

Fa. Membion GmbH

**Effiziente Energieausnutzung in Membranbioreaktoren  
durch Einsatz eines innovativen Membranfilters**

**Teilprojekt 01:  
Herstellung und Test eines Funktionsmusters**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsvorhaben  
gefördert von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)  
unter dem Aktenzeichen:

**AZ-32805-01**

von

Dr.-Ing. Klaus Vossenkaul,  
Dipl.-Ing. Dirk Volmering

September 2016

## Inhalt:

	Seite
1. Zusammenfassung	4
2. Einleitung	5
3. Aufbau des Membion Membranfilters	6
4. Beschreibung der Projektphasen und Abweichungen von der Antragstellung	9
5. Vorarbeiten	10
5.1 Einseitiges Verschließen der Membranfasern	11
5.2 Potting-Verfahren	13
5.3 Optimierung der Kunststoffteile	17
5.4 Konzeption des Modulgestells	18
5.5 Konzeption der Versuchsanlage	21
6. Herstellung des Funktionsmusters	22
7. Test des Funktionsmusters und Ergebnisse	24
7.1 Hydrodynamische Modultests ohne Membranen	24
7.2 Hydrodynamische Modultests mit Membranen	26
7.3 Funktionstest	27
8. Ökologische und ökonomische Betrachtungen	34
8.1 Ökologische Aspekte	35
8.1 Ökonomische Aspekte	36
9. Öffentlichkeitsarbeit	37
10. Fazit und Aussicht zur Weiterführung des Projektes	39

## Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Bild 1:	Konzept MBR im Vergleich zur konventionellen biologischen Kläranlage
Bild 2:	Prinzip des neuen Membranfilters von Membion
Bild 3:	Ansicht und Schnitt des Fußelementes
Bild 4:	Methode zum Verschließen der freien Membran-Faser-Enden
Bild 5:	Testfinger mit verschiedenen eingefärbten Verschlusslösungen
Bild 6:	Potting-Verfahren des Membion Membranfilters
Bild 7:	Ergebnisse des Potting-Verfahrens
Bild 8:	Einharzen der Membran im Modulfuß
Bild 9:	Ergebnisse der Einharz-Tests eines ganzen Modulfußes
Bild 10:	Separierung des Luftverteilsystems für Optimierungszwecke
Bild 11:	Konzept der Einbringung und Halterung der Modulrohre im Modulrahmen
Bild 12:	Optimierung der Befestigung des Modulrohres im Modulrahmen
Bild 13:	Gestaltung des großtechnischen Membion-Membranmoduls
Bild 14:	Ansichten der Versuchsanlage
Bild 15:	Fließbild der Versuchsanlage
Bild 16:	Ansichten der Funktionsmusters
Bild 17:	Ansichten der Funktionsmusters (2)
Bild 18:	hydrodynamische Tests ohne Membranen
Bild 19:	Luftverteilung im Fußelement vor und nach der Optimierung des Luftverteilers
Bild 20:	Pilotanlage mit eingebautem Funktionsmuster-Modul
Bild 21:	Belüftung des Moduls mit 5 m <sup>3</sup> /h
Bild 22:	Befüllung der Pilotanlage mit Schlamm der Membrankläranlage Konzen
Bild 23:	Rückführung des Filtrats in den Tank (links) – Vergleich Schlamm – Filtrat
Bild 24:	Betriebsdaten zur Verdeutlichung des Filtrationsintervalls
Bild 25:	weitere Betriebsdaten über einen längeren Zeitraum von mehreren Stunden
Bild 26:	Datenaufzeichnung zum ersten Critical-Flux-Test
Bild 27:	Datenaufzeichnung zum zweiten Critical-Flux-Test
Bild 28:	großtechnische Demonstrationsanlage auf der Kläranlage Simmerath
Tabelle-01:	erste Abschätzung des Energiebedarfs
Tabelle-02:	weitere Abschätzungen des Energiebedarfs

## 1. Zusammenfassung

In dem vorliegenden Vorhaben wurde erstmalig ein Funktionsmuster eines neuartigen Membranfilters der Fa. Membion hergestellt und unter realen Bedingungen in einer Versuchsanlage auf der Kläranlage Konzen im Betrieb als Membran-Bio-Reaktor (MBR) betrieben. Die bei der Antragstellung angegebenen Arbeitsschritte wurden weitgehend entsprechend der Planung durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen.

In einer ersten Projektphase wurden die geplanten Vorarbeiten umgesetzt, wobei für das Potting-Verfahren ein Patent beim Deutschen Patentamt angemeldet wurde. Die Methode zum einseitigen Verschließen der Membranfasern wurde entgegen der Planung nicht zum Patent angemeldet. Die für die Produktionsschritte benötigten Kunststoffteile wurden über 3D-Druck-Verfahren hergestellt und optimiert.

Änderungen ergaben sich bei der Zeit und den Kosten für den Bau der Pilotanlage, die entgegen der ursprünglichen Planung nicht nur für hydrodynamische Versuche sondern bereits im Rahmen dieses ersten Teilprojektes für einen Betrieb unter Realbedingungen auf einer Kläranlage konzipiert wurde, um den Energiebedarf für die Modulbelüftung realistisch abschätzen zu können.

Nach Abschluss der Vorarbeiten erfolgte in einer zweiten Phase des Projektes die Herstellung des Funktionsmusters mit einer Anpassung der Kunststoffteile für eine zufriedenstellende Montierbarkeit des Moduls im Gestell. In der dritten und letzten Phase des Vorhabens wurde das Funktionsmuster des neuen Membranfilters zunächst ohne und dann mit Membranen in Klarwasser getestet und angepasst, bevor es unter realen Bedingungen einer Membrankläranlage auf der Kläranlage Konzen in Betrieb genommen wurde. In diesen Versuchen konnte die Funktionstüchtigkeit des neuen Membranfilters hinsichtlich Dichtigkeit und Filtrationsleistung nachgewiesen werden. Auch die Gleichverteilung der Luft über den Modulquerschnitt war nach Optimierung des Luftverteilsystems zufriedenstellend. Zudem zeigte sich, dass auch die Erwartungen hinsichtlich einer Senkung des Energiebedarfs für die Modulbelüftung erfüllt wurden. 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 MBR-Nordkanal entnommen wurde. Gegenüber diesem Referenzwert zeigte sich beim Betrieb des neuen Membranfilters eine Reduzierung des Energiebedarfs um 30 % bis 50 % je nach eingestellten Betriebsbedingungen.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Herstellkosten des neuen Membranfilters lässt eine gleiche Größenordnung bis hin zu einer Kostensenkung im Vergleich zum Stand der Technik erwarten. Damit wurden alle gesteckten Ziele des Vorhabens erreicht.

## 2. Einleitung

Das vorliegende Projekt mit dem Titel „Effiziente Energieausnutzung in Membranbioreaktoren durch Einsatz eines innovativen Membranfilters“ ordnet sich ein in die Gruppe der Verfahren zur Abwasseraufbereitung mit Membranen. Dabei werden nach dem sogenannten Membranbioreaktorverfahren Membranfilter in die Belebungsbecken einer biologischen Kläranlage eingetaucht. Durch Anlegen eines geringen Unterdrucks auf der Permeatseite der Membranen wird gereinigtes Filtrat aus den Membranen abgezogen. Regelmäßig eingetragene Luft dient zur Spülung Membranfilter und Austragung der abfiltrierten Stoffe. Für den Prozess der biologischen Abwasserreinigung ergeben sich dadurch folgende Vorteile:

- Wegfall der Nachklärung,,
- eine etwa um den Faktor 1000 bessere Wasserhygienisierung im Vergleich zur konventionellen Technik,
- Verkleinerung der Belebungsbecken durch Aufkonzentrierung der Biomassenkonzentration um einen Faktor 3 bis 5 im Vergleich,
- insgesamt um etwa 50% reduzierter Platzbedarf von Membranbelebungsanlagen im Vergleich zu konventionellen Kläranlagen bei deutlich verbesserter Wasserqualität.

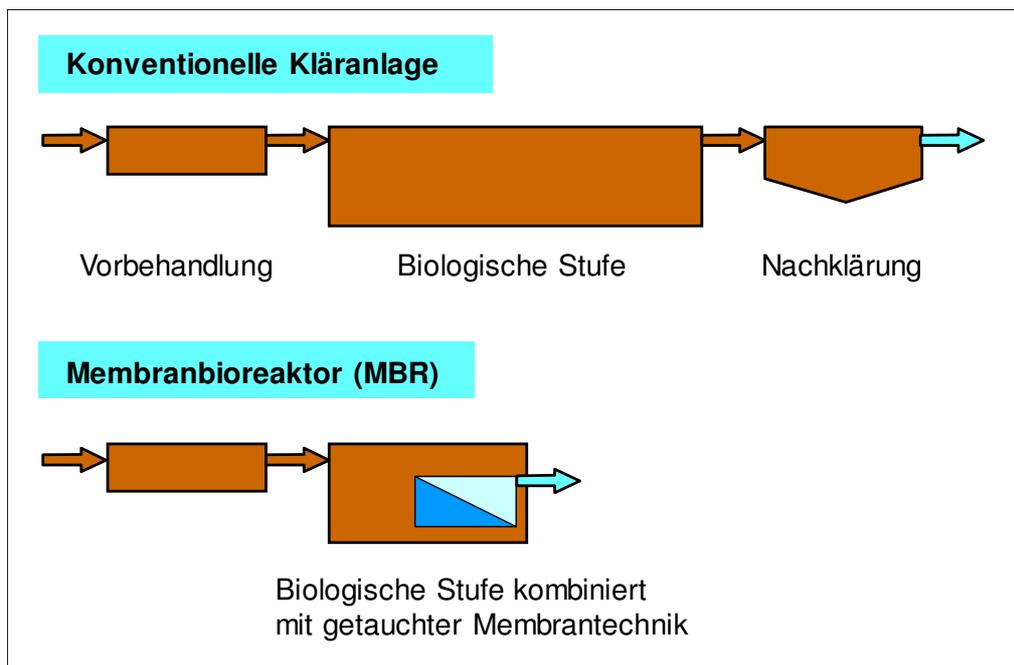


Bild 1: Konzept MBR im Vergleich zur konventionellen biologischen Kläranlage

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 gleicher Größenordnung. 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 Umweltrelevanz des Vorhabens ordnet sich daher ein in die Zielvorstellungen der Verbesserung von Membranbioreaktoren hinsichtlich: Reduzierung des Energiebedarfs, Erhöhung der Lebensdauer der Membranen, Reduzierung deren Verblockungsneigung und Reduzierung des Chemikalienbedarfs durch seltener erforderliche chemische Reinigungen der Membranen.

Die Firma Membion GmbH aus Roetgen hat in den letzten Jahren einen neuartigen Membranfilter für Membranbioreaktoren entwickelt, der von seiner Konzeptionierung her eine effektivere Ausnutzung der zur Spülung der Membranfilter eingetragenen Energie ermöglicht und auch sonstige Betriebsnachteile bisher am Markt etablierter Systeme, wie z.B. Verblockung der Luftdüsen, Verschlammung der Module, Abrasion an den Membranfasern vermeidet.

Die Zielsetzung des durchgeführten Vorhabens war es, ein Funktionsmuster des neuartigen, Hohlfaser-Membranfilters der Firma Membion erstmalig zu erstellen und hydrodynamisch zu testen. Dabei sollte insbesondere gezeigt werden, in wie weit das Konzept des neuen Membranfilters die Erwartungen hinsichtlich einer effektiveren Ausnutzung der zur Spülung der Membranen eingetragenen Luft erfüllt und eine Reduzierung des Energiebedarfs des Prozesses ermöglicht. Zudem sollte in einem ersten Versuch das generelle Betriebsverhalten des neuen Membranfilters untersucht werden, insbesondere hinsichtlich einer Gleichverteilung von Luft und Schlamm im Membranfilter sowie hinsichtlich der Vermeidung von Verblockungen des Luftsystems und Verschlammungen des Membranfilters. Darüber hinaus sollte bei der Herstellung des Funktionsmusters bereits das Potenzial zu einer wirtschaftlichen Herstellung der Membranfilter aufgezeigt werden.

### **3. Aufbau des Membion-Membranfilters**

In dem neuartigen Membranfilter von Membion sind die Bündel aus Hohlfasermembranen von einem Rohrelement umgeben, das lückenlos oben an ein Fußelement des Membranfilters anschließt, in dem die Membranen mit ihrer Unterseite fixiert sind. Durch das Rohrelement wird die eingetragene Luft über die gesamte Länge der Membranen im Bereich des Membranbündels gehalten und somit wesentlich effektiver genutzt, was eine deutliche Senkung des Energiebedarfs verspricht. Zudem erzeugen die Luftblasen in dem aufgesetzten Rohr einen sogenannten Mammutpumpeneffekt, d.h. der Schlamm wird durch die Luftblasen mitgerissen und regelrecht durch den Filter gepumpt. Dadurch steigen die Strömungsgeschwindigkeit und die Turbulenz des Schlamms im Membranfilter, wodurch die Menge der erforderlichen Spülluft weiter reduziert wird. Bild 2 zeigt das Prinzip des neuen Membranfilters von Membion.

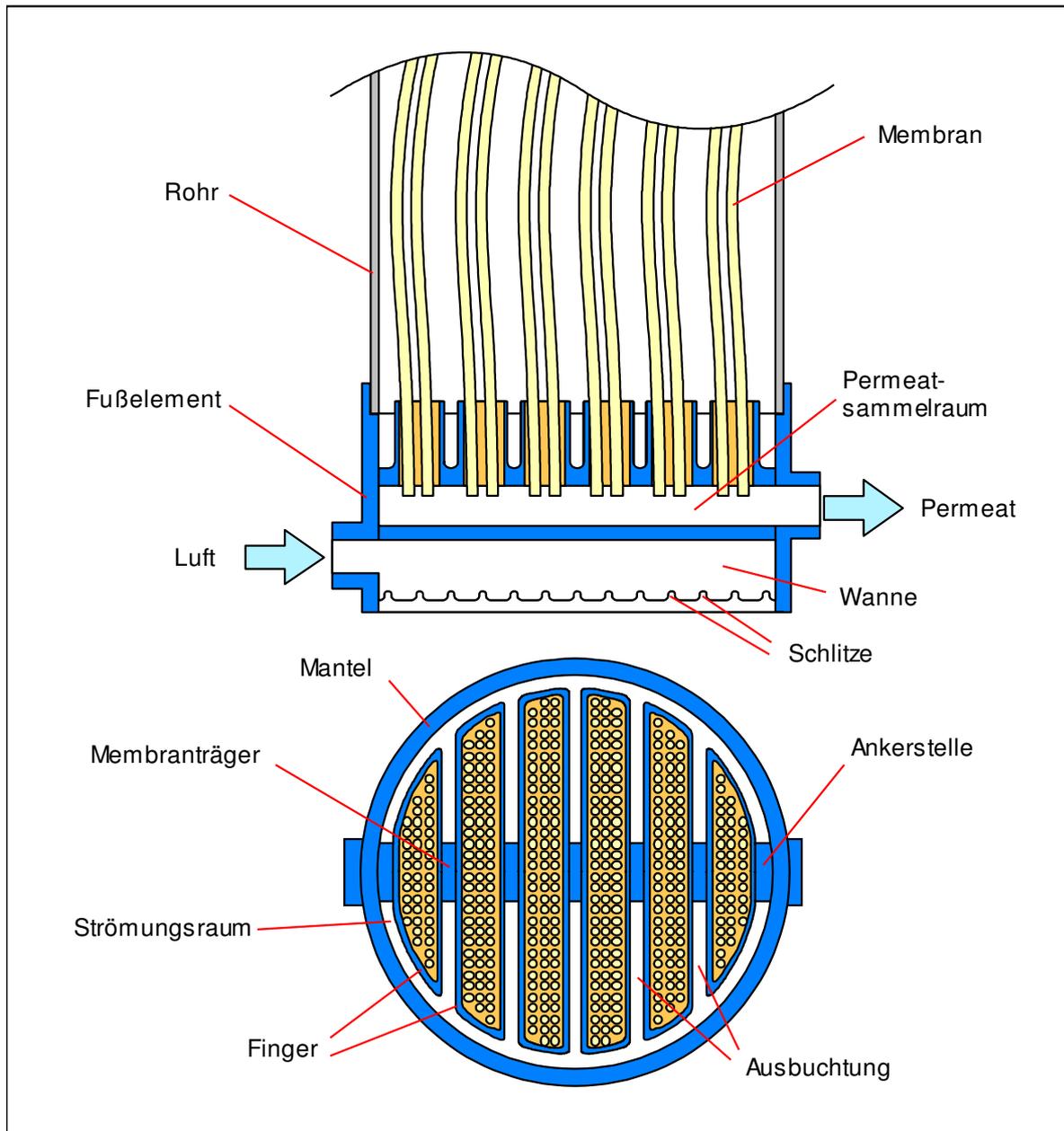


Bild 2: Prinzip des neuen Membranfilters von Membion

Die Membranen sind nur an ihrer unteren Seite in einem Fußelement eingespannt, während die oberen Enden der Hohlfasermembranen einzeln verschlossen im Schlamm schweben. Dadurch vermeiden sie das Problem der Verzopfung, das insbesondere bei Systemen mit beidseitiger Einspannung der Membranen auftritt, indem sich Haare und faserige Verbindungen um die Membranen schlingen, mit der Luft nach oben transportiert werden und sich dann unter der oberen Einspannung der Membranen festsetzen.

Im Membion-Membranfilter wird die Luft im unteren Bereich des Fußelementes eingetragen und durchströmt dann gemeinsam mit dem nur von unten angesaugten Schlamm das Fußelement. Dies hat den Vorteil, dass die Spülluft nicht erst im Bereich der Membranen ihre Wirkung entfaltet, sondern auch schon im Bereich des Fußelementes und besonders auch im verschlammungsanfälligen Bereich direkt oberhalb der Einspannung der

Membranen. Auf ihrem Weg durch das Modul kann die Luft den Bereich des Membranbündels aufgrund des begrenzenden Rohres nicht verlassen und wird daher effektiver ausgenutzt.

Die Herausforderung bei dieser Konzeption von Membion ist jedoch die Gestaltung des Fußelementes, um neben der Zuführung und Verteilung des Schlammes in den Filter auch die gleichmäßige Zuführung und Verteilung der Luft sicherzustellen. Um dies zu gewährleisten, weist das Fußelement des Membion-Filters einen rohrförmigen Mantel auf mit einem darin befindlichen Membranträger, in dem die Hohlfasermembranen permeatseitig offen eingebettet sind. Zwischen Mantel und Membranträger entsteht ein Strömungsraum, durch den das Gemisch aus Luft und Schlamm aufgrund des Mammutpumpeneffektes in den Filter hineingesaugt wird und die Membranen im Membranträger vollständig umströmt. Um den Membranträger im Fußelement zu fixieren, ist dieser über mindestens eine Ankerstelle mit dem Mantel verbunden. Durch die Ankerstellen erfolgt zudem die Abfuhr des Permeates und gleichzeitig die Zuführung der Luft auf die Unterseite des Membranträgers. Da sich das Rohr lückenlos oben an den Mantel anschließt und zudem der Membranträger keine weiteren Öffnungen für die Durchströmung des Gemisches aus Schlamm und Luft hat, bildet der Strömungsraum zwischen Mantel und Membranträger die einzige Zuführungsmöglichkeit für das Schlamm-Luft-Gemisch. D.h. hier in diesem herrscht eine hohe Turbulenz.

Da das aufgesetzte Rohr prinzipiell einen Mehraufwand bei den Herstellungskosten des Filters bedeutet, ist dies aus Kostengründen erst bei größeren Rohrquerschnitten und dementsprechend größerer Membranfläche im Rohr wirtschaftlich zu rechtfertigen. Größere Rohrquerschnitte des Moduls führen allerdings zu zwei weiteren Herausforderungen für die Konzeption des Membranfilters:

- 1.) die Vermeidung von zu großen Membranbereichen, die nicht von der Turbulenz der Zweiphasenströmung erreicht werden, da diese zur Verschlämmung neigen und
- 2.) die gleichmäßige Verteilung der Luft über den größeren Modulquerschnitt.

Ersteres wird beim Membion-Membranfilter durch patentierte Ausbuchtungen der Strömungsräume in den Membranträger hinein erreicht. Dadurch entstehen am Membranträger Finger, die mit Membranen bestückt sind. Durch den Abstand der Ausbuchtungen kann die Dicke der Finger und damit die Breite der Membranbereiche auf ein verschlämmungsunempfindliches Maß von etwa 3 cm reduziert werden.

Die Finger sind zudem in Strömungsrichtung nach außen konisch zulaufend gestaltet, um Haare und faserige Verbindungen nach außen frei abstreifen und durch den Modul austragen zu können. Weiterhin hat der Strömungskanal eine einheitliche Breite, um eine Kanalbildung der Strömung zu vermeiden, d.h. ein bevorzugtes Durchströmen von Bereichen mit größerem Querschnitt. Bild 3 zeigt eine Ansicht und einen Schnitt des Fußelementes, an denen die beschriebenen Teilelemente ersichtlich werden.

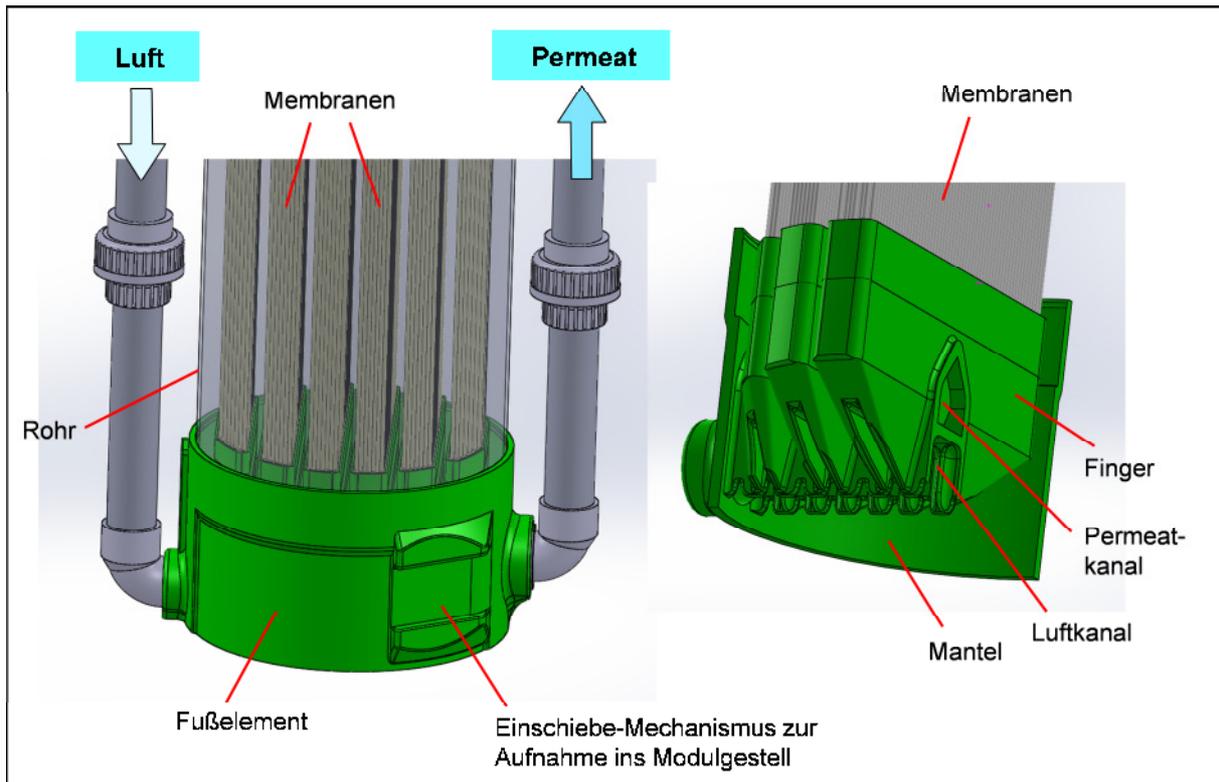


Bild 3: Ansicht und Schnitt des Fußelementes

Die zweite Aufgabe bei größer werdendem Moduldurchmesser ist die gleichmäßige Verteilung der Spülluft über den Querschnitt des Membranfilters. Diese wird im Membion-Filter durch ein patentiertes Luftverteilsystem erreicht, das eine nach unten offene und oben geschlossene Wanne aufweist, die an der Unterseite des Membranträgers ausgebildet ist. In diese Wanne wird die Spül-Luft eingetragen. Seitlich in der Wanne sind nach unten offene Schlitze eingebracht, die als Wehre dienen, an denen die Luft definiert aus der Wanne aus- und in die Flüssigkeit einströmt. Die Weiterleitung der Luft in den Außenbereich der Finger des Membranträgers erfolgt über nach unten offene Leitkanäle, die an der Unterseite der Finger ausgebildet sind.

Das Gesamte Luftverteilsystem, bestehend aus Wanne, seitlichen Schlitzen und Weiterleitungskanälen ist nach unten offen mit abgerundeten Ecken gestaltet, so dass die Wahrscheinlichkeit der Verblockung des Luftsystems durch Störstoffe gering ist. Zudem können beginnende Verblockungen aufgrund der Offenheit des Systems leicht durch einen erhöhten Luftpuls herausgespült werden.

#### 4. Beschreibung der Projektphasen und Abweichungen von der Antragstellung

Die Arbeiten im Rahmen des hier durchgeführten Projektes dienen der Herstellung eines ersten Funktionsmodells des innovativen Membranfilters. Sie gliedern sich in drei

Projektabschnitte. Die für die einzelnen Herstellungsschritte erforderlichen Konzepte wurden alle bereits im Vorfeld des Antrags theoretisch entwickelt, jedoch erstmalig in dem durchgeführten Projekt praktisch umgesetzt. Die drei Projektabschnitte sind die folgenden: Vorarbeiten, Herstellung des Funktionsmusters und Test des Funktionsmusters. Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden im Folgenden näher erläutert.

Die zeitliche und finanzielle Abwicklung der Arbeiten erfolgte dabei weitgehend entsprechend der bei der Antragstellung dargestellten Planung. Es ergaben sich lediglich die folgenden Abweichungen vom ursprünglichen Plan:

- 1.) die Kosten für den Bau der Versuchsanlage waren höher als geplant, da eine von den Gutachtern des Antrags ausdrücklich gewünschte Abschätzung des Energiebedarfs des neuen Membranfilters realistisch nur im Betrieb auf einer Kläranlage unter Originalbedingungen eines MBR-Prozesses untersucht werden konnte. Aus diesem Grund wurde die Versuchsanlage entgegen der ursprünglichen Planung nicht nur für hydrodynamische Untersuchungen sondern auch schon für einen automatisierten Betrieb im Bypass auf einer Membrankläranlage konzipiert.
- 2.) Die zweite Abweichung ergab sich durch einen höheren Zeitaufwand bei der geplanten Patentanmeldung des Potting-Verfahrens. Da sich die Patentrecherche und die Ausarbeitung der Patentanmeldung als umfangreicher darstellten als erwartet, wurde eine kostenneutrale Projektlaufzeitverlängerung bis Ende Juni 2016 beantragt und von der DBU genehmigt.
- 3.) Die zweite geplante Patentanmeldung zur Faser-Verschluss-Methode wurde nicht zum Patent angemeldet, da die Recherche bereits älteren, mittlerweile freien Stand der Technik aufdeckte. Damit kann das Verfahren zwar durchgeführt, aber nicht mehr geschützt werden.

Alle anderen Arbeiten verliefen entsprechend der im Antrag dargestellten Planungen.

## **5. Vorarbeiten**

Bevor das eigentliche Funktionsmuster hergestellt werden konnte, mussten eine Reihe an Vorarbeiten durchgeführt werden. Dabei stand zunächst die Verifizierung der praktischen Machbarkeit der bereits im Vorfeld des Antrags erstellten Konzepte der einzelnen Produktionsschritte auf dem Programm. Es waren dies: das Testen der Methoden zum Faserverschließen, zum Potting-Verfahren sowie zum Harzen der Membranfasern im Modulfuß. Darüber hinaus war eine Optimierung der zum Einsatz kommenden Kunststoffteile erforderlich, um die angestrebten Funktionen der Produktionskonzepte sowie das gewünschte Betriebsverhalten des Membranfilters zu ermöglichen. Zu den Vorarbeiten zählten ebenfalls die Konzeptionierung des Modulgestells sowie der Versuchsanlage.

## 5.1 Einseitiges Verschließen der Membranfasern

Zu den erforderlichen Vorarbeiten zählt zunächst der Test eines Faser-Verschluss-Konzeptes zum einseitigen Verschließen der Hohlfasermembranen an ihrem freien oberen Ende. Bisherige Systeme mit nur einseitiger Fixierung der Membranen verschließen die Faserenden in der Regel durch Eintauchen in eine Polymerlösung und anschließende Aushärtung des anhaftenden Polymertropfens in einem Fäll-Prozess. Das Verschlussmaterial dringt dabei zum Teil in das Faserende ein umschließt dieses aber auch von außen. Das entstehende Faserende weist jedoch - ähnlich einem Wattestäbchen - einen Durchmesser auf, der größer ist als der des Membranröhrchens selber. Diese Methode ist für den Membion-Membranfilter ungeeignet, da die dickeren Faserenden zu einem Engpass im oberen Bereich des Moduls führen würden, da der Platz für die Membranen durch das sie umgebende Rohr begrenzt ist. Daher wurde von Membion eine neue Faserverschluss-Methode konzipiert, die keine Verdickung der Faserenden zur Folge hat und zudem die Möglichkeit einer Automatisierung verspricht. Bei allen Arbeiten zu Produktionsschritten im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde eine mögliche spätere Automatisierung der Prozessschritte mit berücksichtigt. Bild 4 zeigt die Methode zum Faserverschließen.

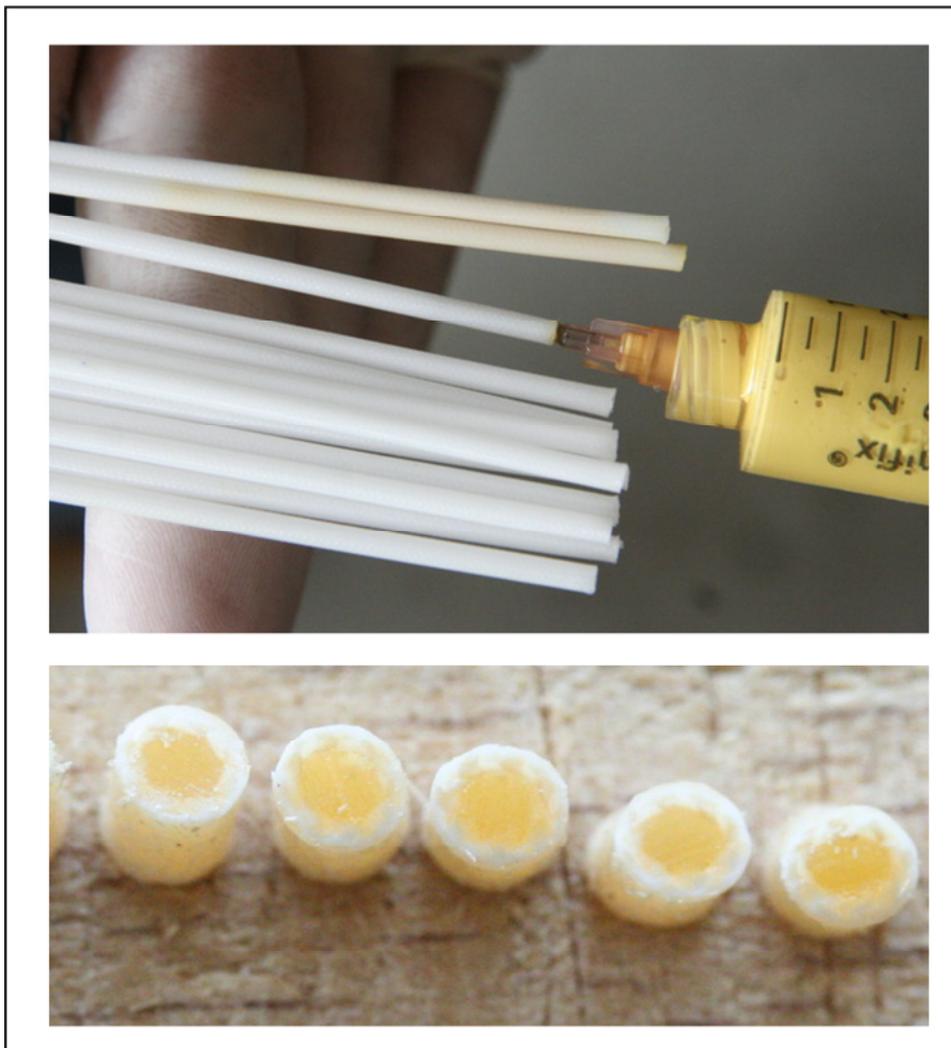


Bild 4: Methode zum Verschließen der freien Membran-Faser-Enden

Bei dieser Methode wird eine Verschlussmasse in eine Injektionsspritze gefüllt und über eine Injektionsnadel in das Lumen der Hohlfasermembranen hineingespritzt. Es wurden viele verschiedene Verschlusslösungen getestet bis eine gefunden wurde, die bei einer Verschlusslänge von etwa 3 bis 4 cm eine zuverlässige und reproduzierbare Abdichtung der freien Membranfaserenden gewährleistete.

Entscheidende Kriterien bei der Auswahl geeigneter Verschlussmittel sind dessen Viskosität und Benetzungsfähigkeit, um insbesondere auch das Eindringen in den auf der Innenseite des Membranröhrchens als Verstärkung befindlichen Geflecht-Schlauches zu ermöglichen. Wie die untere Abbildung in Bild 4 zeigt, dringt bei der als geeignet gefundenen Verschlussmasse diese gleichmäßig in den Gewebes Schlauch ein.

Die mit verschiedenen Verschlussmittel verschlossenen Hohlfasern wurden dann in einer Dauer-Wechselbelastungs-Testanlage einem Belastungstest mit einer Druckluft-Beaufschlagung von der Permeatseite her unterzogen, um sicherzustellen, dass die Verschlussmethode im Feld auch nach einigen Jahren Betriebszeit noch immer eine sichere Abdichtung der freien Faserenden gewährleistet. Dabei wurden unterschiedliche Verschlusslösungen durch Zusatz von unterschiedlichen Farbpigmenten gekennzeichnet und gemeinsam in einem Finger des Membranmoduls eingeharzt. Mehrere der so bestückten Finger kamen dann in der eigens dafür konzipierten Dauerwechselbelastungs-Testanlage zum Einsatz.

Bild 5 zeigt einen solchen Test-Finger des Membranmoduls, bei dem die Membranfasern mit verschieden eingefärbten Verschlusslösungen verschlossen wurden, um unter gleichen Bedingungen gemeinsam in der Dauerwechselbelastungs-Testanlage eingesetzt zu werden.



Bild 5: Testfinger mit verschieden eingefärbten Verschlusslösungen

## 5.2 Potting-Verfahren

Auch das Potting der Membranfasern, d.h. das Einbinden in den Membranträger stellt beim Membion-Membranfilter, wie bei jedem Membranfilter eine besondere Herausforderung dar, da es an die geometrischen Besonderheiten des Systems angepasst werden muss. Generell werden beim Potting die Hohlfasermembranen in ein Harz eingebettet und bleiben dabei permeatseitig, d.h. mit ihrem Lumen offen. Durch das Harz entsteht eine Abdichtung des Permeatsammelraums gegenüber dem Feedraum und gleichzeitig eine Fixierung der Membranfasern im Membranträger.

Die beschriebene Gestaltung des Membion-Membranfilters mit einzelnen Fingern, die zum gemeinsamen Membranträger gehören, birgt eine besondere Herausforderung: da die Finger selber recht schmal sind, ist es wichtig, dass die Breite der Finger möglichst gut für die Bestückung mit Membranen ausgenutzt wird, d.h. die Wandstärken des Gehäuses im Bereich der Finger sollten möglichst dünn sein. Um dies zu gewährleisten wurde auch für das Potting-Verfahren von Membion ein neues Konzept entwickelt. Da die unterschiedlichen Wandstärken nur schwer in einem späteren Spritzgussteil realisiert werden können, arbeitet das neue Konzept in zwei Schritten: zunächst werden die Membranen in den einzelnen Fingern unter Zuhilfenahme eines dünnen Rahmens gepottet (Bild 6).



Bild 6: Potting-Verfahren des Membion Membranfilters

Die so entstehenden Membranblöckchen gewährleisten die gewünschte Ausnutzung der Breite der Finger zur Membranbestückung und erlauben darüber hinaus einen

Dichtigkeitstest der Einharzung, bevor in einem zweiten Schritt die vorgefertigten Membranblöckchen in die Finger des Membranträgers eingebracht werden. Bild 7 zeigt einen Schnitt durch die gepotteten Fasern in den Membranfingern.

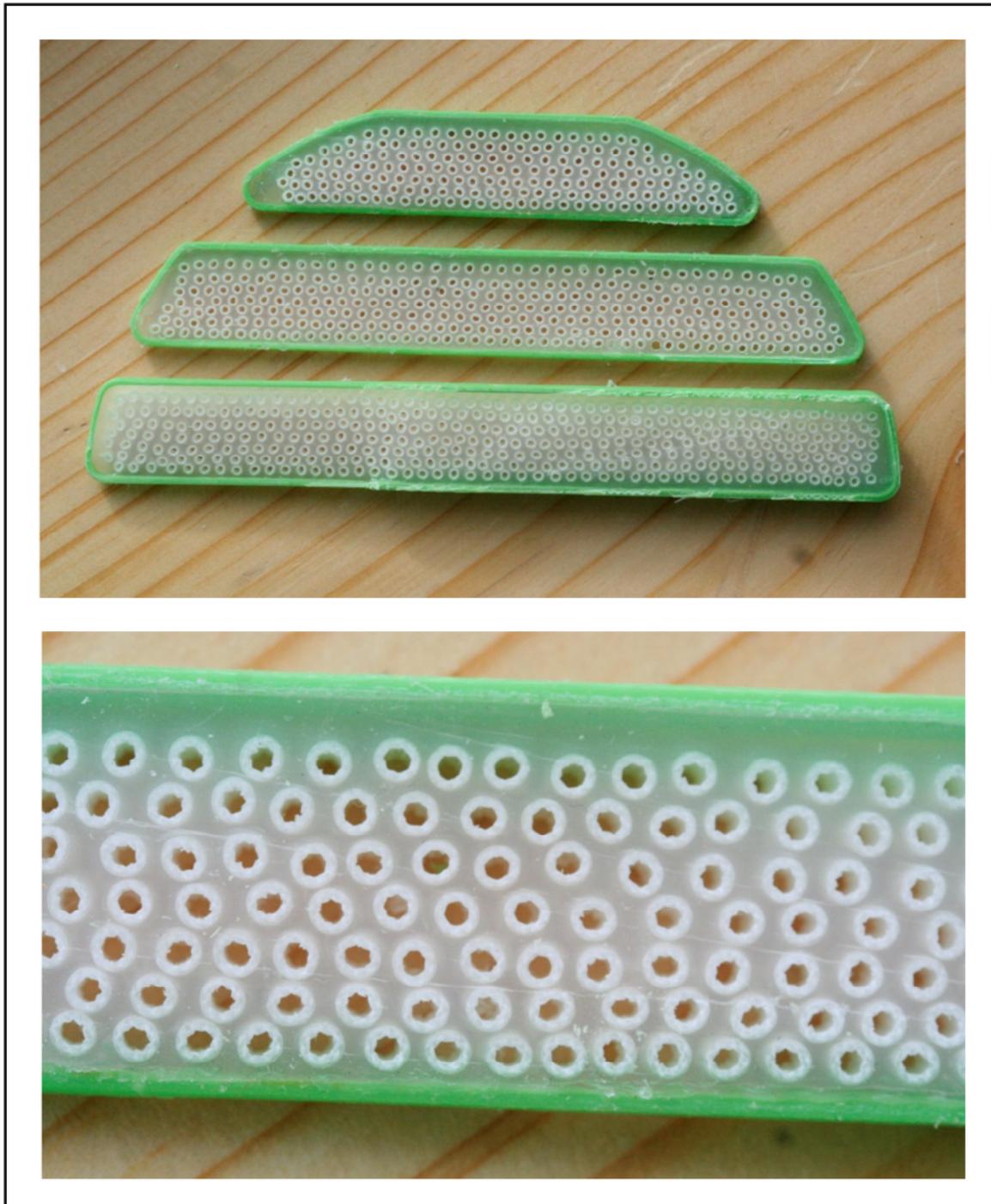


Bild 7: Ergebnisse des Potting-Verfahrens

Das beschriebene Konzept zum Potting der Membranen wurde ebenfalls im Vorfeld dieses DBU-Projektes entwickelt und hier zum ersten Mal in der Praxis getestet und umgesetzt. Dabei musste die Gestaltung der Rahmen mehrmals abgeändert werden, um ein einfaches Einbringen der Membranfasern zu ermöglichen. Die Tests zum neuen Potting-Verfahren wurden begleitet durch Dichtigkeitstest zunächst der Membranblöckchen und später der mit

Membranblöckchen bestückten Modulfüße. Nach einer erfolgversprechenden Patentrecherche wurde das neue Potting-Verfahren von Membion zum Patent angemeldet.

Nach dem Einbringen der mit Membranen bestückten Blöckchen in den Modulfuß wird eine abschließende Harzschicht eingefüllt, die bis etwa 10 mm unterhalb der Faserenden reicht (Bild 8). Dadurch werden die Membranblöckchen im Modulfuß dicht eingegossen und zudem in diesem fixiert. Eine spanende Bearbeitung der Membranenden ist dabei nicht mehr erforderlich.

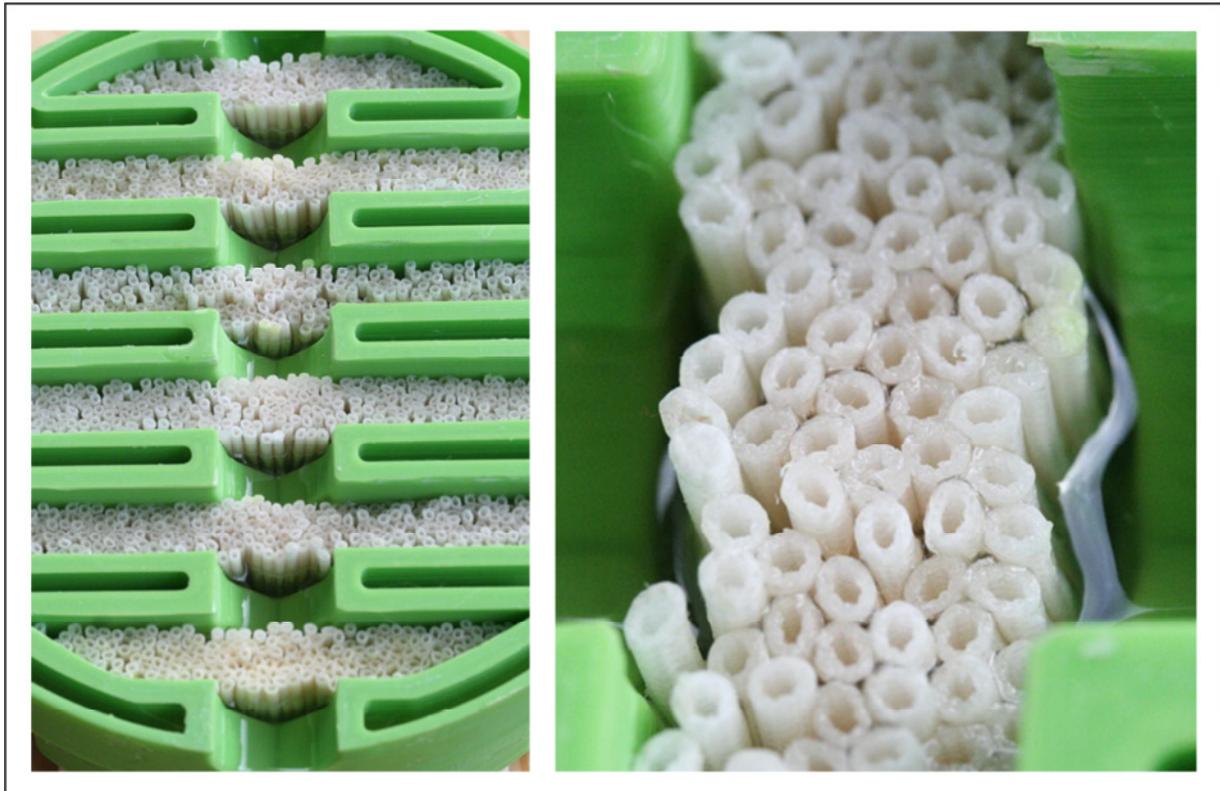


Bild 8: Einharzen der Membran im Modulfuß

Im Rahmen des DBU-Projektes wurde auch die beschriebene Einharzung der Membranblöckchen im Modulfuß erstmalig in die Praxis umgesetzt. Dabei wurden verschiedene Versionen von Kombinationen des Modulfußes und der Rähmchen gefertigt, um eine zügige und Gleichmäßige Verteilung des Harzes im Modulfuß zu gewährleisten.

Bei einigen dieser Testversionen wurde nur der Teil des Modulfußes hergestellt, der für die Entwicklung des Harzschrilles erforderlich ist, um das Fließen des Harzes während des Einfüllprozesses beobachten und optimieren zu können. Dies wäre im kompletten Modulfuß nicht möglich, da die Membranen in dem nach außen geschlossenen Permeat-Kanal enden. In Bild 9 sind Abbildungen einer solchen Testversion von Teilen des Modulfußes dargestellt.



Bild 9: Ergebnisse der Einharz-Tests eines ganzen Modulfußes

### 5.3 Optimierung der Kunststoffteile

Wie bereits in den letzten Kapiteln ersichtlich wurde, war es im Rahmen der Umsetzung Produktionsschritte, wie z. B. des Potting-Verfahrens, immer wieder erforderlich, die dabei verwendeten Kunststoffteile im Detail anzupassen, zu optimieren und zum Teil zu verändern. Um dies einfach, schnell und relativ kostengünstig realisieren zu können, wurden alle Kunststoffteile über 3D-Druck hergestellt. Dabei wurden die Druckparameter in Zusammenarbeit mit dem Lieferanten der Teile so angepasst, dass die entstehenden Teile druckstabil, d.h. auch als Gehäuse für einen Membranfilter (zumindest für Testzwecke) geeignet sind. Nach erfolgter Optimierung werden die Teile später als Spritzgussteile hergestellt. Das 3D-Druck-Verfahren bietet in der Entwicklungsphase jedoch eine sehr effektive und kostengünstige Möglichkeit, Kunststoffteile entsprechend der gewünschten Geometriedaten anpassen und optimieren zu können. Bei allen Kunststoffteilen, die bei der späteren Serienproduktion des Produktes als Spritzgussteile realisiert werden sollen, wurde bereits in der Entwicklungs- und Optimierungsphase darauf geachtet, dass eine Herstellung über Spritzgussverfahren technisch möglich ist.

Auch der Modulfuß selber hat im Rahmen der Entwicklung mehrere Iterationsschleifen durchlaufen. Ein Teilbereich des Modulfußes, der insbesondere auch in dem DBU-Projekt von zentraler Bedeutung war, ist das patentierte Luftverteilsystem. Dieses ist normalerweise fester Bestandteil des Modulfüßelementes. Um eine kostengünstige, schnelle und effektive Optimierung des Luftverteilsystems anhand der Ergebnisse in der Praxis durchführen zu können, wurde das Luftverteilsystem vom Modulfuß separiert und austauschbar gestaltet (Bild 10)

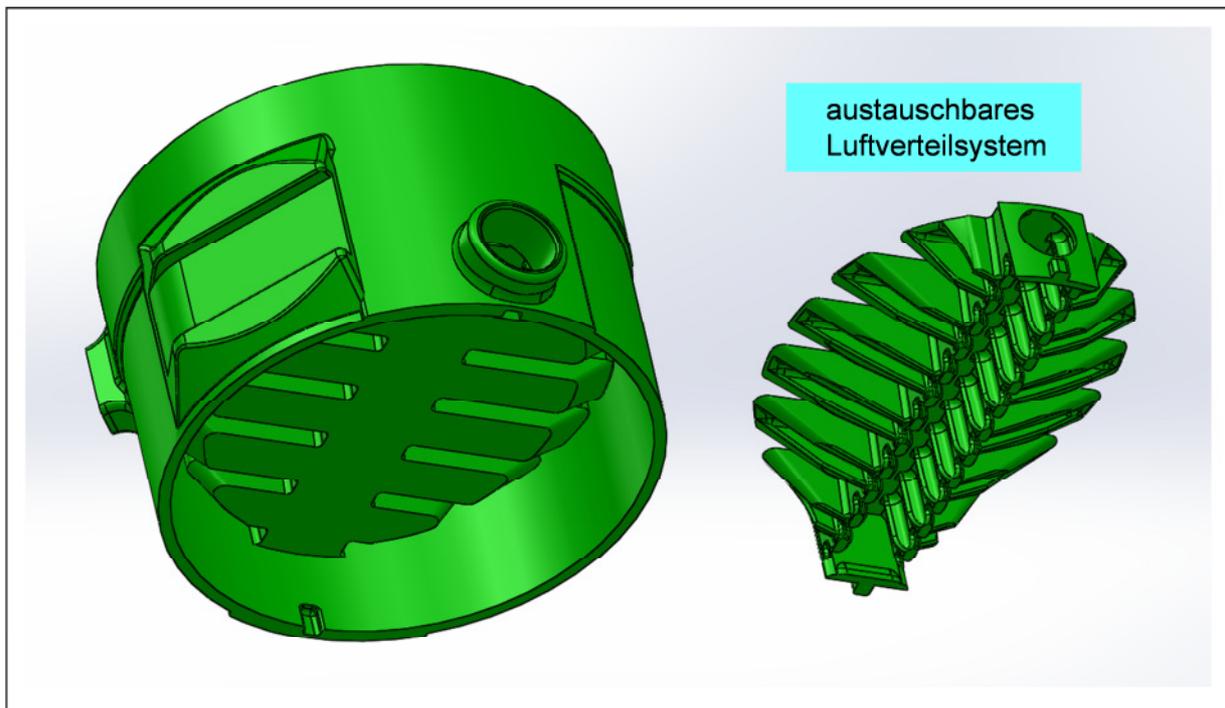


Bild 10: Separierung des Luftverteilsystems für Optimierungszwecke

So konnten die Details des Luftverteilsystems (Breite und Tiefe der Überströmwehre) separat optimiert werden, ohne jedes Mal ein neues Modul-Rohr herstellen und mit Membranen bestücken zu müssen. Auf die Effekte der Optimierung des Luftverteilsystems wird in Kapitel 6.1 noch näher eingegangen.

#### 5.4 Konzeption des Modulgestells

Im technischen Apparat des Membion-Membranfilters werden mehrere der mit Membranen bestückten Modulrohre in einem Modulgestell aus Edelstahl, dem sogenannten Modulrahmen montiert. Bei der Entwicklung der Kunststoffteile eines Modulrohres ist daher auch die Befestigung, die Halterung und das Einbringen des Modulfußes in diesen Rahmen von Bedeutung.

Hierzu wurde von Membion ein Einschiebe-Konzept entwickelt, das im Rahmen der Optimierung der Kunststoffteile erstmals getestet und hinsichtlich seiner Montierbarkeit optimiert wurde. So weist der Modulfuß außen in seinem Umfang auf zwei gegenüberliegenden Seiten Einschiebe-Nuten auf, so dass das Modulrohr auf am Gestell angebrachte Holme aufgeschoben werden kann. Bild 11 zeigt das Prinzip des Modulkonzeptes zur Befestigung der Modulrohre im Modulrahmen.

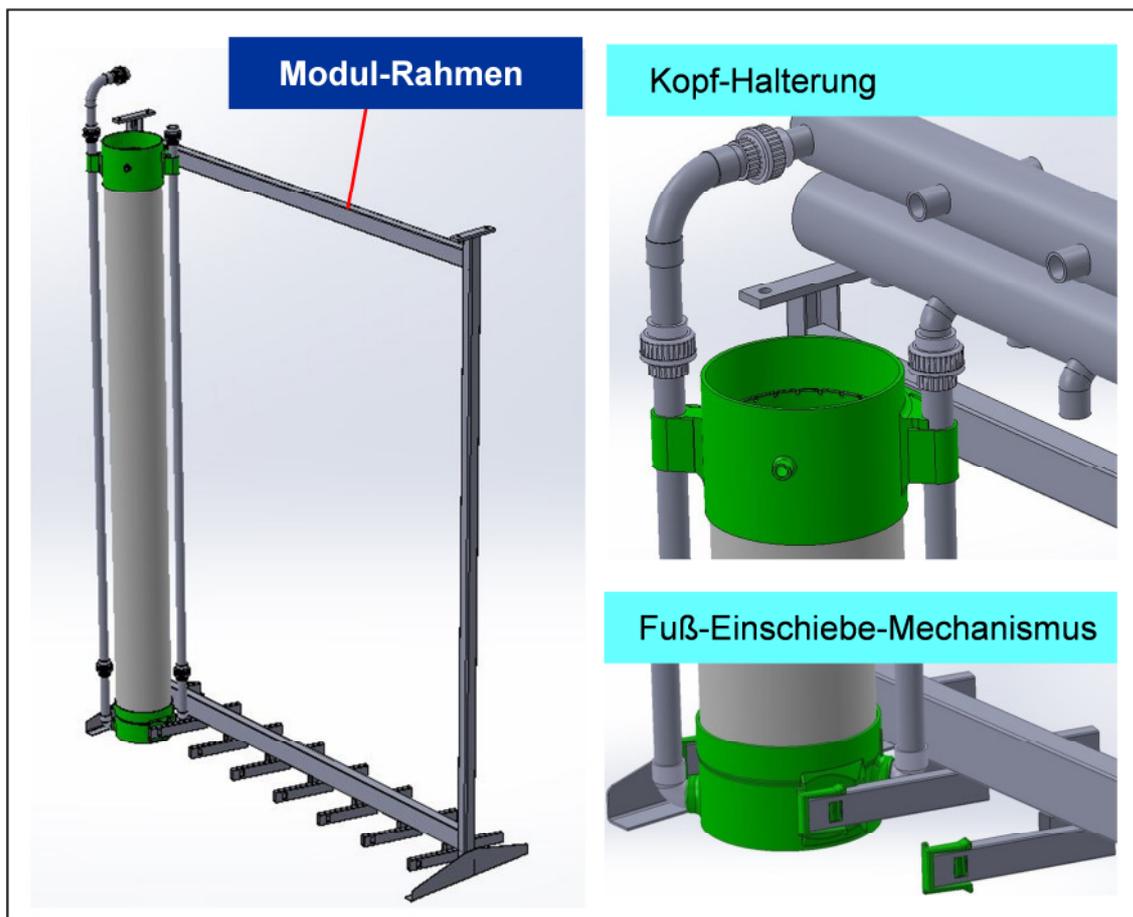


Bild 11: Konzept der Einbringung und Halterung der Modulrohre im Modulrahmen

Nachdem die Modulfüße auf die Holme des Gestells aufgeschoben wurden, werden sie über einen Klick-Mechanismus durch Auf-Klicken einer Kappe auf das Ende des Holmes im Gestell fixiert.

Bei der Gestaltung der oberen Halterung des Membranfilters im Modulgestell ist die unterschiedliche Temperatúrausdehnung der Kunststoffteile des Moduls im Vergleich zum Edelstahl-Gestell zu berücksichtigen. Daher wurde hierfür eine Befestigung mit einem Freiheitsgrad für eine Vertikalausdehnung des Modulrohres entwickelt. Bild 12 zeigt Bilder aus der Optimierungsphase von Modulfuß- und Kopf-Element im Rahmen der Entwicklung Befestigungsmethode der Modulrohre im Modulgestell (hier ein Modul ohne Membranen).



Bild 12: Optimierung der Befestigung des Modulrohres im Modulrahmen

Dabei wurden zunächst die Gleiteigenschaften des Modulfußes auf den gewünschten Edelstahlprofilen untersucht, bevor die Herstellung des Modulgestells beauftragt wurde. Im Bereich der oberen Halterung zeigt sich noch Entwicklungsbedarf. Auch hier wird ein Klickmechanismus angestrebt, der ohne Verschraubung auskommt und einfach montiert werden kann. Dieser Entwicklungsschritt hat jedoch für die Funktion des Filters keine Bedeutung und wurde aus zeitlichen Gründen im Rahmen des DBU-Projektes noch nicht optimiert.

Bild 13 zeigt die Konzeptionierung des großtechnischen Membion-Membranfilters mit einer Gesamtmembranfläche von 1500 m<sup>2</sup>. Dabei werden jeweils 7 Membranrohre zu beiden Seiten eines Edelstahlgestells in einem sogenannten Stack montiert und vier dieser Stacks zu einem Gesamtmodul zusammengesetzt. Die äußeren Abmessungen des Gesamtmoduls sind dabei derart gestaltet, dass sie zu am Markt etablierten Systemen mit 1500 m<sup>2</sup> Filterfläche kompatibel sind. Somit kann der Modul auch in bestehenden Anlagen mit konkurrierenden Systemen eingesetzt werden.

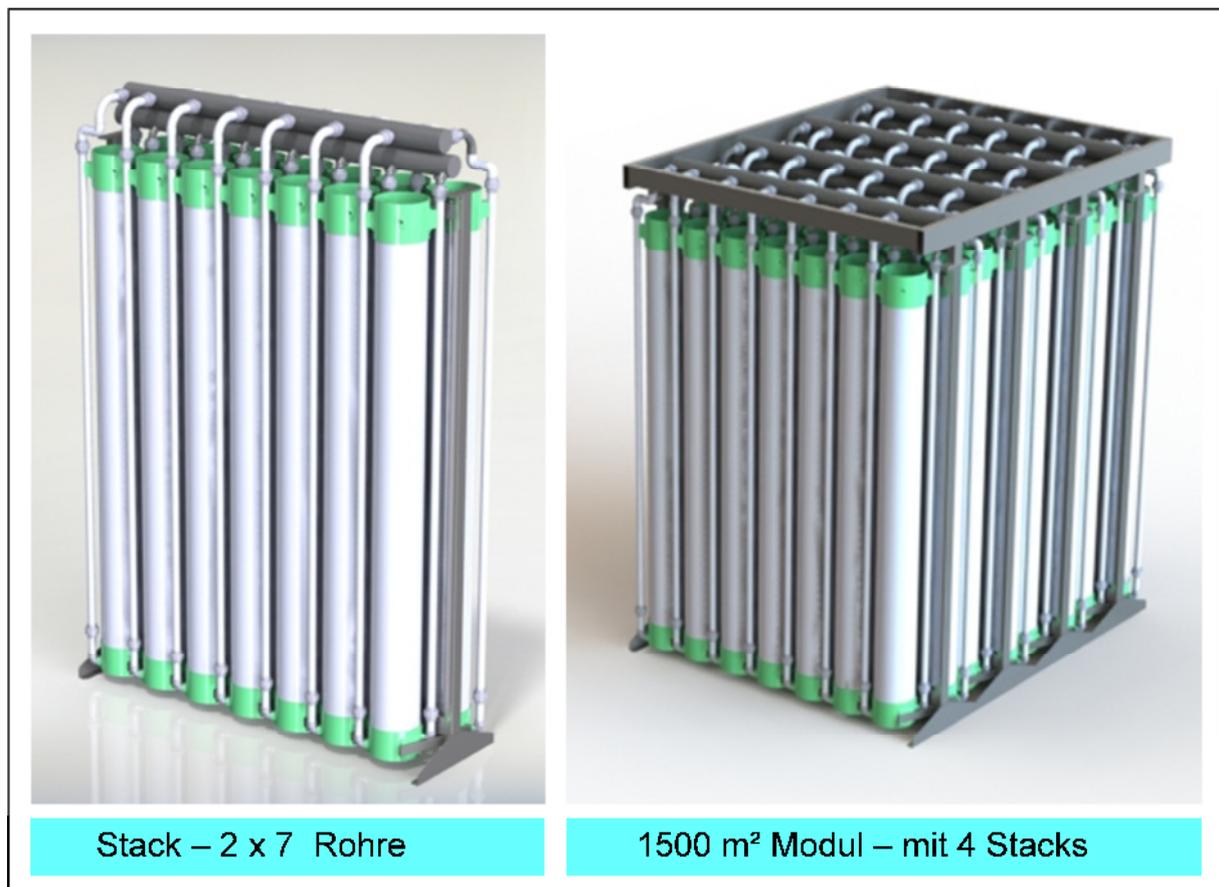


Bild 13: Gestaltung des großtechnischen Membion-Membranmoduls

## 5.5 Konzeption der Versuchsanlage

Im Rahmen der Vorarbeiten des Funktionsmustertests war auch die Konzeption und Beauftragung einer Versuchsanlage vorgesehen, in der der spätere Test des kompletten Funktionsmusters des Membion-Membranfilters erfolgen sollte. Wie bereits erwähnt war die Versuchsanlage während der Beantragung des Projektes zunächst nur für erste hydrodynamische Tests ohne Schlamm geplant. Da von Seiten der Gutachter jedoch gewünscht wurde, eine potentielle Einsparung an Energie für die Belüftung der Membranmodule auch abschätzen zu können, fiel während der Startphase des Projektes die Entscheidung, die Versuchsanlage so zu konzipieren, dass sie direkt auf einer Membran-Kläranlage im Bypass mit MBR-Schlamm betrieben werden kann. Bild 14 zeigt Abbildungen der Anlage am Ende der Bauphase mit einem nicht mit Membranen bestückten Modulrohr.



Bild 14: Ansichten der Versuchsanlage

Diese Versuchsanlage besteht aus einem transparenten Tank, in den das Membranmodul inklusiv Modulgestell abgetaucht werden kann. Die transparente Gestaltung des Tanks gestattet es, während der hydrodynamischen Versuche das Strömungsverhalten des Luft-Wasser-Gemisches im Modul zu beobachten und optimieren zu können. Auch hier ist eine Halterung für das Gestell erforderlich. Zudem weist die Versuchsanlage einen kompletten Filtrationsstrang inklusiv Messtechnik und Automatisierung auf, um den Funktionstest des Membranfilters im Realbetrieb durchführen zu können. Die Versuchsanlage wurde darüber hinaus transportabel gestaltet, um sie für die geplanten Versuche auf der Kläranlage einsetzen zu können.

Bild 15 zeigt das Fließbild der Anlage. Um die Anlage im Rahmen eines geplanten Folgeprojektes zu Optimierungszwecken parallel zu einer Demonstrationsanlage im technischen Maßstab betreiben zu können, wurde ebenfalls eine automatisierte Reinigungsmöglichkeit vorgesehen, die jedoch noch nicht angeschlossen und im Betrieb ist. Die Anlage ist jedoch bereits vorbereitet für einen Dauerbetrieb unter Originalbedingungen.

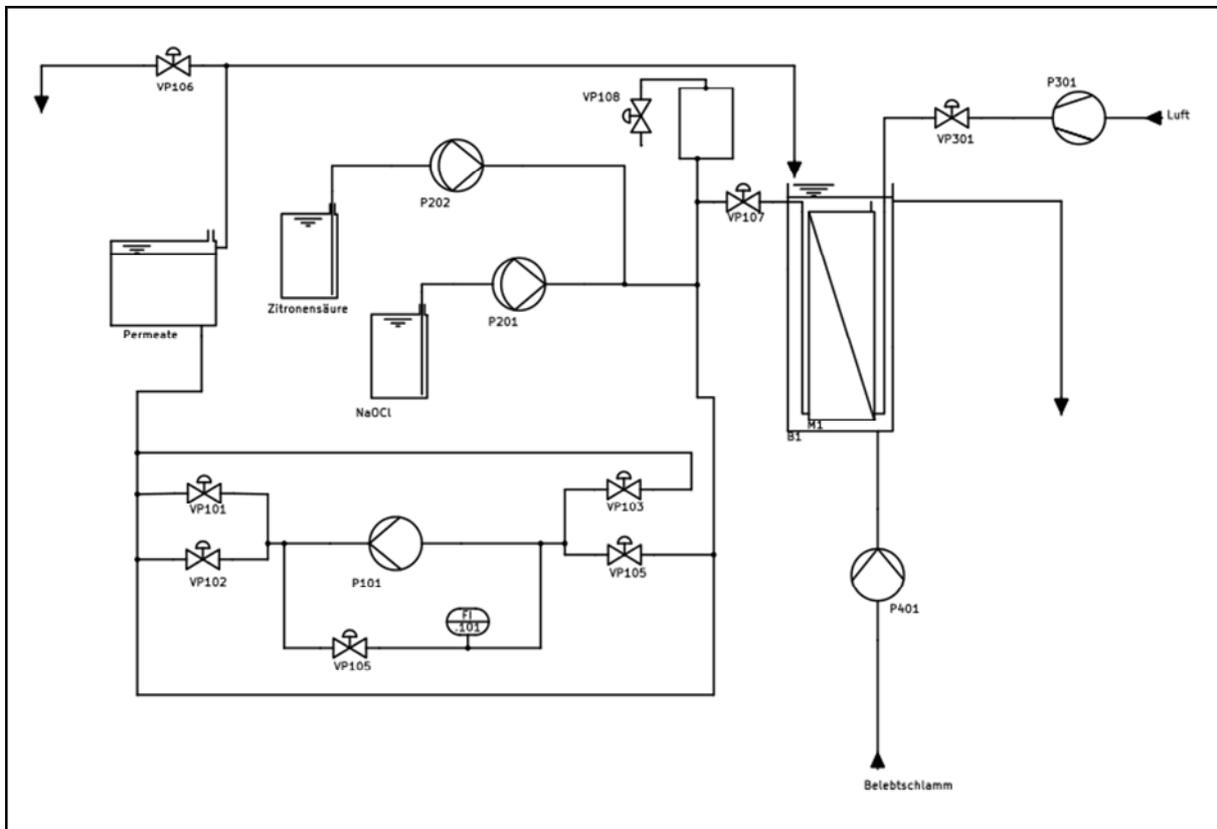


Bild 15: Fließbild der Versuchsanlage

## 6. Herstellung des Funktionsmusters

Nach Abschluss einzelner Teilschritte der Vorarbeiten konnte mit der Herstellung des Funktionsmusters begonnen werden. Hierzu zählen die bereits erläuterten Schritte: das einseitige Verschließen der Membranfasern, das Potting der Membranfasern in Membranblöckchen und das Einbringen der Membranblöckchen in den Modulfuß – bei der Funktionsmustererstellung werden dabei jedoch 2 m lange Fasern verwendet, was ebenfalls eine neue Herausforderung ist, insbesondere beim Handling der Membranblöckchen und deren Einbindung in den Modulfuß. Die unterschiedlichen Arbeiten zur Montage des Moduls begleiteten das Projekt nahezu über die gesamte Projektdauer, beginnend mit den beschriebenen Versuchen zum Einschleiben des Modulfußes bis hin zur Einbringung des fertigen Moduls in das Gestell und dann gemeinsam mit diesem in die Versuchsanlage. Die Bilder 16 und 17 zeigen Abbildungen des Funktionsmusters vor dessen Einbringung in die Versuchsanlage.



Bild 16: Ansichten der Funktionsmuster



Bild 17: Ansichten der Funktionsmuster (2)

## 7. Test des Funktionsmusters und Ergebnisse

Die eigentlichen Tests des Funktionsmusters bilden den letzten Teilschritt des beantragten Vorhabens.

### 7.1 Hydrodynamische Modultests ohne Membranen

Nach Fertigstellung, Installation und Anschluss der Versuchsanlage wurden zunächst hydrodynamische Tests des Moduls ohne Membranen durchgeführt. Ziel dieses Versuch war es, die Gleichmäßigkeit der Belüftung im Fußelement besser beobachten zu können.



Bild 18: hydrodynamische Tests ohne Membranen

Da nach dem Einbringen der Membranen die Sicht auf die Ausbuchtungen der Strömungskanäle eingeschränkt ist, kann die Verteilung der Luft im Fußelement besser ohne Membranen beobachtet werden. Bild 18 zeigt im oberen Teil den Modulfuß mit aufgesetztem Plexiglas-Rohr und im unteren Teil eine Ansicht von unten während des Betriebs des mit Luft beaufschlagten Luftverteilsystems. Um das Betriebsverhalten des Luftverteilsystems von unten beobachten zu können, wurde der Plexiglastank der Versuchsanlage bewusst auf einem Edelstahlgestell erhöht positioniert.

Wie in Bild 18 zu erkennen ist, wird der Luftverteilkanal komplett mit Luft geflutet während die Luft diesen Kanal durch die seitlichen Schlitze verlässt und dann zwischen und unterhalb der Finger ausströmt und sich im Modulfuß verteilt. Diese Verteilung war jedoch zunächst noch sehr ungleichmäßig, da die Luft bevorzugt aus den Schlitzen zwischen zwei Fingern herausstrat und daher überwiegend entlang des Mittel-Ankers im Modul aufstieg (siehe linkes Foto in Bild 19). Nach einer durchgeführten Optimierung der Breite und Tiefe der seitlichen Schlitze des Luftverteilers, konnte eine sehr gleichmäßige Verteilung der Luft über den gesamten Modulquerschnitt erreicht werden. Die Unterschiede in der Luftverteilung sind in Bild 19 für einen Luftvolumenstrom von knapp 6 m<sup>3</sup>/h vor und nach der Optimierung des Luftverteilers dargestellt.

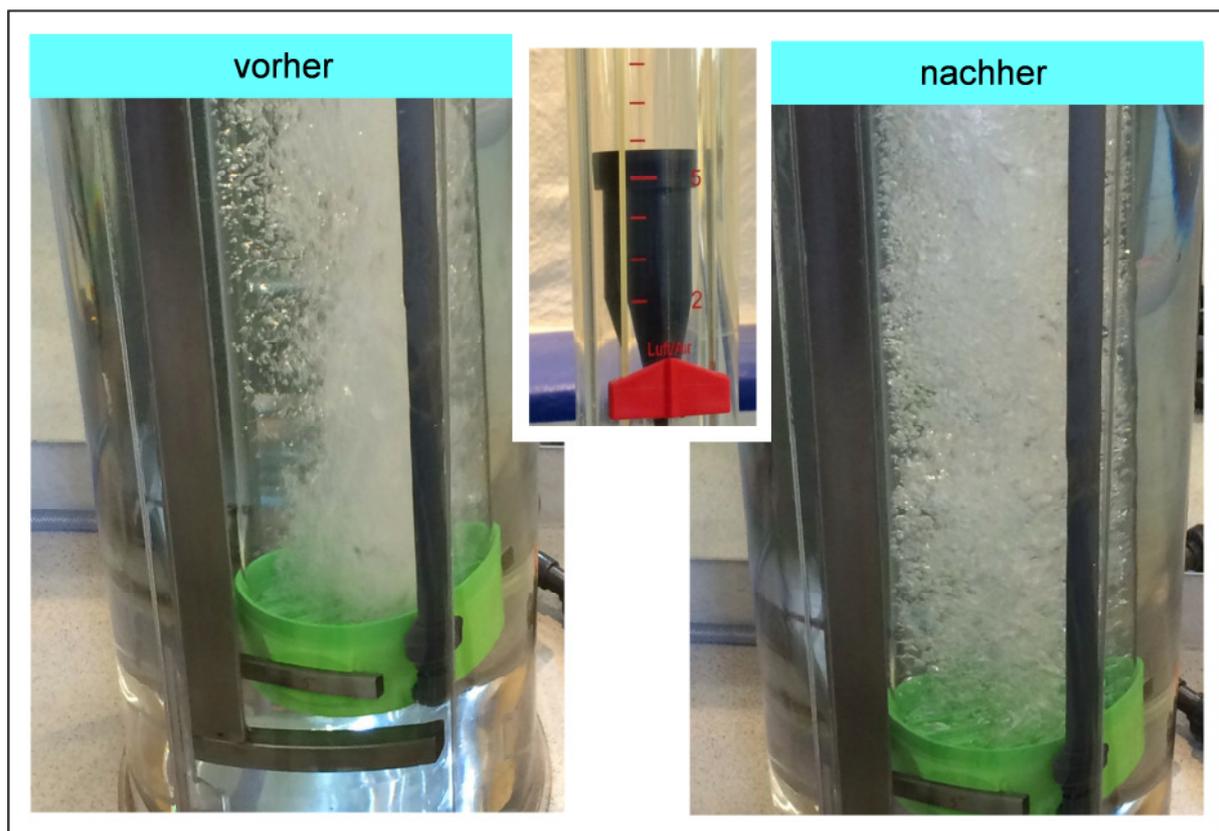


Bild 19: Luftverteilung im Fußelement vor und nach der Optimierung des Luftverteilers

## 7.2 Hydrodynamische Modultests mit Membranen

Im nächsten Schritt wurde das hydrodynamische Verhalten des Moduls mit Membranen untersucht. Wie zu erwarten zeigte sich, dass die Membranen als Strömungsbremse in dem Rohr fungieren und die Gesamtverteilung der Luft noch einmal weiter optimiert werden musste. Dabei mussten weniger die Tiefe und Breite der Schlitze des Luftverteilsystems optimiert werden als vielmehr die Länge der Leitkanäle unterhalb der Finger, um die Luft auch im äußeren Bereich der Finger gleichmäßiger zu verteilen.

Bild 20 zeigt die Versuchsanlage nachdem der mit Membranen bestückte Modul als Funktionsmuster eingebaut wurde. Die aktive Länge der Membranfasern betrug dabei genau zwei Meter mit einer Gesamtmembranfläche im Modul von 27 m<sup>2</sup>.



Bild 20: Pilotanlage mit eingebautem Funktionsmuster-Modul

Nach weiterer Optimierung des Luftverteilsystems konnte eine gleichmäßige Belüftung des Moduls erreicht werden bis zu einer minimalen Luftmenge von knapp unter 4 m<sup>3</sup>/h. Bild 21 zeigt Ansichten des Moduls von außen sowie des Luftverteilsystems von unten während der Belüftung mit 5 m<sup>3</sup>/h.



Bild 21: Belüftung des Moduls mit 5 m<sup>3</sup>/h

Damit waren die Vorversuche zur Optimierung des Luftverteilsystems abgeschlossen und der eigentliche Funktionsmustertest im Schlamm konnte beginnen.

### 7.3 Funktionstest

Der anschließende Funktionstest zu Filtration und Dichtigkeit des Moduls bildet den Abschluss des ersten Teil-Projektes des DBU-Vorhabens. Die Pilotanlage wurde auf die Membrankläranlage Konzen des Wasserverband Eifel-Rur gebracht und dort im Bypass zur bestehenden, mit Plattenmodulen bestückten großtechnischen Membranbelebungsanlage angeschlossen.

Nach der Inbetriebnahme-Phase mit Brauchwasser, in der auch die im vorherigen Kapitel beschriebenen hydrodynamischen Versuche durchgeführt wurden, wurde die Anlage mit Schlamm der großtechnischen MBR-Anlage beschickt, da sie nicht mit einer eigenen biologischen Stufe ausgerüstet ist. Der Schlammumsatz durch die Pilotanlage wurde konstant gehalten, während das in dem Funktionsmuster-Modul erzeugte Filtrat in den Plexiglastank zurückgeleitet wurde. Bild 22 zeigt die Befüllung der Anlage mit Schlamm.

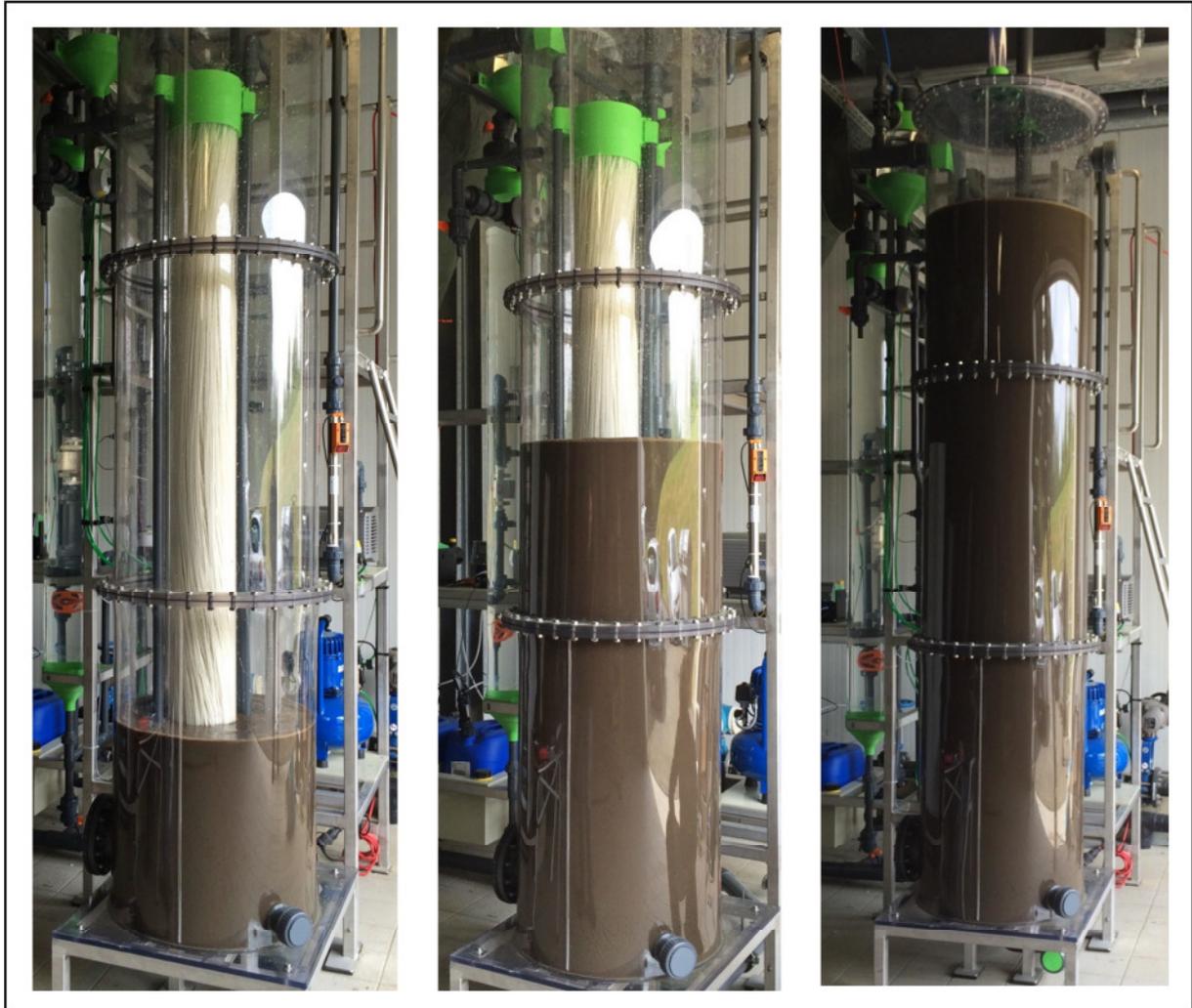


Bild 22: Befüllung der Pilotanlage mit Schlamm der Membrankläranlage Konzen

In Bild 23 ist links die Rückführung des Filtrats in den Tank zu sehen und rechts der Vergleich zwischen Schlamm und Filtrat. Die Dichtigkeit des Moduls wurde im Vorfeld der Versuche durch eine Beaufschlagung der Permeatseite des in Wasser abgetauchten Moduls mit einem Luftdruck von 500 mbar kontrolliert.

Während der Inbetriebnahme des Funktionsmustermoduls mit Schlamm zeigte sich, dass auch mit geringen Luftmengen von etwa 4 bis 6 m<sup>3</sup>/h eine stabile Filtrationsleistung erreicht werden konnte. Die Filtrationsparameter wurden dabei zunächst wie folgt eingestellt:

- Filtrationszeit: 600 Sekunden
- Belüftungsrate: 4 - 6 m<sup>3</sup>/h
- Rückspülzeit: 30 Sekunden
- Rückspülvolumenstrom: 30 l/m<sup>2</sup>h

Bild 24 veranschaulicht die Filtrationszyklen anhand aufgezeichneter Betriebsdaten. Bild 25 zeigt den Verlauf der Betriebsdaten zu Permeatfluss und Permeabilität bei einer Belüftungsrate von 4,5 m<sup>3</sup>/h über einen mehrstündigen Zeitraum.

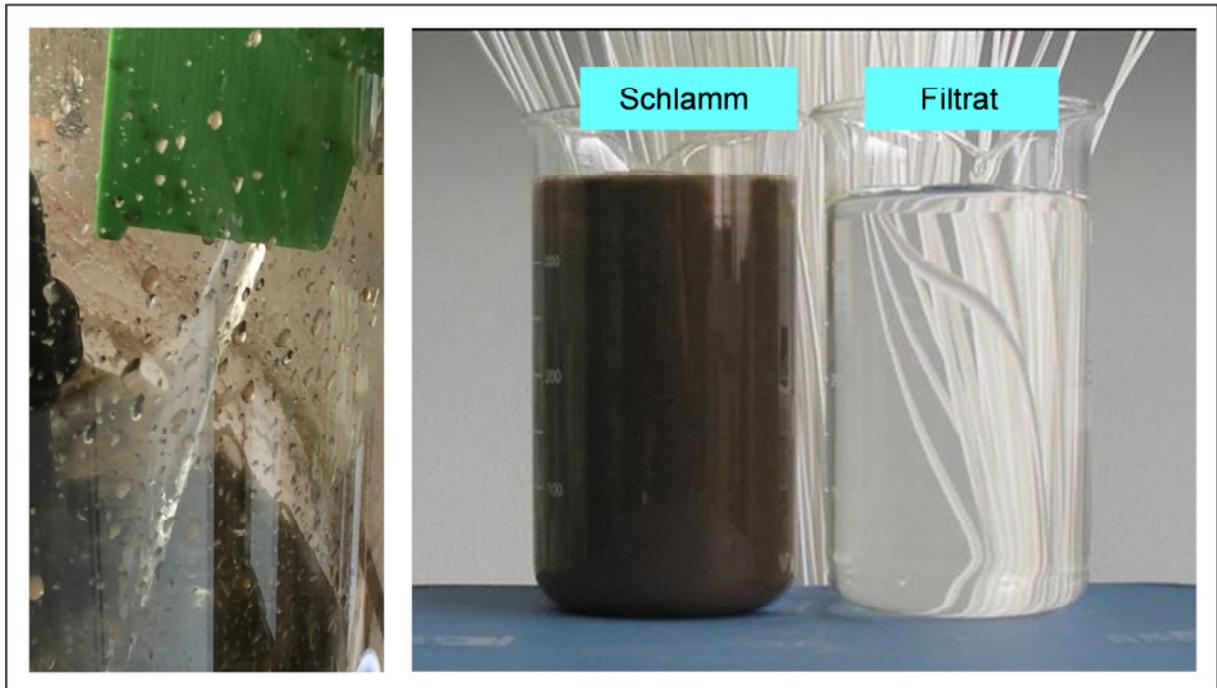


Bild 23: Rückführung des Filtrats in den Tank (links) – Vergleich Schlamm – Filtrat (rechts)

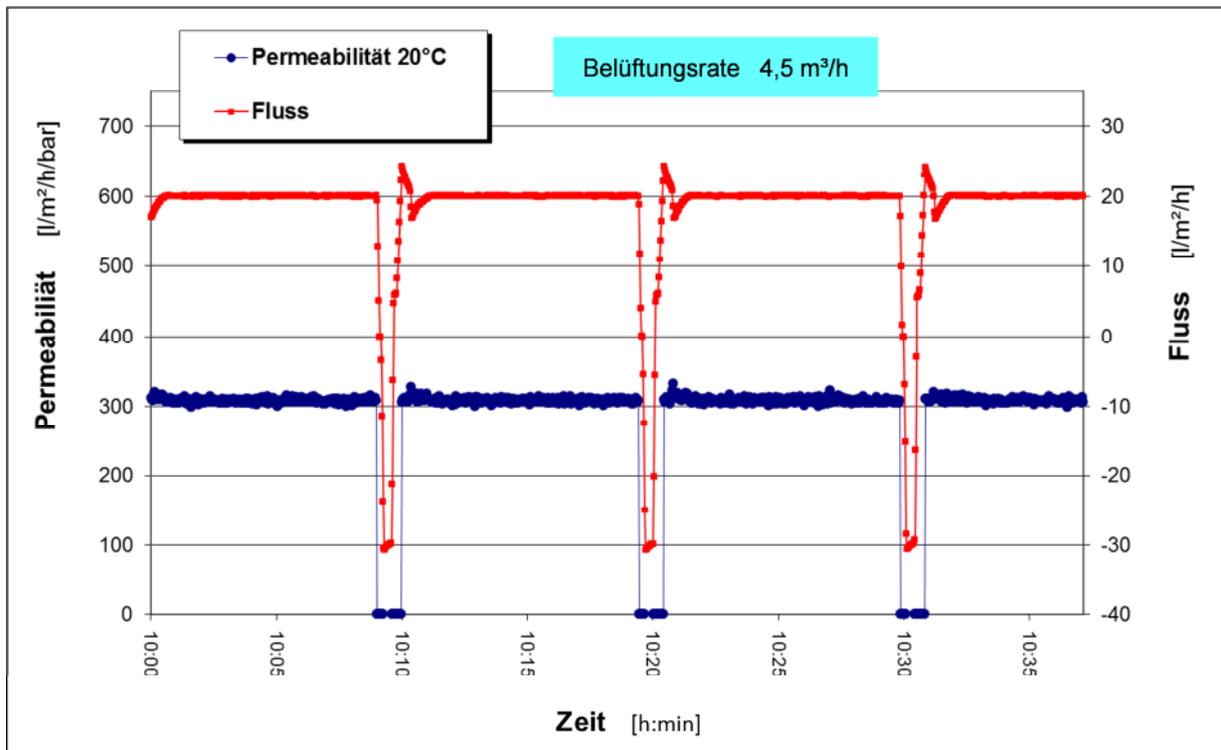


Bild 24: Betriebsdaten zur Verdeutlichung des Filtrationsintervalls

Beim Überschwingen der Werte nach der Rückspülung zeigt sich, dass die Regelung des Prozesses noch weiter optimiert werden muss.

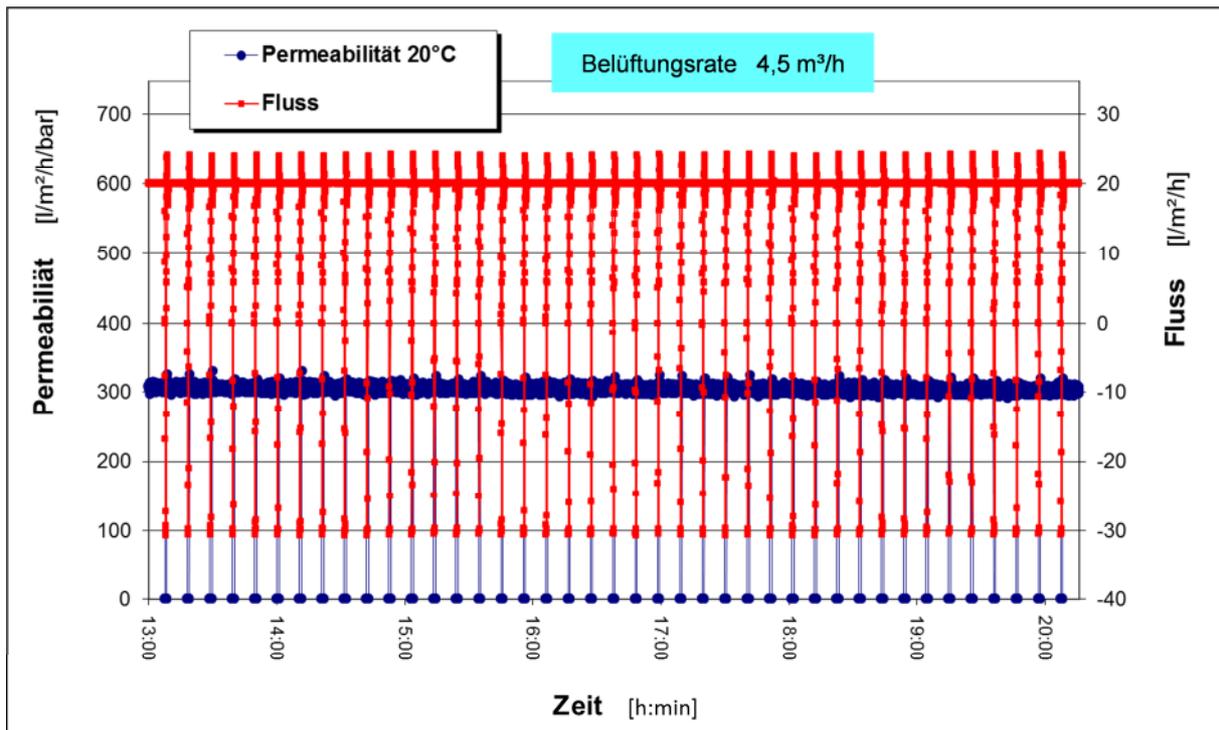


Bild 25: weitere Betriebsdaten über einen längeren Zeitraum von mehreren Stunden

Mit den oben aufgeführten Filtrationsparametern und einer reduzierten Belüftungsrate von  $4\text{ m}^3/h$  wurde dann ein erster Critical-Flux-Test durchgeführt, bei dem die Filtrationsleistung nach jeweils 2 Filtrationszyklen um  $5\text{ l/m}^2/h$  gesteigert wurde (Bild 26).

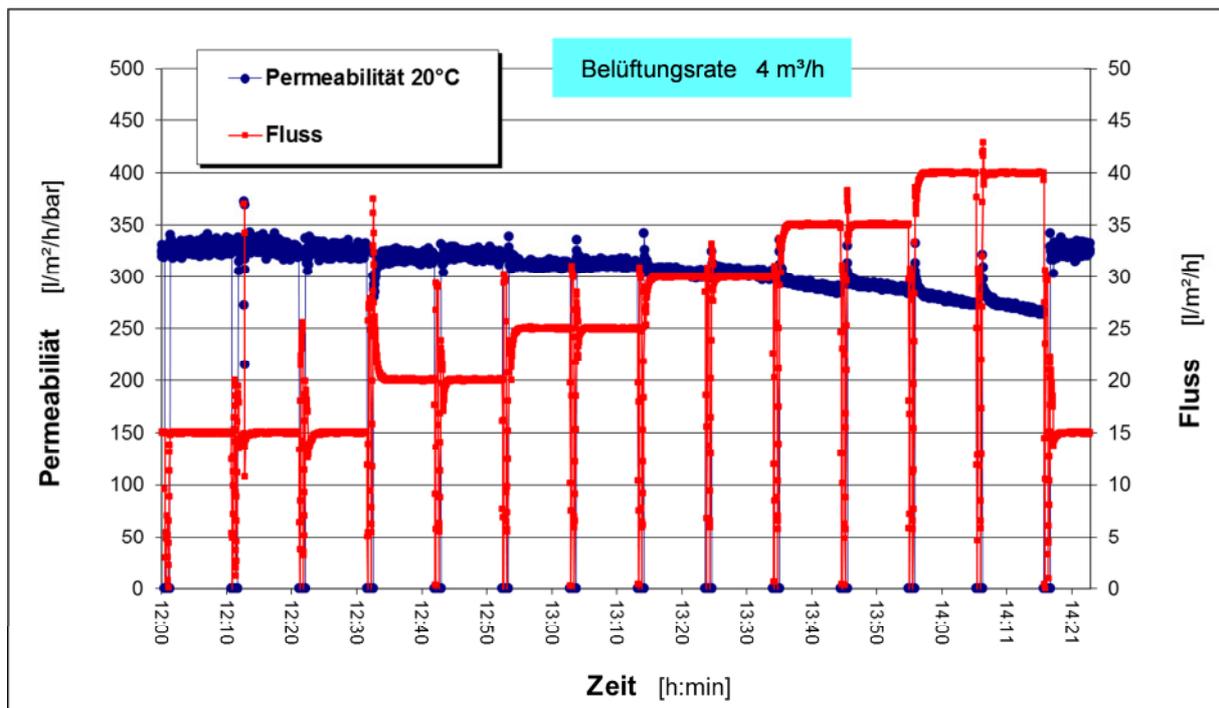


Bild 26: Datenaufzeichnung zum ersten Critical-Flux-Test

So konnte die Filtrationsleistung sukzessiv auf 40 l/m<sup>2</sup>h gesteigert werden. Bei Erhöhung der Belüftungsrate auf 6 m<sup>3</sup>/h konnte die Filtrationsleistung in einem zweiten Critical-Flux-Test bis auf 50 l/m<sup>2</sup>h gesteigert werden, bei anschließender vollständiger Regeneration des Moduls nach Senkung der Filtrationsleistung (Bild 27).

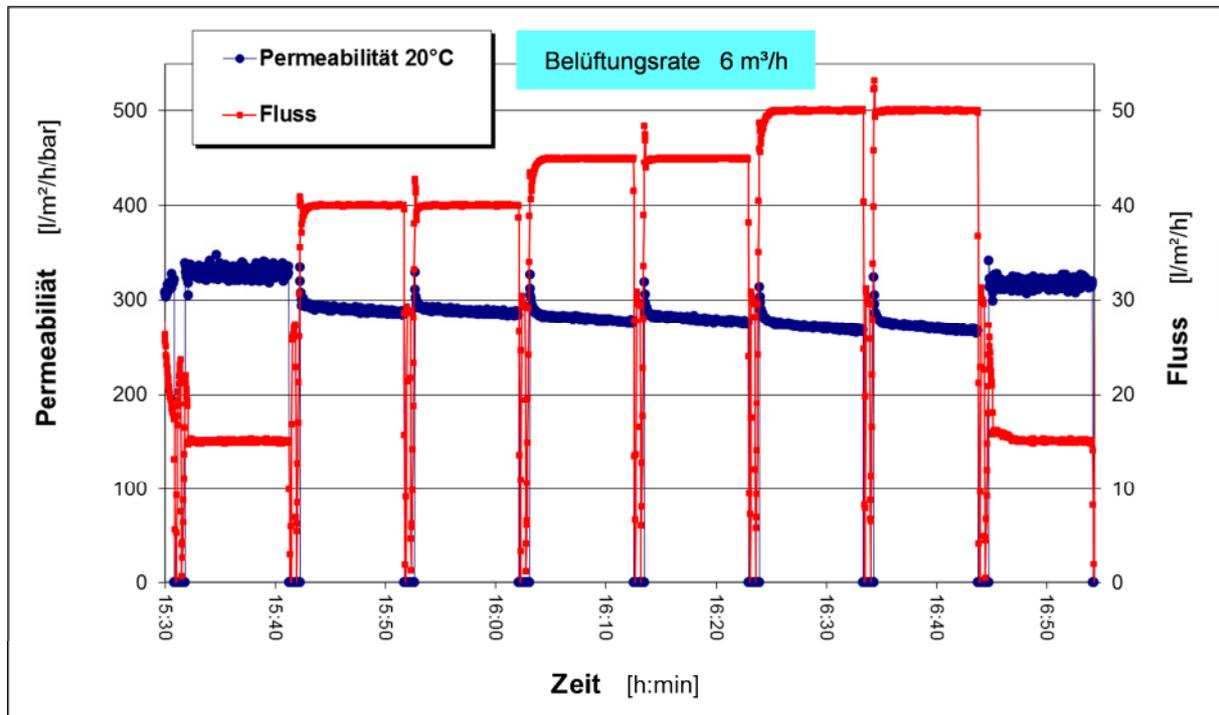


Bild 27: Datenaufzeichnung zum zweiten Critical-Flux-Test

Aus diesen Daten lässt sich eine erste Energiebedarfsabschätzung für einen späteren Dauerbetrieb des Moduls abschätzen. Diese Abschätzung wurde in der Tabelle-01 zunächst für eine Belüftungsrate des Moduls von 4,5 m<sup>3</sup>/h durchgeführt.

Der Energiebedarf wurde dabei für drei verschiedenen Filtrationsleistungen von 10, 20 und 40 l/m<sup>2</sup>h berechnet. Bei dem niedrigsten Durchsatz wurde die Belüftung mit 50% getaktet ähnlich wie es auch beim Betrieb von konkurrierenden Membransystemen praktiziert wird. Anhand der zugrunde gelegten Daten ergeben sich spezifische Energieverbräuche von 0,06 bis 0,13 kWh/m<sup>3</sup> Filtrat.

Bei der Berechnung des Energiebedarfs zahlt sich ein weiterer Vorteil des Membion-Membranmodul aus: bei der Konzipierung des Moduls wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass die Einblastiefe der Luft direkt unterhalb des Modulfußes integriert ist und zudem keine großen Wasserüberstände benötigt werden. Dadurch kann der Belüftungsdruck vergleichsweise gering gehalten werden.

		<b>Membion:</b>		
<b>Permeatfluss</b>	[l/m <sup>2</sup> h]	40	20	10
<b>Taktung</b>		Dauer-Bel.	Dauer-Bel.	60-60 - Takt
<b>prozentuale Belüftung pro Zeit</b>	[%]	100%	100%	50%
<b>Luftmenge während Belüftung</b>	[Nm <sup>3</sup> /h]	4,5	4,5	4,5
<b>Wasserüberstand über Modul</b>	[cm]	3	3	3
<b>Einblastiefe</b>	[m]	2,13	2,13	2,13
<b>Druckverlust pro Düse</b>	[mbar]	10	10	10
<b>Belüftungs-Druck</b>	[mbar]	223	223	223
<b>Energie-Aufnahme</b>	[kW]	0,045	0,045	0,022
<b>Permeatvolumenstrom</b>	[m <sup>3</sup> /h]	1,09	0,54	0,27
<b>Luft-/ Permeatvolumenstrom</b>	[-]	4,14	8,28	8,28
<b>angenommener Wirkungsgrad</b>	[%]	65%	65%	65%
<b>spezifischer Energiebedarf</b>	[kWh/m <sup>3</sup> ]	<b>0,06</b>	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>

Tabelle-01: erste Abschätzung des Energiebedarfs

Da es sich bei den vorliegenden Versuchen um den Betrieb eines Funktionsmusters, d.h. nur eines einzelnen Modul-Rohres handelt, ist zu erwarten, dass der Energiebedarf aufgrund von Realeffekten im großtechnischen Modul etwas höher ausfallen wird. Rechnet man daher für den Dauerbetrieb aus Sicherheitsgründen mit einem höheren Luftbedarf von 6 bis 8 m<sup>3</sup>/h, so zeigt Tabelle-02 die entsprechenden Daten zur Berechnung des spezifischen Energiebedarfs.

Diese werden am Ende verglichen mit einem als repräsentativ zugrunde gelegten Wert des Energiebedarfs zum Stand der Technik von optimierten MBR-Anlagen von 0,19 kWh/m<sup>3</sup>. Dieser Wert beruht auf gemessenen Daten der großtechnischen MBR-Anlage Nordkanal des Erftverbandes. Diese wurden dem Abschlussbericht zum BMU-Umweltinnovationsprogramm zum Vorhaben „Energetische Optimierung der Membrankläranlage Nordkanal“ entnommen (Tabelle 9, Seite 39). Der angegebene Wert von 0,19 kWh/m<sup>3</sup> bezieht sich dabei nur auf die Belüftung der Membranmodule. Diesem liegt eine tatsächlich gefahrene, durchschnittliche Filtrationsleistung der Membranmodule von weniger als 7 l/m<sup>2</sup>h zugrunde.



Bei der Anlage in Nordkanal zeigte sich der gleiche Trend, wie auch bei den Berechnungen des Energiebedarfs in Tabelle-01 und Tabelle-02, dass bei höheren Filtrationsleistungen die Anlage energetisch im günstigsten Bereich arbeitet. Die Energie-Optimierung der Anlage in Nordkanal wurde dabei derart gefahren, dass die Membranstraßen abwechselnd mit Volllast gefahren wurden während die anderen in Stand-by-Modus gingen. Wenn man auch für das Membion-Modul nur den Volllast-Betrieb bei 40 l/m<sup>2</sup>h zugrunde legt und dabei noch einen geringen Prozentsatz für die Stand-by-Belüftung draufrechnet, ergibt sich ein energetisches Einsparpotential von 35% - 50 %.

Mittlerweile gibt es weitere Belüftungsmethoden beim Betrieb von MBR-Anlagen, die auf dem sogenannten Geysir-Prinzip beruhen, d.h. ein konstanter Luftvolumenstrom wird kontinuierlich in ein Luftreservoir unterhalb des Moduls gegeben, das sich dann in Intervallen entleert. Dadurch kann der Energiebedarf von MBR-Anlagen ebenfalls gesenkt werden, was jedoch hauptsächlich für den Nicht-Volllastbetrieb zutrifft, da beim Volllast-Betrieb in der Regel mit 100%-iger Belüftungsrate gefahren wird, d.h. auch der Geysir höher beaufschlagt wird. Das System des Geysirs bringt daher nur Vorteile für den Nicht-Volllast-Betrieb. Es hat jedoch immer den Nachteil, dass das Luftreservoir des Geysirs unterhalb der Membranmodule angeordnet ist und daher zu einer größeren Einblastiefe führt, was wiederum einen Teil der Energieeinsparung zu Nichte macht.

Auch beim Membion-Modul könnte für einen Nicht-Volllast-Betrieb ein solcher Geysir unterhalb des Fußelementes installiert werden, wodurch sich auch für diese Lastfälle eine weitere Energieeinsparung ergeben würde.

Insgesamt bestätigen die ersten Versuche des Funktionsmusters das deutliche Potenzial des Membion-Membranfilters zur Senkung des Energiebedarfs bei MBR-Anlagen im Vergleich zum Stand der Technik.

## **8. Ökonomische und ökologische Betrachtungen**

Die Übertragbarkeit des neuen Modulkonzeptes von Membion in den Markt hängt vor allem von den ökonomischen und ökologischen Randbedingungen ab. Diese sollen daher in diesem Kapitel noch einmal zusammenhängend dargestellt werden.

Die während der Konzeptionierungs-Phase des Moduls erwarteten ökologischen Vorteile im Vergleich zu konkurrierenden Systemen stützen sich im Wesentlichen auf die langjährigen Erfahrungen der Antragsteller beim Betrieb von Membranmodulen in MBR-Anwendungen.

Die ökonomischen Aspekte bei der Herstellung im Markt bestehender Membranmodule sind den Antragstellern aufgrund ihres beruflichen Werdegangs bis ins Detail bestens vertraut – insbesondere im Hinblick auf das selber zuvor entwickelte und in Serienproduktion hergestellte Puron-Modul. Zu den Details dieser Produktionskosten der Wettbewerber werden allerdings aus Geheimhaltungsgründen in diesem Bericht keine konkreten Angaben gemacht. In dem vorliegenden Dokument werden daher nur solche Angaben zurate gezogen,

die auf äußerlichen, für Jedermann überprüfbareren technischen Details des Puron-Moduls bestehen und daher nicht der Geheimhaltungspflicht unterliegen. Alle vergleichenden Angaben werden bewusst nur als prozentuale Werte angegeben, aus denen keinerlei Rückschlüsse auf die tatsächlichen Produktionskosten der Wettbewerber geschlossen werden können.

## **8.1 Ökologische Aspekte**

Die wesentlichen ökologischen Vorteile des Membion Membranfilters ergeben sich aus der Verwendung eines die Membranfasern vollständig umgebenden, mantelseitig geschlossenen Rohres in Kombination mit einem neuartigen Design des Modulfußes und insbesondere des darin implementierten Luftverteilsystems. Die generellen Vorteile eines geschlossenen, die Membranen umgebenden Rohres für den Energiebedarf bei der Filtration sind nicht neu und werden u.a. in den beiden folgenden Patentschriften beschrieben:

- (1) JP 2003-024937 von Asahi Kasei Corp. (Prioritätsdatum 13.07.2001) und
- (2) US 2006/0273007 A1 von Siemens (Prioritätsdatum 02.11.2004).

In beiden Patenten wird der positive Effekt zur besseren Ausnutzung der Luftenergie beschrieben, indem die Luft durch die Rohre im Membranbündel gehalten wird. In einem ausgeführten Beispiel von (2) wird eine Energieeinsparung von 33% erwähnt.

Viele am Markt befindliche, großtechnische Module weisen Bereiche auf, in denen keine Membranfasern sind, die aber trotzdem von der aufsteigenden Luft durchströmt werden. In diesen Bereichen verpufft die Luft daher ungenutzt. Diese Tatsache bietet ein Potenzial zur Senkung des Energiebedarfs. Der Anteil an solchen Bereichen ohne Membranfasern innerhalb des Moduls, so liegt bei einigen etablierten Modulsystemen zwischen 15 und 25 %. Auch diese Zahl lieferte schon während der Konzeptionierungs-Phase des Membion Moduls eine weitere Abschätzung für die erwartete Energieeinsparung im Membion-Modul, in dem derartige Zonen der Randgängigkeit der Luft konstruktionsbedingt vollständig vermieden werden.

Hinzu kommt der positive Effekt des Rohres aufgrund des in Kapitel 2 beschriebenen Mammutpumpen-Effektes. Dadurch stellen sich im Betrieb erhöhte Flüssigkeitsströmungen im Modul ein, die eine weitere Reduzierung des erforderlichen Energiebedarfs für die Belüftung der Module ermöglicht.

Die in Kapitel 6 dargestellten Ergebnisse der ersten Funktionsmuster-Tests belegen das hohe Potential des Membion-Moduls hinsichtlich einer Senkung des Energiebedarfs. Auch wenn die positiven Ergebnisse dieses Funktionsmustertests noch im Betrieb großtechnischer Module bestätigt werden müssen, so lässt die in diesem Vorhaben festgestellte Senkung des Energiebedarfs um 30 % bis 50 % auch für den großtechnischen Betrieb eine deutliche Senkung des Energiebedarfs erwarten.

Die Rohre beim Membion-Modul führen darüber hinaus zu einem weiteren ökologischen Vorteil des Membion-Systems: im Bereich der Hohlfasermembranen werden sämtliche Kanten im Modul vermieden, an denen mögliche Abrasionserscheinungen auftreten können, wie sie bei konkurrierenden Systemen beobachtet werden. Dies wirkt sich positiv auf die Lebensdauer der Membranen im Membion-Modul aus. Zudem vermeidet das Membion-Konzept aufgrund der einseitigen Einspannung auch die bei zweiseitig eingespannten Membranen auftretenden mechanischen Belastungen unterhalb der oberen Einspannung aufgrund der Überlänge der Fasern im Vergleich zur Distanz zwischen den Einspannstellen.

Die beschriebenen ökologischen Vorteile bedeuten gleichzeitig auch eine Verringerung der Betriebs- und Lebenszykluskosten beim neuen Modulsystem von Membion - also auch ökonomische Vorteile. Die tatsächliche Höhe dieser ökonomischen Vorteile kann jedoch letztendlich erst in einem Langzeit-Betrieb der großtechnischen Module unter Beweis gestellt werden.

## **8.2 Ökonomische Aspekte**

Bei der Betrachtung der ökonomischen Aspekte des Membion-Moduls spielen sicherlich auch die Rohre eine wichtige Rolle. Die im letzten Kapitel zitierten Patente sind nicht die ersten, die ein Rohr als äußere Begrenzung der Membranen vorschlagen. So weisen auch zwei deutlich ältere Patente, bei denen einer der Antragsteller als Erfinder beteiligt war, jeweils in mindestens einer der Ausführungsformen ein die Membranfasern umgebendes Rohr auf:

(3) WO 02/22244 A1 Puron-Modul (Prioritätsdatum 13.09.2000) und

(4) DE 198 11 945 A1 Rochem-Modul (Prioritätsdatum 13.03.1998)

Derartige Rohre bilden immer einen nicht zu vernachlässigenden Kostenpunkt bei der gesamten Modulkonstruktion. Daher waren es bisher häufig ökonomische Gründe, die eine Durchsetzung von Modulkonzepten mit umfangseitig geschlossenen Rohren in MBR-Anwendungen verhindert haben. Zentrale Bedeutung hat in diesem Zusammenhang der Moduldurchmesser. Die spezifischen Kosten der Rohre sinken mit größer werdendem Durchmesser der Membranbündel, d.h. mit größer werdendem Rohr- und Moduldurchmesser. Die Verwendung größerer Moduldurchmesser führt allerdings zu den in Kapitel 2 beschriebenen Herausforderungen für das Moduldesign: Vermeidung zu großer zusammenhängender Membranbereiche und gleichmäßige Verteilung der Luft. Das patentierte Design des Membion-Systems bildet eine Lösung für diese Herausforderungen und macht es möglich, größere mit Membranen bestückte Durchmesser gleichmäßig zu belüften und segmentiert zu durchströmen.

Neben der Händelbarkeit größerer Durchmesser bei Herstellung, Montage und Wartung war vor allem auch die preisgünstige Verfügbarkeit geeigneter Rohre ein wesentliches Kriterium für die Auswahl des Rohrdurchmessers im Membion-System. Nach Preisverhandlung mit

mehreren Rohranbietern fiel die Wahl auf ein Massenprodukt aus dem Bereich der Lüftungstechnik, wodurch allein aufgrund der bei Membion zum Einsatz kommenden Rohre im Vergleich zu den dadurch wegfallenden Faserhaltern konkurrierender Systeme eine Materialkostensparnis von über 25% bezogen auf die Kosten der Faserhalter erreicht wird. Dabei sind noch nicht die Vorteile eventuell zusätzlich wegfallender Seitenplatten und deren Halterungen im Modulgestell mit eingerechnet.

Darüber hinaus werden auch im Bereich der Arbeitszeit für die Montage des Membion-Moduls deutliche Vorteile erwartet. Ein Gradmesser für eine einfache Montierbarkeit liegt in der spezifischen, d.h. auf die Membranfläche bezogenen Anzahl der in einem Modul verwendeten Einzelteile (Membranfasern nicht mit eingerechnet). Die Anzahl der Einzelteile korreliert wiederum mit dem Moduldurchmesser, bzw. dem Membranbündel-Durchmesser. In vielen am Markt etablierten Systemen sind die Durchmesser der Bündel relativ klein. Nachteil dieser Systeme ist jedoch häufig, dass die spezifische Anzahl der Einzelteile relativ hoch ist. So finden sich Modul-Systeme am Markt, bei denen die spezifische Anzahl der Einzelteile nicht selten zwischen 3 und 5 Teilen pro Quadratmeter installierter Membranfläche liegt, wird diese Zahl im Membion-Modul auf deutlich unter 1,5 Teile pro Quadratmeter gesenkt. Dies bedeutet neben einer Reduzierung der Materialkosten insbesondere auch eine deutliche Reduzierung der Zeit und Kosten für die Montage des Moduls während der Produktion.

Insgesamt wird daher erwartet, dass das Membion-Modul auch aus ökonomischer Sicht konkurrenzfähig sein wird zu derzeit am Markt etablierten Systemen.

## **9. Öffentlichkeitsarbeit**

Während der Durchführung des Projektes wurde entsprechend des jeweiligen Projektfortschritts auch Öffentlichkeitsarbeit betrieben. So wurde das Modulsystem von Membion Ende Oktober 2015 im Rahmen der 11. Aachener Tagung Wassertechnologie erstmalig im Rahmen eines Vortrags einem interessierten Fachpublikum vorgestellt. Dabei wurden die Konzepte des Membion-Moduls erläutert, die bis dahin durchgeführten Teilarbeiten des Projektes vorgestellt sowie der in Aussicht stehenden Funktionsmustertests angekündigt. Dieser Vortrag wurde auch in dem begleitenden Tagungsband unter dem Titel: „Entwicklung eines neuartigen Membranmoduls für MBR-Anwendungen“ veröffentlicht.

Eine weitere Veröffentlichung erfolgte dann in der Fachzeitschrift „F & S Filtrieren und Separieren“ in einem Bericht von Frau Lyko zum Thema „Membrantechnik in der Wasser- und Abwasseraufbereitung: Ergebnisse der Modul- und Verfahrensentwicklung“ (Jahrgang 30 – 2016 Nr. 1).

Weiterhin wurde am 17.03.2016 im Rahmen des euBAN-Finanzierungsforums der AGIT Aachen einem Kreis von interessierten Investoren das Membion-Konzept vorgestellt.

Und für das kommende Aachener Membrankolloquium vom 2. bis 3. November dieses Jahres in Aachen ist ein Vortrag von Membion angenommen worden mit dem Titel: „New generation submerged module for MBR applications“.

## 10. Fazit und Aussicht zur Weiterführung des Projektes

Im Rahmen des vorliegenden Projektes konnte erfolgreich ein Funktionsmuster des neuartigen Membion-Membranfilters hergestellt und unter Realbedingungen in einer Versuchsanlage auf der Kläranlage in Konzen betrieben werden. Dabei bestätigten sich die konzeptionell erwarteten ökologischen und ökonomischen Vorteile des Membranfilters insbesondere hinsichtlich einer Senkung des Energiebedarfs.

Es bleibt jedoch anzumerken, dass es sich hierbei erst um einen Funktionsmustertest handelt. Es ist daher geplant, die positiven Ergebnisse im technischen Maßstab während eines Dauerbetriebs zu verifizieren. Aus diesem Grund ist ein zweites Teilprojekt als Fortführung dieses ersten Teilprojektes geplant, in dem die neuen Membranfilter von Membion in der vorhandenen Demonstrationskläranlage für MBR-Module in Simmerath im Dauerbetrieb zum Einsatz kommen (Bild 28).



Bild 28: großtechnische Demonstrationsanlage auf der Kläranlage Simmerath

Die Demonstrationsanlage in Simmerath wurde von den Antragstellern seinerzeit für den ersten großtechnischen Test der Puron-Membranfilter gebaut und vom Umweltministerium des Landes NRW finanziert. Die Anlage gehört dem Wasserverband Eifel-Rur, von dem

bereits eine Zusage zur Nutzung der Anlage für einen großtechnischen Test der Membion-Membranfilter im Rahmen der Fortführung des vorliegenden Vorhabens in einem zweiten Teilprojekt vorliegt.

