


# Hohlfaser-Membrankontaktoren zur Stickstoffrückgewinnung aus Prozesswasser einer kommunalen Kläranlage

Lea Richter<sup>1,\*</sup>, Svea Paulsen<sup>2</sup>, Marc Wichern<sup>3</sup>, Markus Grömping<sup>2</sup>, Ulrich Robecke<sup>4</sup> und Jens Haberkamp<sup>1</sup>

DOI: 10.1002/cite.202100019

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

Prozesswasser aus der Faulschlammwässerung von kommunalen Kläranlagen stellt eine zusätzliche stoffliche Belastung der Anlage in Form von Stickstoff dar. Die Hauptkläranlage Münster betreibt zur Stickstoffentfernung und -rückgewinnung aus Prozesswasser eine innovative Membrankontaktorenanlage im großtechnischen Maßstab. Im Rahmen dieser Studie werden Auswirkungen auf die Leistung und den Betrieb der Membran sowie die Verwertung des produzierten Düngers untersucht. Erste Ergebnisse zeigen Stickstoffentfernungsleistungen von ca. 85 % und eine regionale Verwertbarkeit des produzierten Düngers.

**Schlagwörter:** Ammoniumrückgewinnung, Kommunales Abwasser, Membrankontaktoren, Prozesswasser

*Eingegangen:* 29. März 2021; *akzeptiert:* 25. Mai 2021

## Hollow-fibre Membrane Contactors for Nitrogen Recovery from Municipal Wastewater

Process water deriving from digested sludge dewatering at municipal wastewater treatment plants (WWTP) represents an additional load for the plant in terms of nitrogen. Münster WWTP is the first German plant to operate an innovative full-scale membrane contactor facility for nitrogen removal and recovery from process water. Within the scope of this study, aspects influencing the membrane performance and operation as well as utilization of the produced fertilizer are investigated. First results reveal nitrogen removal efficiencies around 85 % and a regional usability of the produced fertilizer.

**Keywords:** Ammonium recovery, Membrane contactors, Municipal wastewater, Process water

## 1 Einleitung

Ohne eine weitgehende Elimination von Stickstoffverbindungen in kommunalen Abwässern durch Kläranlagen wird die Gewässerökologie nachteilig beeinträchtigt. Erhöhte Stickstoffkonzentrationen in Form von Ammonium/Ammoniak treten im Prozesswasser aus der Faulschlammwässerung auf kommunalen Kläranlagen auf. Durch die Rückführung des Prozesswassers in den Zulauf zur biologischen Stufe der Kläranlage stellt die Ammoniumkonzentration eine zusätzliche Stickstoffbelastung für die Kläranlage dar. Um die zusätzliche Stickstoffbelastung zu verringern und die Gesamtstickstoffeliminationsrate der Kläranlage zu verbessern, kann das Prozesswasser mit Verfahren im Nebenstrom behandelt werden. Mittels chemisch-physikalischer Behandlungsverfahren kann Stickstoff auf verschiedene Arten zurückgewonnen werden. Die Behandlung von Prozesswasser über eine Extraktion von Ammoniak durch hydrophobe Hohlfasermembranen und dessen anschließen-

de Absorption durch Schwefelsäure stellt eine innovative Technologie dar [1]. Die generelle Anwendbarkeit von Hohlfaser-Membrankontaktoren zur Prozesswasseraufbereitung geht aus begrenzt verfügbaren Daten von Unter-

<sup>1</sup>Lea Richter, Prof. Dr.-Ing. Jens Haberkamp  
richter.l@fh-muenster.de

FH Münster, Institut für Infrastruktur, Wasser, Ressourcen, Umwelt (IWARU), Corrensstraße 25, 48149 Münster, Deutschland.

<sup>2</sup>Svea Paulsen, Prof. Dr.-Ing. Markus Grömping  
FH Aachen, Institut Nowum-Energy, Bayernallee 9, 52066 Aachen, Deutschland.

<sup>3</sup>Prof. Dr.-Ing. Marc Wichern  
Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik, Universitätsstraße 150, 44780 Bochum, Deutschland.

<sup>4</sup>Dr.-Ing. Ulrich Robecke  
Stadt Münster, Amt für Mobilität und Stadtentwicklung, Zum Heidehof 72, 48157 Münster, Deutschland.

suchungen im Pilot- und Labormaßstab hervor. Erfahrungen zum Langzeitbetrieb von Membrankontaktoren zur Behandlung von kommunalem Abwasser und zur Nutzung des zurückgewonnenen Stickstoffs als Düngemittel sind bisher nicht vorhanden [2].

Auf der Hauptkläranlage Münster wurde 2018 die erste großtechnische Membrankontaktorenanlage einer deutschen Kläranlage zur Verbesserung der Gesamteffizienz der Stickstoffelimination bei gleichzeitiger Stickstoffrückgewinnung installiert. Ziel der großtechnischen Anwendung ist es, einen stabilen Langzeitbetrieb zu erreichen, Einflüsse auf die Membranleistung unter großtechnischen Betriebsbedingungen zu untersuchen und eine Ammoniumsulfatlösung (ASL) als Düngemittel zurückzugewinnen. Im Rahmen dieser Studie werden Einflüsse variierender Betriebsparameter auf die Membranleistung, Prozesswasser- und Absorbensqualität durch Online-Monitoring und chemische Analysen untersucht. Zusätzlich werden mögliche Anwendungen für die zurückgewonnene ASL in der Region um Münster untersucht.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Prozesswasserbehandlung der Hauptkläranlage Münster

Die Prozesswasserbehandlungsanlage der Hauptkläranlage Münster besteht aus mehreren Verfahrensschritten zur Vorbehandlung des Prozesswassers und der Membrankontaktorenanlage. Dem bei der Faulschlammwässerung mittels Zentrifugen anfallenden Prozesswasser wird zunächst Natronlauge hinzudosiert, um den pH-Wert des Prozesswassers zu erhöhen. Die pH-Wert-Erhöhung führt zur Verschiebung des Ammonium-Ammoniak-Dissoziationsgleichgewichts zugunsten des flüchtigen Ammoniaks. Schwebstoffe und Ausfällungen infolge der pH-Wert-Erhöhung im Prozesswasser werden durch einen Schrägklärer (Lamellenabscheider) und eine dreistufige Filtrationsstufe entfernt. Die Filtrationsstufe besteht aus einer Tiefenfiltration mit aktiviertem Filtermaterial, Scheibenfiltern (Berkal-Filter, 20 µm Maschenweite, Fa. Veolia Water Technologies Deutschland GmbH) und Beutelfiltern (Eaton-Filter, 1–3 µm Maschenweite, Fa. Eaton Electrics GmbH).

Das vorbehandelte Prozesswasser fließt anschließend durch die dreistufige Membrankontaktorenanlage. Insgesamt umfasst die Anlage 16 14×28 Liqui-Cel<sup>®</sup>-Membranmodule aus Hohlfasermembranen (Polypropylen, 0,02–0,1 µm Porengröße, Fa. 3M Deutschland GmbH) aufgeteilt in zwei Straßen mit je drei Stufen. Die Membrankontaktorenanlage hat eine maximale Behandlungskapazität von 30 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> und eine gesamte Membranfläche von 3520 m<sup>2</sup> [3]. Das Prozesswasser fließt innerhalb des Membrankontakts auf der Mantelseite, während eine Säure auf der Lumenseite der Membran fließt. Durch den erhöhten pH-Wert dissoziiert Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) zu flüchtigem Ammoniak (NH<sub>3</sub>), das durch die Membranporen diffundiert und von einer Säure

durch erneute Umwandlung in gelöstes Ammonium absorbiert wird. Daher wird ein permanentes Konzentrationsgefälle zwischen beiden Seiten der Membran als treibende Kraft für die Ammoniakdiffusion durch die Membranen aufrechterhalten.

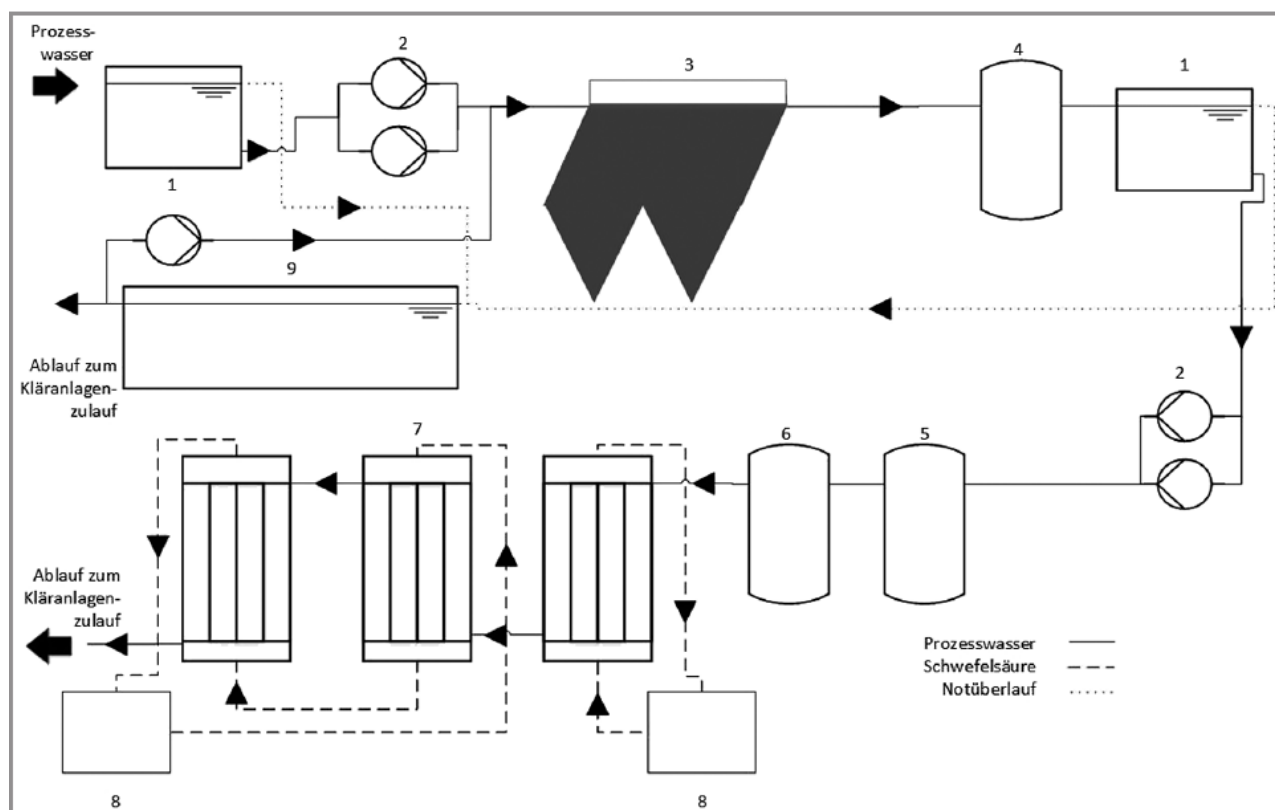
Unter Verwendung einer 78%igen Schwefelsäurelösung (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) als Absorptionsmittel innerhalb der Membranmodule wird Stickstoff aus dem Prozesswasser in Form einer Ammoniumsulfatlösung (ASL) zurückgewonnen. Die Schwefelsäure wird innerhalb der Membrankontaktorenanlage in zwei Kreisläufe unterteilt: Unbeladene Schwefelsäure mit einem pH-Wert von ca. 2–3 wird in der zweiten und dritten Membranstufe (1. Säurekreislauf) und eine teilweise beladene Schwefelsäure mit einem pH-Wert von ca. 4,1 in der ersten Membranstufe (2. Säurekreislauf) rezirkuliert. Dadurch wird die Stickstoffbeladung der Säure und somit die Ammoniumkonzentration in der produzierten ASL erhöht. Das anfallende Produkt kann als landwirtschaftlicher Dünger vermarktet werden. Abb. 1 zeigt ein vereinfachtes Verfahrensfließbild der großtechnischen Membrankontaktorenanlage.

### 2.2 Ermittlung des Bedarfs der Ammoniumsulfatlösung

Um die regionale Verwertbarkeit der ASL zu ermitteln, wurden die landwirtschaftliche Fläche und der Düngbedarf in der Umgebung der Hauptkläranlage Münster betrachtet. Diese wurden innerhalb von drei Kreisen (20, 35 und 50 km) um die Hauptkläranlage Münster ermittelt. Zur Bestimmung der landwirtschaftlichen Fläche innerhalb dieser Umkreise wurden folgende Methoden angewandt und verglichen:

- manuelle Messung und Summierung der auf Luftbildern identifizierten landwirtschaftlichen Fläche auf der Internetplattform Boris.nrw.de [4],
- Auswertung von Daten der landwirtschaftlichen Fläche pro Einwohner [5],
- Auswertung von Daten zur landwirtschaftlichen Fläche innerhalb der jeweiligen Gemeinden [6],
- manuelle Vermessung und Summierung der in der topographischen Karte von Nordrhein-Westfalen (NRW) der Bezirksregierung Köln als landwirtschaftlich gekennzeichneten Fläche.

Als durchschnittliches Ergebnis dieser Methoden wurde die landwirtschaftliche Fläche um die Kläranlage Münster angenommen. Um den Düngbedarf dieser landwirtschaftlichen Fläche zu ermitteln, wurde der N<sub>min</sub>-Wert vom Stickstoffbedarf aller in den drei ausgewählten Umkreisen angebauten Kulturen subtrahiert [7]. Der N<sub>min</sub>-Wert gibt den Gehalt an verfügbarem, mineralisiertem Stickstoff innerhalb der Böden an. Dies wurde anhand der Hauptbodentypen auf der Bodenkarte der Bezirksregierung Köln untersucht [8]. Der Stickstoffbedarf der Pflanzen wurde dem NP<sub>max</sub>-Programm der Landwirtschaftskammer NRW entnommen [9].



**Abbildung 1.** Verfahrensfliessbild Großanlage Hauptkläranlage Münster. 1: Prozesswasservorlagebehälter; 2: Pumpen; 3: Schrägklärer; 4: Tiefenfiltrationsstufe; 5: Scheibenfilter (20 µm); 6: Beutelfilter (1–3 µm); 7: dreistufige Membrankontaktorenanlage; 8: Schwefelsäurevorlagebehälter; 9: Prozesswasserspeicher.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme und ersten Betriebserfahrungen mit einem hohen Stickstoffeliminationsgrad von  $96,4 \pm 3\%$  musste der Anlagenbetrieb aufgrund erhöhter Partikelkonzentrationen im Prozesswasser unterbrochen werden. Die anfängliche Vorfiltration mit zwei Mikrosieben (Berkal-Filter 20 µm, Eaton-Filter 1–3 µm) erwies sich als nicht ausreichend. Die anschließende Installation einer vorgeschalteten Tiefenfiltrationsstufe führte zu einer stabilen Eliminierung der Partikel.

Die großtechnische Membrankontaktorenanlage wurde nach der Optimierung der Vorbehandlung 2020 wieder in Betrieb genommen. Nach einem vierwöchigen Probetrieb mit anschließender Leistungsfahrt wurde die Membrananlage mit einer durchschnittlichen Behandlungskapazität von  $9,9 \pm 3,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  und somit mit etwa einem Drittel der vorhandenen Anlagenkapazität betrieben. Grund dafür ist die Sicherstellung eines Dauerbetriebs der Anlage für die derzeit anfallende Prozesswassermenge. Von 16 Membranmodulen sind unter diesen Randbedingungen 4 Membranmodule in Betrieb.

Betriebsdaten einer dreimonatigen Betriebsphase mit konstantem Betrieb sind in Tab. 1 zusammengefasst. Das unbehandelte Prozesswasser hat eine Ammoniumkonzent-

**Tabelle 1.** Betriebsparameter und Ergebnisse der ersten Betriebsphasen der Membrankontaktorenanlage.

Betriebsparameter	Wert
Prozesswasservolumenstrom [ $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ ]	$9,9 \pm 3,0$
Ammoniumzulaufkonzentration [ $\text{mg L}^{-1} \text{NH}_4\text{-N}$ ]	$862 \pm 76$
pH-Wert vor NaOH-Dosierung [-]	$8,0 \pm 0,2$
NaOH-Dosiermenge [ $\text{L m}^{-3}$ ]	$3,8 - 6,3$
pH-Zulaufwert nach NaOH-Dosierung [-]	$11,1 \pm 0,6$
Partikelkonzentration ( $< 0,45 \mu\text{m}$ ) vor Vorbehandlung [ $\text{mg L}^{-1}$ ]	100–1500
Partikelkonzentration ( $< 0,45 \mu\text{m}$ ) nach Vorbehandlung [ $\text{mg L}^{-1}$ ]	$44 \pm 26$
Ammoniumablaufkonzentration [ $\text{mg L}^{-1} \text{NH}_4\text{-N}$ ]	$130 \pm 100$
Reinigungsleistung [%]	$85 \pm 12$
$\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration in $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ produziert [%]	3,5

ration von  $862 \pm 76 \text{ mg L}^{-1} \text{NH}_4\text{-N}$  und einen pH-Wert von  $8,0 \pm 0,2$ . Durch NaOH-Dosierung wurde der pH-Wert des Prozesswassers auf  $11,1 \pm 0,6$  angehoben. Die Behandlung des Prozesswassers mittels Membrankontaktoren führte zu

Ablaufkonzentrationen von  $130 \pm 100 \text{ mg L}^{-1} \text{ NH}_4\text{-N}$ . Die Stickstoffkonzentration im Prozesswasser wird somit durch die Membrankontaktoren um durchschnittlich rund 85 % verringert und führt bei Rückführung des behandelten Prozesswassers in den Hauptstrom der Kläranlage zur Entlastung der Belebungsstufe. Abb. 2 zeigt die Zulauf- und Ablaufkonzentrationen von Ammoniumstickstoff ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) der Membrankontaktorenanlage zusammen mit der Reinigungsleistung während der Betriebsphase.

Die beladene Schwefelsäure des 2. Säurekreislaufs wurde so lange rezirkuliert, bis ein maximaler pH-Wert erreicht und die produzierte ASL aus dem System geführt wurde. Analysen der anfallenden ASL ergaben eine Stickstoffkonzentration von etwa 3,5 %, die somit unterhalb des Grenzwertes von  $5,0 \pm 0,5 \%$  nach Düngemittelverordnung (DüMV) für die Vermarktung als Düngemittel liegt [12]. Eine Erhöhung der Stickstoffkonzentration der ASL wird im weiteren Betrieb durch Optimierungen angestrebt.

Durch die zusätzliche Installation einer Tiefenfiltration innerhalb der Vorbehandlung des Prozesswassers konnte die Konzentration an suspendierten Feststoffen auf  $44 \pm 26 \text{ mg L}^{-1}$  verringert werden. Die Konzentration suspendierter Feststoffe im unbehandelten Prozesswasser schwankte im Bereich von ca.  $100\text{--}1500 \text{ mg L}^{-1}$ .

Während des Betriebs wurden die Auswirkungen verschiedener pH-Werte des Prozesswassers auf die Reinigungsleistung der Membrankontaktoren untersucht. Mittels der NaOH-Dosierung (50 %ige NaOH) wurden pH-Werte des Prozesswassers im Bereich von 10–12 untersucht. Die Dosierung erfolgte im Zulauf zum Schrägklärer, die Messung des pH-Werts im Ablauf des Schrägklärers (ASK) und die Dosiermenge lag im Bereich  $3,8\text{--}6,3 \text{ L m}^{-3}$ . Die eingestellten pH-Werte wurden in die pH-Wert-Bereiche

$10 \leq \text{pH} < 11$ ,  $11 \leq \text{pH} < 12$  und  $12 \leq \text{pH} < 13$  eingeteilt. Die jeweiligen Reinigungsleistungen wurden aus der Differenz der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen des unbehandelten Prozesswassers im Zulauf zum Schrägklärer und des behandelten Prozesswassers im Ablauf der Membrankontaktorenanlage bestimmt. Abb. 3 zeigt die Reinigungsleistungen der untersuchten pH-Wert-Bereiche. Die Reinigungsleistungen befinden sich insgesamt in einem Bereich von 80–95 %. Bei pH-Werten  $\geq 12,0$  schwanken die Reinigungsleistungen in einem größeren Bereich (83–95 %) als bei pH-Werten  $< 12,0$ . Werden pH-Werte im Bereich zwischen 11,0 und 11,9 eingestellt, bewegen sich die Reinigungsleistungen für  $\text{NH}_4\text{-N}$  meist in einem niedrigeren Bereich (81–85 %). Aufgrund des geringeren pH-Werts im Vergleich zu einem pH-Wert von  $> 12,0$  liegt weniger  $\text{NH}_4\text{-N}$  in Form von  $\text{NH}_3$  im Prozesswasser vor und kann somit durch die Membranporen diffundieren und anschließend von der Schwefelsäure zu  $\text{NH}_4^+$  umgewandelt werden. Deshalb wird weniger  $\text{NH}_4\text{-N}$  aus dem Prozesswasser bei niedriger eingestellten pH-Werten entfernt. Insgesamt ist demnach eine geringe Zunahme der Reinigungsleistung von  $\text{NH}_4\text{-N}$  mit erhöhtem pH-Wert zu erkennen.

Die produzierte ASL soll als Düngemittel in der regionalen Landwirtschaft um Münster eingesetzt werden. Auf diese Weise würde die Stickstoffrückgewinnung aus dem Prozesswasser der Hauptkläranlage Münster zu einer verbesserten Kreislaufwirtschaft führen. Die stöchiometrisch berechnete ASL-Jahresproduktion durch Membrankontaktoren auf der Hauptkläranlage Münster beträgt 778,26 t, die 21,2 % oder 165,09 t reinen Stickstoff enthalten. Die Berechnung des Stickstoffbedarfs im Umkreis von 20 km um Münster ergab 10.958 t, wovon 1,5 % durch den aus der Hauptkläranlage Münster zurückgewonnenen Stickstoff gedeckt werden könnten.

Der landwirtschaftliche Stickstoffbedarf in der Umgebung von Münster wird bisher durch Wirtschaftsdünger, Mineraldünger, Gärreste, Klärschlamm und Kompost gedeckt [10].

Verglichen mit dem berechneten Stickstoffbedarf ist die ausgebrachte Düngermenge in allen drei Kreisen höher als der Bedarf. Der Gesamtstickstoffbedarf der Landwirtschaft beträgt deutschlandweit unter Annahme der Obergrenze von  $170 \text{ kg ha}^{-1}$  ca. 3,105 Mio. t [11]. Da die Membrankontaktoren im Vergleich zum hohen Bedarf an Stickstoffdünger in Münster und Deutschland nur eine sehr geringe Menge an potenziellem Dünger produzieren, wird eine regionale Verwertung durch Substitution

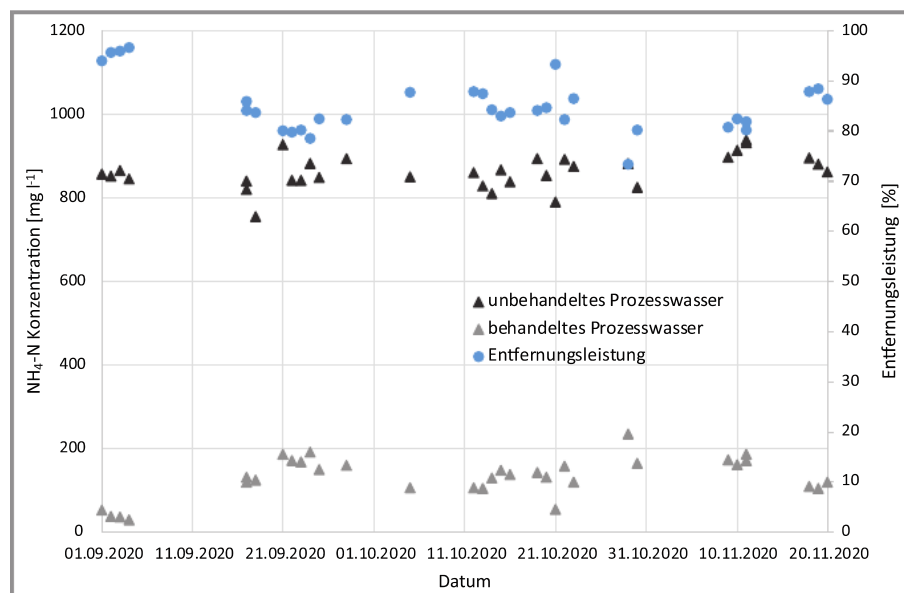
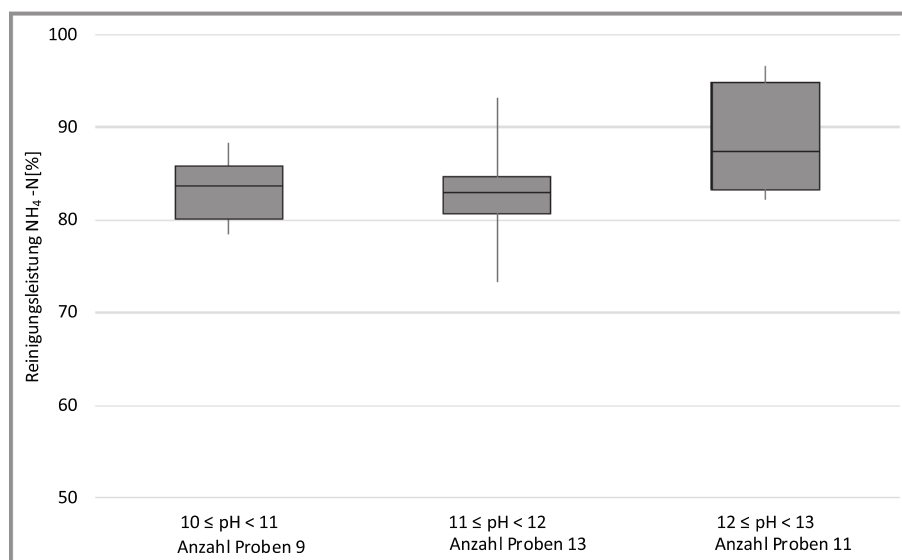


Abbildung 2.  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im unbehandelten Prozesswasser und im Ablauf der Membrankontaktorenanlage.



**Abbildung 3.** Reinigungsleistungen bei verschiedenen pH-Werten des Prozesswassers.

anderer Stickstoffquellen durch den aus dem Prozesswasser zurückgewonnenen Stickstoff als realistisch eingeschätzt.

#### 4 Fazit

Die Ergebnisse der ersten Betriebsphasen der großtechnischen Prozesswasserbehandlungsanlage der Hauptkläranlage Münster zeigen, dass eine effiziente Stickstoffelimination mittels Hohl-faser-Membrankontaktoren technisch realisierbar ist. Neben der weitergehenden Stickstoffelimination aus dem Abwasser ist die Rückgewinnung der Nährstoffressource Stickstoff als landwirtschaftlicher Dünger in Verbindung mit einer ortsnahen Nutzung ein vielversprechender Aspekt dieser innovativen Technologie zur Prozesswasserbehandlung auf kommunalen Kläranlagen.

Das Forschungsprojekt wurde vom Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen innerhalb des Förderprogramms „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW“ gefördert. Für die tatkräftige Unterstützung des Amts für Mobilität und Tiefbau der Stadt Münster wird gedankt.

#### Abkürzungen

ASK	Ablauf Schrägklärer
ASL	Ammoniumsulfatlösung
LF	landwirtschaftliche Fläche
$N_{\min}$	Gehalt an verfügbarem, mineralisiertem Stickstoff innerhalb der Böden

$NP_{\max}$	Stickstoffbedarf der Pflanzen aus Programm der Landwirtschaftskammer NRW
$NH_4-N$	Ammonium-Stickstoff
NRW	Nordrhein-Westfalen
WWTP	Wastewater treatment plant

#### Literatur

- [1] T. Melin, R. Rautenbach, *Membranverfahren*, 3rd ed., Springer, Heidelberg **2007**.
- [2] M. Darestani, V. Haigh, S. J. Couperthwaite, G. J. Millar, L. D. Nghiem, *J. Environ. Chem. Eng.* **2017**, 5, 1349–1359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.02.016>
- [3] 3M Company, *14 x 28 Extra-Flow Product Data Sheet*, Liqui-Cel® Membrane Contactors, **2015**.
- [4] L. Hoffmann, *Boris.nrw: das zentrale Informationssystem der Gutachterausschüsse und des Oberen Gutachterausschusses für Grundstückswerte über den Immobilienmarkt in Nordrhein-Westfalen*, **2018**.
- [5] M. Lammers, T. Becker, *Landwirtschaft im Münsterland. Daten – Fakten – Analysen*, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Münster **2014**.
- [6] [www.deutschland123.de](http://www.deutschland123.de) (aufgerufen am 18. September 2020)
- [7] *Ernteberichterstattung über Feldfrüchte und Grünland in Nordrhein-Westfalen. Endgültiges Ergebnis der Getreideernte*, Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf **2016**.
- [8] G. Walsken, *tim-online*, Version 2.0: Bezirksregierung Köln **2018**.
- [9] *Programm zur Stickstoff- und Phosphor-Düngebedarfsermittlung nach DüV 2017*, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Münster **2018**.
- [10] *Nährstoffbericht 2017 über Wirtschaftsdünger und andere organische Düngemittel*, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Münster **2018**.
- [11] *Daten und Fakten. Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft mit Fischerei und Wein- und Gartenbau*, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Bonn **2017**.
- [12] *Düngemittelverordnung – DüMV*, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Bonn **2019**.

DOI: 10.1002/cite.202100019

## Hohlfaser-Membrankontaktoren zur Stickstoffrückgewinnung aus Prozesswasser einer kommunalen Kläranlage

*Lea Richter\*, Svea Paulsen, Marc Wichern, Markus Grömping, Ulrich Robecke, Jens Haberkamp*

**Kurzmitteilung:** Zur Prozesswasserbehandlung wurde auf der Hauptkläranlage Münster eine Membrankontaktorenanlage im Großmaßstab in Betrieb genommen. Ersten Betriebserfahrungen nach eignet sich die innovative Technologie zur Stickstoffentfernung aus kommunalen Prozesswasser. ....

