

Weitergehende Reinigung in kommunalen Kläranlagen mittels MBR-Technologie



Kurzbericht

für das



Ministerium für Umwelt und
Naturschutz, Landwirtschaft und
Verbraucherschutz des Landes
Nordrhein-Westfalen

Förderkennzeichen: AZ IV – 9 – 042 IA5

Projektpartner:

- Erftverband (Bergheim)
- Koch Membrane Systems GmbH, Aachen
- Wasserverband Eifel-Rur (WVER), Düren

Aachen, im Oktober 2008



Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Str. 1 • 52074 Aachen
Tel: 0241 80 25207 • Fax: 0241 80 22285 • isa@isa.rwth-aachen.de

Kurzbericht

zum Forschungsvorhaben:


„Weitergehende Reinigung in kommunalen Kläranlagen mittels MBR-Technologie“

AZ IV-9-042-1A5

für das



Aachen, im Oktober 2008



Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp
(Projektleiter)

Projektpartner

- **Partner**

- **Antragsteller – wissenschaftliche Leitung**



- Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen
- Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp
- Mies-van-der-Rohe-Str. 1
- 52074 Aachen

- **Bearbeiter**

- Dipl.-Ing. S. Grinwis
- Dipl.-Ing. C. Keyzers
- Dipl.-Biol. C. Cramer
- Dr.-Ing. D. Montag
- Dr.-Ing. H. Herbst

- **Kommunale Kooperationspartner**



- Erftverband
- Paffendorfer Weg 42
- 50126 Bergheim

- Dipl.-Ing. C. Brepols
- Dipl.-Ing. H. Schäfer



- Wasserverband Eifel-Rur
- Eisenbahnstraße
- 52353 Düren

- Dipl.-Biol. E. Brands
- Dipl.-Ing. T. Rolf

- **Industrielle Kooperationspartner**



- DHV Water BV
- Laan 1914 No 35
- P.O. Box 1132
- NL-3800 BC Amersfoort

- Dipl. Ing. A. v. Bentem
- Dipl.-Ing. H. v. d. Roest



- Koch Membrane Systems GmbH
- Kackertstr. 10
- 52072 Aachen

- Dr.-Ing. K. Voßenkaul
- D. Volmering



- Tuttans & Meyer
- Bismarckstraße 2-8
- 52066 Aachen

- Dipl.-Ing. D. Loch

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	1
2	Veranlassung	2
3	Ziele des Vorhabens	4
4	Anlagenkonfiguration der MBR-Demonstrationsanlage	4
5	Vorgehensweise	7
6	Ergebnisse der Reinigungsleistung	8
7	Untersuchungen zum Anlagenverhalten bei kritischen Belastungszuständen	10
7.1	Reale Belastungsszenarien	10
7.2	Erzeugte Belastungsszenarien – Stoßbelastungsuntersuchungen	13
8	Spurenstoffanalytik	16
9	Kinetische und stöchiometrische Parameter des belebten Schlammes	18
10	Membranentwicklung und Betriebsoptimierung	19
10.1	Entwicklung und Untersuchung einer Membran mit geringer Trenngrenze	19
10.2	Optimierung des Lufteintrags	21
10.3	Optimierung des Verschlammungs- und Verzopfungsverhaltens	23
10.4	Optimierung der chemischen Zwischenreinigung	24
11	Schlussfolgerung	26
12	Literatur	28

1 Vorwort

Im Anschluss an das Forschungsvorhaben „Demonstrationsvorhaben Membranfiltration - Kläranlage Simmerath/ Nord-Eifel“ wurde im Mai 2004 das Forschungsvorhaben „Weitergehende Reinigung in kommunalen Kläranlagen mittels MBR-Technologie“ (AZ IV-9-042 1A5) beantragt, das auf den Erkenntnissen des vorangegangenen Vorhabens aufbaute.

Das ursprüngliche Ziel dieses Vorhabens war die Verbesserung von bestehenden Membranbioreaktoren (MBR-Verfahren) hinsichtlich der Elimination gefährlicher Stoffe durch eine ganzheitliche Optimierung und Weiterentwicklung des MBR-Verfahrens. Bestandteile der Optimierung waren sowohl die Membranstufe - hier speziell die Materialeigenschaften der eingesetzten Membran - als auch die biologische Reinigungsstufe. Zentraler Gegenstand der Membranoptimierung war die Entwicklung einer neuartigen Membran mit einer geringeren Trenngrenze durch die Firma Koch Membrane Systems AG aus Aachen. Die Optimierung der biologischen Stufe sollte gemeinsam mit einem niederländischen Verbundprojekt „M2 Bioreaktor - Entwicklung eines MBR mit MTR-Qualität“ mit dem Ziel der Erreichung des in den Niederlanden entwickelten Maximal-Tolerierbares-Risiko-(MTR)-Konzeptes vorgenommen werden. Die MTR-Qualität wurde in den Niederlanden als Reinigungsziel für Abwässer vorgeschlagen, die in empfindliche Oberflächengewässer und Badegewässer eingeleitet werden.

Der im Mai 2006 gestellte Antrag zur Verlängerung der Projektlaufzeit und Vorschlag zur Änderung des Forschungsantrages wurde notwendig, da das niederländische Teilprojekt, welches die grundlegenden Erkenntnisse im Hinblick auf das Erreichen der Grenzen der biologischen Prozesse ermitteln sollte, nicht umgesetzt wurde. Die vom ISA im Rahmen des Projektes durchgeführte Simulationsstudie machte deutlich, dass die auf der Kläranlage Simmerath vorliegenden Randbedingungen das Erreichen der MTR-Qualität nicht zulassen. Auf die Umsetzung der aus der Simulationsstudie resultierenden Umbauarbeiten wurde verzichtet, da sie nur geringe Erfolgsaussichten boten und die hohen Betriebskosten von MBR-Anlagen noch weiter erhöht hätten.

Ein weiterer Grund, der die Änderung des Forschungsantrages erforderlich machte, betraf die Membranentwicklung. Im Rahmen des Vorhabens wurden verschiedene Typen der neuen Membran entwickelt und nach einer Testphase im Labor einer vergleichenden Untersuchung auf dem Testfeld für Membranbelebungsanlagen auf der Kläranlage Aachen-Eilendorf unterzogen. Dabei zeigte sich, dass die neuen Membranen („Blend-Membranen“) eine Permeabilitätsabnahme aufwiesen, die deutlich stärker ausgeprägt war als erwartet. Dieser für den Einsatz in der Praxis nicht vertretbarer, schnell einsetzenden Leistungsabnahme konnte im Rahmen der möglichen Betriebsweisen der biologischen Stufe nicht erfolgreich entgegengewirkt werden. Ohne die Ergebnisse des niederländischen Teilprojektes (s.o.) fehlte der auf MTR-Qualität hin optimierte Teil des Projektes, in dem eine derartige Membran eventuell ein stabileres Betriebsverhalten hätte zeigen können. Um an dem Projektziel der

Entwicklung einer engeren Membran und damit einer Optimierung des Gesamtprozesses weiter festhalten zu können, wurde parallel zur Entwicklung einer Membran mit gleichmäßiger Porenstruktur die bestehende PURON-Membran dahingehend weiterentwickelt, dass nunmehr ein höherer Rückhalt durch Verringerung der Trenngrenze erreicht wird. In diesem Zusammenhang konnte die Trenngrenze der PURON-Membran von $0,2\ \mu\text{m}$ auf $0,05\ \mu\text{m}$ reduziert werden. Mit dieser Membran wurden bereits unter Praxisbedingungen auf der Kläranlage Simmerath deutlich stabilere Betriebsergebnisse erreicht als mit der neuen „Blend-Membran“. Ein Rückhalt gefährlicher Stoffe konnte allerdings nur begrenzt erreicht werden.

Die im Rahmen einer Voruntersuchung im Zulauf erfassten Spurenstoffe konnten im weiteren Verlauf des Projektes im Zulauf zur Kläranlage Simmerath nur noch in so niedrigen Konzentrationen ermittelt werden, dass nahezu sämtliche Ergebnisse der Spurenstoffanalysen des Ablaufs der Großanlage und des Filtrats der MBR-Anlage unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen. Eine vergleichende Bewertung des Rückhalts dieser gefährlichen Stoffe zwischen der konventionellen Kläranlage und der MBR-Anlage sowie die Beurteilung eines verbesserten Rückhalts durch eine feinporigere Membran ist daher nicht möglich gewesen.

Die im November 2006 eingereichte Ergänzung des Projektantrages umfasste Untersuchungen zum Anlagenverhalten der MBR-Demonstrationsanlage bei kritischen Belastungszuständen. Basierend auf den Voruntersuchungen wurde das Anlagenverhalten bei einzelnen Regenwetterereignissen ausgewertet und eine Einteilung der Ereignisse in Abhängigkeit der hydraulischen und stofflichen Belastung vorgenommen. Die gezielte Belastung der Versuchsanlage bei niedrigen Abwassertemperaturen und bei Stoßbelastungen ermöglicht die Erfassung belastbarer Aussagen im Hinblick auf die Auslegung von Membranbelebungsanlagen. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Ergänzungsvorhabens (November 2006) Stoßbelastungsuntersuchungen durchgeführt, bei denen der zeitliche Abstand zwischen den auftretenden stofflichen und hydraulischen Spitzenbelastungen variiert wurde. Durch gezielte Dosierung von Ammoniumstickstoff in den Zulauf zur MBR-Anlage wurde eine Trennung zwischen der stofflichen und der hydraulischen Lastspitze erreicht. Des Weiteren wurden ausgewählte kinetische und stöchiometrische Parameter des belebten Schlammes bestimmt. Ausgewählt wurden für die biologische Abwasserreinigung sensitive Parameter, die nach LIEBESKIND (1999) im labortechnischen Maßstab relativ sicher zu bestimmen sind.

2 Veranlassung

Zur kommunalen bzw. industriellen Abwasserreinigung sowie zur Trinkwasseraufbereitung werden poröse Membranen der Mikro- oder Ultrafiltration eingesetzt. Diese Membranen ermöglichen einen weitgehenden Rückhalt von Bakterien, Viren und parasitären Krankheitserregern. Diese im Vergleich zu klassischen Verfahren der Wasseraufbereitung einzigartige

Eigenschaft der Membranen führt derzeit zu einem verstärkten Bau von Membrananlagen in der kommunalen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung.

Wenn die Porengröße neu entwickelter Membranen im Vergleich zu den heute bereits in der kommunalen Abwasserreinigung eingesetzten Membranen dermaßen verringert werden könnte, dass auch Arzneimittel in der Kläranlage zurückgehalten würden, dann wäre der Haupteintragspfad für Humanarzneimittel in die Umwelt reduziert. Die bisher gesammelte Erfahrung mit Porenmembranen auf kommunalen Kläranlagen zeigt jedoch, dass der Einsatz von Membranverfahren, die der Nanofiltration zuzuordnen sind, infolge einer raschen Verblockung der Poren sowie einer raschen Deckschichtbildung (in Kombination mit dem Belebtschlammverfahren) nicht möglich ist. Zusätzlich ist bei Membranen mit einer derart geringen Trenngrenze mit einem verstärkten Scaling gegenüber MF-/UF-Membranen zu rechnen.

Um dennoch gefährliche Stoffe aus dem Abwasser kommunaler Kläranlagen zu beseitigen, sind

- die Entwicklung einer Membran mit engerer Trenngrenze und
- die Optimierung der biologischen Reinigungsstufe

notwendig. Die Optimierung der biologischen Reinigungsstufe ist erforderlich, um die im Abwasser enthaltenen, Fouling verursachenden Substanzen vor dem Kontakt mit der Membran weitestgehend abzubauen. Die Umsetzung des in den Niederlanden entwickelten MTR-Konzeptes (Maximal Tolerierbares Risiko) könnte den Einsatz einer Nanofiltrationsmembran ermöglichen, da das MTR-Konzept hohe Anforderungen an die biologische Reinigungsstufe stellt und daher vom behandelten Abwasser nur noch ein geringes Foulingpotenzial ausgeht. Die Zielvorgaben des MTR-Konzeptes wurden ursprünglich für die Einleitung von Kläranlagenabläufen in sehr sensible Gewässer erarbeitet.

Um generell eine hohe Reinigungsleistung in Membranbioreaktoren dauerhaft zu gewährleisten, sind ergänzende Untersuchungen zum Anlagenverhalten bei kritischen Belastungszuständen erforderlich. Zu diesem Zweck wird das Anlagenverhalten bei einer kombinierten stofflichen und hydraulischen Spitzenbelastung näher untersucht.

Um die Übertragbarkeit der Modellansätze für konventionelle Kläranlagen auf Membranbelebungsanlagen zu prüfen und um die Datenbasis für Membranbelebungsanlagen zu vergrößern, werden kinetische und stöchiometrische Parameter des belebten Schlammes bestimmt und mit bereits vorhandenen Literaturwerten verglichen. Auch soll untersucht werden in wie weit eine Anhebung der Schlammbelastung Einfluss auf diese Parameter hat.

Des Weiteren stellen der im Vergleich zu konventionellen Kläranlagen deutlich höhere Energieverbrauch (infolge der Modulbelüftung) sowie der zusätzliche Aufwand, um die Leistungsfähigkeit der Membranen aufrecht zu erhalten (z.B. chemische Reinigungen, Maßnahmen zur Vermeidung von Verschlämmungen und Verzopfungen), häufig Ausschluss-

kriterien für die MBR-Technologie dar. Daher werden zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit des untersuchten Membranmoduls Konzepte

- für eine automatisierte chemische Zwischenreinigung der Membranmodule und
- für einen reduzierten Energiebedarf für die Modulbelüftung

erarbeitet und umgesetzt.

3 Ziele des Vorhabens

Ziele des Vorhabens waren

- die Entwicklung einer Membran mit engerer Trenngrenze im Vergleich zu herkömmlichen Mikrofiltrationsmembranen für den Rückhalt von gefährlichen Stoffen,
- die Optimierung der biologischen Reinigungsstufe zur weitestgehenden biologischen Reinigung und Verringerung des Foulingpotenzials sowie zur Erreichung des weitestgehenden Abbau biologisch schwer abbaubarer organischer Stoffe,
- Untersuchungen der Reinigungsleistung von MBR-Anlagen bei kritischen Belastungszuständen,
- die Überprüfung des Bemessungsansatzes $V_{DN}/V_N = 1$ nach PINNEKAMP und FRIEDRICH (2006),
- Bestimmung von ausgewählten kinetischen und stöchiometrischen Parametern des belebten Schlammes,
- Etablierung einer automatischen Zwischenreinigung der Membranmodule und
- die Entwicklung einer neuen Modulbelüftung zur Reduzierung des Energiebedarfes.

4 Anlagenkonfiguration der MBR-Demonstrationsanlage

Die Demonstrationsanlage mit einer Anschlussgröße von 750 E wurde auf dem Gelände der vom Wasserverband Eifel-Rur betriebenen Kläranlage Simmerath (Anschlussgröße 15.000 E) errichtet. Ein Schema beider Anlagen ist in Bild 4-1 abgebildet.

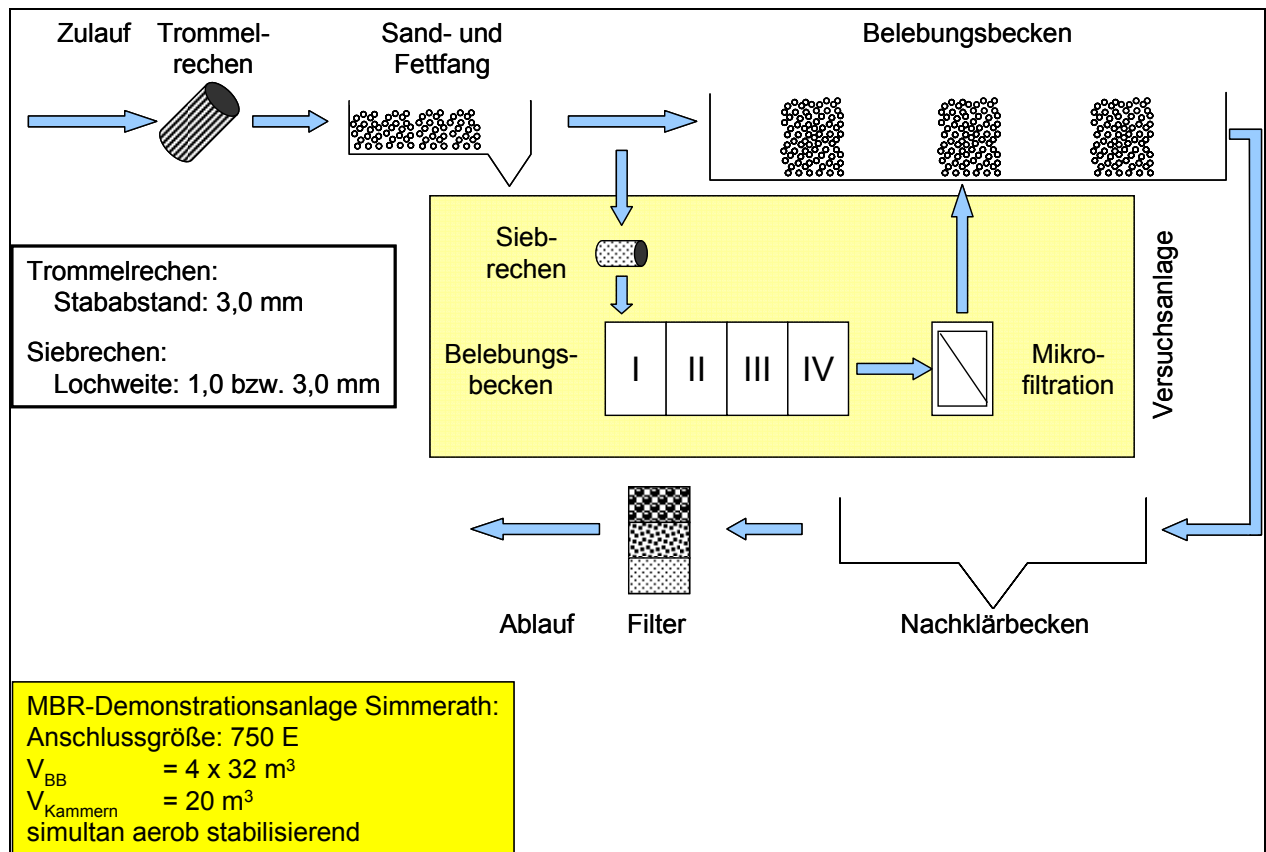


Bild 4-1: Schema der Kläranlage Simmerath und der Demonstrationsanlage

Die Parameter, die der Bemessung der Demonstrationsanlage zugrunde gelegt wurden, sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Eine zusätzliche Vorreinigung des Abwasserteilstroms durch einen Siebrechen, wie sie bei Membrananlagen zur Reinigung kommunaler Abwässer i. d. R. vorgenommen wird, wurde ebenfalls implementiert.

Tabelle 4.1: Bemessungsparameter für die Demonstrationsanlage

Mischwasserzufluss	Q_m	26,1	m^3/h
	$t_{\text{Durchfluss, MW}}$	5,7	h
Trockenwetterzufluss	Q_t	14,3	m^3/h
	$t_{\text{Durchfluss, TW}}$	10,3	h
Schmutzwasserzufluss	Q_{SW}	7,2	m^3/h
Zulaufsrachten	CSB	90,0	kg/d
	BSB	45,0	kg/d
	$\text{NH}_4\text{-N}$	5,3	kg/d
	$N_{\text{anorganisch}}$	3,0	kg/d
	P_{ges}	1,4	kg/d
	AFS	53,0	kg/d

Die Membranmodule (Fa. Koch Membrane Systems, $A_{\text{Membran, ges}} = 943 \text{ m}^2$) waren in zwei Membrankammern (jeweils 10 m^3) angeordnet. Die Anordnung der einzelnen Module sowie deren Spezifikationen sind Bild 4-2 zu entnehmen.

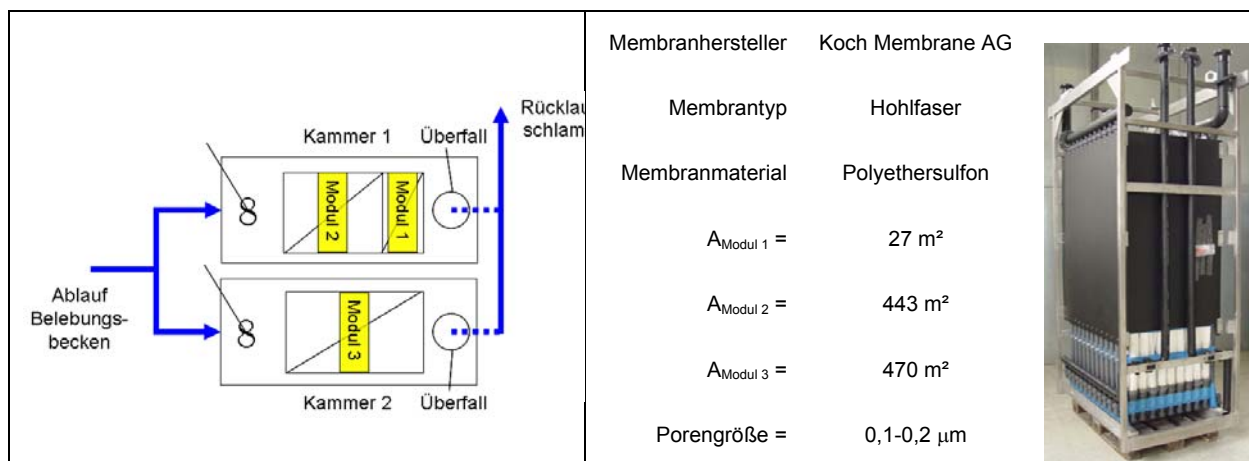


Bild 4-2: Membrankammern und installierte Module

Das Filtrat der drei Membranmodule wurde in einem Sammeltank zwischengespeichert und für die Rückspülung zur Verfügung gestellt. Das restliche Filtrat wurde zurück in das Belebungsbecken der Kläranlage Simmerath geleitet.

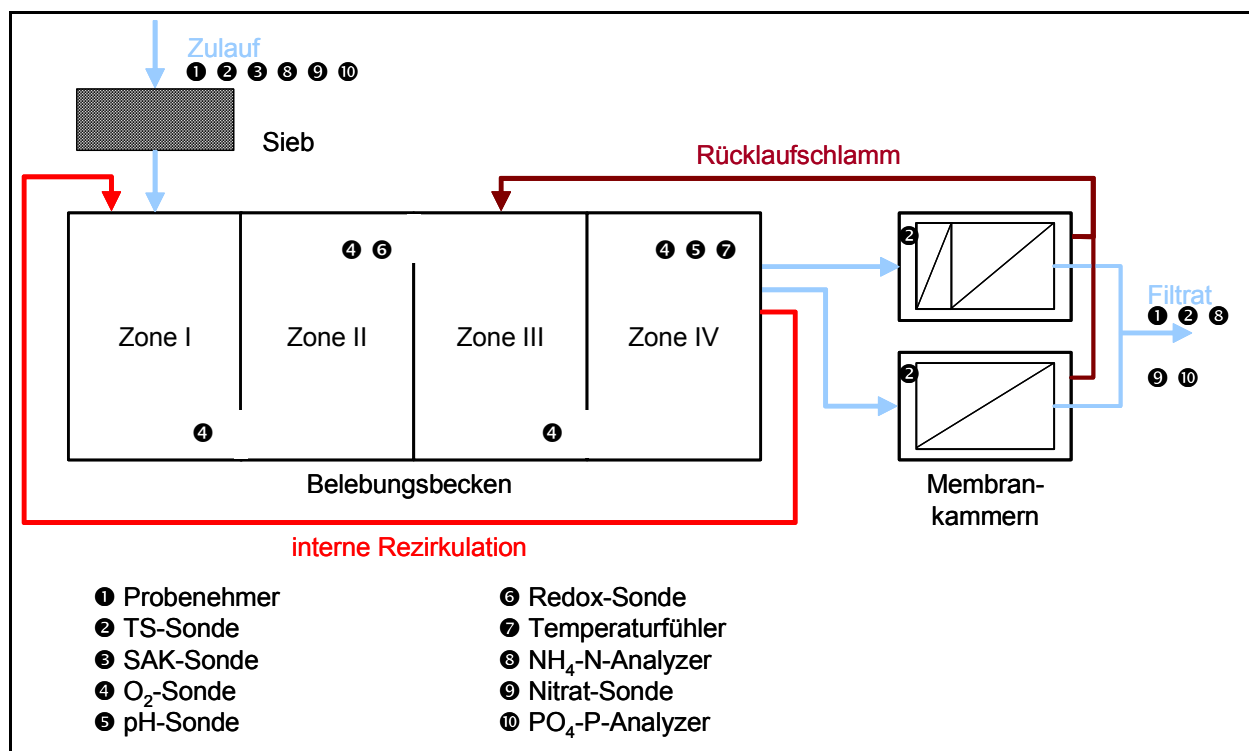


Bild 4-3: Installierte Messtechnik der MBR-Demonstrationsanlage Simmerath

• **Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik**

Die Demonstrationsanlage war mit umfangreicher Online-Messtechnik ausgestattet. In Bild 4-3 sind die erfassten Parameter und die Messstellen abgebildet. Zusätzlich wurden mittels Probenehmerschränken am Ablauf des Sandfangs (Zulauf Demonstrationsanlage) und am Filtrattank (Ablauf Demonstrationsanlage) wöchentlich Abwasserproben (24h-Mischproben) im

Labor untersucht und somit die Messergebnisse der Analyser kontrolliert. Die erfassten Daten dienten neben der Analyse der ablaufenden Prozesse auch der Anlagensteuerung.

5 Vorgehensweise

Die biologische Stufe der MBR-Versuchsanlage in Simmerath wurde im Untersuchungszeitraum mit unterschiedlichen Verfahrensweisen betrieben. Eine Übersicht über die Untersuchungsphasen und -zeiträume bietet Bild 5-1. Neben der Betriebsweise mit intermittierender Belüftung wurde eine modifizierte vorgeschaltete Denitrifikation umgesetzt. Innerhalb letzterer Betriebsweise (Betriebsphase II bis IV) wurden reale kritische Belastungszustände ausgewertet und hinsichtlich ihrer Reinigungsleistung untersucht. Die Überprüfung des Bemessungsansatzes $V_{DN}/V_N = 1$ und weitergehende Untersuchungen bei kritischen Belastungszuständen (reale sowie erzeugte Belastungsszenarien) erfolgten während der Betriebsphase V. Innerhalb dieser Betriebsphase wurden auch ausgewählte kinetische und stöchiometrische Parameter des belebten Schlammes bestimmt. Die Etablierung einer automatischen Zwischenreinigung der Membranmodule und die Entwicklung einer neuen Modulbelüftung zur Reduzierung des Energiebedarfes erfolgten während des gesamten Projektzeitraumes.

Parallel zur Optimierung der biologischen Reinigungsstufe wurde durch die Firma Koch Membrane Systems eine neue Membran (Blend-Membran) entwickelt, die eine deutlich engere Trenngrenze im Vergleich zu herkömmlichen Mikrofiltrationsmembranen aufweist. Vor der großtechnischen Umsetzung erfolgten Untersuchungen im Labormaßstab und im Teststand auf der Kläranlage Eilendorf.

Betriebsweise	November 04	Dezember 04	Januar 05	Februar 05	März 05	April 05	Mai 05	Juni 05	Juli 05	August 05	September 05	Oktober 05	November 05	Dezember 05	Januar 06	Februar 06	März 06	April 06	Mai 06	Juni 06	Juli 06	August 06	September 06	Oktober 06	November 06	Dezember 06	Januar 07	Februar 07	März 07	April 07	Mai 07	Juni 07	Juli 07	August 07	September 07	Oktober 07	November 07	Dezember 07	Januar 08	Februar 08					
Phase I: intermittierende Belüftung Anteil am Zufluss zur KA 5%	■	■	■	■	■	■																																							
Phase II: modifizierte vorgeschaltete Denitrifikation Anteil am Zufluss zur KA 5%							■	■	■	■	■	■	■	■	■																														
Phase III: modifizierte vorgeschaltete Denitrifikation Anteil am Zufluss zur KA 5% - 7%							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Phase IV: modifizierte vorgeschaltete Denitrifikation Anteil am Zufluss zur KA 7%																																													
Phase V: modifizierte vorgeschaltete Denitrifikation Anteil am Zufluss zur KA 7% Reduzierend von V_n um 50 %																																													
							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

Bild 5-1: Betriebsphasen und Untersuchungszeiträume der biologischen Reinigungsstufe der MBR-Demonstrationsanlage Simmerath

6 Ergebnisse der Reinigungsleistung

Kohlenstoffelimination

Die Beurteilung der Eliminationsleistung der Versuchsanlage bezüglich des Kohlenstoffs wurde anhand von Laborwerten und online erfassten Messwerten vorgenommen. Da hinsichtlich der Kohlenstoffelimination keine wesentlichen Unterschiede in Abhängigkeit der Untersuchungsphasen festgestellt werden konnten, wurde auf eine Aufschlüsselung der erzielten Elimination für die einzelnen Phasen verzichtet. Die erzielte Kohlenstoffelimination betrug während des gesamten Untersuchungszeitraumes über 95 %. Insgesamt wurde eine mittlere Elimination von 98 % erzielt.

Stickstoffelimination

Im Folgenden erfolgt eine Gesamtbeurteilung der erzielten Elimination bezüglich der Stickstoffparameter für die einzelnen Betriebsweisen.

Phase I: intermittierende Belüftung

Während des gesamten Betriebes mit intermittierender Belüftung betrug der 85 %-Perzentilwert der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Filtratkonzentration $< 0,3 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$. Trotz der Zeiträume, in denen ausschließlich eine Belüftung in den Membrankammern erfolgte, liegt der 85 %-Perzentilwert der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen im Filtrat beim Betrieb mit intermittierender Belüftung mit $8,5 \text{ mg NO}_3\text{-N/l}$ in einem Wertebereich, der auch bei einem Betrieb mit modifizierter vorgeschalteter Denitrifikation (Phase II-IV) erzielt werden konnte.

Phase II-IV: modifizierte vorgeschaltete Denitrifikation

Der 85 %-Perzentilwert der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Filtratkonzentration betrug während dieser Betriebsphase $< 0,2 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$. Während des Betriebs mit intermittierender Belüftung (Phase I) wurde infolge der Zeiträume ohne Belüftung ein geringfügig höherer 85 %-Perzentilwert ($< 0,3 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$) im Filtrat festgestellt. Die 85 %-Perzentilwerte der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Filtratkonzentrationen ($8,4$ bis $9,5 \text{ mg NO}_3\text{-N/l}$) der Betriebsweise modifizierte vorgeschaltete Denitrifikation lagen in derselben Größenordnung wie während der intermittierende Belüftung ($8,5$ bis $9,3 \text{ mg NO}_3\text{-N/l}$).

Phase V: modifizierte vorgeschaltete Denitrifikation

Während der fünften Betriebsphase ist ein deutlicher Unterschied der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Elimination zwischen den beiden betrachteten Zeiträumen zu erkennen. Der mit $< 0,4 \text{ mg/l}$ höhere 85 %-Perzentilwert für den Zeitraum vom 01.07.2007 bis zum 31.10.2007 im Vergleich zu den Betriebsphasen II-IV kann auf die Absenkung des TS-Gehaltes von 12 auf 9 g/l zurückgeführt werden. Während der Wintermonate (Zeitraum vom 01.11.2007 bis zum 21.03.2008) lag der 85 %-Perzentilwert der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Filtrat bei $1,25 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$. Die verringerte Nitrifikationsleistung ist auf die niedrige Abwassertemperatur im Belebungsbecken ($T_{\text{BB}} = 7\text{-}8^\circ \text{C}$) zurückzuführen. Trotz der erhöhten Ammoniumkonzentrationen im Filtrat kann die Nitrifikationsleistung während der Wintermonate als ausreichend angesehen werden.

Infolge der Reduzierung des Denitrifikationsvolumens um 50 % traten während der fünften Betriebsphase deutlich erhöhte $\text{NO}_3\text{-N}$ -Filtratkonzentrationen auf. Der 85 %-Percentilwert im Filtrat betrug $16,5 \text{ mg NO}_3\text{-N/l}$. Die mangelnde Denitrifikationsleistung während dieser Betriebsphase ist den verfahrenstechnischen Randbedingungen geschuldet (Absenkung des TS-Gehaltes, Verringerung des Denitrifikationsvolumens). Zur Feststoffkontrolle innerhalb der Membrankammer ist eine ausreichend hohe Rezirkulation zwischen Membrankammer und Belebungsbecken sicherzustellen. Für die Betriebsweise der modifiziert vorgeschalteten Denitrifikation erfolgt die Rezirkulation zwischen Membrankammern und Nitrifikationsbecken. Um den maximalen Feststoffgehalt in den Membrankammern nicht zu überschreiten, betrug die Rezirkulation in Abhängigkeit des Lastfalls (Trockenwetter- oder Mischwetterzufluss) zwischen 40 und $120 \text{ m}^3/\text{h}$. Da für die Denitrifikation eine Rückführung des Nitratstickstoffs von dem Nitrifikations- in das Denitrifikationsbecken erforderlich ist, müsste die Rezirkulation zwischen den beiden biologischen Becken mindestens in derselben Größenordnung liegen wie die Rezirkulation zwischen Nitrifikationszone und Membrankammern. Unter Berücksichtigung einer Mindestaufenthaltszeit für die Denitrifikationszone von $t_{\text{HRT,Deni.}} \geq 0,5 \text{ h}$ können die hohen Rezirkulationsvolumenströme nicht gepumpt werden, da bei einer Beckengröße von $V_{\text{DN}} = 30 \text{ m}^3$ der maximal zulässige Zulaufvolumenstrom ($Q_{\text{Rezi}} + Q_{\text{Zu}}$) $60 \text{ m}^3/\text{h}$ nicht überschreiten sollte (ALT und WEDI, 2007).

Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Schlammbelastung und der erzielten Stickstoffelimination (bezogen auf N_{anorg}) konnte nicht ermittelt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die geänderte Schlammbelastung mit Änderungen anderer Randbedingungen einherging, wie beispielsweise der Temperatur oder des TS-Gehaltes.

Phosphorelimination

Zur Ermittlung der Phosphorelimination wurden ausschließlich Online-Messwerte ausgewertet. Die Beurteilung der Reinigungsleistung hinsichtlich Phosphor beschränkt sich auf die Phasen I-IV, da der Untersuchungsschwerpunkt der Betriebsphase V die Stickstoffelimination war. Zu Beginn wurde versucht, durch langsame Steigerung der Natriumaluminatdosiermenge eine geeignete Fällung einzustellen. Trotz Verlegung der Dosierstelle, die anfänglich in der Zulaufleitung integriert war, konnten keine zufrieden stellenden Ergebnisse erzielt werden. Neben der Dosierung in die Leitung des Rücklaufschlammes wurde auch eine Dosierstelle in der Leitung der internen Rezirkulation untersucht. In der anschließenden Untersuchungsphase mit ausschließlicher Fällung mit Hilfe von Eisen(III)Chlorid konnte die Phosphorelimination von ca. 50 % auf ca. 90 % gesteigert werden. Im Dezember 2005 musste die Dosierung eingestellt werden, da die Säurekapazität des behandelten Abwassers unter den in der Literatur angegebenen unteren Grenzwert von $1,6 \text{ mmol/l}$ sank (IMHOFF, 2007). Nach einer kurzen Zeit ohne Fällmitteldosierung wurde wieder Natriumaluminat dosiert. Im Vergleich zur 1. Untersuchungsphase wurde die Fällmittelmenge erhöht, so dass eine Elimination zwischen 70 % und ca. 90 % erzielt werden konnte. Da eine dauerhafte alleinige Zugabe von Eisen(III)Chlorid nicht möglich war, wurde im Anschluss eine kombinierte Fällung mit Natriumaluminat und

Eisen(III)Chlorid vorgenommen. Die Einhaltung des angestrebten Überwachungswertes des MTR-Konzeptes von 0,15 mg P_{ges}/l ist nicht gelungen. Die Einhaltung eines Überwachungswertes von 1,0 mg P_{ges}/l (vgl. Demonstrationsvorhaben in Simmerath) ist, mit Ausnahme einiger Ausreißer, ab Oktober 2005 mit Natriumaluminat möglich gewesen. Zusammenfassend sind die mittleren Filtrat-Gesamtphosphorkonzentrationen in Tabelle 6-1 dargestellt

Tabelle 6-1: *Mittlere Gesamtphosphor-Konzentrationen im Filtrat der Demonstrationsanlage Simmerath*

		P _{ges, Filtrat}	Fällmittel
Phase I	intermitt. Belüftung (alte Zulaufleitung) 16.11.2004-21.02.2005	1,20 mg/l	NaAl(OH) ₄
	intermitt. Belüftung (neue Zulaufleitung) 04.03.2005-21.06.2005	1,45 mg/l	NaAl(OH) ₄
Phase II	mod. vorg. Denitrifikation 01.08.2005-31.03.2006	0,85 mg/l	FeCl ₃
Phase III	mod. vorg. Denitrifikation 01.04.2006-31.07.2006	0,76 mg/l	NaAl(OH) ₄
Phase IV	mod. vorg. Denitrifikation 01.08.2006-31.12.2006	0,69 mg/l	kombiniert NaAl(OH) ₄ + FeCl ₃

7 Untersuchungen zum Anlagenverhalten bei kritischen Belastungszuständen

7.1 Reale Belastungsszenarien

Im Folgenden werden Messergebnisse von Tagen mit Mischwasserzuflüssen bei unterschiedlichen Betriebsweisen ausgewertet und miteinander verglichen. Ziel dieser Vergleiche ist die Beurteilung des Anlagenverhaltens bei kritischen Belastungszuständen in Abhängigkeit der Reaktorkonfiguration.

Szenario 1: Zeitgleiche hydraulische und stoffliche Belastungsspitzen

16.04.2005 - intermittierende Belüftung

20.05.2006 - modifizierte vorgeschaltete Denitrifikation

Im Bild 7-1 sind die NH₄-N-Filtratkonzentrationen und die hydraulische Aufenthaltszeit dargestellt. Trotz der um ca. 40 % geringeren Spitzenzulaufkraft (12,7 kg NH₄-N/d zu 21,3 kg NH₄-N/d) und der um ca. 3 Stunden längeren Durchflusszeit wurde bei der Betriebsweise mit intermittierender Denitrifikation eine um ca. 1 mg NH₄-N/l höhere Spitzen-Konzentration im Filtrat registriert (Bild 7-1). Dies ist auf das implementierte Regelkonzept der Belüftung zurück zu führen, da die zeitgesteuerte Belüftung erst ab einer NH₄-N-Konzentration im Filtrat von 1 mg NH₄-N/l aktiviert wurde. Infolge der langen Denitrifikationsphase steigt die

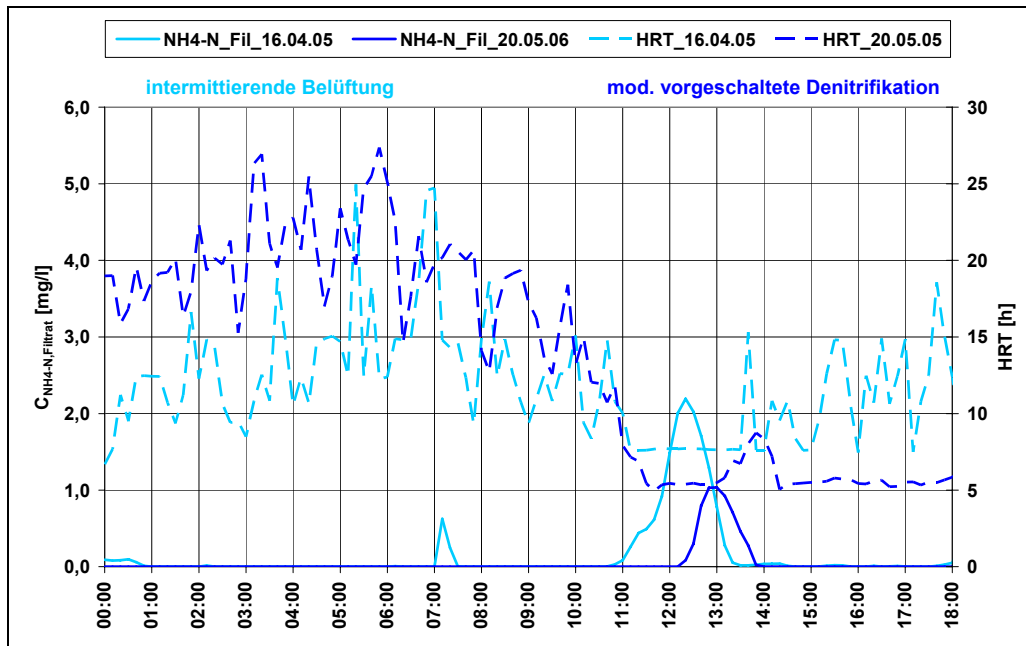


Bild 7-1: NH_4-N -Konzentrationsganglinien des Filtrats und Ganglinien der HRT des MBR-Simmerath

NH_4-N -Konzentration bereits frühzeitig infolge der hydraulischen und stofflichen Belastung an. Die später einsetzende Dauerbelüftung reicht in den ersten 30 Minuten nicht aus, um die NH_4-N -Konzentration wieder zu senken.

Für das erste Szenario liegt der 85 %-Perzentilwert der anorganischen Stickstoffkonzentration ($NH_4-N + NO_3-N$) im Filtrat bei $< 4,2 \text{ mg } N_{\text{anorg.}}/\text{l}$ für die Betriebsweise der intermittierenden Belüftung. Dahingegen lag der 85 %-Perzentilwert für die Betriebsweise der modifizierten vorgeschalteten Denitrifikation bei $< 6,6 \text{ mg } N_{\text{anorg.}}/\text{l}$ (Bild 7-2).

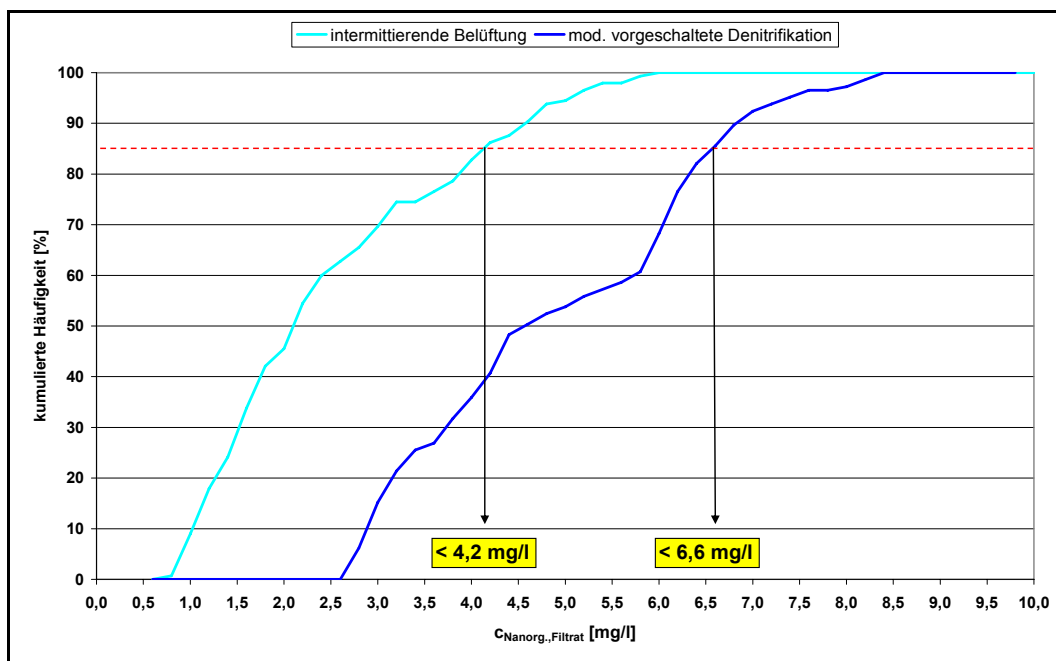


Bild 7-2: Vergleich der kumulierten Häufigkeit der $N_{\text{anorg.}}$ -Konzentration im Filtrat – zeitgleiche hydraulische und stoffliche Belastungsspitzen

Szenario 2: Hydraulische Belastungsspitze vor stofflicher Belastungsspitze

28.12.2004 - intermittierende Belüftung

26.05.2006 - modifizierte vorgeschaltete Denitrifikation

Im Gegensatz zu dem zuvor ausgewerteten Mischwasserereignis traten während des Untersuchungszeitraums keine Zuflussrandbedingungen innerhalb der verschiedenen Betriebsphasen auf, die nahezu identisch sind.

Trotz der gegenüber dem 26.05.2006 um ca. 45 % niedrigeren NH₄-N-Spitzenfrachtbelastung und der um ca. 3 Stunden längeren HRT ab ca. 11:30 Uhr konnten im Filtrat des MBR bei der Betriebsweise mit intermittierender Belüftung eine NH₄-N-Konzentrationen bis zu 0,7 mg/l festgestellt werden (Bild 7-3). Die höhere Belastung infolge größerer Zulaufkraft und kürzerer HRT führte zu keinen deutlich höheren NH₄-N-Spitzenkonzentrationen im Filtrat. Hinsichtlich der Gestalt der NH₄-N-Ganglinien im Filtrat gibt es jedoch deutliche Unterschiede. Diese beruhen zum einen auf den nicht vollständig gleichen Zuflussbedingungen und zum anderen auf den unterschiedlichen Betriebseinstellungen. Infolge der intermittierenden Belüftung am 28.12.2004 entsteht ein wellenförmiger Verlauf der NH₄-N-Filtratkonzentrationen. Da die Amplitude des Konzentrationsverlaufs weniger als 1 mg NH₄-N/l betragen, erfolgte keine konzentrationsgesteuerte Zwangsbelüftung des biologischen Reaktors. Aus diesem Grund und der höheren HRT wurden über einen Zeitraum von rd. 7 Stunden NH₄-N-Filtratkonzentrationen > 0,1 mg/l festgestellt. Bei der Betriebsweise mit modifizierter vorgeschalteter Denitrifikation war eine erhöhte NH₄-N-Filtratkonzentration nur für ca. 2 Stunden zu verzeichnen.

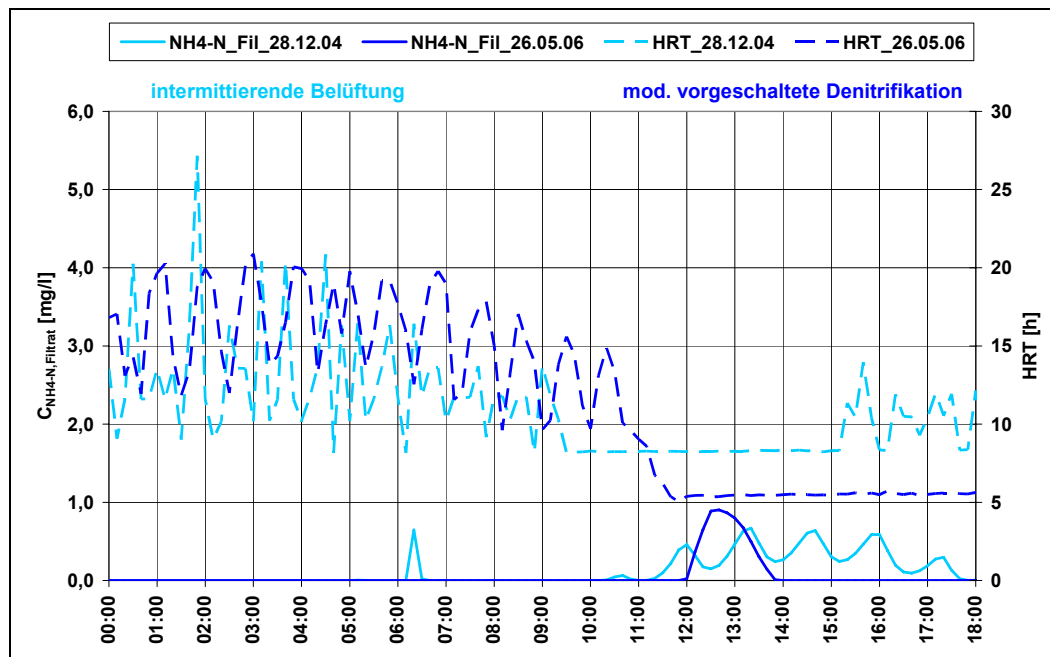


Bild 7-3: NH₄-N-Konzentrationsganglinien des Filtrats und Ganglinien der HRT im MBR Simmerath

Ein qualitativ ähnliches Bild im Vergleich zum ersten Szenario ergibt sich bei der Betrachtung dieses Szenarios. Bei diesem Lastfall liegt der 85 %-Percentilwert der anorganischen Stickstoffkonzentration für die intermittierende Belüftung bei $< 5,0 \text{ mg N}_{\text{anorg.}}/\text{l}$. Bei der vorgeschalteten Denitrifikation beträgt der 85 %-Percentilwert $< 5,7 \text{ mg N}_{\text{anorg.}}/\text{l}$ (Bild 7-4).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für beide Szenarien sowohl die Betriebsweise der modifiziert vorgeschalteten Denitrifikation als auch die der intermittierenden Belüftung eine ausreichende Leistungsfähigkeit aufweisen, um die definierten Reinigungsziele zu erreichen. Die Einhaltung des MTR-Konzeptes ($N_{\text{ges}} \leq 2,2 \text{ mg/l}$) konnte nicht erreicht werden. Ein direkter Vergleich der beiden Betriebsweisen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit ist aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen (Zulauffracht, HRT und Abwassertemperatur) nicht möglich.

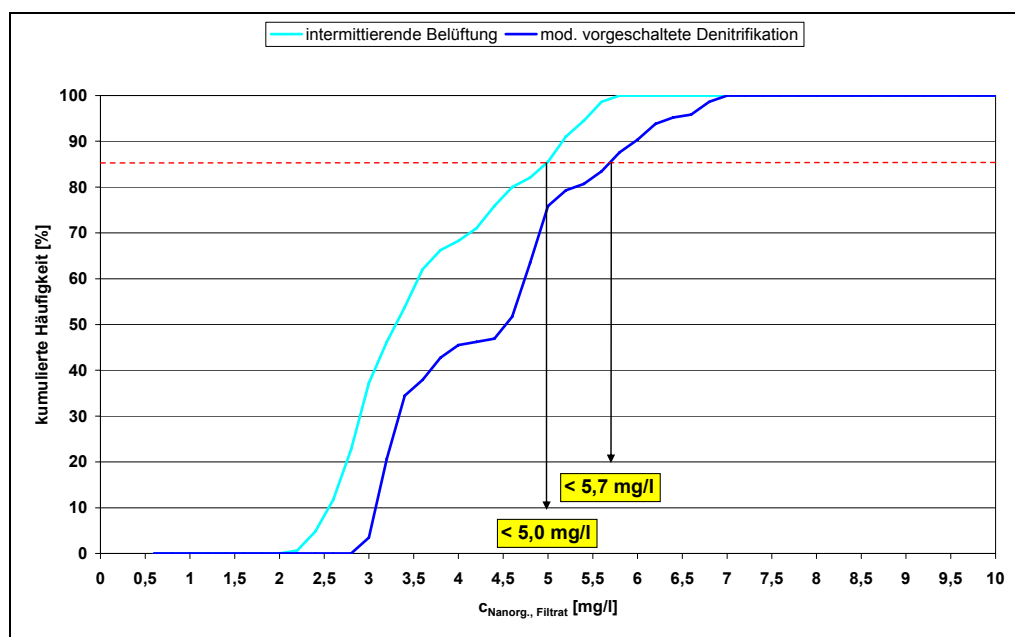


Bild 7-4: Vergleich der kumulierten Häufigkeit der $N_{\text{anorg.}}$ -Konzentration im Filtrat – hydraulische Belastungsspitze vor stofflicher Belastungsspitze

7.2 Erzeugte Belastungsszenarien – Stoßbelastungsuntersuchungen

Im Folgenden wurden für die Demonstrationsanlage in Anlehnung an die bei KREBS und KÜHN (1999) ausgeführten Überlegungen, kritische Belastungsszenarien erzeugt. Dabei werden erneut zwei Szenarien unterschieden. Zum einen das zeitgleiche Auftreten der hydraulischen und stofflichen Belastungsspitze und zum anderen das zeitversetzte Auftreten der Belastungsspitzen (stoffliche Spitze vor hydraulischer Spitze).

Da bei den Untersuchungen der primäre Fokus auf das Anlagenverhalten hinsichtlich der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufkonzentrationen gelegt wird und daher kein zusätzlicher Kohlenstoff zudosiert wurde, wird für die folgenden Betrachtungen nicht näher auf die Denitrifikationsleistung bzw. auf die Gesamtstickstoffelimination der MBR-Anlage eingegangen.

Szenario 1: Zeitgleiche hydraulische und stoffliche Belastungsspitzen

Zur Erreichung der hydraulischen Belastung wurde Filtrat in den MBR zurückgeführt. Die Erzeugung der Ammoniumstöße erfolgte durch die Zugabe von gelöstem Ammoniumchlorid, wobei eine gute Durchmischung mit dem Abwasserstrom sichergestellt wurde. Um die definierte Belastungssituation möglichst genau abzubilden, erfolgten die Filtratrückführung und die Zudosierung des Ammoniumchlorids voll automatisch über das Prozessleitsystem.

Die minimale HRT bei dieser Versuchsdurchführung betrug 4,5 Stunden. Wie aus Bild 7-5 hervorgeht, trat die hydraulische Spitze zeitgleich mit der stofflichen Spitze zwischen 11:40 und 12:20 Uhr auf. Infolge der zeitgleichen hydraulischen und stofflichen Belastung der Anlage und aufgrund eines voll durchmischten Systems war ein Anstieg der Ammoniumkonzentration im Filtrat schon nach 40 Minuten zu verzeichnen. Die erhöhten Ammoniumkonzentrationen im Filtrat von $> 1 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ konnten über einen Zeitraum von 10 Stunden beobachtet werden. Die maximale Ammoniumkonzentration im Filtrat betrug $2,7 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$.

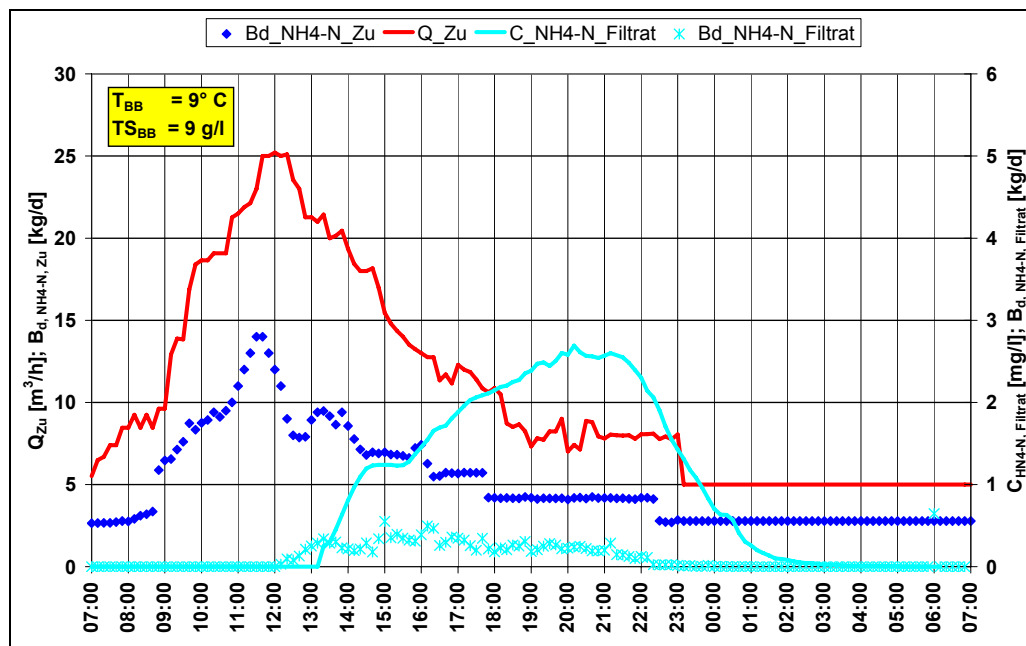


Bild 7-5: Hydraulische und stoffliche Zulaufbelastung sowie $\text{NH}_4\text{-N}$ -Filtratkonzentrationen und -frachten des MBR Simmerath am 04.03.2008

Szenario 2: Hydraulische Belastungsspitze vor stofflicher Belastungsspitze

Die minimale HRT am 17.03.2008 betrug 4,8 Stunden. Erhöhte Ammoniumkonzentrationen im Filtrat traten beim Einsetzen des hydraulischen Stoßes auf (12:10 Uhr), also etwa zwei Stunden nach dem stofflichen Stoß an Ammoniumstickstoff. Der Anstieg der Ammoniumkonzentration im Filtrat ging einher mit dem Anstieg der hydraulischen Belastung (Bild 7-6). Beim Szenario 2 wurden über einen Zeitraum von nur ca. zwei Stunden Ammoniumkonzentrationen im Filtrat von $> 1 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ beobachtet. Die maximale Ammoniumkonzentration im Filtrat betrug $2,15 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$.

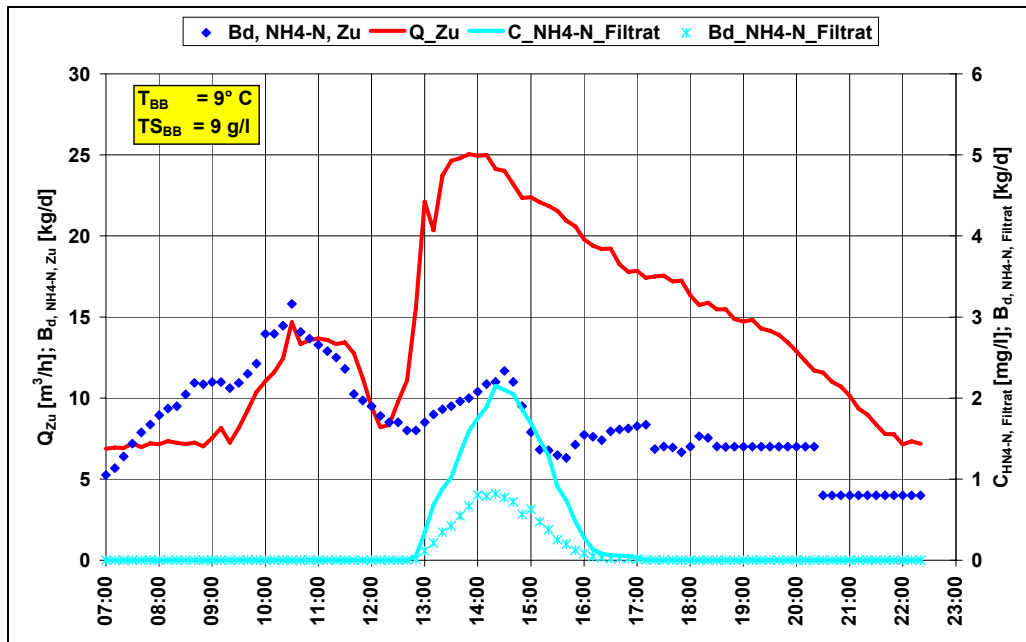


Bild 7-6: Hydraulische und stoffliche Zulaufbelastung sowie NH_4-N -Filtratkonzentrationen und -frachten des MBR Simmerath am 17.03.2008

Für den Vergleich und die Bewertung der beiden Szenarien werden ebenfalls die Ammoniumablafrachten herangezogen, da eine ausschließliche Beurteilung auf Basis von Ablaufkonzentrationen nicht hinreichend ist.

Bei Szenario 1 betrug die Ammoniumablafracht infolge der Stoßbelastung sowie des lang andauernden Zeitraums mit erhöhten Ammoniumkonzentrationen im Filtrat 0,646 g NH_4-N . Dahingegen betrug die Ammoniumablafracht für das Szenario 2 lediglich 0,378 g NH_4-N (Bild 7-7). Ursache für die deutlich bessere Ammoniumstickstoffelimination des Szenarios 2 sind die günstigeren hydraulischen Verhältnisse im Vergleich zum Szenario 1, da zwischen dem stofflichen und hydraulischen Peak ein Zeitraum von zweieinhalb Stunden lag. Für beide Szenarien konnte jedoch das ursprüngliche Reinigungsziel in Höhe von 4 mg NH_4-N/l sicher eingehalten werden (Bild 7-7).

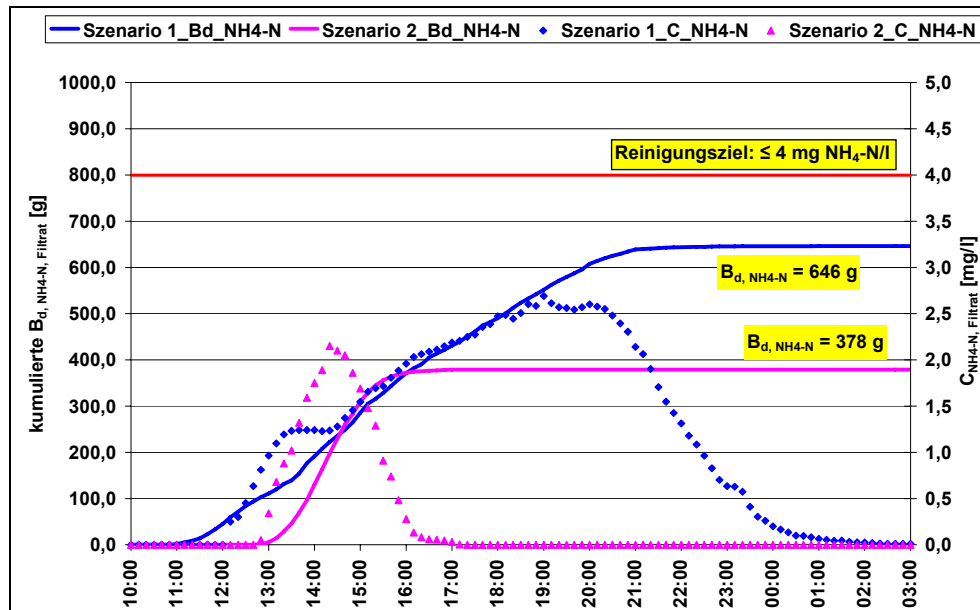


Bild 7-7: Vergleich der Szenarien 1 und 2 anhand der kumulierten Ammoniumablafracht und der Ammoniumkonzentration im Filtrat

8 Spurenstoffanalytik

Basierend auf dieser Voruntersuchung wurden im Zulauf zur Kläranlage Simmerath im Zeitraum von August 2004 bis Juli 2005 38 Proben hinsichtlich ihres Gehaltes an Spurenstoffen untersucht. Hierbei konnten regelmäßig 12 Stoffe der Stoffgruppe Polycyclischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) im Zulauf erfasst werden, deren Konzentrationen in den Abläufen der Großanlage und der MBR-Anlage kontinuierlich unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen. Diese Stoffe adsorbieren anscheinend sehr gut an den Schlammflocken, was auch durch die entsprechenden Stoffkonzentrationen in den untersuchten Schlämmen bestätigt wird. In der Tabelle 8-1 sind die Untersuchungen aufgeführt, in denen die Zulaufkonzentrationen oberhalb der Bestimmungsgrenze lagen.

Die Auswahl, welche Stoffe der Stoffgruppe Pharmaka genauer untersucht werden sollen, fiel im Rahmen einer Besprechung mit den Projektbeteiligten. Arzneimittelrückstände, die nach bisherigen Erkenntnissen durch konventionelle Kläranlagen um deutlich weniger als 80 % eliminiert werden, wurden für die Analytik näher betrachtet. Als Vertreter dieser Gruppe wurden die Stoffe Sulfamethoxazol und Diclofenac ausgesucht. Zur Bestimmung dieser Stoffe wurde über einen dreimonatigen Zeitraum der Zu- und Ablauf der konventionellen Anlage sowie der Ablauf der MBR-Demonstrationsanlage beprobt. Die Probenentnahme erfolgte zeitkorrespondierend in Abhängigkeit der jeweiligen hydraulischen Aufenthaltszeit. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 7-2 aufgeführt. Wie aus Tabelle 7-2 hervorgeht, konnte für den Stoff Sulfamethoxazol eine mittlere Elimination in Höhe von 55 % für die MBR-Anlage beobachtet werden. Für die konventionelle Anlage lag die mittlere Elimination bei ca. 12 bis

Tabelle 8-1: Vergleich der Elimination von Polycyclischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) der MBR - Demonstrationsanlage und des Gruppenklärwerks Simmerath

Probenbezeichnung	Naphthalin	Acenaphthylen	Acenaphthen	Fluoren	Phenanthren	Anthracen	Fluoranthen	Pyren	Benz(a)anthracen	Chrysen	Benzo(b)fluoranthen	Benzo(k)fluoranthen	Benzo(a)pyren	Dibenz(a,h)anthracen	Benzo(ghi)perylene	Indeno(123-cd)pyren
ng/l bei Wässern bzw. µg/kg TR bei Schlämmen																
Zulauf	11,1	<5	4,5	3,2	8,2	<1	27,2	4,5	8,2	7,2	2,1	<1	<1	<1	<1	<3
Ablauf konv.	<5	<5	<2	<1	<1	<1	<2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<3
Ablauf MBR	<5	<5	<2	<1	<1	<1	<2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<3
Zulauf	<5	<5	7,3	5,9	29	13	41	19	8,9	7,8	5,9	4,3	6,1	2,9	2,1	<3
BS konv.	<10	<10	8,4	12	29	29	87	101	39	30	41	62	27	39	24	17
Ablauf konv.	<5	<5	<2	<1	<1	<1	<2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<3
BS MBR	<10	<10	<5	8,7	14	47	104	87	46	25	56	44	35	21	27	25
Ablauf MBR	<5	<5	<2	<1	<1	<1	<2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<3
Zulauf	<5	<5	8,9	8,1	22	20	52	31	16	14	14	12	9,4	5,7	8,4	3,4
BS konv.	<10	<10	11	14	21	25	56	107	46	38	43	32	36	31	14	12
Ablauf konv.	<5	<5	<2	<1	<1	<1	<2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<3
BS MBR	<10	<10	7,4	6,2	17	32	87	102	41	31	43	24	21	26	18	17
Ablauf MBR	<5	<5	<2	<1	<1	<1	<2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<3
Zulauf	<5	<5	7,4	7,9	18	2,9	19	11	4,6	5,3	2,1	3,1	2,1	1,2	<1	<3
BS konv.	<10	<10	5,4	5,2	13	22	56	69	48	52	66	47	31	44	59	30
Ablauf konv.	<5	<5	<2	<1	<1	<1	<2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<3
BS MBR	<10	<10	7,2	11	32	14	89	51	34	51	72	63	25	40	46	23
Ablauf MBR	<5	<5	<2	<1	<1	<1	<2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<3

BS: belebter Schlamm

16 %. Für den Stoff Diclofenac betrug die mittlere Eliminationsleistung rund 36 % für die MBR-Anlage und etwa 22 % für die konventionelle Abwasserreinigungsanlage. Ein Vergleich mit den zur Verfügung stehenden Literaturquellen aus Deutschland für den Stoff Diclofenac zeigt, dass

die in Tabelle 7-2 angegebene Elimination des MBR sich im mittleren Bereich der Literaturspannweite (Elimination von 15 bis 69 %) befindet (STUMPF et al., 1996; MÖHLE et al., 1999; TERNES et al., 1999; BLAC, 2003; MUNLV, 2004; POSEIDON, 2004). Für Sulfamethoxazol geben BLAC (2003) und POSEIDON (2004) eine Eliminationsspannweite von 0 bis 90 % an.

Tabelle 8-2: Vergleich der Elimination ausgewählter Spurenstoffe der MBR-Demonstrationsanlage und des Gruppenklärwerks Simmerath

Proben Nr.	Sulfamethoxazol					Diclofenac				
	Konzentration [ng/l]			Elimination [%]		Konzentration [ng/l]			Elimination [%]	
	Zulauf	Ablauf MBR	Ablauf konv.	MBR	konv.	Zulauf	Ablauf MBR	Ablauf konv.	MBR	konv.
I	305,5	141,0	268,4	53,8	12,1	2.062,8	1.329,2	1.599,4	35,6	22,5
II	271,1	112,0	227,4	58,6	16,1	762,4	485,8	373,4	36,2	23,1
III	265,0	125,5	230,6	52,6	13,0	772,1	491,7	390,5	36,3	20,6

Da nur Proben im Zu- und Ablauf auf das Vorkommen von Sulfamethoxazol und Diclofenac untersucht wurden, sind keine Aussagen zum Verbleib der eliminierten Arzneistoffmengen (Klärschlamm: Feststoffphase vs. Wasserphase) oder zu deren Abbau möglich. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass der wesentliche Teil dieser Stoffe am belebten Schlamm adsorbiert wurde bzw. sich in der Wasserphase der Belebtschlammfraktion befindet (POSEIDON, 2004; LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT, 2006).

Die bessere Elimination der MBR-Anlage kann durch den vollständigen Biomasserückhalt und durch das hohe Schlammalter, welches eine Adaption der Mikroorganismen ermöglicht, erklärt werden. Hinsichtlich des Stoffes Diclofenac kann ausschließlich vom ersten Mechanismus (Adsorption an die Biomasse und vollständiger Biomasserückhalt durch die Membran) ausgegangen werden, wohingegen für den Stoff Sulfamethoxazol beide Mechanismen zum Rückhalt beitragen.

9 Kinetische und stöchiometrische Parameter des belebten Schlammes

In Betriebsphase V des Versuchsbetriebs der Membranbelebungsanlage wurden zwischen November 2007 und März 2008 insgesamt fünf Untersuchungen zur Ermittlung ausgewählter kinetischer und stöchiometrischer Parameter des belebten Schlammes durchgeführt (Tabelle 8-1).

Die Probe 0 wurde zu einem Zeitpunkt genommen, zu dem die Versuchsanlage schon mehrere Wochen entsprechend Betriebsphase V (modifizierte vorgeschaltete Denitrifikation mit verringertem Denitrifikationsvolumen) betrieben wurde. Die Proben I bis IV wurden jeweils unmittelbar nach den Stoßbelastungsversuchen entnommen. Die Probe I und II wurden jeweils nach zeitversetzten, hydraulischen und stofflichen Belastungsspitzen genommen. Den Proben

III und IV ging jeweils eine zeitgleich auftretende hydraulische und stoffliche Belastungsspitze voraus.

Die Werte des Ertragskoeffizienten der Proben I bis IV (erhöhte stoffliche Belastung) lagen in einem höheren Wertebereich als der Wert der Nullprobe. Gleiches gilt auch für die Werte der Netto- und Bruttoabsterberate. Für die Wachstumsrate lagen die Werte aller Proben, bis auf Probe III über dem Wert der Nullprobe. Aufgrund der erhöhten stofflichen Belastung war diese Tendenz zu erwarten. Auffallend ist der Wert der Brutto-Absterberate von Probe IV, der deutlich über den anderen Werten liegt.

Tabelle 9-1: Kinetische und stöchiometrische Parameter des belebten Schlammes

Probe	Datum	Ertragskoeffizient Y_H [-]	Wachstumsrate μ_{Hmax} [d ⁻¹]	Absterberate Netto b'_H [d ⁻¹]	Absterberate Brutto b_H [d ⁻¹]
Probe 0	05.11.2007	0,52	0,25	0,015	0,029
Probe I	12.02.2008	0,62	0,30	0,021	0,049
Probe II	17.02.2008	0,92	0,95	0,061	0,397
Probe III	26.02.2008	0,64	0,21	0,055	0,134
Probe IV	04.03.2008	0,86	0,65	0,099	0,474

Während der kritischen Belastungssituationen in Betriebsphase V der Versuchsanlage wurden höhere Absterberaten und teilweise höhere Ertragskoeffizienten für die heterotrophe Biomasse ermittelt. Die im Vergleich zum vorangegangenen Forschungsvorhaben „Demonstrationsvorhaben Membranfiltration – Kläranlage Simmerath/Nord-Eifel“ (Az 54-2-3.3-1820-vMe) höhere Schlammbelastung könnte für die erhöhten Werte bei o. g. Parametern ursächlich sein. Die Datenbasis ist jedoch zu gering um, diesbezüglich gesicherte, allgemein gültige Aussagen zu treffen.

10 Membranentwicklung und Betriebsoptimierung

10.1 Entwicklung und Untersuchung einer Membran mit geringer Trenngrenze

Die Blend-Membran ist nur dann sinnvoll einzusetzen, wenn sie trotz der engeren Trenngrenze ein gutes Permeabilitätsverhalten aufweist. Dies ist aus zwei Gründen von Bedeutung: Zum einen werden MBR-Anlagen in der Regel mit permeatseitigem Unterdruck betrieben und sind daher bezüglich der maximal erreichbaren Triebkraft (Transmembrandruck) begrenzt, zum anderen leidet bei zu hohen Transmembrandrücken die Wirtschaftlichkeit des Systems. Einerseits muss dann das Intervall der Membranreinigungen erhöht werden, und andererseits besteht die Gefahr der irreversiblen Verblockung der Poren bei hohen Transmembrandrücken. Daher kam der Untersuchung der Permeabilität der neu entwickelten Blend-Membran eine zentrale Bedeutung zu. Der Bubble-Point liegt bei 3 bar und die Laborpermeabilität beträgt 1.450 l/(m²·h·bar).

In Bild 10-1 ist der Permeabilitätsverlauf der Blend-Membran (B61.2) im Vergleich zur Standard-PURON®-Membran (L1) beim Betrieb in der Pilotanlage in Eilendorf dargestellt. Beide Membranen wurden mit gleichen Flüssen betrieben. Wie zu erkennen ist, beginnen beide Membrantypen auf einem hohen Permeabilitätsniveau. Der Vergleich der Betriebspermeabilität zeigt, dass die Blend-Membran letztlich auf einem sehr viel niedrigeren Niveau arbeitet. Die Permeabilität liegt im ersten Betriebszeitraum nur bei ca. 50 l/(m²·h·bar). Die Standardmembran (L1) wird bei einer Permeabilität von ca. 100 l/(m²·h·bar) im ersten Betriebszeitraum betrieben. Anfang April 2005 wurde eine Intensivreinigung durchgeführt. Bei der Standardmembran wird hierdurch eine Permeabilität von 250 l/(m²·h·bar) erzielt. Die Permeabilität der Blend-Membran erhöht sich hingegen nur auf ca. 110 l/(m²·h·bar). Im anschließenden Betriebszeitraum wurde eine regelmäßige Zwischenreinigung eingeführt. Mit dieser ist es möglich, das Betriebspermeabilitätsniveau beider Membranen anzuheben. Doch auch mit regelmäßiger Zwischenreinigung liegt das Permeabilitätsniveau der Blend-Membran weit unter 100 l/(m²·h·bar). Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Versuche auf einem vergleichsweise geringen Permeatflussniveau von 10 bis 20 l/(m²·h) durchgeführt wurden. Wenn bei diesen Flüssen die Betriebspermeabilität einer Membran bereits weit unter 100 l/(m²·h·bar) liegt, sind höhere Flüsse technisch im Unterdruckbetrieb nicht realisierbar.

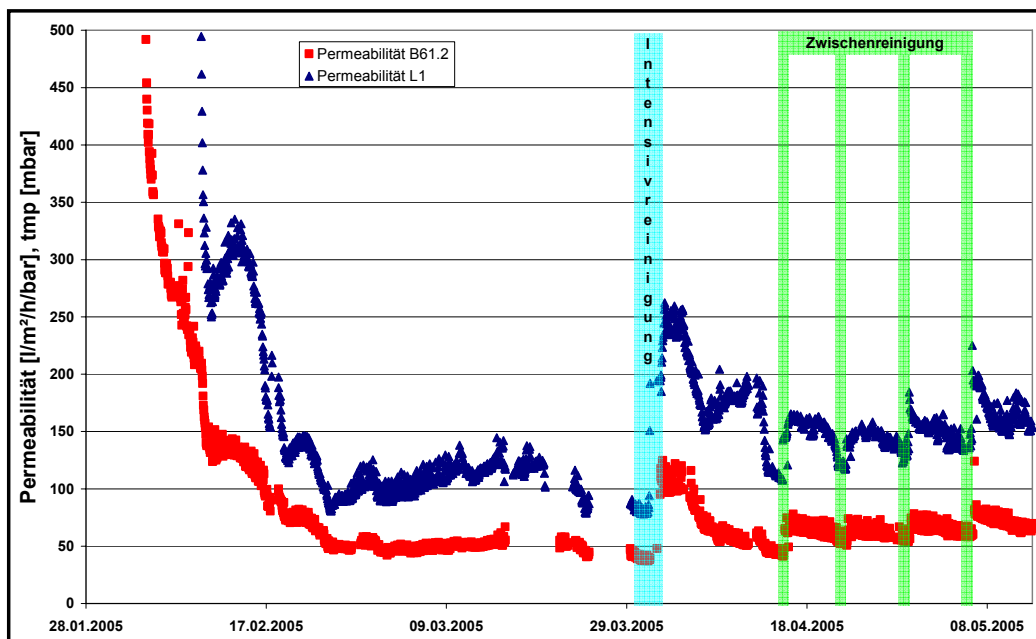


Bild 10-1: Vergleich Betriebsverhalten Blend-Membran und Standardmembran auf der Kläranlage Eilendorf

Die Ursache für das geringe Permeabilitätsniveau der Blend-Membran liegt in ihrer deutlich höheren Foulingneigung im Vergleich zur Standardmembran. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass ein technisch sinnvoller und wirtschaftlicher Betrieb mit dieser Membran nicht erreichbar ist. Daher wurden die Entwicklungsarbeiten der Blend-Membran gestoppt und der Einsatz dieser Membran auf der Demonstrationsanlage Simmerath nicht durchgeführt

Ein Grund für das erhöhte Fouling könnte in der Struktur der Membran begründet sein. Diese ist als Rasterelektronenmikroskopaufnahme in Bild 10-2 im Vergleich zur Standardmembran dargestellt. Die Standardmembran besteht im oberen Bereich aus einer asymmetrischen Schwammstruktur, die im unteren Bereich in eine Kavernenstruktur übergeht. Die Blendmembran besteht dagegen aus einer sehr gleichmäßigen Schwammstruktur.

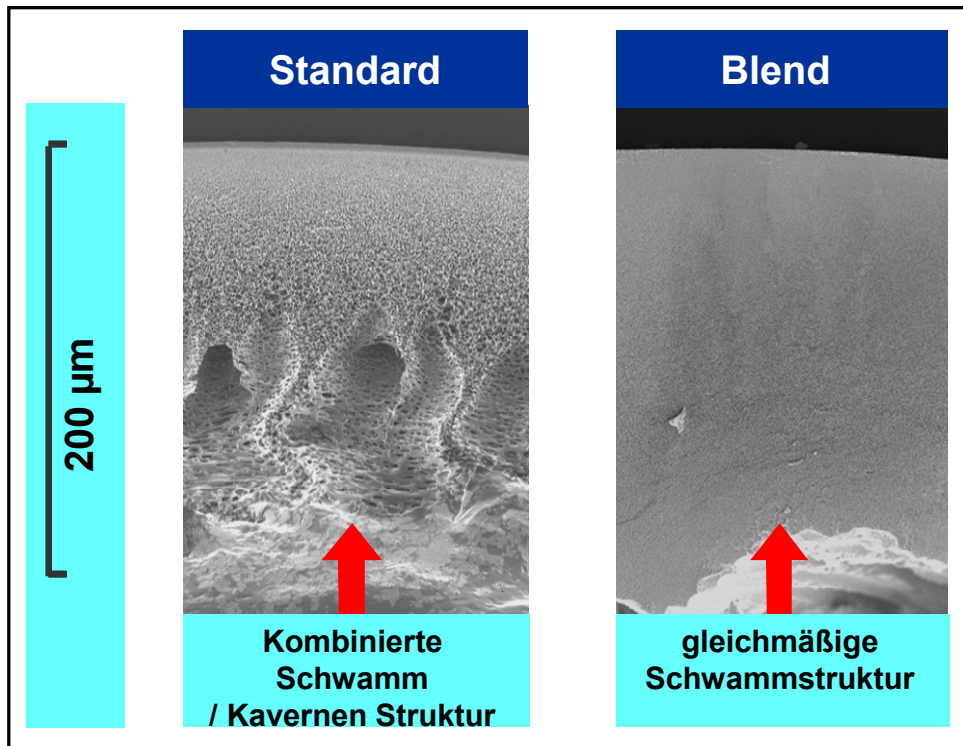


Bild 10-2: Rasterelektronenmikroskopaufnahme der Standard- und der Blend-Membran

10.2 Optimierung des Lufteintrags

Im FuE-Vorhaben „Demonstrationsvorhaben Membranfiltration – Kläranlage Simmerath/Nord Eifel“ wurde eine zulaufproportionale Gangliniensteuerung entwickelt. Hier wurde für eine definierte Zeit die Zulaufmenge aufsummiert. Diese Summe war dann die Grundlage, um den Filtratvolumenstrom für den nächsten Summationszeitraum zu steuern.

Das Problem dieser im „Demonstrationsvorhaben Membranfiltration – Kläranlage Simmerath/Nord Eifel“ entwickelten Gangliniensteuerung war, dass für einen Großteil der Zeit die Anlage mit Flüssen kleiner $10 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ betrieben worden ist. Diese Flüsse sind aufgrund des hohen spezifischen Luftbedarfs energetisch als unwirtschaftlich anzusehen. Ein großes Einsparpotential ergibt sich, wenn der Minimalfluss mit dem filtrierte wird, vorgegeben werden kann.

Während der Optimierung wurde vor allem daran gearbeitet, bei gleicher Belüftungsrate den Fluss zu erhöhen. Dies ist in der Praxis, vor allem auch für die Umsetzung in technischen Anlagen, einfacher als den Anteil der belüfteten Zeit zu variieren. Je nach Flussbereich konnte

die spezifische Filtratmenge um 20 % (niedriger Flussbereich) bis 80 % (Maximalfluss) gesteigert werden (Bild 10-3).

Modul 3-02	Gangliniensteuerung					Modul 2-02	optimierte Gangliniensteuerung				
	Filtration		Modulbelüftung				Filtration		Modulbelüftung		
	Anteil Bereiche	Nettofluss [l/m ² /h]	belüftete Zeit [%]	Nm ³ /m ² /h	Nm ³ /m ³		Anteil Bereiche	Nettofluss [l/m ² /h]	belüftete Zeit [%]	Nm ³ /m ² /h	Nm ³ /m ³
Bereich 1	0,06	4,8	25	0,2	40,0	F0	0,12	0,0	12	0,1	
Bereich 2	0,5	9,0	25	0,2	21,2	Fmin	0,51	11,1	25	0,2	18,1
Bereich 3	0,17	13,4	25	0,2	14,3	Fopt	0,29	20,1	25	0,2	9,9
Bereich 4	0,27	20,8	50	0,4	18,4	Fmax	0,08	38,3	50	0,4	10,5
effektiv	1	12,7	32	0,26	20,4	effektiv	1	14,5	25	0,21	13,8

→ 20%- 80% Flussteigerung bei gleicher Belüftungsrate

Bild 10-3: Optimierung der Parameter für die Gangliniensteuerung

Die Optimierung der Gangliniensteuerung erfolgte über den gesamten Zeitraum des Projektes. Interessant ist an dieser Stelle der Vergleich des spezifischen Luftbedarfs je Kubikmeter filtrierten Abwassers. Dieser lag im Mittel während des vorangegangenen Forschungsvorhaben („Demonstrationsvorhaben Membranfiltration – Kläranlage Simmerath/Nord Eifel“) bei 20,4 Nm³/m³ und konnte im aktuellen Forschungsvorhaben im Mittel auf 16,7 Nm³/m³ reduziert werden. Berücksichtigt man zusätzlich, dass im Laufe des Projektes eine stetige Optimierung der Gangliniensteuerung erfolgte, und überträgt die bei Projektende gewonnenen Erkenntnisse fiktiv auf den gesamten Projektzeitraum, so ist zu erkennen, dass mit der optimierten Gangliniensteuerung eine 33 %-ige Luftmengeneinsparung bzw. Energieeinsparung ermöglicht wird (Bild 10-4).

Modul 3-02	Gangliniensteuerung					● kurze Platten
	Filtration		Modulbelüftung			
	Anteil Bereiche	Nettofluss [l/m ² /h]	belüftete Zeit [%]	Nm ³ /m ² /h	Nm ³ /m ³	● erstes Gap Design
Nov. 04 - Nov. 05						
Bereich 1	0,06	4,8	25	0,2	40,0	
Bereich 2	0,5	9,0	25	0,2	21,2	
Bereich 3	0,17	13,4	25	0,2	14,3	
Bereich 4	0,27	20,8	50	0,4	18,4	
effektiv	1	12,7	28,9	0,26	20,4	

Modul 2-02	minimalisation software					● lange Platten
	Filtration		Modulbelüftung			
	Anteil Bereiche	Nettofluss [l/m ² /h]	belüftete Zeit [%]	Nm ³ /m ² /h	Nm ³ /m ³	● verbessertes Gap Design
Jan. 06 - Nov. 06						
F0	0,12	0,0	12	0,1		
Fmin	0,51	11,1	25	0,2	18,1	
Fopt	0,29	20,1	25	0,2	9,9	
Fmax	0,08	38,3	50	0,4	10,5	
effektiv	1	14,5	0,3	0,21	13,8	

→ 33% Luftmengenreduzierung pro m³ behandeltes Abwasser

Bild 10-4: Luftbedarfsvergleichsrechnung

Als Ausblick für zukünftige Untersuchungen ist zu erwähnen, dass das Modul größtenteils im Niedrigflussbereich (F_{min}) filtriert (51 % Betriebszeit). Momentan wird das Modul dabei mit der

gleichen Luftmenge wie im Mittelflussbereich (F_{opt}) betrieben. Hieraus geht hervor, dass weitere Einsparungen möglich sind, wenn dieser Bereich weiter optimiert wird. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die im Bereich F_{min} momentan erhöhte Luftmenge auch zur Erholung des Moduls nach Regenwetterereignissen beiträgt. Inwieweit eine Verringerung der Luftmenge bei Betrieb mit F_{min} realisierbar ist, müsste in einer weiteren Projektphase eingehend untersucht werden.

10.3 Optimierung des Verschlammungs- und Verzopfungsverhaltens

Das optimierte Gap Design ist in Bild 10-5 zu erkennen. Dies wurde durch eine Änderung des Produktionsprozesses erreicht, die es ermöglicht, die Gaps während der Aushärtungsphase des Harzes offen zu halten und daher eine Gap-verschließende Orientierung der Membranen im fertigen Bündel vermeidet. Eine Einzelreihe wurde mit diesem Gap Design produziert und in Simmerath mit einem Fluss von $45 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ drei Wochen lang ohne chemische Reinigung betrieben.

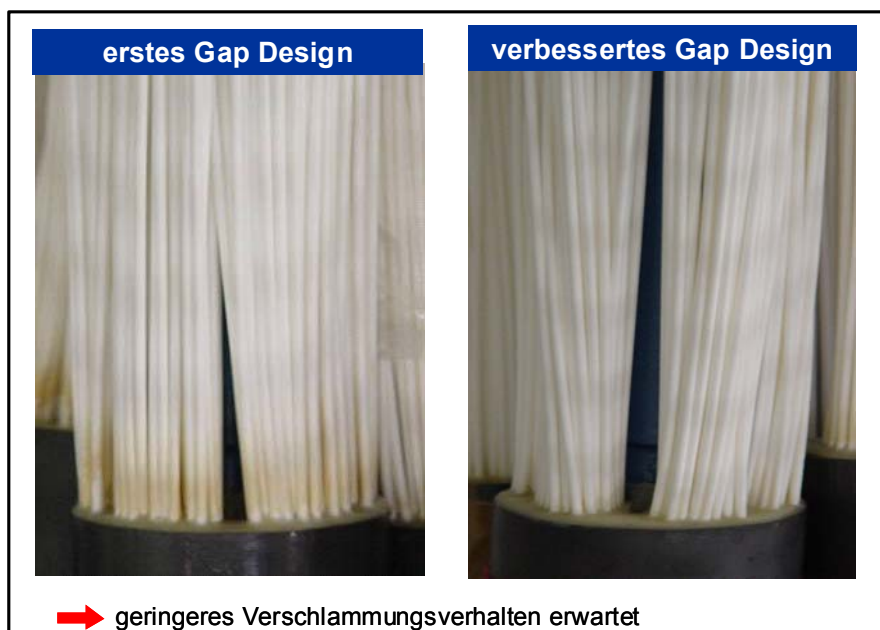


Bild 10-5: Optimiertes Design der Strömungskanäle im Bündel (Gaps)

Um zu überprüfen, wie groß die Verschlammungsneigung des optimierten Moduls ist, wurden zwei Versuche bei einem Regenwetterfluss von $45 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ durchgeführt. Der erste Versuch wurde bei einem TS Gehalt von 12 g/l durchgeführt; der zweite bei einem TS-Gehalt von 15 g/l . Die Belüftung betrug bei beiden Versuchen $0,4 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Es wurde versucht, den Fluss für drei Tage aufrecht zu halten. Da aber nicht während der gesamten Versuchszeit genügend Abwasser zur Verfügung stand, war dies nicht durchgängig möglich. Nach Beendigung des Versuchs wurde das Modul ausgebaut und die Reihen wurden inspiziert. Hierbei wurde mit einer Federwaage das Gewicht der Reihen festgestellt. In Bild 10-6 ist das Betriebsverhalten

eines Moduls mit 30 m² Membranfläche (technische Reihe) mit neuem Belüftungssystem abgebildet. Bei einem Fluss von 50 l/(m²·h) sinkt die Permeabilität innerhalb einer Woche von 450 l/(m²·h·bar) auf ca. 350 l/(m²·h·bar) ab. Dieses Absinken entspricht einem Transmembrandruckanstieg von ca. 30 mbar. Innerhalb dieses Versuches wurde eine Membranreinigung durchgeführt. Hieraus resultiert der Permeabilitätsanstieg von ca. 40 l/(m²·h·bar).

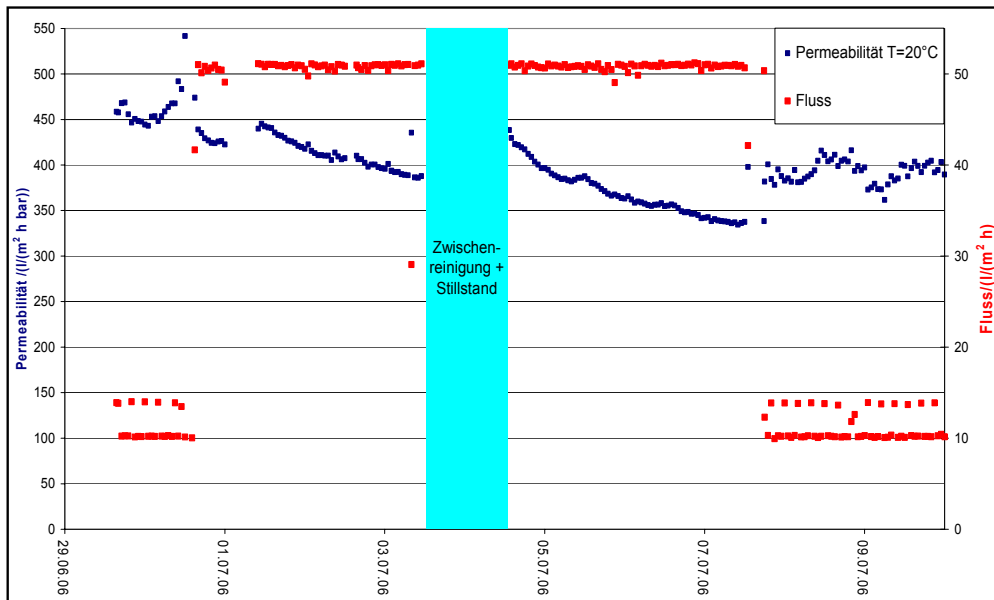


Bild 10-6: Betriebsverhalten einer Reihe mit neuem Luftsystem bei Regenwetterflüssen

10.4 Optimierung der chemischen Zwischenreinigung

Die Untersuchungen zur chemischen Zwischenreinigung wurden sowohl im Handbetrieb als auch im Automatikbetrieb durchgeführt. In Bild 10-7 ist der Erfolg der Reinigungen dargestellt, die im Handbetrieb durchgeführt wurden. Da in Simmerath die Zitronensäurereinigung keinen direkten Reinigungserfolg zeigte, ist der Reinigungserfolg nur auf den oxidierenden Natriumhypochloridschritt bezogen.

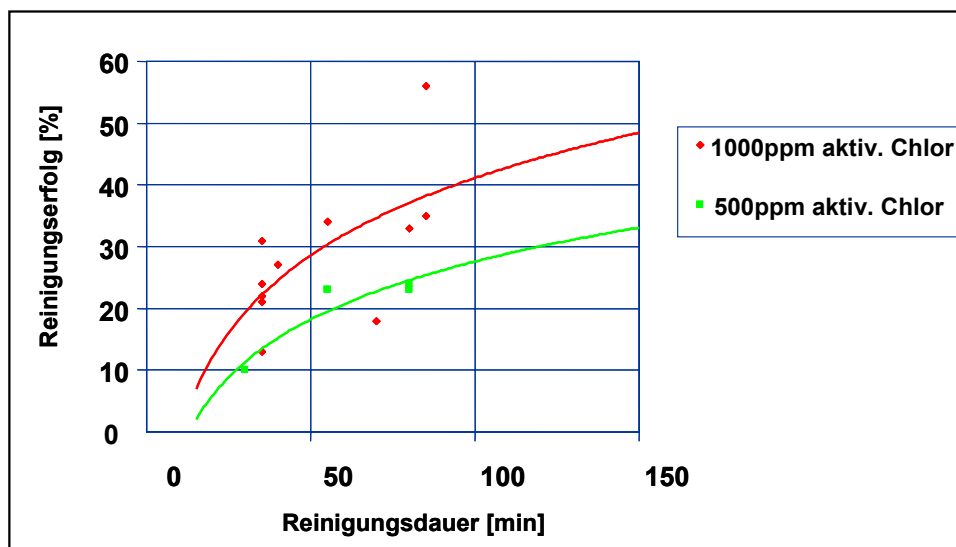


Bild 10-7: Reinigungserfolg in Abhängigkeit von Zeit und Konzentration während des Handbetriebes

Bei den Reinigungen im Automatikbetrieb stellte sich bei einer Konzentration von 500 ppm aktivem Chlor ein durchschnittlicher Reinigungserfolg von 21,6 % ein. Dabei lag die Reinigungszeit zwischen 30 und 40 Minuten. Der im Automatikbetrieb erzielte Reinigungserfolg ist um ca. 40 % höher als bei der Reinigung im Handbetrieb. Zur Auswertung wurden 25 Membranreinigungen herangezogen. Für die Erhöhung des Reinigungserfolges gibt es unterschiedliche Gründe. Die Umstellung auf den Automatikbetrieb trägt hier sicherlich auch zu einem geringen Teil bei, da aufgrund der automatisierten Reinigung Fehler und Ungenauigkeiten des Handbetriebs vermieden werden können und ein gleichmäßiger Reinigungsablauf gewährleistet werden kann. Darüber hinaus ist jedoch zu berücksichtigen, dass während der Projektphase mit automatisierter Zwischenreinigung gleichzeitig auch deutlich höhere Permeatflüsse eingestellt wurden. Das führt zu einer schnelleren Verschmutzung der Membranen und dadurch auch zu einem höheren Regenerierungspotenzial bei der chemischen Reinigung. Zudem wurden während dieser Projektphase auch kontinuierlich die hydraulischen Parameter des Moduls (s.o.) verbessert, die sich nicht nur auf den Filtrationsbetrieb, sondern auch auf den Reinigungsbetrieb positiv auswirken.

Tabelle 10-1 zeigt die Auswertung aller durchgeführten Reinigungen im Jahr 2006 und deren Mittelung. Der spezifische Reinigereinsatz von Natriumhypochloridlösung (150 g/l aktives Chlor) liegt demnach zwischen 0,005 und 0,006 mg/m³_{Abwasser} /m²_{Membranfläche}.

Tabelle 10-1: Zusammenfassung automatisierte Zwischenreinigung

Automatische Zwischenreinigung 2006					
	Permeabilitätssteigerung		Chemikalienverbrauch NaOCl [150g akt. Cl/l]	spezifischer Verbrauch mg/m ³ /m ²	Reinigungsintervall [Tage]
	[l/m ² /h/bar]	[%]			
Modul 2-02	40	19	5,8	0,005	16,7
Modul 3-02	21	25	6,6	0,006	22,3

11 Schlussfolgerung

Entwicklung einer Membran mit engerer Trenngrenze

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde von der Firma Koch Membrane Systems AG eine Membran mit einer Trenngrenze entwickelt. Die hydraulische Leistungsfähigkeit der Blend-Membran konnte trotz verkürzter Reinigungsintervalle nicht auf ein wirtschaftlich notwendiges Maß angehoben werden. Die geringe Permeabilität der Blend-Membran führte dazu, dass eine technische Umsetzung in Simmerath als nicht zielführend angesehen und die Entwicklung der Membran nicht fortgesetzt wurde.

Optimierung der biologischen Reinigungsstufe

Beim Vergleich der Reinigungsleistungen der untersuchten Betriebsweisen konnte hinsichtlich der Kohlenstoffelimination kein nennenswerter Unterschied festgestellt werden. Die Kohlenstoffelimination betrug im Median 98 %.

Bei Gegenüberstellung der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Eliminationsleistung zeigten sich in den Betriebsphasen I bis IV nur geringe Differenzen. Die mittlere $\text{NH}_4\text{-N}$ -Eliminationsleistung betrug für die Betriebsphasen I bis IV $0,15 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$. Für die Betriebsphase V konnte eine mittlere $\text{NH}_4\text{-N}$ -Elimination in Höhe von $0,3 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ beobachtet werden. Innerhalb der Betriebsphase V, in der vom Bemessungsansatz für Membranbelebungsanlagen ($V_{\text{DN}}/V_{\text{N}} = 1$) abgewichen worden ist, kam es zu einem signifikanten Rückgang der Denitrifikationsleistung der MBR-Demonstrationsanlage. In Folge dessen kam es während der Betriebsphase V im Vergleich zu den vorangegangenen Betriebsphasen zu erheblich höheren Nitratblaukonzentrationen (Betriebsphase I-IV: 85 %-Perzentilwert = $8,4\text{-}9,5 \text{ mg NO}_3\text{-N/l}$; Betriebsphase V: 85 %-Perzentilwert = $16,5 \text{ mg NO}_3\text{-N/l}$).

Die Einhaltung eines Phosphor-Überwachungswertes von $1,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{l}$ ist, mit Ausnahme einiger Überschreitungen, ab Oktober 2005 möglich gewesen. Die Simulationsergebnisse ergaben, dass keine kontinuierliche Einhaltung der MTR-Qualität möglich ist, da bei Mischwasserzufluss die hohen Rezirkulationsvolumenströme zu kurze Verweilzeiten in den Reaktoren bedingen. Die ursprünglichen Reinigungsziele der MBR-Demonstrationsanlage konnten für alle Parameter weitestgehend eingehalten werden.

Reinigungsleistung von MBR-Anlagen bei kritischen Belastungszuständen

Ein direkter Vergleich der realen Belastungszustände hinsichtlich der Leistungsfähigkeit war aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen (Zulauftracht, hydraulische Aufenthaltszeit und Abwassertemperatur) nicht möglich. Für beide Szenarien und Betriebsweisen der realen Belastungszustände konnten die Überwachungswerte eingehalten werden. Auch bei den erzeugten Belastungsszenarien (Betriebsweise: modifiziert vorgeschaltete Denitrifikation), in denen Filtrat in den MBR zurückgeführt und Ammoniumchlorid zudosiert wurde, konnte der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Überwachungswert in Höhe von $4 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ eingehalten werden. Das Szenario „zeitgleiche hydraulische und stoffliche Belastungsspitze“ ist im Vergleich zum Szenario

„stoffliche Belastungsspitze vor hydraulischer Belastungsspitze“ hinsichtlich der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Elimination als günstiger zu bewerten.

Überprüfung des Bemessungsansatzes $V_{\text{DN}}/V_{\text{N}} = 1$ für Membranbelebungsanlagen

Durch die verfahrenstechnische Trennung der Schlamm-Wasser-Kreisläufe des Rücklaufschlammes aus dem Membranbereich in das Belebungsbecken einerseits und des Schlammkreislaufs der internen Rezirkulation innerhalb des Belebungsbeckens andererseits wurde die Gefahr von O_2 -Verschleppungen in die Denitrifikationszone auf ein zu konventionellen Kläranlagen vergleichbares Maß reduziert. Problematischer stellte sich die Einhaltung einer Mindestaufenthaltszeit innerhalb der um 50 % verringerten Denitrifikationszone dar ($V_{\text{DN}} = 32,5 \text{ m}^3$; $V_{\text{N}} = 65 \text{ m}^3$). Da zur Feststoffkontrolle innerhalb der Membrankammer hohe Rücklaufströme von der Membrankammer in die biologische Reinigungsstufe (Nitrifikationszone) realisiert werden mussten, konnte unter Berücksichtigung einer Mindestaufenthaltszeit für die Denitrifikation von $\geq 0,5 \text{ h}$ nicht im ausreichenden Maß Nitratstickstoff in die Denitrifikationszone gefördert werden. Aus diesem Grund kann eine pauschale Abweichung vom Bemessungsansatz von $V_{\text{DN}}/V_{\text{N}} = 1$ auf $V_{\text{DN}}/V_{\text{N}} = 0,5$ nicht empfohlen werden. Inwieweit trotzdem eine Reduzierung des Denitrifikationsvolumens vorgenommen werden kann, konnte aufgrund der Beckenkonstruktion nicht näher untersucht werden. Zu überprüfen wäre beispielsweise die Volumenaufteilung $V_{\text{DN}}/V_{\text{N}} = 0,75$.

Experimentelle Bestimmung ausgewählter kinetischer und stöchiometrischer Parameter

Um die Übertragbarkeit der Modellansätze für konventionelle Kläranlagen auf Membranbelebungsanlagen zu prüfen, wurden kinetische und stöchiometrische Parameter des belebten Schlammes bestimmt. Dabei beschränkte man sich in Abhängigkeit der Sensitivität und des Bestimmungsaufwandes auf den heterotrophen Ertragskoeffizienten Y_{H} , die heterotrophe Wachstumsrate μ_{H} und die heterotrophe Absterberate b_{H} . Gesicherte Aussagen inwieweit die Erhöhung der Schlammbelastung Auswirkungen auf die kinetische und stöchiometrische Parameter des belebten Schlammes hat kann aufgrund der geringen Datenmenge noch nicht gemacht werden. Für die Quantifizierung wären diesbezüglich weitere Versuche erforderlich.

Entwicklung von Konzepten für eine automatisierte chemische Zwischenreinigung der Membranmodule und für einen reduzierten Energiebedarf

Verringerung des Lufteintrags

Während der Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich des Lufteintrags wurde vor allem daran gearbeitet, bei gleicher Belüftungsrate den Fluss zu erhöhen. Dafür wurde die im vorhergehenden Forschungsvorhaben (Demonstrationsvorhaben in Simmerath) entwickelte Gangliniensteuerung optimiert. Durch die Optimierung konnte bei gleichbleibender Belüftungsrate die spezifische Filtratmenge um 20 % (niedriger Flussbereich) bis 80 %

(Maximalfluss) gesteigert werden. Durch die optimierte Gangliniensteuerung konnte der Luft- bzw. der Energiebedarf für die Belüftung um 33 % reduziert werden.

Verbesserung des Verschlammungs- und Verzopfungsverhaltens:

Durch die Optimierung des Gap-Designs konnte das Verschlammungs- und Verzopfungsverhalten erheblich verbessert werden. Der Rückgang der Permeabilität ist nach den Optimierungsmaßnahmen im Wesentlichen auf Foulingmechanismen und nicht auf Verzopfungen und Verschlammungen der Module zurückzuführen. In Verbindung mit dem optimierten Lufteintrag konnte die hydraulische Leistungsfähigkeit der Membran verbessert werden.

Verbesserung der chemischen Zwischenreinigung

Der spezifische Reinigereinsatz von Natriumhypochloridlösung (150 g/l aktives Chlor) betrug nach der Optimierung zwischen 0,005 und 0,006 $\text{mg/m}^3_{\text{Abwasser}} / \text{m}^2_{\text{Membranfläche}}$. Das Reinigungsintervall lag zwischen 17 und 22 Tagen.

Zur abschließenden Beurteilung der Optimierungsmaßnahmen der Filtrationsstufe wurde das Langzeitverhalten der Permeabilität vor und nach den Optimierungsmaßnahmen herangezogen. Der Vergleich des Langzeitverhaltens zeigt, dass die Permeabilität und der Fluss des Moduls nach der Optimierung im Mittel auf einem höheren Niveau liegen als das Vergleichsmodul ohne Optimierung.

12 Literatur

- BLAC (2003): Arzneimittel in der Umwelt – Auswertungen der Untersuchungsergebnisse an die 61. Umweltministerkonferenz (UMK) am 19./20. November 2003 in Hamburg, Im Internet unter: <http://blak-uis.server.de/servlet/is/2146/P-2c.pdf> (01.04.2008).
- KREBS, P., KÜHN, V. (1999): Dynamik in der Siedlungsentwässerung. Beitrag im Rahmen der 12. Ostsee-Tagung. 15.-16.11.1999. Travemünde.
- LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT (2006): Arzneistoffe in Zu- und Abläufen von kommunalen Kläranlagen des Landes Sachsen-Anhalt. Nr. 3/2006.
- MÖHLE, E., HORVATH, S., MERZ, W., METZGER, J. W.: (1999): Bestimmung von schwer abbaubaren organischen Verbindungen im Abwasser – Identifizierung von Arzneimittelrückständen. Vom Wasser Nr. 92, S. 207-223.
- MUNLV-NRW (2004): Untersuchungen zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunalen Kläranlagen. Ministerium für Umwelt- und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben – Institut für Umweltforschung an der Universität Dortmund.
- PINNEKAMP, J., FRIEDRICH, H. (2006): Abwasserreinigung mit Membrantechnik – Membraneinsatz im kommunalen und industriellen Bereich. Hrsg. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW und Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp. 2. Auflage. FIW Verlag, Aachen.

- POSEIDON (2004): Assessment of Technologies for the Removal of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Sewage and Drinking Water Facilities to Improve the Indirect Potable Water Reuse. Report 2004, Im Internet unter: <http://poseidon.bafg.de/servlet/is/2888/Final-Report-POSEIDON-May2006.pdf?command=downloadContent&filename=Final-Report-POSEIDON-May2006.pdf>
- STUMPF, M., TERNES, TH. A., HABERER, K., SEEL, P., BAUMANN, W. (1996). Nachweis von Arzneimittelrückständen in Kläranlagen und Fließgewässern. *Vom Wasser* 86, 291-303.
- TERNES, T., HIRSCH, RW., STUMPF, M., EGGERT, T., SCHUPPERT, BF., HABERER, K. (1999): Nachweis und Screening von Arzneimittelrückständen Diagnostika und Antiseptika in der aquatischen Umwelt. Forschungsbericht für das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie. Referenznummer 02WU9567/3.