

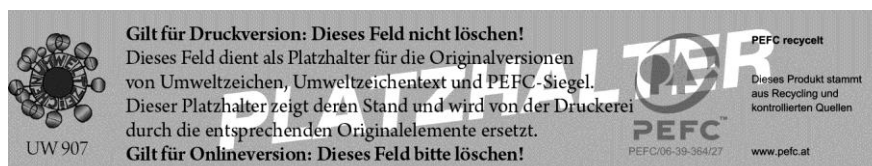
## KURZBERICHT PHARMAQUA

**IMPRESSUM**

Medieninhaber und Herausgeber:  
BUNDESMINISTERIUM  
FÜR NACHHALTIGKEIT UND TOURISMUS  
Stubenring 1, 1010 Wien  
[www.bmnt.gv.at](http://www.bmnt.gv.at)

Text und Redaktion: Thomas Mach, Arnold Stuhlbacher, Michael Harasek, Simone Spitzer, Christian Jordan, Marco Rupprich, Marc Koch, Norbert Kreuzinger, Julia Haslinger, Daniela Reif, Herbert Spitzer und Markus Plank  
Grafikdesign: Simone Spitzer und Markus Plank  
Lektorat: Technische Universität Wien  
Bildnachweis: BMNT/Paul Gruber (S. 3)  
Gestaltungskonzept: WIEN NORD Werbeagentur

1. Auflage



**Gilt für Druckversion: Dieses Feld nicht löschen!**  
Dieses Feld dient als Platzhalter für die Originalversionen von Umweltzeichen, Umweltzeichentext und PEFC-Siegel. Dieser Platzhalter zeigt deren Stand und wird von der Druckerei durch die entsprechenden Originalelemente ersetzt.  
**Gilt für Onlineversion: Dieses Feld bitte löschen!**

UW 907

**PEFC**  
PEFC/06-39-364/27

**PEFC recycelt**  
Dieses Produkt stammt aus Recycling und kontrollierten Quellen  
[www.pefc.at](http://www.pefc.at)

Alle Rechte vorbehalten.  
Wien, 20.12.2018

INHALTSVERZEICHNIS

IMPRESSUM..... 2

1 PROJEKTPARTNER ..... 4

2 ZIELSETZUNG..... 5

3 EINLEITUNG..... 5

4 BESCHREIBUNG DER ENTWICKLUNG..... 5

    4.1 MATERIALFINDUNG ADSORPTION ..... 6

    4.2 KOMBINATION MIKROFILTRATIONSMEMBRAN UND SORPTIONSMATERIAL ..... 6

        4.2.1 EMBEDDED-MEMBRANE..... 6

        4.2.2 ROHRMODUL-ADSORPTIONS-KOMBINATION..... 7

    4.3 BASIC ENGINEERING UND PROZESSSIMULATION..... 7

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK..... 12

    5.1 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE/SYSTEMVERGLEICH..... 12

    5.2 ELIMINATIONSPOTENTIALE..... 12

    5.3 PLANERISCHE GRUNDLAGEN ..... 12

    5.4 WIRTSCHAFTLICHKEIT UND ANWENDUNGSPOTENTIAL ..... 12

    5.5 FESTLEGUNG ZUKÜNFTIGER ENTWICKLUNGSSCHRITTE..... 13

6 TABELLENVERZEICHNIS..... 14

7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS..... 14

8 LITERATURVERZEICHNIS ..... 14

# 1 PROJEKTPARTNER

**DAS PROJEKTKONSORTIUM UMFASST** drei Forschungseinrichtung und zwei Industriepartner. Die Projektpartner sind in weiterer Folge von 1 - 4 (P1 – P4) durchnummeriert, der Projektkoordinator wird als L (Leadpartner) bezeichnet.

## **SPIN Tec GmbH (SPINtec) - L**



Ansprechpartner:  
Herbert Spitzer  
Tel: + 43 676 4411015  
hspitzer@spitzer.at

## **Mach & Partner ZT-GmbH (M&P) – P1**



Ansprechpartner:  
Thomas Mach  
Tel: + 43 664 1803674  
thomas.mach@mach-partner.at

## **Technische Universität Wien – Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften – P2**

„Thermische Verfahrenstechnik – Fluidynamische Simulation“ (TU Wien TVT)



Ansprechpartner:  
Michael Harasek  
Tel: +43 1 58801 166202  
michael.harasek@tuwien.ac.at

## **MCI - Internationale Hochschule GmbH – P3**

Department für Umwelt- Verfahrens- und Energietechnik (MCI)



Ansprechpartner:  
Marco Rupprich  
Tel: + 43 512 2070 -3210  
marco.rupprich@mci.edu

## **Technische Universität Wien - Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft – P4 "Wassergütewirtschaft - Biologie und Chemie des Wassers" (TU Wien iwr)**



Ansprechpartner:  
Norbert Kreuzinger  
Tel: + 43 1 58801-22622  
norbkreu@iwag.tuwien.ac.at

## 2 ZIELSETZUNG

**ZIEL DES GEGENSTÄNDLICHEN PROJEKTS** war die Entwicklung eines Labormusters, bei dem durch die Kombination der Vorteile von Membranen („Size-Exclusion“) mit den adsorptiven Eigenschaften eines geeigneten Adsorbens ein innovativer Weg zur Entfernung von organischen Spurenstoffen getestet wurde. Das Labormuster wurde auf die selektive Abtrennung von anthropogenen Spurenstoffe sowie auf einen möglichst einfachen und kostengünstigen Einsatz abgestimmt.

## 3 EINLEITUNG

**DER BEGRIFF MIKROSCHADSTOFFE** umfasst synthetische organische Substanzen, wie Arzneimittel, Röntgenkontrastmittel, Kosmetikprodukte, Haushaltschemikalien, Biozide und Pestizide sowie Industriechemikalien, die über verschiedene Eintragspfade in Gewässer gelangen (Hillenbrand, et al., 2014). Die Bezeichnung „Mikroschadstoff“ leitet sich vom typischen Konzentrationsbereich (ng/L bis µg/L), in welchem sie nachgewiesen werden, ab. Auf politisch-rechtlicher Ebene gibt es ein abgestuftes, vielschichtiges Akteurssystem, das von der stofflichen Regulierung (REACH, Arzneimittelzulassung) bis hin zur Gewässerbewirtschaftung, welche für rechtliche Rahmenbedingungen sowie Umsetzung und Monitoring der Einhaltung von Anforderungen zuständig ist, reicht.

Der gesetzliche Ordnungsrahmen im Wasserrecht wird im Wesentlichen durch die **EU Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) 2000/60/EG** bestimmt. Mit der **Richtlinie 2008/105/EG** werden für 33 prioritäre Stoffe harmonisierte Umweltqualitätsnormen aufgestellt. Zwischenzeitlich wurden mit Inkrafttreten der **Richtlinie 2013/39/EU** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. August 2013 erste Revisionen der Liste prioritärer Stoffe verlautbart. Die Revision der Liste prioritärer Stoffe hat spätestens 4 Jahre nach Inkrafttreten dieser Richtlinie (2017) zu erfolgen, danach alle 6 Jahre (Hutter, 2015). Mit der Richtlinie 2013/39/EU wurde auch eine regelmäßig fortzuschreibende sogenannte Beobachtungsliste für Stoffe eingeführt, welche ein erhebliches Risiko für die aquatische Umwelt aufweisen und für die keine Überwachungsdaten vorliegen.

Auf nationaler Ebene wird die EU-WRRL unter anderen mit den Qualitätszielverordnungen Chemie Oberflächengewässer (QZV Chemie OG), Chemie Grundwasser (QZV Chemie GW) und Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer (QZV Ökologie OG) umgesetzt. Mit der neuerlichen Änderung der **QZV Chemie OG, BGBl. II Nr. 363/2016**, welche am 6. Dezember 2016 in Kraft getreten ist, wurden die Regelungen der Richtlinie 2013/39/EU zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik umgesetzt.

## 4 BESCHREIBUNG DER ENTWICKLUNG

**WESENTLICHE EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE EFFIZIENZ** und Wirtschaftlichkeit einer Kombinationsanlage sind standortspezifische Rahmenbedingungen, die Qualitätsanforderungen, zu behandelnde Abwassermengen und daraus resultierende hydraulische Leistungsfähigkeiten. Die Höhe der Investitionskosten und Betriebskosten wird primär beeinflusst durch Adsorbensmaterial, Adsorbensmenge, Membranmaterial, Cut off der Membran, erforderliche Membranfläche, gewählte Modulform sowie der für den Betrieb erforderlichen Peripherie.

#### 4.1 MATERIALFINDUNG ADSORPTION

Es wurden unterschiedliche Adsorptionsmittel auf ihre Eignung zur Entfernung von organischen Spurenstoffen untersucht. Diese sind in Tabelle 1 angeführt.

TABELLE 1 UNTERSUCHTE ADSORPTIONSMITTEL

Adsorptionsmittel	Bezeichnung	Beschreibung
Aktivkohle (Frischkohle)	Epibon A pulverisiert	Braunkohle-Aktivkohle
	Epibon A granuliert	
	Hydraffin CC pulverisiert	Kokosnussschale-Aktivkohle
Aktivkohle (Reaktivat)	Epibon A pulverisiert	Reaktivierte Braunkohle-Aktivkohle
Vergaserkohle (Kohle aus Biomassevergasung)	Vergaserkohle Hatlerdorf	Kohle aus Biokohle-Holzvergasungsanlage in Hatlerdorf
	Vergaserkohle Vorau	Kohle aus Holzverstromungsanlage in Wenigzell
Zeolith	inzeo mono 80 (feinkörnig)	Natürlicher Zeolith
	inzeo mono 0,5/1,0 (grobkörnig)	
	inzeo duo 15/5 H4	Modifizierter natürlicher Zeolith
	Köstrolith® 13XBFK	Synthetischer Zeolith

Die **Aktivkohlen** (Aktivkohle Epibon A pulverisiert, Aktivkohle Epibon A granuliert, reaktivierte Aktivkohle Epibon A pulverisiert und Aktivkohle Hydraffin CC pulverisiert) konnten eine geeignete Abtrennung erzielen. Es wurde auch gezeigt, dass durch eine **Reaktivierung** das ursprüngliche Adsorptionspotential fast vollständig wiederhergestellt werden kann und die reaktivierte Aktivkohle somit eine geeignete Alternative zu Frischkohle darstellt.

Die weiteren Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten **Vergaserkohlen (Vorau und Hatlersdorf)** im Vergleich zur Aktivkohle ein deutlich geringeres Adsorptionsvermögen für die untersuchten Spurenstoffe aufwiesen. Die Versuche deuten aber darauf hin, dass sich die speziell für die Adsorption im Trink- und Abwasserbereich optimierten und eingesetzten Aktivkohlen eventuell durch Abfallkohlen aus der Biomassevergasung, bei entsprechender Aktivierung, ersetzen lassen.

Die Versuche zeigen auch, dass selbst bei den vergleichsweise hohen Mengen (100 mg/L) der untersuchten **Zeolithe** keine Entfernung der untersuchten Spurenstoffen stattfand. Basierend auf diesen Ergebnissen ist Zeolith in Hinblick auf die Entfernung von organischen Spurenstoffen keine geeignete Alternative zu herkömmlicher Aktivkohle.

Aufgrund der Untersuchungen verschiedener Korngrößen auf das Adsorptionsverhalten ist davon auszugehen, dass sich feineres Adsorptionsmaterial positiv auf die Adsorptionskinetik auswirkt, aber keinen Einfluss auf das Adsorptionsvermögen hat.

#### 4.2 KOMBINATION MIKROFILTRATIONSMEMBRAN UND SORPTIONSMATERIAL

##### 4.2.1 EMBEDDED-MEMBRANE

Ein Konzept ist die Einbettung von Substanzen mit adsorptiven Eigenschaften direkt in die Membranmatrix. Im ersten Schritte wird die Möglichkeit der Realisierbarkeit und Wirksamkeit der embedded-Membranen als Flachmembranen hergestellt. Diese Polyethersulfon Membranen wurden mittels Phaseninversionsprozess hergestellt. Hauptaugenmerk dieser Verfahrensvariante war die Evaluierung hinsichtlich Diclofenac-Rückhalt und membranspezifische Leistungsparameter.

Ferner wurden weiterführende Untersuchungen wie der Einfluss der Art der verwendeten Adsorbentmaterialien, Korngrößenverteilung, Beladungskapazität und Adsorptionsvermögen empirisch ermittelt. Dabei ergaben sich teils vielversprechende Ergebnisse, welche in möglichen anknüpfenden Forschungsvorhaben etabliert werden können

Im zweiten Schritt wurden Multi-channel-Kapillarmembranen mit eingebettetem Adsorbensmaterial hergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass Multi-channel-Kapillarmembranen mit eingebetteter Pulveraktivkohle in der Lage sind, Spurenstoffe abzutrennen. Hinsichtlich einer Optimierung der Membran in Bezug auf eine Steigerung des erzielbaren Rückhalts sind weitere Versuche erforderlich. Dabei sollen unter anderem der Aktivkohleanteil erhöht und die Polymerzusammensetzung untersucht werden.

### 4.2.2 ROHRMODUL-ADSORPTIONS-KOMBINATION

Eine technisch vielversprechende Prozessvariante stellt die Kombination von rohrförmigen Membranen (Rohrmodulen) mit Adsorptionsmaterialien dar. Die Aktivkohle wird dabei nicht in das Membranmaterial integriert und der Trennprozess zweistufig ausgeführt. In der ersten Trennstufe (Membran) erfolgt der Rückhalt im klassischen Mikrofiltrationsbereich der verwendeten Membran. Das Permeat der klassischen Membranfiltration wird im zweiten Trennschritt mit der Aktivkohle kontaktiert und hinsichtlich der vorhandenen Spurenstoffe gereinigt. Es wurden die zwei Verfahrensweisen Dead-End und Cross-Flow untersucht. Es zeigte sich dass die Dead-End Variante nicht geeignet ist, da der sich bildende Filterkuchen zum Verlegen der Membran führt. Bei der Cross-Flow Variante wird die Membran tangential zum Filter angeströmt und durch die Überströmung der Membran ein Aufbau des Filterkuchens verhindert. Da bei der Cross-Flow Variante für dieselbe Permeatmenge systembedingt wesentlich höhere Wassermengen im Vergleich zur Dead-End Variante gefördert werden müssen, ist der Energiebedarf ein wesentlicher Faktor. Um genauere Aussagen über das Langzeitverhalten der Cross-Flow Membranen tätigen zu können, müssten weitere Tests angestellt werden bei denen neben der Untersuchung des Konkurrenzverhaltens von organischen Spurenstoffen ein Fokus auf die Erprobung verschiedener Rückspülintervalle und Abwässer gelegt werden sollte. Durch die Kombination von Membran- und Adsorptionsprozessen ergibt sich ein Multibarrierensystem und es können positive Effekte beider Verfahren genutzt werden (z.B. Entkeimung durch Membranen, Spurenstoffentfernung durch Adsorption, Rückhalt von Mikroplastik). Von den zahlreichen getesteten Varianten und aufbauend auf den gewonnenen Erfahrungen aus dem Testbetrieb im Labor stellten sich die beiden Ansätze „embedded Multichannel Kapillar Membranen“ und „Inside-Out (IO) Mikrofiltrationsmembran-Aktivkohle Kombination“ als gangbare Varianten für eine technische Umsetzung eines Kombinationsansatzes dar.

### 4.3 BASIC ENGINEERING UND PROZESSSIMULATION

Im Basic Engineering wurde ein Prozessablauf entwickelt, bei dem die Membran des Membran-Adsorptions-Moduls nicht zu stark durch Hintergrundmatrix belastet wird, ein Austrag der beladenen Partikel in den Vorfluter vermieden wird und gleichzeitig durch Nutzung von Synergien bzw. geeigneter Systemkomponenten ein platzsparendes System entsteht, welches auch zur nachträglichen Implementierung in eine Kläranlage geeignet ist. Der Fokus wurde auf eine Anlage für 15.000 EW gelegt.

Das Basic Engineering wurde für ein Cross-Flow-Modul inkl. Rückführung des Retentats ins Belebungsbecken ausgelegt. Für die Prozesssimulation wurden zwei gut adsorbierbare Modellsubstanzen (Diclofenac, Carbamazepin) sowie eine schlecht bis mittel adsorbierbare Modellsubstanz (Sulfamethoxazol) gewählt. Huminsäuren wurden wie in den Laborversuchen als Modellsubstanz für die Hintergrundmatrix verwendet.

Für die Prozesssimulation wurden drei verschiedene Membranmodelle modelliert. Da man sich mit der Porengröße der Membranen im Überschneidungsbereich zwischen Ultra- und Mikrofiltration befand, wurden zwei druckgetriebene Modelle (Deckschichtmodell, Modell nach Hagen-Poiseuille) betrachtet, welche eher für die Mikrofiltration geeignet sind, sowie ein Diffusionsmodell (Gel Permeation Model), welche üblicherweise zur Modellierung der Ultrafiltration verwendet werden. Zur Überprüfung wurden die Ergebnisse der Modelle mit jenen der Laborversuche verglichen. Da die druckgetriebenen Modelle eine bessere Übereinstimmung mit den Laborversuchen aufwiesen, wurde die weitere Prozesssimulation mit dem Deckschichtmodell durchgeführt.

Anhand der Dead-End-Versuchen wurde ein möglicher Reinigungszyklus zur Entfernung des reversiblen Foulings entwickelt. Hinweise aus den letzten Versuchen deuten jedoch darauf hin, dass bei einem Cross-Flow-Betrieb mit deutlich reduziertem Fouling zu rechnen ist und infolgedessen längere Betriebszeiten ohne Spülvorgang möglich sind.

Als wesentlicher Faktor für die Abschätzung des Energiebedarfs wurde die Pumpe identifiziert, welche zur Weiterleitung zur Membran und Druckaufbau des weitergeleiteten Abwassers dient. Zusätzlich wurde eine Abschätzung des zu erwartenden Druckverluste durchgeführt, wobei diese hauptsächlich auf der Vorfiltration, den Membranmodulen sowie dem Rohrleitungssystem beruhen. Abbildung 1 zeigt die prozentuelle Aufteilung des jährlichen Energiebedarfs pro EW einer Spurenstoffentfernung mittels Membran-Adsorptions-Kombination. Anhand dieser Daten wurden die zusätzlich anfallenden Energiekosten in einer Kläranlage bei Implementierung einer derartigen Spurenstoffentfernung abgeschätzt.

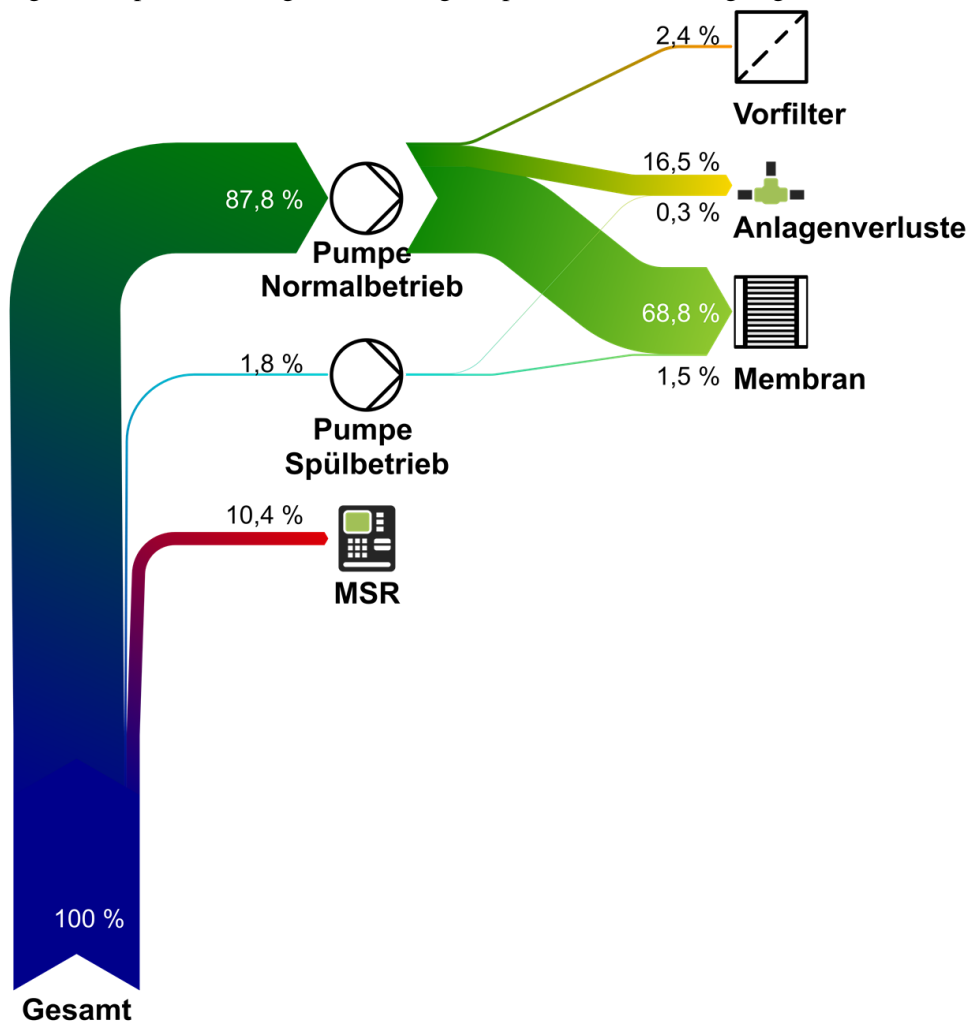


Abbildung 1 Prozentuelle Aufteilung des jährlichen Energiebedarfs pro EW einer Spurenstoffentfernung mittels Membran-Adsorptions-Kombination bei Einsatz in einer 15.000 EW Kläranlage.



Zur Untersuchung der Vorgänge im Inneren des kombinierten Membran-Adsorptionsmoduls wird numerische Strömungssimulation (Computational fluid dynamics, CFD) verwendet. Für eine CFD-Simulation wird das Untersuchungsgebiet (Geometrie) in kleine Volumen („Zellen“) unterteilt, für jede Zelle werden physikalische Bilanzgleichungen (Impuls, Masse, Energie, Komponente, Phase usw.) iterativ gelöst, um zeitlich und örtlich aufgelöste Details des Strömungsfeldes zu erhalten. CFD ermöglicht den Zugang zu lokalen Informationen in kritischen Bereichen, ohne aufwändige und teure Experimente, siehe Abbildung 2.

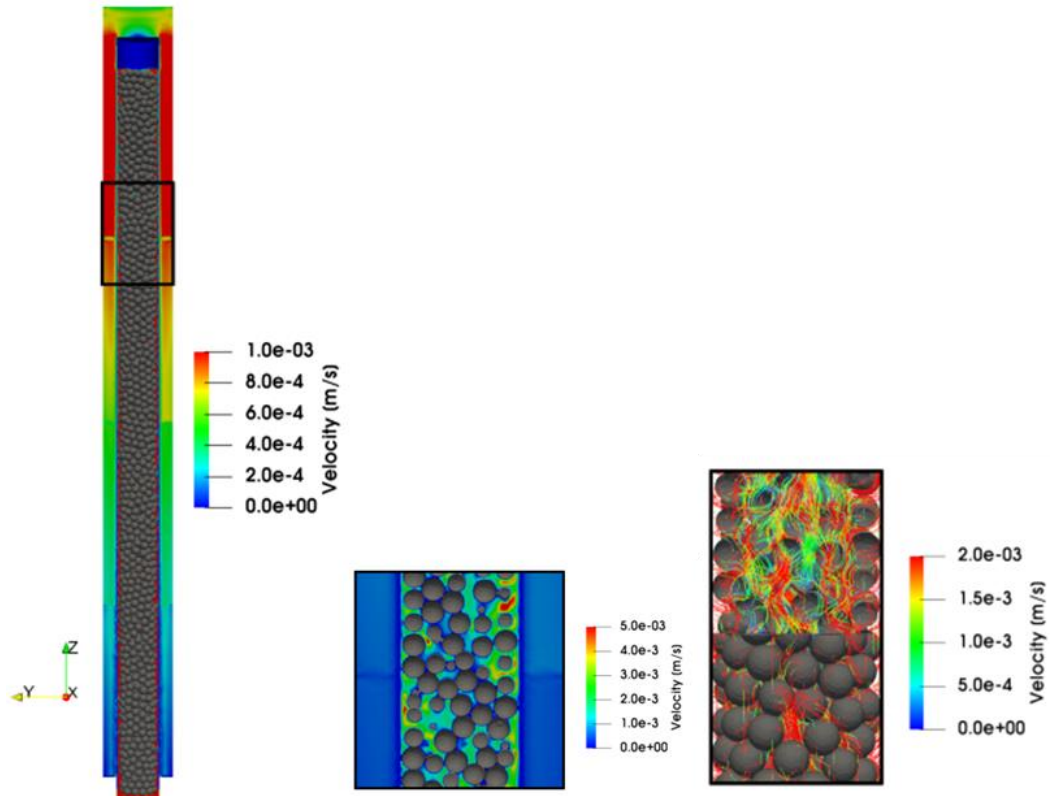


Abbildung 2 Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit: links im Bereich der Aktivkohle, rechts in der Kugelschüttung im Inneren der Membran.

Beispiele sind z.B. die Vorausberechnung von Druckverlusten, schlecht durchströmten Totvolumen oder Kurzschlussströmungen, welche die Leistungsfähigkeit und die Effizienz von Apparaten oder Systemen negativ beeinflussen können (siehe Abbildung 3). Damit wird die Untersuchung von neuen Anlagen oder -teilen vor dem Bau bzw. die Analyse von bestehenden Aufbauten zur Optimierung und Verbesserung ermöglicht.

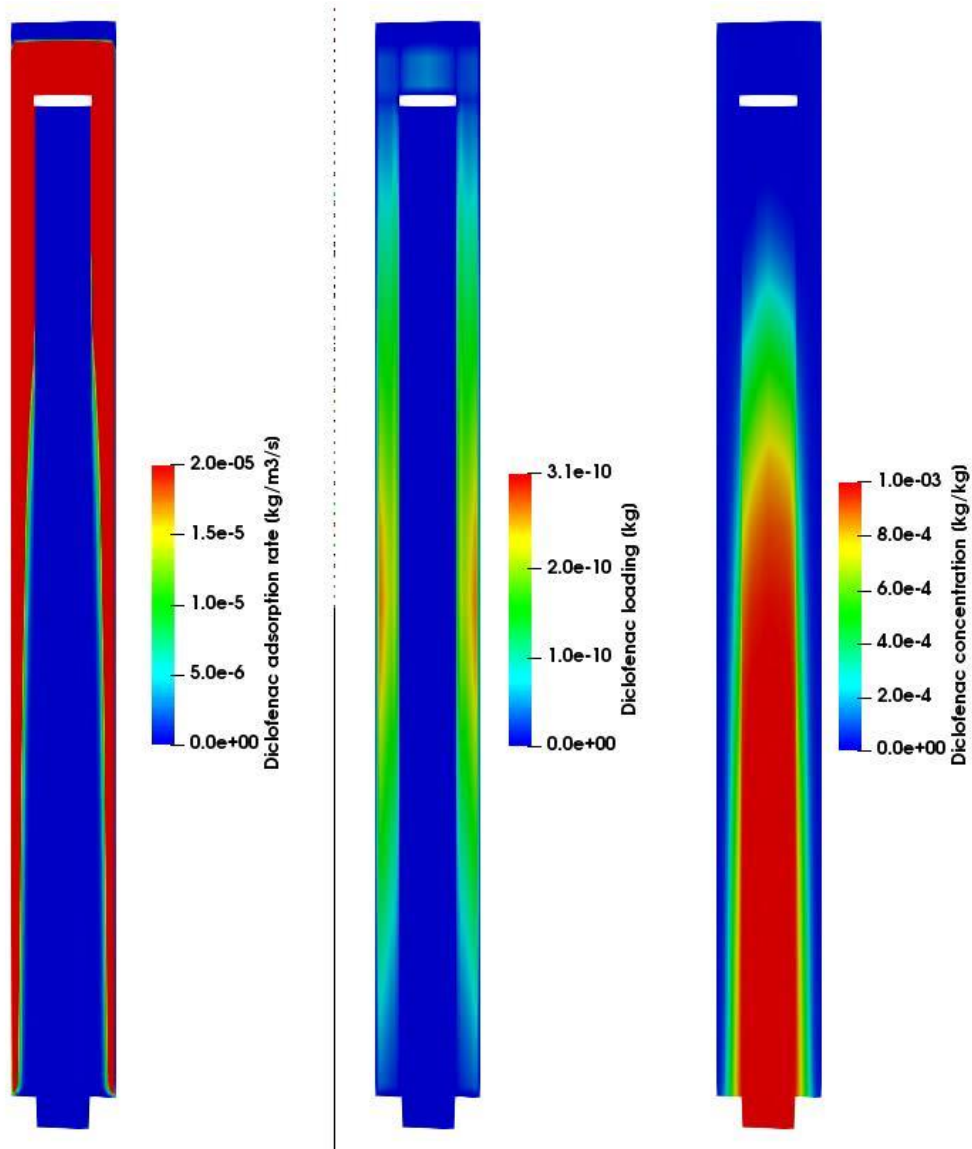


Abbildung 3 Adsorptionsrate, adsorbierte Menge und Konzentration im durchströmenden Wasser für den Testspurenstoff

Im Projekt wurden die erforderlichen Methoden für die Modellierung von Adsorption in porösen Schüttungen und der Stoffdurchtritt durch semipermeable Membranen entwickelt, welche am Beispiel des IWR-Testmoduls für die „Inside-Out“-Anordnung (Rohwasser wird über eine Stützschiicht zur Dead-End-Membran gebracht, das Permeat kommt in Kontakt mit dem granularen Adsorbens) evaluiert wurden. Für die detaillierte Untersuchung inklusive Vollauflösung der Kugelpackung in der Membran wurde ein Rechengitter mit ca. 3,5 Millionen Zellen verwendet, zusätzlich wurden „beschleunigte“ Rechnungen mit ca. 10.000 Zellen für die Ermittlung einer exemplarischen Durchbruchskurve durchgeführt.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Simulationen wurden mit dem Programmpaket OpenFOAM® durchgeführt. OpenFOAM® ist ein freies, quelloffenes Paket (Lizenz: GPL), das in der Originalform auf [www.openfoam.org](http://www.openfoam.org) (community edition) bereitgestellt wird. Die Gittererstellung erfolgte mit snappyHexMesh, die Visualisierungen wurden mit Paraview® erstellt.

Mit Hilfe der Strömungssimulation konnte bereits Verbesserungspotential für das Modell-Modul identifiziert werden: Aufgrund einer Kurzschlussströmung kommt ein Teil des kontaminierten Rohwassers nur unzureichend mit dem Adsorbens (Aktivkohle) in Kontakt, wodurch es zu einer schlechten Spurenstoffabscheidung (Modellsubstanz Diclofenac) kommt, wie sich in der bereits sehr früh ansteigenden Konzentration am Austritt (Durchbruchskurve - Abbildung 4) zeigt. In gleicher Weise kann CFD zur Designverbesserung für weitere Modulkonzepte herangezogen werden.

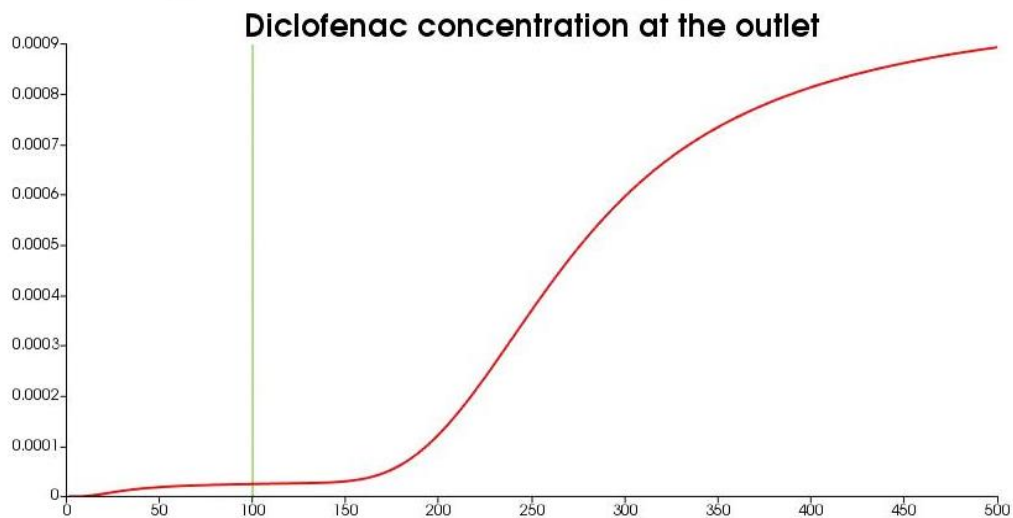


Abbildung 4 Konzentration des Spurenstoffes im austretenden Wasser aus dem Kombimodul („Durchbruchskurve“).

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

### 5.1 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE/SYSTEMVERGLEICH

Die Membrantechnik hat in den letzten Jahren umfassende Entwicklungen und Optimierungen für unterschiedlichste Anwendungen in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung erfahren. Im Zusammenhang mit der Elimination von Mikroschadstoffen beziehen sich dokumentierte Erfahrungen überwiegend auf MBR-Anlagen. Zusammenfassend wird festgestellt, dass das Potential und die Entwicklungsmöglichkeiten der Membrantechnik derzeit noch nicht ausgeschöpft sind (Lyko, 2016). Die Vorteile der Membrantechnik liegen in der Verknüpfung mit weiteren Verfahrensschritten mit dem Ziel mehrere Aufbereitungsziele gleichzeitig zu erreichen.

### 5.2 ELIMINATIONS-POTENTIALE

Im Vergleich zur Leistungsfähigkeit dokumentierter Eliminationsverfahren, entweder als Pilotanlage oder im Praxisbetrieb, erwies sich der untersuchte Ansatz der Membranfiltration in Kombination mit Aktivkohle (Membranadsorber) als konkurrenzfähig, wobei generell vermerkt werden muss, dass keine Verfahrenskombination alle Arzneimittelrückstände bei vertretbarem Aufwand vollständig eliminieren kann. Generelle Aussagen zur Betriebssicherheit im Langzeitbetrieb sind auf Basis der Laboruntersuchungen nur eingeschränkt möglich.

### 5.3 PLANERISCHE GRUNDLAGEN

Um eine dauerhafte Belastung der Membran durch Trübstoffe (erfasst als abfiltrierbare Stoffe) vorzubeugen, ist in der betrieblichen Praxis eine Vorfiltration des Ablaufs aus der Nachklärung erforderlich. Dieser Vorbehandlungsschritt ist notwendig um die Verblockung der Membran zu minimieren und somit Standfestigkeit und Wirtschaftlichkeit zu optimieren. Als mögliche Verfahren eignen sich Sand, Scheiben- oder Tuchfilter. Näherungsweise kann für die Errichtung einer Vorfiltrationsanlage ungefähr 10 bis 15% des Gesamtinvestments einer 4. Reinigungsstufe angesetzt werden, wobei sich standortspezifische Gegebenheiten entsprechend auf die Kostensituation auswirken. Zur Erhaltung der Filtrationsleistung stehen verschiedene mechanische, chemisch-physikalische und thermische Maßnahmen zur Verfügung.

### 5.4 WIRTSCHAFTLICHKEIT UND ANWENDUNGSPOTENTIAL

Zusammenfassend zeigen Auswertungen publizierter Machbarkeitsstudien für Maßnahmen zur Mikroschadstoffentfernung für Deutschland (Mikroschadstoffelimination in kommunalen Kläranlagen in NRW, Stand 05/2018), dass die Investitionskostenabschätzungen, auch innerhalb der einzelnen Verfahrenstechnologien, in Abhängigkeit des Standortes und den spezifischen Rahmenbedingungen sehr große Unterschiede aufweisen. Rein aus wirtschaftlicher Sicht ist daher eine Präferenz für eine bestimmte Verfahrenstechnologie schwer abzuleiten.

Die Membrantechnik weist momentan im Vergleich zu den derzeit etablierten Verfahren sowohl höhere Investitionskosten, als auch Betriebskosten auf. Gleichzeitig ist aber ein starkes Potential in der Optimierung dieser Verfahrenstechnologie (Membranmaterialien, Trennpotential, Steuer- und Regelungstechnik) feststellbar, die die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens deutlich verbessern wird.

In einer wirtschaftlichen Gesamtbetrachtung ist ferner der zusätzliche Mehrwert der kombinierten Membran- und Adsorptionstechnologie aufgrund zusätzlicher Eliminationspotentiale (Multibarriensystem), wie etwa eine weitergehende Hygienisierung des Abwasserstroms zusehen und in einem Technologievergleich zu berücksichtigen. So können die zusätzlichen spezifischen Ausbaurückstellungen für UV-Desinfektionsanlagen mit ca. € 25.--/EW zur Hygienisierung von biologisch gereinigtem Abwasser angenommen werden (Müller et.al, 2009).

Damit wären rund 20% der Gesamtinvestitionskosten einer kombinierten Membran-Aktivkohle-Anlage, als Mehrwert Anlagen, die nicht über dieses Leistungsspektrum verfügen, gegenüber zu stellen.

Anwendungsmöglichkeiten der kombinierten Membran/Adsorptionstechnologie ergeben sich sowohl in der Trinkwasseraufbereitung als auch in der Abwasserentsorgung. Darüber hinaus sind Anwendungen als dezentrale Maßnahmen an Hotspots des Mikroschadstoffeintrags sinnvoll. Solche Hotspots können beispielsweise indirekt oder direkt einleitende Industriebetriebe sein oder Einrichtungen des Gesundheitswesens, in denen ein hoher Arzneimittelverbrauch vorherrscht.

### 5.5 FESTLEGUNG ZUKÜNFTIGER ENTWICKLUNGSSCHRITTE

Zusammenfassend wird festgestellt, dass das Potential und die Entwicklungsmöglichkeiten der Membrantechnik derzeit bei weitem noch nicht ausgeschöpft sind. Alleine die Entwicklung der Biomembrantechnologie in der kommunalen Abwasserwirtschaft bzw. spezielle Applikationen in der industriellen Wasserwirtschaft zeigen die Dynamik an neuen Umsetzungen. Die Vorteile der Membrantechnik liegen u.a. in der Verknüpfung mit weiteren Verfahrensschritten mit dem Ziel mehrere Aufbereitungsziele gleichzeitig zu erreichen. Aus den vorliegenden Projektergebnissen zur Entwicklung einer integrierten Adsorptions-Membrantechnologie zur Elimination von Mikroschadstoffen lassen folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- ✓ Einfache Verfahrensintegration in bestehende Anlagen aufgrund der einfachen Prozessführung und des geringen Platzbedarfs
- ✓ Einfache Handhabung und Wartung der Module und des Prozesses
- ✓ Automatisierung problemlos möglich
- ✓ Auf Kläranlagen übliche Sicherheitsmaßnahmen ausreichend, da keine gefährlichen Einsatzstoffe (Ozon, Pulveraktivkohle) verwendet werden
- ✓ Keine zusätzliche Stufe zur Entfernung von Nebenprodukten notwendig, da im Gegensatz zur Ozonierung keine Nebenprodukte entstehen
- ✓ Einsatz von Standardmaterialien für Anlagenteile möglich, da das eingesetzte Verfahren keine negativen Einflüsse, wie Korrosivität oder Abrasivität, aufweist
- ✓ Im Gegensatz zu Ozon auch für stark mit Bromid belastete Abwässer geeignet
- ✓ Regeneration des beladenen Adsorptionsmaterials relativ einfach möglich
- ✓ Möglichkeit einer standortangepassten flexiblen Behandlungstechnologie für dezentrale Anwendungen

Zur Verifizierung bisheriger Laborergebnisse und zur weiteren Optimierung einzelner Prozesse wird ein weiterführendes Forschungsprojekt angestrebt. Wesentliche Eckpunkte sollen dabei vertiefende Untersuchungen zur Morphologie und Geometrie der eingesetzten Membranmodule, Prozesskinetik und Betriebsstabilität sowie insbesondere die Minimierung des erforderlichen Energieeinsatzes sein. Ein verstärkter Aspekt soll auch auf die alternative Nutzung von Pyrolysekohlen als Adsorptionsmittel gelegt werden. Hinsichtlich des Technologiedesigns sollten weiterführende Untersuchungen zur Thematik durchgeführt werden.

## 6 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Untersuchte Adsorptionsmittel .....	6
---	---

## 7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Prozentuelle Aufteilung des jährlichen Energiebedarfs pro EW einer Spurenstoffentfernung mittels Membran-Adsorptions-Kombination bei Einsatz in einer 15.000 EW Kläranlage. ....	8
Abbildung 2 Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit: links im Bereich der Aktivkohle, rechts in der Kugelschüttung im Inneren der Membran.....	9
Abbildung 3 Adsorptionsrate, adsorbierte Menge und Konzentration im durchströmenden Wasser für den Testspurenstoff.....	10
Abbildung 4 Konzentration des Spurenstoffes im austretenden Wasser aus dem Kombimodul („Durchbruchskurve“). ....	11

## 8 LITERATURVERZEICHNIS

- Hillenbrand, T., Tettenborn, F., Menger-Krug, E., Marscheider-Weidemann, F., Fuchs, S., Toshovski, S., . . . Abegglen, C. (2014). Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer. *Umweltbundesamt Texte 85/2014*.
- Hutter, G. (2015). *Schadstoffe im Gespräch. Der chemische Zustand*. Abgerufen am 08. 08 2017 von <https://www.vorarlberg.at/pdf/schadstoffeimgespraech.pdf>
- Lyko, H. (2016). Membrantechnik zur weitergehenden Wasser- und Abwasseraufbereitung: Herausforderungen durch Mikroschadstoffe, Mikroplastik, Keime und hohe Salzgehalte. *F&S, Filtrieren und Separieren*, 30(3), S. 134-139.
- Probst, S. J., & Dietl, F. (September 2014). Röntgenkontrastmittel separieren. *WWT - Wasserwirtschaft und Wassertechnik*, S. 45.

