könnte es über die Zeit zu einer Ablagerung in den Membranporen kommen. In Laborversuchen konnte diese Theorie jedoch nicht bestätigt werden. Weitere Untersuchungen diesbezüglich müssen zukünftig erbracht werden. Dies war jedoch kein Bestandteil der in diesem Projekt aufgeführten Untersuchungen.

Bild-29:

Ausbau des Moduls nach der Intensivreinigung



Im Zuge der Intensivreinigung fand eine regelmäßige Inspektion der Module statt. Bild-29 zeigt den ausgebauten MSG-500 Modul nach Durchführung der oben beschriebenen Intensivreinigung. Die Module sind optisch sauber geworden, d.h. der Modul ist von Mai 2021 bis August 2022 ohne nennenswerte Verunreinigungen oder Verschlämmungen betrieben worden. Verzopfungen konnten nicht festgestellt werden. Die leichte Rosafärbung der Membranen nach der Intensiv-Reinigung mit NaOCl ist üblich für PVDF-Membranen.

9. Vergleich von MSG-500 und MSH-500

MSH-500 ist im Projektzeitraum parallel zu MSG-500 betrieben worden. Dadurch war es möglich den Mehrwert der JetSplash®-Technologie im Parallelversuch direkt zu visualisieren. Beide Module besitzen dieselben äußerlichen Bedingungen wie Temperatur, Zulauf und Schlammbeschaffenheit. Aus diesen Gründen konnte die Beurteilung der biologische Reinigungsleistung simultan für beide Module verwendet werden. Die Ablaufqualität beider Module, wie im vorherigen Kapitel erörtert, liegt mit einer 97%igen Abbauquote von organischer Belastung und 88%igen Abbauquote von Stickstoff im sehr guten Bereich.

Da MSH-500 schon seit 2019 betrieben wurde, ist zu Beginn des Parallelversuchs eine Intensivreinigung des Moduls durchgeführt worden. Anschließend lag die Permeabilität von MSH-500 bei 250 l/m²/h/bar und damit vergleichbar mit der Anfangspermeabilität des MSG-500 Moduls. Im Betriebszeitraum wurden die Prozessparameter dauerhaft gleich gehalten. D.h. die Flüsse der Module je nach Zulaufbedingungen (Trocken- oder Regenwetter) waren gleich. Lediglich

die Belüftungsmenge pro RR musste bei MSH-500 angepasst werden. So lagen die Luftmengen für MSH-500 zwischen 3 – 5 Nm³/h/RR. Durch Einbeziehen der Einblastiefe und des Wasserüberstands lässt sich eine Energieeinsparung des MSH-500 Moduls von 37 % vergleichend zu Nordkanal-Kaarst realisieren und nachweisen. MSG-500 wird je nach Zulauf mit Luftmengen von 0,7 – 3 Nm³/h/RR beaufschlagt. Beim Vergleich der Betriebsergebnisse des MSH-500 Moduls mit dem MSG-500 Modul ist die prozentuale Steigerung für die Reduzierung des Energiebedarfs mit dem MSG-500 Modul von bis zu 70 % im Vergleich zum Referenzwert Nordkanal-Kaarst nochmal exorbitant höher. Es zeigt sich bei geringen Durchsatzleistungen eine geringfügig erhöhte Energieeinsparung. Der MSH-500 Modul besitzt die größtmögliche Energieeinsparung bei hohen Durchsatzleistungen. Für den üblichen Betrieb der kommunalen Kläranlage bedeutet dies, dass bei Anwendung des MSG-500 Moduls ein zulaufproportionaler Betrieb möglich ist. Für MSH-500 wäre es energetisch günstiger mit einem permanent hohen Fluss von bspw. 25 l/m²/h/bar zu fahren und die Module abwechselnd aus und anzuschalten.

Durch Etablierung von chemischen Reinigungen beider Module konnten MSH-500 und MSG-500 weitestgehend auf eine Permeabilität von 200 l/m²/h/bar im Betriebszeitraum stabilisiert werden. Allerdings wurde im Projektzeitraum Mai bis September 2021 der MSG-500 Modul deutlich öfter angesteuert. Besonders in Trockenwetterphasen befand sich MSH-500 öfters im Standby Modus, während MSG-500 den minimalen Zulauf in Stufe-01 alleine filtrierte. Dies hatte folgenden Grund: In der Steuerung wird die Entscheidung über Filtration oder nicht anhand von Permeatsummen geregelt. Da MSH-500 jedoch eine deutlich längere Betriebsdauer aufweist und damit deutlich höhere Permeatsummen besitzt, ist zunächst immer als erstes MSG-500 angesteuert worden. D.h. im Projektzeitraum bei einem zulaufproportionalen Betrieb hat MSG-500 mit JetSplash®-Technologie deutlich mehr filtrierte als MSH-500. Dieses Problem wurde erst im September 2021 behoben. Trotz dieser Umstände besitzt MSG-500 in diesem Zeitraum eine stabile Permeabilität.

Durch die Etablierung der Permeatrückführung konnte ein paralleler Versuch mit gleich hohen Flüssen und Zeiten der Module realisiert werden. Beide Module weisen in dieser Zeit ein ähnliches Betriebsverhalten hinsichtlich des Permeabilitätsverlaufs auf. Nach langen Regenwetterphasen erholen sich beide mit Hilfe von chemischen Zwischenreinigungen nahezu vollständig. Eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit für MSG-500 durch die JetSplash®-Technologie konnte nicht beobachtet werden. Der entscheidende Mehrwert der neuartigen Technologie liegt insbesondere in der deutlich geringeren Luftmenge, die für die gleiche Leistungsfähigkeit des Moduls benötigt wird. Dadurch kommt es zu einer deutlichen Reduzierung des Energiebedarfs und schließlich zu einer Reduzierung der Betriebskosten für Anlagenbetreiber.

Das neuartige Moduldesign vereinfacht zudem durch die Elimination der Permeat und Luftleitungen die Handhabung des Membion Systems für Anlagenbetreiber. MSH-500 ist, da es ein erster technischer Modul der Firma Membion war, gestaltungstechnisch nicht optimiert. So muss beim Ausbau von MSH-500 für jedes einzelne Membranelement jede Luft- und Permeatleitung abgeschraubt werden. Bei MSG-500 werden lediglich 4 Anschlüsse von Luft und Permeatsammelleitungen entfernt. Der Modul hat nicht für jedes Membranelement eine zusätzliche Rohrleitung. Durch die Optimierung des Moduldesigns und die Etablierung des Klickmechanismus konnte so eine Zeiteinsparung der Betreiber bei Wartungsarbeiten erreicht werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der sowohl Energie- als auch Moduldesign-technisch optimierte MSG-500 Modul vergleichend zum ersten technischen Modul MSH-500 ohne JetSplash®-Technologie deutlich mehr Vorteile für Anlagenbetreiber besitzt.

10. Verifizierung und Ausblick

Des Weiteren war im Laufe des hier beantragten Projekts eine ETV – „environmental technical verification“ – Verifizierung der energetischen Vorteile des MSG-500 für MBR-Anwendungen geplant.

Bild-30:

Beschreibung der ETV-Verifizierung



EU-Pilotprogramm zur Überprüfung von Umwelttechnologien (ETV)



für Umwelttechnologien:

- unabhängiger Nachweis überprüfbarer Leistungsparameter
- Validierung innovativer technologischer Merkmale, die spezifischen Nutzeranforderungen Rechnung tragen
- zusätzlicher Nutzen für die Umwelt
- technologische Konzepte vor der industriellen Serienproduktion

Hierfür wurden im Jahr 2021 eine erste Beauftragung an eine unabhängige Institution zur Durchführung der ETV-Überprüfung durch das PIA – Prüfinstitut für Abwassertechnik aus Aachen GmbH vorgenommen. Die Verifizierungsarbeiten vor Ort konnten Corona-bedingt aufgrund eingeschränkter Möglichkeiten für die erforderlichen physischen Projekttreffen zunächst nicht begonnen werden. Außerdem war zu Projektbeginn nicht klar, dass für eine erfolgreiche Verifizierung ein standardisierter technischer Modul mit allen Serienteilen vorhanden sein muss. Der seit 2021 in Simmerath laufende technische Modul MSG-500 mit Geysir-Elementen und JetSplash®-Technologie besitzt allerdings noch Prototypen von Einzelteilen, die über 3D-Druck-Verfahren hergestellt wurden und keine Serienteile sind. Deswegen sollte die Verifizierung an der sich in der Inbetriebnahme befindlichen MBR-Anlage in Konzen mit Doppeldecker-Modulen stattfinden, bei der gleichzeitig ein Vergleich zu konkurrierenden, bereits im Markt etablierten Systemen existiert.

Bild-31:

Förderprojekt Double Membion 02WQ1549A

Double Membion

Replacement of one membrane train by double-decker hollow fibre module in MBR Konzen

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium für Bildung und Forschung





Förderkennzeichen 02WQ1549A






Im Rahmen des vom BMBF geförderten KMU-Innovationsprojekts "Double Membion" (02WQ1549A-C) erfolgte die Weiterentwicklung vom Single-Decker Modul hin zu einer Doppeldecker-Konfiguration (Bild-31). Ziel dieses Projektes ist es, die bestehenden energieintensiven Plattenmodule auf der Kläranlage Konzen durch die energieeffizientere und kompaktere Lösung von Membion in einem der bestehenden 8 Stränge der Anlage zu ersetzen und damit einen Beitrag zur CO₂-Reduzierung und zum Klimaschutz zu leisten. Im Rahmen der Weiterentwicklung wurden die Vorteile der JetSplash®-Technologie auf einen Membion-Doppeldeckermodul übertragen. Im Moduldesign erfolgt die Anordnung von zwei Membranelementen über einem Geysir-Element. Dadurch kann beim Austausch von Doppeldecker-Plattenmodulen die vorhandene Höhe in den Membranabschnitten genutzt werden. Im Februar 2021 wurde die einstöckige Pilotanlage auf der Kläranlage Konzen genutzt und zu einer doppelstöckigen Pilotanlage umgebaut, um die neuartige Betriebsweise der Doppeldecker-Konfiguration zunächst im Kleinmaßstab zu optimieren. Auf dieser Grundlage wurden Konstruktionsparameter für den Einsatz auf der Großanlage festgelegt. Im Doppeldeckermodul wird die gleiche Luftmenge wie bei der Single-Decker Konstruktion nur für die doppelte Membranfläche verwendet. Die Pilotergebnisse zeigten bereits einen niedrigen Energiebedarf von 0,04 - 0,06 kWh/m³ bei einem Nettopermeatfluss von 23 l/m²/h, was dem gleichen Auslegungsfluss wie bei den Plattenmodulen entspricht, um einen direkten Vergleich anstellen zu können. Gleichzeitig hat der Betrieb gezeigt, dass Filtrationsintervalle von 30 Minuten gefolgt von einer kurzen Relaxationsphase von 60 Sekunden möglich sind, ohne dass eine Rückspülung der Membran erforderlich ist. Dies erhöht die Permeatausbeute der Membranfilter und der Anlage bei gleichzeitiger Vereinfachung der Steuerungstechnik. Da auch die Plattenmodule ohne Rückspülung betrieben werden, war es nicht notwendig, eine zusätzliche Permeat-Rückspülpumpe für den Wechsel zu Membion-Modulen zu installieren. Nach diesen Optimierungsarbeiten konnte dann im Mai 2022 der Einbau der Doppeldecker-Module auf der Großkläranlage realisiert werden. Für diese Module sollte dann im Laufe des hier dargestellten Projektes eine ETV-Verifizierung erfolgen.

Bild-32:

Energieverbrauch
Der Doppeldecker
Module im
Projektzeitraum

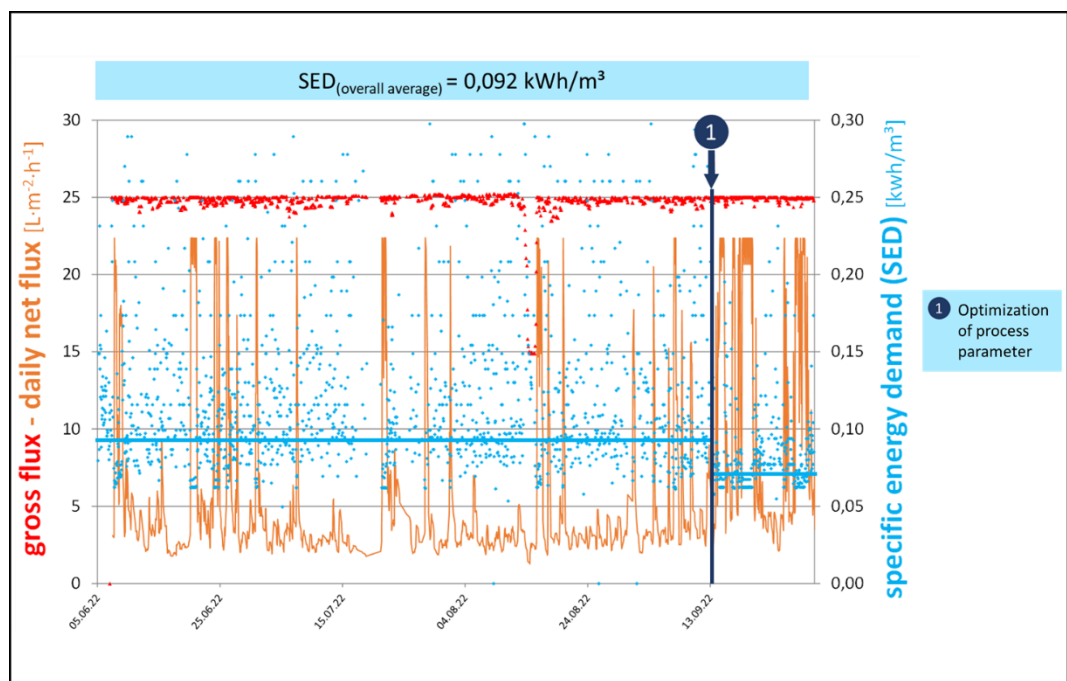
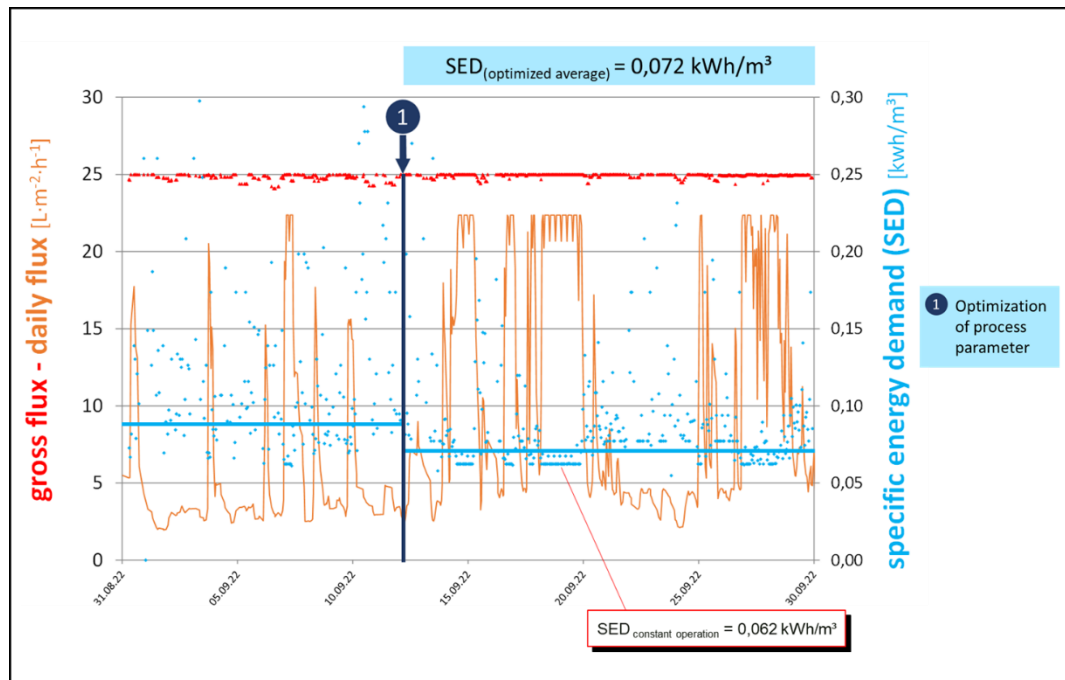


Bild-33:
Energieverbrauch
Im August
Bis September
2021 nach
Optimierung
Von Prozess-
parametern



Der Energiebedarf für die Belüftung der auf der Kläranlage Konzen installierten Plattenmodulen liegt nach Untersuchung von Krebber et al. im Jahr 2013 bei etwa 0,53 kWh/m³. Die hier dargestellten Ergebnisse des Energieverbrauchs der Membion-Module auf der Kläranlage Konzen zeigen einen Energiebedarf von 0,062 – 0,092 kWh/m³ (Bild-32 und Bild-33). Im Vergleich zu den installierten Doppeldecker-Plattenmodulen erzielten die Membion-Module im Projekt Energieeinsparungen von bis zu 90 % für die Modulbelüftung. Der reduzierte Energiebedarf senkte dabei aber nicht nur die Betriebskosten deutlich, sondern auch die Investitionskosten für den Bau und die Installation der Gebläse. Ein weiterer Vorteil der Membion-Module ist die deutlich höhere Packungsdichte. Im Vergleich zu den bisher installierten Plattenmodulen benötigt Membion für die Installation der exakt gleichen Menge an Membranfläche nur 2 der vorhandenen 9 Modulplätze des Membrantanks, was eine Reduzierung des Platzbedarfs im Membrantank um mehr als 75 % bedeutet. Dies bedeutet, dass auch das Volumen des Membranbeckens (derzeit 200 m³) auf weniger als ¼ reduziert werden könnte. Bei einem Austausch der gesamten Anlage durch Membion-Module würden nur zwei der vorhandenen Membranbecken für die Installation der gesamten Membranfläche (23.200 m²) benötigt. Die Membranbecken der anderen 6 Züge könnten zur Optimierung des biologischen Prozesses genutzt werden, z.B. zur Vermeidung von Sauerstoffverschleppung in die Denitrifikation oder zur Kapazitätserweiterung der Anlage.

Im Laufe der noch andauernden Optimierungs- und Entwicklungsarbeiten werden auch bei dem Doppeldecker-Moduldesign einzelne Komponenten angepasst und verändert. Für eine erfolgreiche und vollständige ETV-Verifizierung müssen jedoch sämtliche Entwicklungsarbeiten vollständig abgeschlossen sein. Aus den Erfahrungen von Membion sowohl im DBU Projekt AZ-34834-02 als auch im Double Membion Projekt stellte sich heraus, dass die Entwicklung der jeweiligen Module noch nicht in dem Maße abgeschlossen sind, dass eine Verifizierung sinnvoll erscheint. So wird zukünftig eine Verbesserung der Edelstahlrahmen sowohl für die Single- als auch für die Doppeldeckerkonstruktion erfolgen. Zugleich soll eine Flexibilität in der Gestaltung einzelner

Modulkomponenten bestehen bleiben. Durch zukünftige Forschungsvorhaben und weitere Pilotierung neuartiger Ideen und Optimierungen durch die Firma Membion GmbH erschien eine Verifizierung, wie sie in diesem Projekt ursprünglich angedacht war, im Laufe des Projektes zunächst eher hinderlich als vorteilhaft. Aus diesen Gründen sollte die ETV-Verifizierung auf das Ende des Projektes verschoben werden. Doch im letzten Halbjahr des Projektes wurde uns dann von Seiten der Verifizierungsinstitution mitgeteilt, dass das ETV-Programm aufgrund von Einsparmaßnahmen nicht mehr von der EU finanziert wird, so dass sich eine weitere Verfolgung der ETV-Verifizierung erübrigte.

Die Erkenntnisse aus diesem Projekt sollen ab Mitte 2023 in einem vom BMBF geförderten Programm „Rubin“ (mit dem Titel „AIX-Net-WWR“) erstmalig in Containerbauweise im Kleinstmaßstab realisiert und weiterentwickelt werden, um die oben genannten Vorteile von Membion entsprechend zu nutzen. Zusammen mit 27 Unternehmen und Hochschuleinrichtungen sollen standardisierte, dezentrale Abwasserwiederverwendungssysteme auf Quartiersebene entstehen. Dadurch soll die direkte Wiederverwendung und Nutzung des aufbereiteten Wassers und der im Abwasser vorhandenen Energie direkt an Ort und Stelle des Abwasseranfalls ermöglicht werden, und zwar ökologisch und ökonomisch optimiert. Die hier nachgewiesene Energiereduktion mittels JetSplash®-Technologie wird den Energiebedarf derartiger Containerlösungen erheblich senken.