

Kurzberichtbericht
zum Forschungsvorhaben:

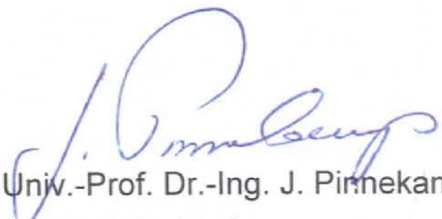
**„Begleitprojekt zu FuE-Vorhaben im Bereich der
Membrantechnik in Nordrhein-Westfalen (FEMem)“**

AZ IV – 9 – 042 1C4

für das



Aachen, im März 2008


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

Projektbearbeitung

Partner	Bearbeiter
 Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen Direktor: Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp Mies-van-der-Rohe-Str. 1 52074 Aachen Tel.: 0241 80 25207 Fax: 0241 80 22285 Email: isa@isa.rwth-aachen.de www.isa.rwth-aachen.de	Dipl.-Ing. S. Beier Dipl.-Ing. D. Arndt Dr.-Ing. S. Köster

Inhalt

1	Zusammenfassung.....	1
2	Veranlassung und Zielsetzung	8
3	Vorgehensweise	9
3.1	Komponente 1: Auswertung der großtechnischen Projekte	9
3.2	Komponente 2: Erarbeitung von Empfehlungen zu zukünftigen Förderschwerpunktthemen.....	9
3.3	Komponente 3: Multiplikation der Projektergebnisse.....	10
4	Stand der Anwendung der Membrantechnik	11
4.1	Kommunale Abwasserreinigung	11
4.1.1	Stand weltweiter Anwendungen	11
4.1.2	Stand europäischer Anwendungen	13
4.1.3	Stand nationaler Anwendungen	14
4.2	Industrielle Abwasserreinigung.....	17
4.3	Trinkwasseraufbereitung	18
4.3.1	Stand weltweiter Anwendungen	18
4.3.2	Stand nationaler Anwendungen	20
5	Ableitung von zukünftigen Forschungsaktivitäten und Empfehlungen für das MUNLV	22
5.1	Entwicklung eines nachvollziehbaren und reproduzierbaren Bewertungskataloges für das MUNLV	22
5.2	Membraninnovation	22
5.3	Reinigung Membranflächen.....	23
5.4	Energieoptimierung / Prozesseffizienz	25
5.5	Elimination von Spurenstoffen.....	28
6	Multiplikation der Projektergebnisse	30
7	Empfehlungen für das MUNLV.....	32
8	Literatur.....	34

ANHANG

Tagungsprogramm zum Workshop „Membrantechnik in Nordrhein-Westfalen“

Verzeichnis der Abbildungen

Bild 1-1: Leistungsvergleich für die Parameter CSB, Nges und Pges	2
Bild 1-2: Energieverbräuche ausgewählter MBR	4
Bild 4-1: Weltweite Entwicklung kommunaler Membranbelebungsanlagen.....	12
Bild 4-2: Kommunale Membranbelebungsanlagen in Europa.....	13
Bild 4-3: Entwicklung der Membranbelebungsanlagen in Deutschland	15
Bild 4-4: Entwicklung der Membrantechnik im Trinkwassersektor weltweit (GIMBEL, 2007)	18
Bild 4-5: Entwicklung der Membrantechnik im Trinkwassersektor in Deutschland (GIMBEL, 2007)	20

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 4-1:	Verteilung Membranbelebungsanlagen weltweit, Stand 2007 (PINNEKAMP, 2007; PINNEKAMP ET AL., 2006; LESJEAN UND HUISJES, 2007; DORGELOH, 2000)	11
Tabelle 4-2:	Behandelte Abwassermengen in Membranbelebungsanlagen weltweit, Stand 2007 (PINNEKAMP, 2007; PINNEKAMP ET AL., 2006; LESJEAN UND HUISJES, 2007; DORGELOH, 2000)	12
Tabelle 4-3:	Membranbelebungsanlagen in Deutschland	15
Tabelle 4-4:	Aufstellung der größten MF- und UF-Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung (GIMBEL, 2007)	19
Tabelle 4-5:	Aufstellung der größten MF- und UF-Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung in Deutschland (LIPP, 2007)	21

1 Zusammenfassung

Nordrhein-Westfalen zählt zu den führenden Technologiestandorten in der kommunalen Abwasserreinigung mit Membranverfahren, was durch die Vielzahl an Referenzobjekten bestätigt wird. Allein in Deutschland werden täglich mehr als 80.000 m³ Abwasser mit Membrantechnik gereinigt. National existieren derzeit 19 kommunale Membranbelebungsanlagen mit einer durchschnittlichen hydraulischen Kapazität von mindestens 20 m³/d, von denen 10 Anlagen in NRW betrieben werden.

Vor diesem Hintergrund verfügt gerade NRW über wesentliche Betriebserfahrungen und umfangreiche Forschungskennntnisse, die bisher jedoch der Fachöffentlichkeit nicht vollständig verfügbar sind.

Daher wurde das Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA) der RWTH Aachen beauftragt, das Vorhaben „Begleitprojekt zu FuE-Vorhaben im Bereich der Membrantechnik in NRW“ durchzuführen. Das Ziel ist die derzeitige Expertise über den Einsatz der Membrantechnik mit dem Schwerpunkt Abwasserbehandlung zusammenzutragen, auszuwerten und die Ergebnisse in der Fachwelt zu verbreiten. So soll sichergestellt werden, dass essentielle Grundlagen für eine zügige Weiterentwicklung und erfolgreiche Anwendung der Membrantechnologie vervollständigt werden, um auf deren Basis die zukünftige Entwicklung der Technologie zu bewerten und dem MUNLV zukünftige Förderschwerpunktthemen zu empfehlen.

Das FuE-Vorhaben wurde in drei Komponenten aufgeteilt:

- Komponente 1: Auswertung der durchgeführten, großtechnisch geförderten Projekte
- Komponente 2: Erarbeitung von zukünftigen Förderschwerpunkten
- Komponente 3: Multiplikation der Projektergebnisse

Komponente 1: Auswertung der durchgeführten, großtechnisch geförderten Projekte

Die technischen Entwicklungen haben in den vergangenen Jahren bedeutende betriebliche und kostenmäßige Vorteile bewirkt, so dass die vorliegenden Betriebserfahrungen die Randbedingungen für den Einsatz der Membrantechnik weiter verbessern. Neben der zusätzlichen Anwendung der Membrantechnik in kommunalen Kleinkläranlagen und Großklärwerken werden zunehmend auch Schiffskläranlagen mit dieser Technologie ausgestattet. Aktuelle Beispiele sind die Fregatte F 123 „Brandenburg“ der Bundesmarine und zahlreiche Seekreuzfahrtschiffe.

Der vorliegende Bericht bietet einen umfassenden Überblick über großtechnische Membrananwendungen in Deutschland und im Ausland sowie über die dort gewonnenen Betriebserfahrungen. Hierzu wurde eine umfassende und übersichtliche Zusammenstellung der Ergebnisse aus verschiedenen FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Membrantechnologie vorgenommen.

Die Auswertung erfolgte dabei mit einem eigens entwickelten Bewertungsbogen.

Zudem wurden aktuelle Entwicklungen nahezu aller am Markt vertretenden Anbieter von Membransystemen für den Anwendungsbereich der Trinkwasserver- und Abwasserentsorgung in der Auswertung berücksichtigt.

Die zentralen Ergebnisse eines Leistungsvergleiches der Membranbelebungsanlagen werden in Bild 1-1 dargestellt und mit denen einer durchschnittlichen konventionellen Kläranlage verglichen.

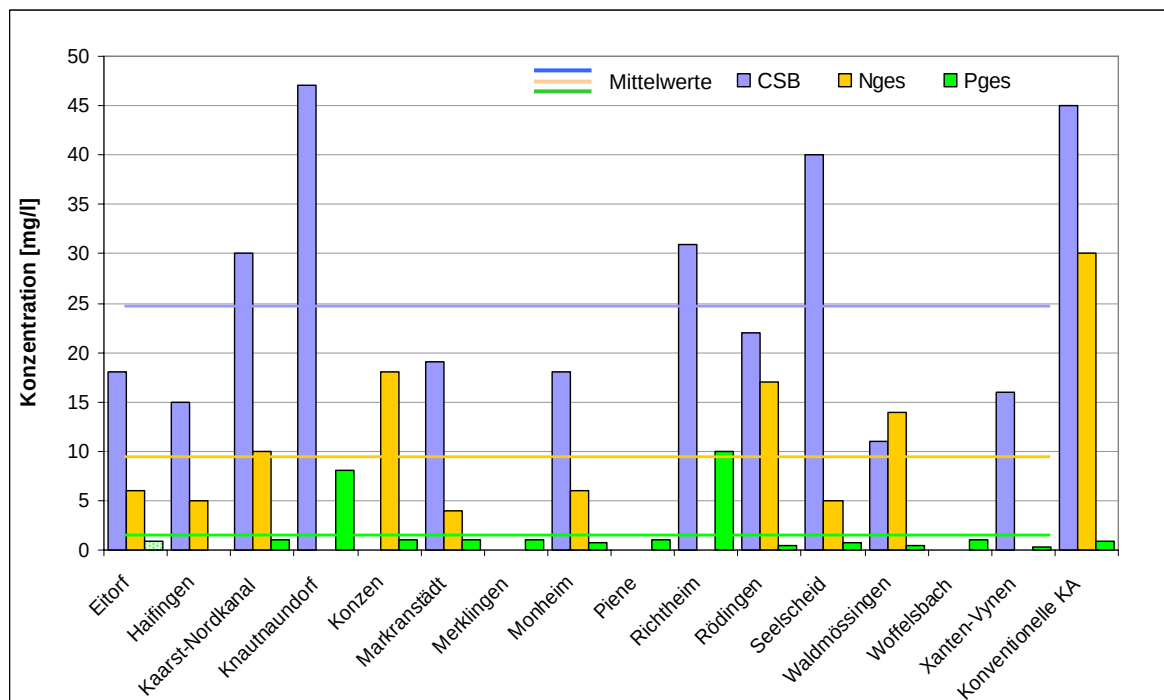


Bild 1-1: Leistungsvergleich für die Parameter CSB, Nges und Pges

In Anlehnung an die Empfehlungen der DWA erfolgte die Beurteilung der Ablaufqualität nach 5 Qualitätsstufen (Restverschmutzung sehr gering, gering, mäßig, groß, sehr groß). Nicht für alle Anlagen sind entsprechende Ablaufwerte bekannt. Ferner ist zu beachten, dass die Betriebswerte einiger Anlagen nur relativ kurze Betriebszeiträume beschreiben.

Für den CSB liegen Ablaufwerte von 11 Membranbelebungsanlagen vor. Neun von ihnen erreichen einen sehr geringen Sauerstoffbedarf, wenn die eingeleiteten Konzentrationen den Kategorien der DWA zu Grunde gelegt werden. Zwei Anlagen liegen mit 40 bzw. 45

mg/l CSB im Bereich geringer Konzentration. Im Vergleich dazu erreicht eine konventionelle Kläranlage ohne Erweiterung mit durchschnittlichen Ablaufwerten < 50 mg/l ebenfalls die DWA-Qualitätsstufe gering.

Der im Ablauf verbleibende Phosphor ist nur bei drei Anlagen mit einer Konzentration von kleiner 1 mg/l in sehr geringer Konzentration vorhanden. Acht Anlagen erreichen die Qualitätsstufe gering, was 5 mg/l entspricht. Die kleinste untersuchte Anlage emittiert ca. 9 mg/l Phosphor in den Vorfluter, wobei die Einleiterlaubnis einen Grenzwert von 17 mg/l vorschreibt.

Ablaufwerte für Gesamtstickstoff liegen für neun Anlagen vor. Fünf Anlagen überschreiten dabei die DWA-Grenze sehr gering von 8 mg/l. Drei Anlagen sogar die Stufe gering von 13 mg/l.

Die eingesetzte Energie beeinflusst bekanntermaßen die erreichte Ablaufqualität. Muss ein sehr hoher Reinigungsaufwand betrieben werden, wird auch entsprechend viel Energie benötigt. Anlagen, deren Ablaufanforderungen gering sind, benötigen in der Regel auch entsprechend weniger Energie. Um einen Vergleich des Energiebedarfs zu ermöglichen, wurde unterstellt, dass der gesamte Abwasserreinigungsprozess der verglichenen Anlagen annähernd gleich energieeffizient konzipiert wurde.

Für die graphische Darstellung wird der Energieverbrauch auf kWh pro Einwohner und Jahr normiert. Da die Grundlagendaten z. T. in der Einheit kWh pro m³ filtrierte Abwasser gegeben sind, wurde für eine Umrechnung davon ausgegangen, dass täglich rund 120 Liter Wasser pro Einwohner verbraucht werden. In dieser Hochrechnung sind Unschärfen möglich, da der Energieverbrauch zuflussabhängig ist und damit jahres- und tageszeitlichen Schwankungen unterliegt. In Bild 1-2 werden nur die Anlagen aufgeführt, deren Energieverbrauch bekannt ist. Alle Anlagen können lediglich als Richtwerte verstanden werden, da sie aus sehr unterschiedlichen Ablesezeiträumen stammen.

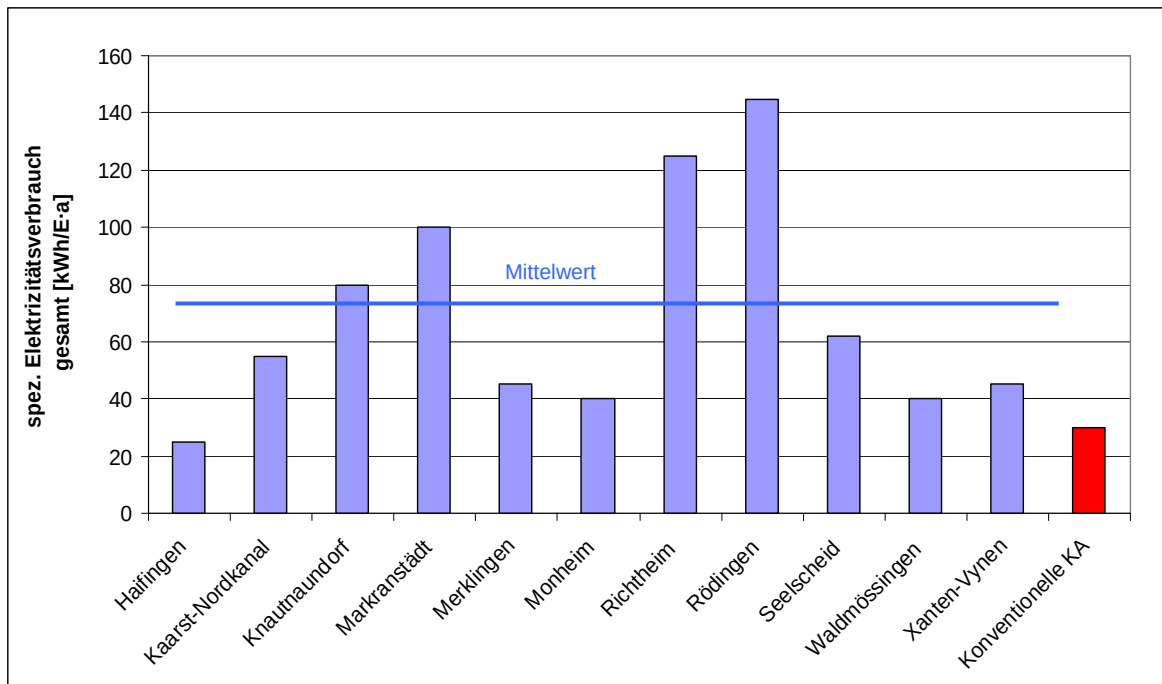


Bild 1-2: Energieverbräuche ausgewählter MBR

Der diskontinuierliche Abwasseranfall und stark schwankende Abwasserzusammensetzungen sind häufig für industrielle Anwendungen kennzeichnend. Die industrielle Abwasserreinigung mit Membrantechnik führt je nach Anwendungsfall zu einer Trennung von Wert- und Hilfsstoffen, bewirkt Kreislaufführungen von Teilströmen oder ermöglicht einen Wiedereinsatz von Konzentraten bzw. Sekundärrohstoffen. In der industriellen Abwasserreinigung dienen Membranverfahren daher primär dem Abwasserrecycling und dem Wiedereinsatz als Brauchwasser. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Sickerwasseraufbereitung auf Deponien in Kombination mit einer biologischen Stufe.

Vor allem die Textilindustrie, Papierfabriken, Wäschereien und die Nahrungsmittelindustrie sind Branchen, die den erfolgreichen Einsatz der Membrantechnik seit Jahren belegen. Die Membrantechnik wird neben der Abwasserreinigung im Lebensmittelsektor z.B. auch für die Zwecke der Aufkonzentrierung, Klarfiltration oder der Bierentalkoholung eingesetzt. Vor dem Hintergrund der Reduzierung der Abwassermenge und Reinigungskosten ist und bleibt die Membrantechnik ein wesentlicher Baustein in der industriellen Abwasserreinigung.

In der Trinkwasseraufbereitung wird die Membrantechnik seit Jahren erfolgreich z.B. für die Aufbereitung von Quellwasser eingesetzt und gewinnt vor dem Hintergrund immer knapper werdender Trinkwasserressourcen stetig an Bedeutung. Weltweit werden heute etwa 800 Membrananlagen mit einem Durchsatz von rund 9 Mio. m³/d für die

Trinkwasseraufbereitung eingesetzt. In Deutschland werden derzeit mehr als 300.000 m³/d Trinkwasser mit 83 Anlagen durch UF- und MF aufbereitet.

Auch beim Einsatz von Membranverfahren für die Trinkwasseraufbereitung und Spülwasserbehandlung nimmt NRW mit der größten deutschen UF-Membran im Wasserwerk Roetgen bei Aachen eine Vorreiterrolle ein.

Weitere Beispiele für die Anwendung der Membrantechnik sind mobile Aufbereitungsanlagen für Katastrophengebiete, die als Umkehrosmoseanlagen bzw. als Kombinationen aus Ultrafiltration und Umkehrosmose konzipiert sind.

Komponente 2: Erarbeitung von zukünftigen Förderschwerpunkten

Jede Technologie kann nur dann zukunftsfähig sein, wenn sie kontinuierlich angewandt und weiterentwickelt wird. Aufgabe des Forschungsvorhabens war es, konkrete Ansatzpunkte für die Optimierung der Membrantechnik zu identifizieren und Verbesserungspotentiale aufzuzeigen. Ein wesentlicher Projektschwerpunkt lag daher bei der Identifizierung zukünftiger Förderschwerpunkte, um wissenschaftliche Perspektiven aufzuzeigen und ggf. Investitionsentscheidungen zu erleichtern.

Zu den lokalisierten Zukunftsaufgaben zählen insbesondere:

- die Reduzierung des Energieverbrauchs von Membranbelebungsanlagen auf ein mit konventionellen Kläranlagen vergleichbares Niveau;
- die Reinigung der Membranstufe;
- die Eliminierung von Arzneimittelrückständen sowie
- die Optimierung des großtechnischen Anlagenbetriebes und
- die weitergehende Einbindung der Membrantechnik zur Aufbreitung industrieller Teilströme zur Schließung von Wasserkreisläufen.

Unter Einbeziehung der gewonnen Ergebnisse konnten im Wesentlichen vier Schwerpunktbereiche für die zukünftige Anwendung der Membrantechnik im Wassersektor identifiziert werden. Diese lassen sich wie folgt gruppieren:

- Entwicklung von Membraninnovationen;
- Membranreinigung;
- Energieoptimierung sowie
- die Elimination von Spurenstoffen.

Im Bereich der Membraninnovation (z.B. Technikentwicklung) ist daher zu prüfen, ob neben der Oberflächenmodifizierung der Membran selbst ein Laminat entwickelt werden

kann, das einerseits aus der Membran und andererseits aus einer vernetzten, mesoporigen hoch hydrophilen, aber ebenso einer entsprechenden hoch hydrophoben Folie besteht, um Kontaminationen der Oberfläche und des Inneren der wirksamen Membran zu vermeiden.

Um das Foulingpotential und die Reinigungsintervalle zu reduzieren, sind weiterführende Forschungsaktivitäten im Bereich der Membranentwicklung erforderlich. Aus dem Bereich der Biomaterialforschung ist bekannt, dass hydrophobe Polymere dazu neigen, in hohem Maße Proteine und Bakterien zu adsorbieren. Dieser Tendenz könnte beispielsweise dadurch entgegengewirkt werden, dass die Oberfläche hydrophober Materialien hydrophiliert wird bzw. das ein Hydrogel die Oberfläche benetzt. Hierfür sind jedoch weiterführende Untersuchungen notwendig, die die Praxistauglichkeit dieser Maßnahme verifizieren.

Die Membrantechnik ist eine zukunftsfähige Technologie zur Wasser- und Abwasseraufbereitung, die zwar mehrfach erprobt aber dennoch nicht abschließend betriebstechnisch optimiert wurde. Gerade die Aufwendungen für Energie und chemische Reinigungen stellen exponierte Kostenfaktoren dar, die den Betrieb derartiger Anlagen im Vergleich zu konventionellen Kläranlagen wesentlich verteuern. Um die vorhandenen Anlagen zukunftsfähig zu gestalten und auch unter steigenden Kostengesichtspunkten weiter betreiben zu können, sind daher Bestrebungen zur Energieoptimierung unerlässlich. Diese sollten insbesondere auf Untersuchungen zur Verbesserung des Lufteintrages und der Modifizierung des Prozessdesigns wie z.B. der Implementierung einer Vorklärung mit einer anschließenden anaeroben Klärschlammbehandlung abzielen.

Beim Einsatz der Membrantechnologie für die Elimination von Spurenstoffen wird der Aspekt der Konzentratbehandlung bzw. –entsorgung zukünftig stärker fokussiert werden müssen. Es existiert diesbezüglich sowohl international als auch national ein großer Forschungsbedarf. Sollte es gelingen, durch eine optimierte Prozessgestaltung bzw. Konzentratbehandlung, die zur Entsorgung anfallenden Mengen entscheidend zu reduzieren, würden die Membrananwendungen weiter gesteigert werden können und evtl. Risiken wie z.B. die Entstehung und langfristige Wirkung von Oxidationsnebenprodukten bei der Ozonung ausschließen.

Komponente 3: Multiplikation der Projektergebnisse

Die im Rahmen des Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse wurden in Form von Aufsätzen, Referaten und einer Tagungsveranstaltung der Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht. In Absprache mit dem Fördermittelgeber wurde, alternativ zu den im Antrag geplanten 2 Kurzveranstaltungen, zum Projektabschluss eine größere Tagungsveranstaltung mit dem Titel „Workshop Membrantechnik in NRW“ initiiert und

unmittelbar vor einer 2-tägigen internationalen Konferenz durchgeführt. Dadurch wurde es möglich, die Projektergebnisse auch mit einem internationalen Publikum zu diskutieren und den Teilnehmerkreis wesentlich zu erweitern. Aufgrund der exzellenten Kooperation mit dem Lehrstuhl für chemische Verfahrenstechnik der RWTH Aachen (Prof. Dr. Melin) wurde es möglich, weitere Teilnehmende einer europäischen Parallelveranstaltung für den Workshop zu gewinnen.

Die Diskussion über die Bedeutung der Membrantechnik für die Abwasserreinigung führte abschließend und übereinstimmend zu der Erkenntnis, dass auch zukünftig der Membrantechnologie eine besondere Rolle zugeschrieben werden muss, um die erfolgreiche Anwendung dieser Technologie zu gewährleisten. Denn keine andere Technik hat die Abwasserreinigung in den letzten Jahren so geprägt wie die Membrantechnik. Die große Vielfalt möglicher Anwendungen ist dabei nur ein herauszustellender Vorteil.

Die wesentlichen Erkenntnisse des Workshops wurden in einem Tagungsband über den Auftragsinhalt hinausgehenden Tagungsband zusammengefasst.

2 Veranlassung und Zielsetzung

Die Membrantechnik ist eine leistungsfähige Technologie, mit der sowohl die herkömmlichen Aufgaben der Abwasserreinigung bewältigt werden als auch den genannten neuen Herausforderungen begegnet werden kann. Ist beispielsweise eine weitgehende Hygienisierung der Einleitungen aus biologischen Reinigungsanlagen erforderlich, werden häufig Membranbelebungsanlagen eingesetzt. Zunehmend setzen sich auch im industriellen Bereich produktionsintegrierte Maßnahmen, wie z. B. Membranstufen zur Aufbereitung und Rückführung von Prozesswässern, durch. Mit der stetigen technischen Fortentwicklung nimmt die Zahl der Anwendungen und Anwendungsgebiete der Membrantechnik stetig zu.

Das Begleitprojekt zu FuE-Vorhaben im Bereich der Membrantechnologie wurde durchgeführt, um die bislang gewonnenen Ergebnisse aus verschiedenen FuE-Vorhaben auszuwerten, zu bündeln und vorhandene Wissenslücken aufzuzeigen. Ferner diente es zur Ableitung eines aktuellen Beratungsbedarfs sowie zur Bestimmung von Potenzialen und Anwendungsgrenzen der Membrantechnologie.

Dabei wurden spezifische Forschungsvorhaben herangezogen, Informationen aufbereitet und allgemeingültige Erkenntnisse abgeleitet, die den Einsatz der Membrantechnik weiter forcieren.

Die zentralen Zielsetzungen dieses Projektes umfassen die

- Bündelung, Aufbereitung und Verbreitung des Kenntnisstandes zur Membrantechnik,
- Steigerung der Akzeptanz der Membrantechnik und
- Entwicklung und Etablierung der Membrantechnologie für die Abwasserreinigung und Trinkwasseraufbereitung.

Die Umsetzung der Ziele erfolgte dabei mit der Bearbeitung von 3 Komponenten:

1. Auswertung großtechnischer Projekte
2. Erarbeitung von Empfehlungen für zukünftige Schwerpunktthemen
3. Multiplikation der Projektergebnisse

Die Vorgehensweise im Vorhaben und die Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt.

3 Vorgehensweise

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte über einen Zeitraum von 2,5 Jahren. Zentrale Schwerpunkte bildeten die Auswertung verschiedener nationaler und internationaler FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Membrantechnik, die Befragung einschlägiger Membranhersteller, die Ableitung von offenen Fragestellungen aus der Auswertung bislang bearbeiteter FuE-Vorhaben, die Beratung des Fördermittelgebers und die Schaffung eines unabhängigen Bewertungstools in Form eines Bewertungskataloges.

Die Detailbearbeitung gruppiert sich in 3 wesentliche Komponenten, die im Folgenden kurz charakterisiert werden.

3.1 Komponente 1: Auswertung der großtechnischen Projekte

Die erste Komponente umfasst die Aufarbeitung der bisher geleisteten Arbeiten und der bewilligten und durchgeführten Projekte zur Membrantechnik aus den zurückliegenden fünf Jahren mit dem Schwerpunkt Deutschland und Nordrhein-Westfalen. Die Ergebnisse aus den entsprechenden FuE-Vorhaben wurden gesammelt sowie die daraus ableitbaren Aussagen aufbereitet und bewertet. Im Einzelnen erfolgte die:

- Erarbeitung von Übersichten in Bezug auf die bewilligten und durchgeführten nationalen und internationalen Projekte in den zurückliegenden fünf Jahren;
- Zusammenfassung und Aufarbeitung der geleisteten Arbeiten im Bereich Membrantechnik;
- Abgleich mit den Aussagen und Empfehlungen einschlägiger Expertengremien aus den Bereichen Technik, Anwenden und Politik;
- Formulierung eines Statusberichtes/Abschlussberichtes in Bezug auf die zurückliegenden fünf Jahre Membrantechnikförderung sowie die
- Erklärung zu den Perspektiven für die weitere Förderung der Membrantechnik.

3.2 Komponente 2: Erarbeitung von Empfehlungen zu zukünftigen Förderschwerpunktthemen

Bis heute wurden zahlreiche Anlagen, vor allem kommunale und industrielle Membranbelebungsanlagen, großtechnisch realisiert. Die begleitenden Forschungsvorhaben zielten häufig auf grundlegende oder standortspezifische Besonderheiten ab. Eine Nachbewertung der Anlagen, vor allem im Vergleich der Anlagen untereinander, findet hierbei nicht statt. Ergänzend zur Auswertung durchgeführter Projekte wurden daher Informationsdefizite zur Bewertung dieser Anlagen ermittelt, aufbereitet und Schwerpunktthemen für zukünftige Forschungsausschreibungen ermittelt.

Nach Rücksprache mit dem MUNLV NRW wurden im Rahmen der Auswertung der FuE-Vorhaben und unter Einbeziehung internationaler Erfahrungsaustausche die Schwerpunktthemen gruppiert und in einer eigenen Komponente 2 zusammengefasst.

3.3 Komponente 3: Multiplikation der Projektergebnisse

Wesentliche Aufgabe im Rahmen der dritten Komponente war die Erarbeitung und Veröffentlichung der Ergebnisse bzgl. verschiedener FuE-Vorhaben im Bereich der Membrantechnik. Als Plattform dienten Tagungsveranstaltungen, Publikationen in Fachzeitschriften sowie Referate am Schulungsinstitut für Membrantechnik in der Abwasserreinigung in Seelscheid e.V. (simas).

Die gewählte Form der Veröffentlichung der Endergebnisse dieses Vorhabens erfolgte im Rahmen einer Tagungsveranstaltung unmittelbar vor der international anerkannten „Aachener Tagung Wasser und Membrane“ und diente insbesondere zahlreichen Betreibern sowie potenziellen Antragstellern als Information darüber, welche Projekte bereits abgeschlossen, in der Bearbeitung bzw. gefördert worden sind und welches zukünftige Potential der Membrantechnik zugeschrieben wird.

Im Rahmen der Tagungsveranstaltung wurde über den Auftragsinhalt des Projektes hinaus ein Tagungsband erstellt.

4 Stand der Anwendung der Membrantechnik

4.1 Kommunale Abwasserreinigung

Um den aktuellen Stand der Anwendung der Membrantechnik in der Abwasserreinigung darzustellen, wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Daten aus eigenen Untersuchungen sowie Daten aus Referenzlisten und Befragungen nationaler und internationaler Membranhersteller ausgewertet und zusammengetragen. Die Untersuchungsergebnisse werden nachfolgend für Anlagen mit einer mittleren hydraulischen Kapazität von mindestens 20 m³/d dargestellt. Die angegebenen Daten erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

4.1.1 Stand weltweiter Anwendungen

Weltweit werden heute etwa 900 Membranbelebungsanlagen für die Abwasserbehandlung eingesetzt (PINNEKAMP, 2007). Insbesondere Asien und Nordamerika nehmen, bezogen auf die Anzahl an Membranbelebungsanlagen, eine Vorreiterstellung ein. Die detaillierte Verteilung der Anlagenanzahl ist in Tabelle 4-1 dargestellt. Bei Betrachtung der behandelten Abwassermengen in Membranbelebungsanlagen ist ersichtlich, dass Amerika und Europa den höchsten Gesamt-Anlagendurchsatz aufweisen (vgl. Tabelle 4-2). Im Vergleich mit Ergebnissen von DORGELOH aus dem Jahre 2000 wird deutlich, dass sich die Anzahl der Membrananwendungen in der kommunalen Abwasserreinigung in den letzten sieben Jahren weltweit verdoppelt hat. Die Gründe für den rasanten Anstieg der Membrantechnik liegen vor allem im geringen Platzbedarf, in der kompakten modularen Bauweise und in der Erzeugung eines feststofffreien Ablaufs.

Tabelle 4-1: Verteilung Membranbelebungsanlagen weltweit, Stand 2007 (PINNEKAMP, 2007; PINNEKAMP ET AL., 2006; LESJEAN UND HUISJES, 2007; DORGELOH, 2000)

Region	Anzahl der Membranbelebungsanlagen, differenziert nach Membrantyp		Summe [-]
	Platte	Hohlfaser	
Afrika	12	3	15
Nordamerika	98	198	296
Asien	241	45	286
Australien	18	5	23
Europa	113	56	169
Südamerika	3	5	8
Gesamt	485	312	797

Tabelle 4-2: Behandelte Abwassermengen in Membranbelebungsanlagen weltweit, Stand 2007 (PINNEKAMP, 2007; PINNEKAMP ET AL., 2006; LESJEAN UND HUISJES, 2007; DORGELOH, 2000)

Region	Behandelte Abwassermenge, differenziert nach Membrantyp [m³/d]		Summe in m³/d	Beh. Abwassermenge [m³/d je Anlage]
	Platte	Hohlfaser		
Afrika	1.082	28.239	29.321	1.955
Nordamerika	123.452	368.980	492.432	1.664
Asien	159.509	108.132	267.641	936
Australien	13.919	30.931	44.850	1.950
Europa	164.357	259.175	423.532	2.506
Südamerika	703	3.370	4.073	509
Gesamt	463.022	798.827	1.261.849	1.583

Die in den vorstehenden Tabellen dargestellte Anlagenverteilung verdeutlicht die Verteilung zwischen den verschiedenen Modulsystemen. Während in Amerika primär Hohlfasermembransysteme eingesetzt werden, dominieren auf dem asiatischen Markt Plattenmembranen. In Bild 4-1 wird die weltweite Entwicklung der Anlagenzahlen und -kapazitäten für die Jahre 1999 bis 2007 grafisch dargestellt.

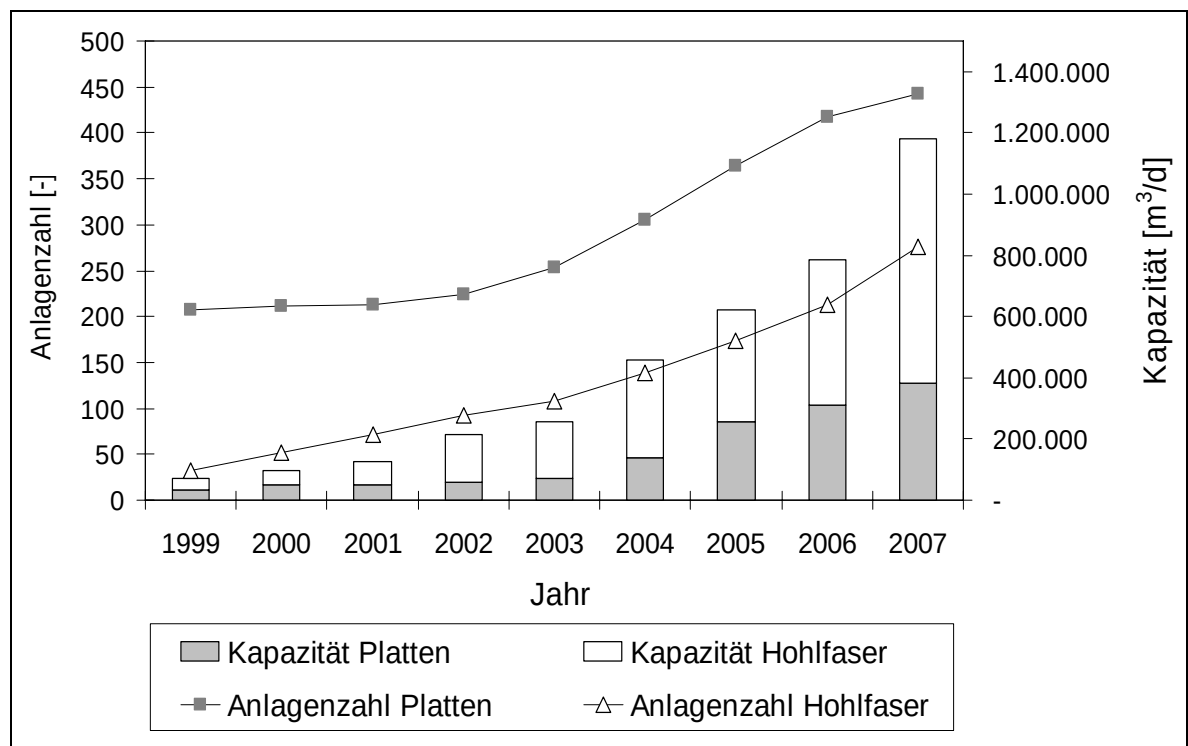


Bild 4-1: Weltweite Entwicklung kommunaler Membranbelebungsanlagen

4.1.2 Stand europäischer Anwendungen

Deutschland und Großbritannien nehmen die Vorreiterrolle in Europa beim Einsatz kommunaler Membranbelebungsanlagen ein. Allein in Deutschland werden Anlagen mit einer Kapazität von mehr als 80.000 m³/d betrieben. Diese Leistung wird lediglich von Großbritannien übertroffen, wo bereits im Jahre 2003 ein Abwasservolumina von etwa 88.000 m³/d in 22 Membranbelebungsanlagen behandelt wurde (PINNEKAMP ET AL., 2006).

In Bild 4-2 ist die historische Entwicklung der Anlagenanzahlen und -kapazitäten dargestellt. Neben Deutschland und Großbritannien werden in Europa vornehmlich in Italien, Spanien und Frankreich kommunale Membranbelebungsanlagen betrieben (PINNEKAMP ET AL., 2006).

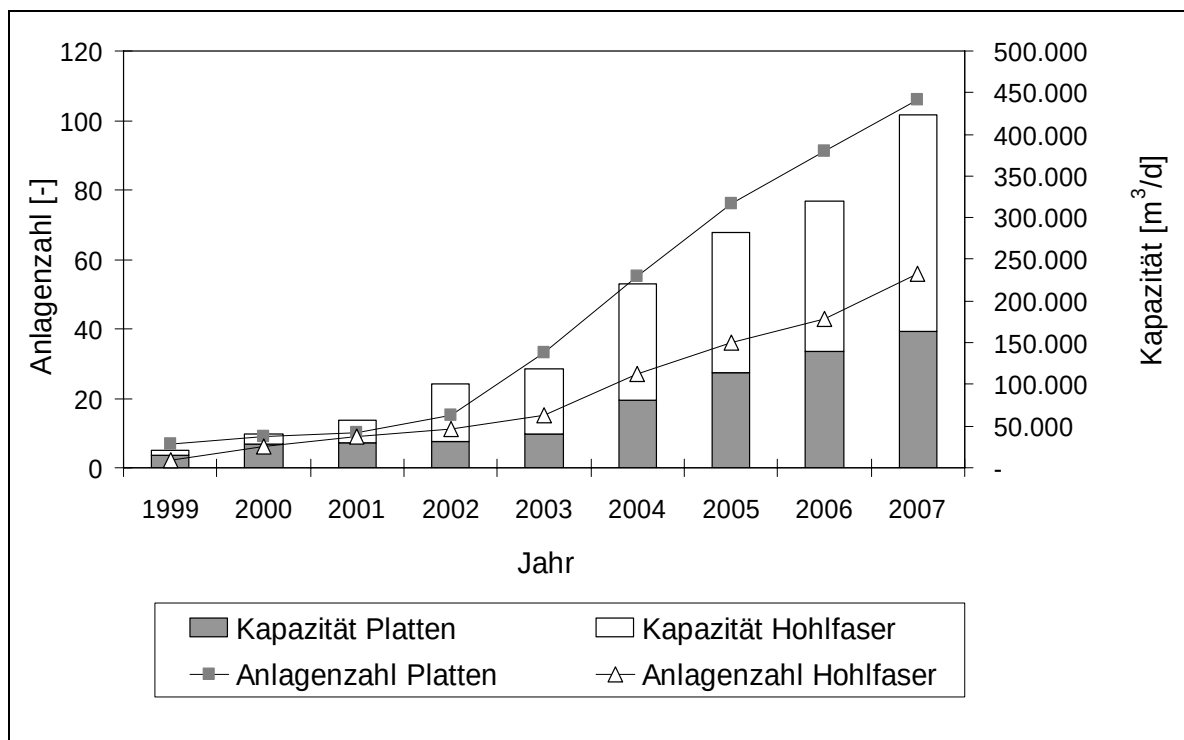


Bild 4-2: Kommunale Membranbelebungsanlagen in Europa

Zu den größten europäischen Membranbelebungsanlagen hinsichtlich der hydraulischen Kapazität zählen das Gruppenklärwerk Nordkanal in Deutschland mit einer maximalen Kapazität von etwa 45.000 m³/d und der MBR Brescia in Italien mit einer maximalen Kapazität von etwa 42.000 m³/d (PINNEKAMP, 2007). Die erste europäische kommunale Membranbelebungsanlage wurde im Jahre 1998 in England (Porlock) in Betrieb genommen. Bis heute werden in Europa insgesamt 169 Membranbelebungsanlagen betrieben.

4.1.3 Stand nationaler Anwendungen

In Deutschland beschränkt sich der Einsatz von Membranen in der kommunalen Abwasserreinigung derzeit meist auf Projekte, die öffentlich gefördert werden. Neben den Investitionskosten für die Membranstufe, die trotz einer Kostenreduzierung innerhalb der letzten Jahre weiterhin einen großen Anteil der gesamten Investitionskosten bedeuten, führen die im Vergleich zu konventionellen Kläranlagen höheren Betriebskosten häufig zu einem Ausschluss der Membrantechnik bei Anlagenerweiterungen bzw. Neuanlagen. Die großtechnische Anwendung der Membrantechnik im Bereich der Abwasserreinigung hat ihren nationalen und landesweiten Ursprung im Jahre 1999, als der Erftverband die Membrananlage Rödingen mit einer Anschlussgröße von 3.000 EW in Betrieb nahm. Im Jahr 2004 folgte die Inbetriebnahme des Gruppenklärwerks Nordkanal in Kaarst mit einer Anschlussgröße von 80.000 EW. Nordrhein-Westfalen zählt zu den führenden Technologiestandorten bei der kommunalen Abwasserreinigung mit Membranverfahren, was durch die Vielzahl an Referenzobjekten bestätigt wird.

Allein in Deutschland werden täglich mehr als 80.000 m³ Abwasser mit Membrantechnik gereinigt. National existieren derzeit 19 kommunale Membranbelebungsanlagen mit einer mittleren hydraulischen Kapazität von mindestens 20 m³/d.

Die historische Entwicklung der Membranbelebungsanlagen in Deutschland ist in Bild 4-3 für Platten- und Holfasermembranen dargestellt. In Tabelle 4-3 sind ergänzend die derzeit in Deutschland betriebenen kommunalen Membranbelebungsanlagen mit einer mittleren Kapazität von mindestens 20 m³/d aufgeführt.

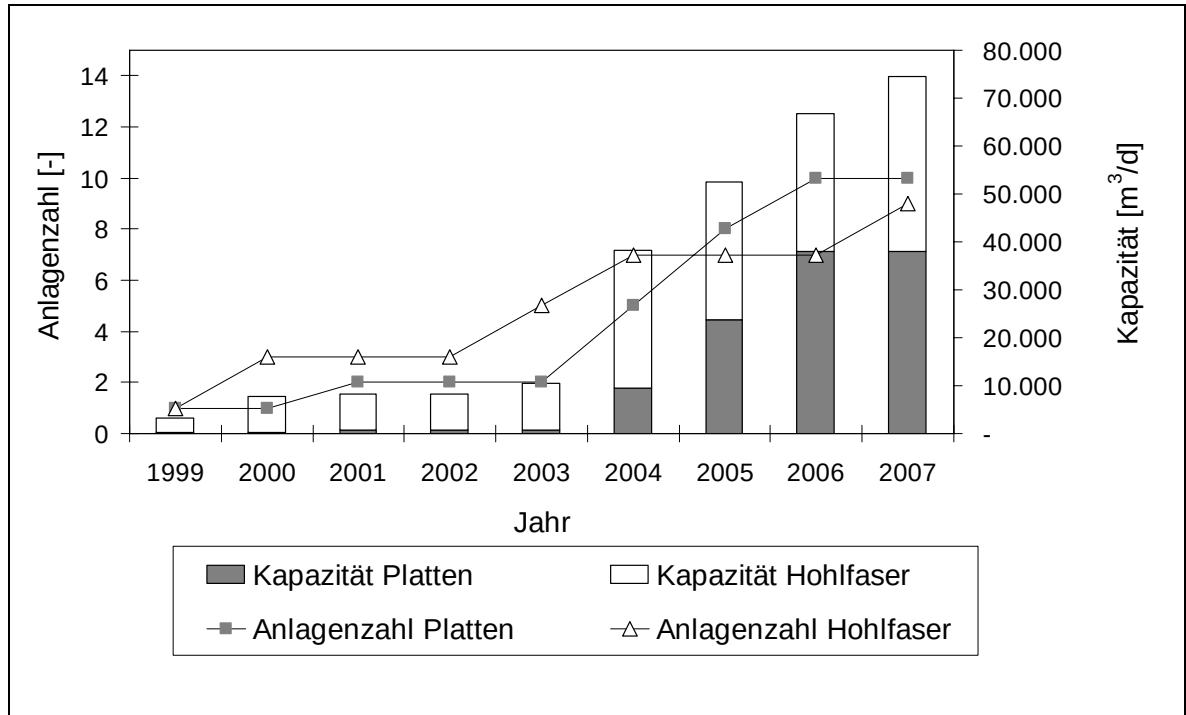


Bild 4-3: Entwicklung der Membranbelebungsanlagen in Deutschland

Innerhalb der kommunalen Abwasserreinigung wird in Deutschland hauptsächlich die integrierte Anordnung der Membranstufe als Kombination von Membranfiltration und Belebungsverfahren als Membranbelebungsverfahren favorisiert. Separate Filtrationsbecken bedingen höhere technische Aufwendungen für das Pumpen der Rezirkulationsströme bzw. Vorteile während der chemischen Reinigung, da die Module nicht umgebaut werden müssen und die Filtrationszelle als Wascheinheit genutzt werden kann.

Tabelle 4-3: Membranbelebungsanlagen in Deutschland

	Mittlere Kapazität [m³/d]	Art	Jahr der Inbetriebnahme
Rödingen	3.168	Hohlfaser	1999
Erlangen	190	Platte	1999
Markranstädt	4.320	Hohlfaser	2000
Linslerhof	20	Hohlfaser	2000
Knautnaundorf	442	Platte	2002
Monheim	1.820	Hohlfaser	2003
Simmerath	624	Hohlfaser	2003
Nordkanal	16.656	Hohlfaser	2004

	Mittlere Kapazität [m³/d]	Art	Jahr der Inbetriebnahme
Waldmössingen	2.160	Hohlfaser	2004
Merklingen	240	Platte	2004
Richtheim	96	Platte	2004
Seelscheid	8.544	Platte	2004
Eitorf	6.700	Platte	2005
Woffelsbach	7.100	Platte	2005
Xanten	400	Platte	2005
Konzen	14.100	Platte	2006
Piene	138	Platte	2006
Glessen	6.980	Hohlfaser	2007
Bronn	720	Hohlfaser	2007

Die in der Tabelle 4-3 aufgeführten Anlagen werden mit getauchten Membranmodulen im Niederdruckbereich betrieben.

Die technischen Entwicklungen haben in den vergangenen Jahren bedeutende betriebliche und kostenmäßige Vorteile bewirkt, so dass die vorliegenden Betriebserfahrungen die Randbedingungen für den Einsatz der Membrantechnik weiter verbessern. Neben der Anwendung der Membrantechnik in kommunalen Kleinkläranlagen und Großklärwerken werden zunehmend auch Schiffskläranlagen mit dieser Technologie ausgestattet.

4.2 Industrielle Abwasserreinigung

Der Ursprung der Membrantechnik liegt in der Aufbereitung produktionsspezifischer industrieller Teilströme. Bedingt durch steigende Abwasserentsorgungskosten und wachsende Umweltansprüche werden zunehmend Membranverfahren zur Reinigung industrieller Abwässer eingesetzt.

Der diskontinuierliche Abwasseranfall und stark schwankende Abwasserzusammensetzungen sind häufig für industrielle Anwendungen kennzeichnend. Die Membrantechnik kann hier entweder als produktionsintegrierte oder nachgeschaltete Maßnahme eingesetzt werden.

Die industrielle Abwasserreinigung mit Membrantechnik kann je nach Anwendungsfall zu einer Trennung von Wert- und Hilfsstoffen führen, Kreislaufführungen von Teilströmen bewirken oder einen Wiedereinsatz von Konzentraten bzw. Sekundärrohstoffen ermöglichen. In der industriellen Abwasserreinigung dienen Membranverfahren daher primär dem Abwasserrecycling und dem Wiedereinsatz als Brauchwasser sowie der Sickerwasseraufbereitung auf Deponien in Kombination mit einer biologischen Stufe.

Vor allem die Textilindustrie, Papierfabriken, Wäscherein und die Nahrungsmittelindustrie sind Branchen, die den erfolgreichen Einsatz der Membrantechnik seit Jahren belegen. Die Membrantechnik wird neben der Abwasserreinigung im Lebensmittelsektor z.B. auch für die Zwecke der Aufkonzentrierung, Klarfiltration oder der Bierentalkoholung eingesetzt.

Vor dem Hintergrund der Reduzierung der Abwassermenge und –kosten ist und bleibt die Membrantechnik ein wesentlicher Baustein in der industriellen Abwasserreinigung.

Die Abwassercharakteristik entscheidet dabei maßgeblich über die Investitionen und Betriebskosten. Da jedes industrielles Abwasser sehr spezifisch ist, sind vor der großtechnischen Planung einer Membrananlage Pilotierungen zur Auswahl des Membranverfahrens erforderlich.

4.3 Trinkwasseraufbereitung

In der Trinkwasseraufbereitung wird die Membrantechnik erfolgreich z.B. für die Aufbereitung von Quellwasser eingesetzt und gewinnt vor dem Hintergrund immer knapper werdender Trinkwasserressourcen weltweit an Bedeutung. Auch im Einsatz von Membranverfahren für die Trinkwasseraufbereitung und Spülwasserbehandlung nimmt Nordrhein-Westfalen mit der größten deutschen UF-Membran im Wasserwerk Roetgen bei Aachen eine Schlüsselrolle ein.

Aber auch für den Einsatz in Katastrophengebieten hat sich die Membrantechnik bewehrt. Anwendungsbeispiele für die Membrantechnik in der mobilen Aufbereitung sind Umkehrosmoseanlagen bzw. Kombinationen aus Ultrafiltration und Umkehrosmose.

4.3.1 Stand weltweiter Anwendungen

Der aktuelle Stand der Anwendung der Membrantechnik in der Trinkwasseraufbereitung wurde anlässlich der 7. Aachener Tagung Verfahrenstechnik von Gimbel (2007) und Lipp (2007) aufbereitet und dargestellt. Weltweit werden heute etwa 800 Membrananlagen mit einem Durchsatz von rund 9 Mio. m³/d für die Trinkwasseraufbereitung eingesetzt (siehe Bild 4-4).

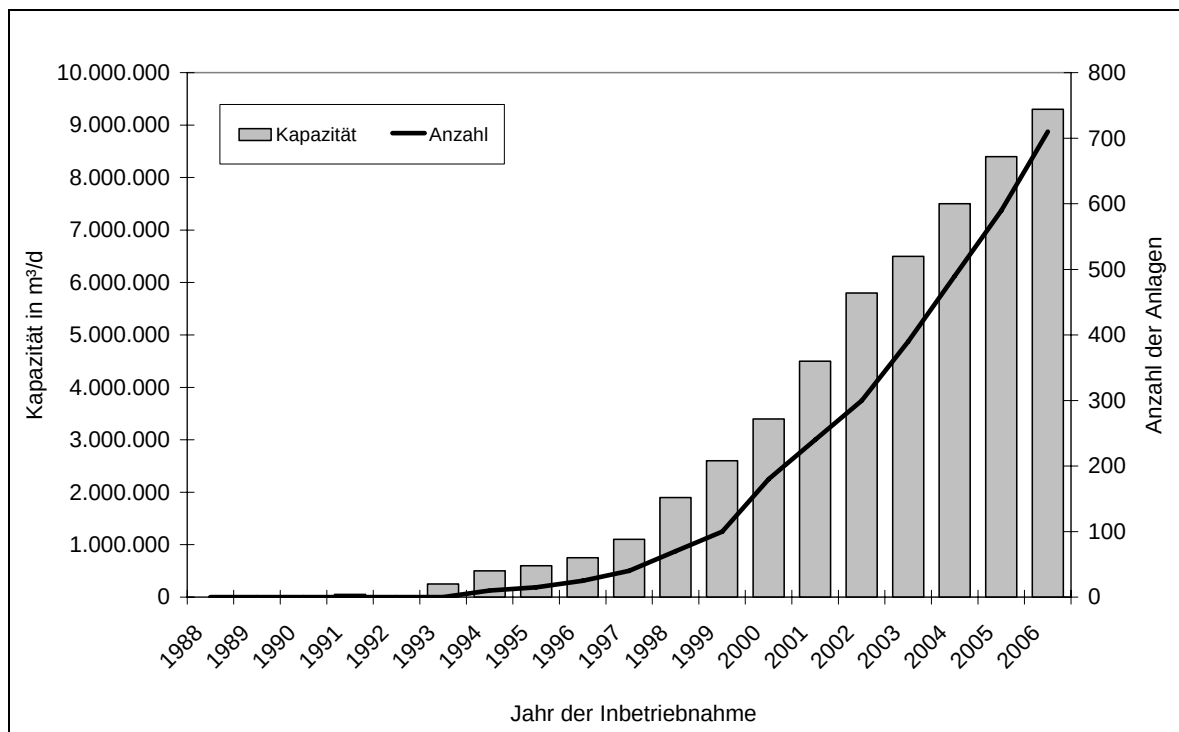


Bild 4-4: Entwicklung der Membrantechnik im Trinkwassersektor weltweit (GIMBEL, 2007)

Beginnend in 1988 hat ein stetiges Wachstum des Einsatzes dieser Technologie stattgefunden. Aufgrund der Anforderung vor allem Mikroorganismen aus dem aufzubereitendem Rohwasser vollständig zu entfernen, finden die Verfahren der Mikro- und Ultrafiltration Anwendung.

Auch in diesem Sektor nehmen die USA eine herausragende Stellung ein (siehe Tabelle 4-4). Die größten Trinkwasseraufbereitungsanlagen werden in Singapur und Moskau betrieben, die beide für einen Durchsatz von 11.500 m³/h ausgelegt sind. In Singapur ist eine Erweiterung um 8.500 m³/h in den nächsten Jahren vorgesehen.

Tabelle 4-4: Aufstellung der größten MF- und UF-Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung (GIMBEL, 2007)

Standort	Land	max. Kapazität in m ³ /h	Jahr der Inbetriebnahme	Membran	Wasserquelle
Moskau	Russland	11.500	2006	Aqua-source	Oberflächenwasser
Chestnut Avenue Waterworks	Singapur	11.400	2003	Zenon	Oberflächenwasser
Minneapolis Columbia Heights	USA	11.000	2005	Norit	Oberflächenwasser
Columbine (Thornton)	USA	7.900	2005	Zenon	Oberflächenwasser
Racine	USA	7.900	2006	Zenon	Oberflächenwasser
Roetgen Aachen	Deutschland	7.000	2005	Norit	Oberflächenwasser
Clay Lane, Prim. London	UK	6.750	2001	Norit	Quellwasser
Kamloops	Kanada	6.700	2004	Zenon	Oberflächenwasser
San Joaquin	USA	5.500	2005	Zenon	Oberflächenwasser
Olivenhain	USA	5.400	2000	Zenon	Oberflächenwasser

Der Einsatz von RO- und NF-Anlagen ist derzeit in einem starken Wachstum begriffen. In Deutschland werden derzeit 10 derartige Anlagen mit einem Durchsatz größer 10 m³/h betrieben. Das Hauptanwendungsgebiet ist hierbei die Enthärtung von Grundwasser. In Deutschland wird 2008 eine sehr große RO-Anlage (1.100 m³/h) zur Aufbereitung von Uferfiltrat durch die Stadtwerke Dinslaken in Löhnen auch mit dem Ziel der Elimination von Spurenstoffen in Betrieb genommen.

4.3.2 Stand nationaler Anwendungen

In Deutschland hat sich der Einsatz von Membrananlagen zur Trinkwasseraufbereitung ebenfalls bewährt und gewinnt zunehmend an Bedeutung (siehe Bild 4-5). Derzeit werden mehr als 300.000 m³/d Trinkwasser in 83 Anlagen mittels UF- und MF aufbereitet. Eine detaillierte Aufstellung ist Tabelle 4-5 zu entnehmen.

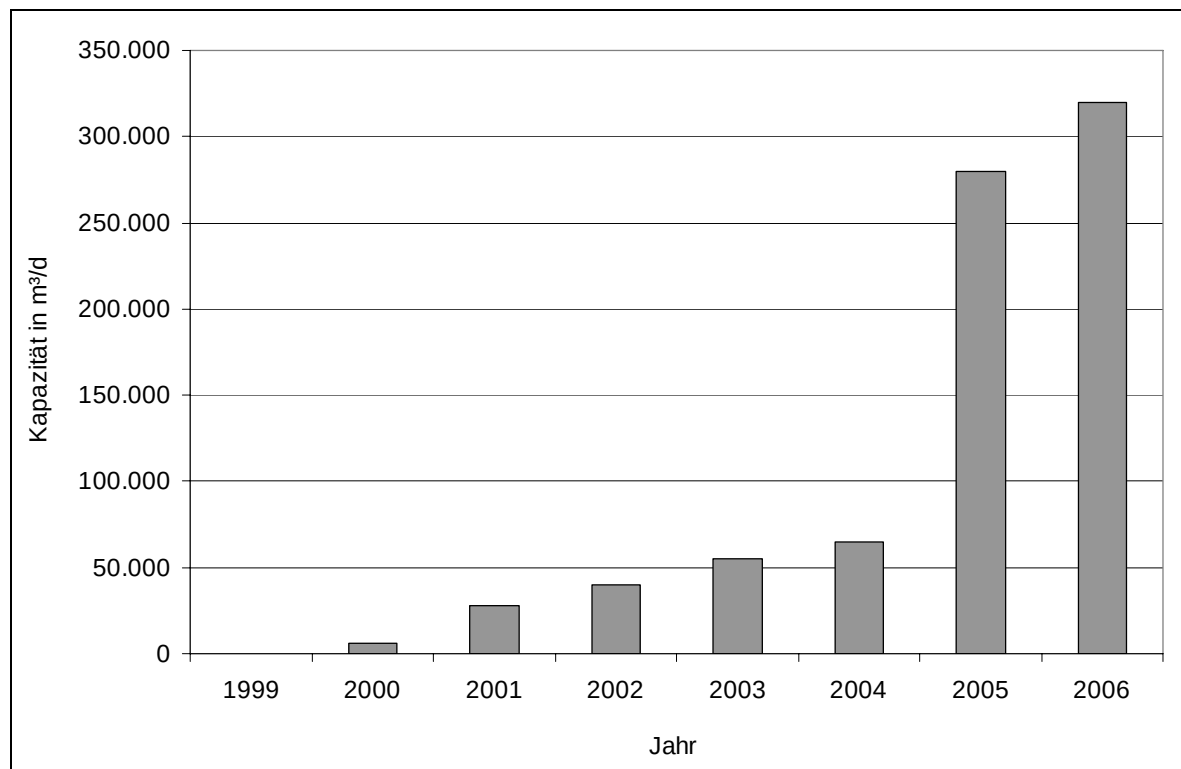


Bild 4-5: Entwicklung der Membrantechnik im Trinkwassersektor in Deutschland
(GIMBEL, 2007)

Die größte Anlage dieser Art wird in Roetgen, Kreis Aachen, betrieben und nimmt mit einer Kapazität von 7.000 m³/h weltweit sogar Position 7 ein.

Tabelle 4-5: Aufstellung der größten MF- und UF-Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung in Deutschland (LIPP, 2007)

Anlagenkapazität [m³/h]	Anzahl Anlagen [-]	Summe Kapazität [m³/h]
1-10	14	112
10-50	34	806
50-250	31	4.187
250-1.000	3	1.360
>1.000	1	6.000
Rohwasserart		
Quelle	45	1.827
Brunnen	18	1.772
Brunnen und Quelle	11	808
Talsperre	6	7.524
Uferfiltrat	3	534
Zusätzliche Desinfektion		
Keine	12	426
UV	34	1.173
Chlor	22	2.590
Chlordioxid	15	8.276

Weitere Einsatzgebiete im Umfeld der Trinkwassergewinnung wie das Recycling von Spülwässern der TW-Aufbereitung (ebenfalls seit 2007 in Roetgen betrieben), die Aufbereitung von Grauwasser zu Brauchwasser für Toilettenspülungen und der Betrieb von Kleinanlagen für Eigenversorger, vornehmlich in ländlich strukturierten Gebieten, gewinnen ebenfalls zunehmend an Bedeutung.

5 Ableitung von zukünftigen Forschungsaktivitäten und Empfehlungen für das MUNLV

5.1 Entwicklung eines nachvollziehbaren und reproduzierbaren Bewertungskataloges für das MUNLV

Das ISA der RWTH Aachen hat für das MUNLV einen Bewertungskatalog für neu zu genehmigende Projekte entwickelt.

Dieser Begutachtungsbogen trägt zu einer transparenten und objektiven Beurteilung von Forschungsanträgen bei und wurde so konzipiert, dass auch vor dem Hintergrund zukünftiger Publikationen und Broschüren des MUNLV bereits während der Beurteilung die Gruppierung in fachspezifischen Themenbereiche erfolgt und eine Kurzzusammenfassung des Vorhabens impliziert.

Der Begutachtungsbogen vereint die zentralen Fragestellungen, die für eine objektive Förderentscheidung von Bedeutung sind. Hierzu zählen z.B. die Beurteilung der Bedeutung des Vorhabens als auch die daraus resultierende Verwertungsmöglichkeiten.

Unter Einbeziehung der Ergebnisse dieses FuE-Vorhabens konnten 4 Schwerpunktbereiche für die zukünftige Förderungen der Membrantechnik im Wassersektor identifiziert werden. Diese lassen sich wie folgt gruppieren: Entwicklung von Membraninnovationen, Membranreinigung, Energieoptimierung und Elimination von Spurenstoffen.

5.2 Membraninnovation

Um die Membrantechnologie zukunftsfähig zu gestalten, sind kontinuierliche Weiterentwicklungen notwendig. Diese basieren auf Membranentwicklungen, der Modifizierung einschlägiger Bewertungsmethoden und intelligenter Verfahrenskombinationen.

Aus dem Bereich der Biomaterialforschung ist bekannt, dass hydrophobe Polymere dazu neigen, in hohem Maße Proteine und Bakterien zu adsorbieren. Dieser Tendenz kann dadurch entgegengewirkt werden, dass die Oberfläche hydrophober Materialien hydrophiliert wird bzw. dass ein Hydrogel auf die Oberfläche getropft wird.

Im Bereich der Membraninnovation ist daher zu prüfen, ob neben der Oberflächenmodifizierung der Membran selbst ein Laminat entwickelt werden kann, das einerseits aus der Membran und andererseits aus einer vernetzten, mesoporigen hoch hydrophilen, aber ebenso einer entsprechenden hoch hydrophoben Folie besteht, um Kontaminationen der Oberfläche und des Inneren der wirksamen Membran zu vermeiden.

Da die Filtrationsleistung einer Membranbelebungsanlage durch die im Betrieb auftretende Deckschicht auf der Membran begrenzt wird, ist der Affinität von Deckschicht und zurückgehaltenen Wasserinhaltsstoffen eine besondere Aufmerksamkeit zu widmen. In diesem Zusammenhang sind neben der verschiedenen Membranmaterialien vor allem die Porengrößenverteilung sowie die Betriebsbedingungen der Anlagen von Bedeutung. Hier interessieren vor allem das ideale feed- und permeatseitige Druckniveau, die Überströmung der Membran sowie die Häufigkeit und Menge einer feedseitigen Luftzufuhr. Die gegenseitige Wechselwirkung der genannten Parameter wurde zwar in der Vergangenheit immer wieder bestätigt, es fehlt jedoch noch immer an umfassenden Erkenntnissen der Zusammenhänge.

Nachfolgend werden die wesentlichen Inhalte besonders bedeutender Einzelthemen vorgestellt.

5.3 Reinigung Membranflächen

Die Leistung von Membranstufen nimmt grundsätzlich über der Betriebszeit ab. Die Ursachen liegen in Verschmutzungen (Fouling und Scaling) der Membranen durch Abwasserinhaltsstoffe. Durch Kenntnis der Einflüsse auf die Bildung der Verblockungen und letztendlich die Ermittlung von Maßnahmen zur Verringerung fouling- bzw. scalingverursachender Stoffe kann dieser Leistungsverlust reduziert werden (vgl. F&E-Vorhaben: Strategien zur Foulingkontrolle bei Membranbelebungsanlagen in der kommunalen Abwasserbehandlung; MUNLV-Projekt: AZ: IV-9-042 198). Eine regelmäßige (chemische) Reinigung zur Aufrechterhaltung bzw. Wiederherstellung der Filtrationsleistung wird jedoch immer notwendig bleiben. Die hiermit verbundenen finanziellen Aufwendungen und ökologischen Auswirkungen des Chemikalieneinsatzes werden, vor allem aufgrund zum Teil schlechter Erfahrungen in anderen Anwendungen, in der Öffentlichkeit oftmals generalisiert und als (entscheidender) Nachteil der Membrantechnik gegenüber herkömmlichen Verfahrenstechniken angeführt.

In der Tat sind mit dem Betrieb von Membrananlagen zum Teil erhebliche finanzielle Aufwendungen und ökologische Auswirkungen verbunden. Die Foulingneigung in kommunalen Membranbioreaktoren liegt aber gegenüber anderen Anwendungen vergleichsweise niedrig. Da im kommunalen Bereich die Verfügbarkeit der Filtrationsleistung permanent zu gewährleisten ist sowie zum Teil sehr große Membranstufen – z.B. verglichen mit klassischen Anwendungen zur prozessintegrierten Stoffstromaufbereitung – zur Verfügung stehen und entsprechend erhebliche Mengen an Reinigungslösungen anfallen, ergeben sich jedoch neue ökonomische und ökologische Fragestellungen. Bzgl. der Wirtschaftlichkeit sind neben direkten Betriebskosten bzw.

Investitionen, wie Chemikalienkosten, Personalaufwand und Ausfallzeiten der Membranstufe, die nur durch vermehrten Flächeneinsatz zu kompensieren sind, Instandhaltungskosten durch verringerte Membranstandzeiten infolge der chemischen Beanspruchung der Membranmaterialien durch die eingesetzten Reinigungschemikalien zu berücksichtigen. Bzgl. der Umweltaspekte sind neben der Schädlichkeit der eingesetzten Chemikalien, etwaige Zwischenprodukte, die bei der Reinigung entstehen (z.B. Entstehung halogenorganischer Verbindungen beim Einsatz chlorhaltiger Reinigungsmittel) zu berücksichtigen.

Seit der Inbetriebnahme der ersten großtechnischen Anlagen konnten vor allem durch die Betreiber, zum Teil unterstützt durch Modul- und Chemikalienlieferanten sowie Forschungseinrichtungen, einige Erfahrungen zur Reinigung der Membranmodule und ansatzweise auch zum Umgang mit den verbrauchten Reinigungslösungen gesammelt werden. Trotz des Austauschs dieser Erfahrungen ist eine Übertragbarkeit, z.B. auf andere Modulsysteme oder Anlagen nur begrenzt bzw. nicht möglich, so dass de facto die Betreiber jeweils selbst nach Lösungen suchen müssen.

Anhand eines übergreifenden Ansatzes unter Einbindung der Betreiber von Membrananlagen, der Membran- bzw. Modulhersteller sowie Herstellern von Reinigungsmitteln werden Chancen gesehen, auf Basis der bisherigen Erfahrungen und unter Einbeziehung der standortspezifischen und anlagentechnischen Randbedingungen, zunächst eine ökonomische und ökologische Bewertung und Optimierung durchzuführen und anschließend angepasste Optimierungswege für die Reinigung und den Umgang mit Reinigungslösungen zu entwickeln.

Einer nachhaltigen Optimierung der Reinigung entsprechend könnten durch zukünftige FuE-Vorhaben folgende Ziele verfolgt:

Ökonomische Aspekte

- Reduzierung von Häufigkeit, einzusetzenden Chemikalienmengen, Reinigungsdauer, personellem Aufwand
- Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit durch Reduzierung der Ausfallzeiten der Membranstufe (relevant für die Bemessung)
- Erhöhung der Standzeiten der Membranmodule durch Verringerung der Alterung infolge minimierter chemischer Beanspruchung
- Verwendung günstiger und effektiver Reinigungschemikalien

Ökologische Aspekte

- Erhöhung der Betriebssicherheit

- Reduzierung des Chemikalienverbrauchs
- Einsatz unkritischer Chemikalien bzw. Erhalt unkritischer Reinigungslösungen nach Gebrauch
- Ermittlung geeigneter Entsorgungswege der Reinigungslösungen nach Gebrauch

Durch die Sammlung, Aus- und Bewertung der bestehenden Daten verschiedener Anlagen und die Auswertung der Erfahrungen von Betreibern und Anbietern sollen, unterstützt durch weiterführende begleitende Untersuchungen, Optimierungspotentiale für die Großtechnik abgeleitet und zur Validierung umgesetzt werden.

5.4 Energieoptimierung / Prozesseffizienz

Die spezifischen Abwasserreinigungskosten von Membranbelebungsanlagen liegen derzeit üblicherweise höher als die für eine konventionelle biologische Behandlung. Neben den höheren Ablaufqualitäten liefern diese zwar u.a. Vorteile im Platzbedarf; diese Vorteile sind bislang jedoch nur unter spezifischen Bedingungen entscheidungsrelevant für den Bau.

In Deutschland beschränkt sich der Einsatz von Membranen in der kommunalen Abwasserreinigung derzeit zumeist auf Projekte, die öffentlich gefördert werden. Zwar liegen die Erstinvestitionen für MBR-Anlagen inzwischen auf gleichem bzw. niedrigerem Niveau als für konventionelle Anlagen; die Jahreskosten liegen jedoch höher. Neben den Investitionskosten für die Membranstufe, die trotz einer Kostenreduzierung innerhalb der letzten Jahre weiterhin einen großen Anteil der Investitionskosten (einschließlich der Membranersatzkosten) bedeuten, führen die im Vergleich zu konventionellen Kläranlagen höheren Betriebskosten, hierbei vor allem der Energiebedarf für die Membranstufe sowie die Membranersatzkosten, oftmals zum Ausschluss dieser Verfahrenstechnik bei der Planung von Anlagenerweiterungen bzw. Neuanlagen.

Für die weitere Verbreitung dieser ökologisch vorteilhaften Technologie sind daher Kostenreduzierungen anzustreben, für die eine Vielzahl von Ansätzen gesehen werden. Diese zielen unter anderem auf die verfahrenstechnische Gestaltung, Bemessung und Prozessführung von MBR-Anlagen ab. So werden bislang MBR-Anlagen zur kommunalen Abwasserreinigung ausschließlich als Stabilisierungsanlagen gestaltet. Unterschiedliche Verfahrenskonfigurationen, z.B. als Anlagen mit Vorklärung, lassen hier eine energieoptimierte Prozessgestaltung und Betriebsweise erwarten. Bzgl. der Investitionen und Betriebskosten für die Membranstufe werden Potentiale durch geeignete Pufferung des Abwassers bzw. Kanalnetzbewirtschaftung gesehen.

Eine kritische Überprüfung der Bemessung bestehender Anlagen im Hinblick auf die gewählten Sicherheiten bzw. die erzielte Reinigungsleistung lässt ebenfalls Optimierungen im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit erwarten. Daneben seien beispielhaft weitere Möglichkeiten zur Reduzierung des Energiebedarfs, wie die Optimierung der Schlammkreisläufe durch die gezielte Nutzung des Sauerstoffgehaltes der rückzuführenden Schlamm-Wasser-Ströme aus den Filtrationsbereichen, genannt. Im Allgemeinen sind bzgl. der Prozessführung bekannte steuerungs-/ regelungsbasierte Energiesparmaßnahmen im Hinblick auf die Nutzbarkeit bzw. deren besonderen Nutzen für Membranbelebungsanlagen zu prüfen.

Auch für bestehende Anlagen werden Potentiale zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit gesehen. Hauptansatzpunkte hierbei sind jeweils die Reduzierung des Energiebedarfs sowie der Investitionen.

Hierbei ermöglichen die Vielzahl und Verschiedenartigkeit der in Nordrhein-Westfalen errichteten Anlagen, z.B. hinsichtlich der eingesetzten Membransysteme, sowie die zum Teil mehrjährigen Betriebserfahrungen eine kritische Bestandsaufnahme zur Bewertung der jeweiligen ökologischen und ökonomischen Effizienz der Anlagen. Auf Basis einer Auswertung spezifischer Kosten (Investitionen, Energieverbrauch, Betriebsmitteleinsatz etc.) vor dem Hintergrund anlagenspezifischer Randbedingungen (Bemessung, Auslastung, Reinigungsleistung etc.) lassen sich Benchmarks ableiten, die die Optimierung bestehender Anlagen ermöglichen bzw. grundlegende Hinweise auf zukünftige Planungen enthalten. Weitergehend können durch die Identifikation kostenintensiver Betriebsfaktoren zusätzliche Maßnahmen zur Kostenreduzierung entwickelt werden.

Im Hinblick auf die Jahreskosten ist bekannt, dass im Vergleich zu konventionellen Kläranlagen die Investitionen mit ca. 30 bis 60 % durch die Membranstufe geprägt werden, wobei Aufwendungen für Belebungsbecken bzw. Nachklärung geringer ausfallen bzw. ganz entfallen. Die Betriebskosten werden abweichend von konventionellen Anlagen vor allem durch den Energieverbrauch zum Betrieb der Membranstufe sowie Membranersatzkosten geprägt. Als Hauptansatzpunkte für die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit werden daher vor allem die investitions- und energieoptimierte Anlagengestaltung und Betriebsführung gesehen.

Die umfangreichsten Daten zum Energieverbrauch von Membrankläranlagen wurden bislang an der KA Rödingen des Ertverbandes sowie der KA Markranstädt der Kommunalen Wasserwerke Leipzig ermittelt. Zusätzlich liegen auch Schätzungen aus der Planungsphase des GKW Nordkanal des Ertverbandes vor.

Der Energieverbrauch von Membranbelebungsanlagen ist nach STEIN ET AL. (2004) vom Trockensubstanzgehalt, von der Zulauffracht und der Zulaufmenge abhängig. Untersuchungsergebnisse auf der Kläranlage Markranstädt verdeutlichen, dass während des Einfahrbetriebes der Kläranlage der Trockensubstanzgehalt von 21 g/L durch Automatisierung des Schlammabzuges, auf 12 g/L gesenkt werden konnte, wodurch sich der spezifische Energieverbrauch von ca. 3 kWh/m³ auf 1 kWh/m³ reduzierte. Zurückzuführen ist dieses vor allem auf eine Reduzierung des Energiebedarfs zur Sauerstoffversorgung der Biozönose.

Der spezifische Stromverbrauch konnte zusätzlich durch einen stufenweisen Betrieb der Mikrofiltration entsprechend des Zuflusses und durch die Ausnutzung der grobblasigen Belüftung für die biologischen Prozesse durch Implementierung der Membranen in die Nitrifikationsstufe verringert werden.

Bedingt durch Störungen in der Prozesssteuerung verblockten zunächst die Filter auf der Kläranlage mit Rechengut, wodurch ein Anstieg des Transmembrandrucks, ein Rückgang des Durchsatzes und entsprechend eine Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs resultierten. Nach Austausch der Filter wurde das Verhältnis von Netto- zu Bruttodurchsatz wieder verbessert und der Anteil der Cross-Flow-Belüftung um ca. 50% auf 0,35 kWh/m³ verringert.

Ferner konnte auch ein Zusammenhang des Energiebedarfs zur Abwassertemperatur abgeleitet werden. Um den hydraulischen Durchsatz bei niedrigen Temperaturen aufrecht zu erhalten, ist aufgrund erhöhter Transmembrandrücke ein erhöhter Energiebedarf erforderlich.

Der spezifische Energiebedarf für die Kläranlage Knautnaundorf wurde beispielsweise mit 1,3 – 2 kWh/m³ angegeben (STEIN ET AL., 2004). Nach Angaben von ENGELHARDT (2002) betrug der spezifische Stromverbrauch auf der KA Rödingen 2,0 kWh/m³. Eine Umrüstung der Membranbelüftung zu einer zyklisch/intermittierenden Betriebsweise führte zu einer Reduzierung des Stromverbrauchs unter 1,6 kWh/m³.

Nach KRAUSE (2005) beträgt der Energiebedarf auf den realisierten großtechnischen Membranbelebungsanlagen durchschnittlich 1,4 kWh/m³. Durch Modifizierung der Systeme zur Deckschichtkontrolle soll sich der Energiebedarf auf etwa 0,7 bis 0,8 kWh/m³ reduzieren lassen (KRAUSE, 2005). Dies würde einer Energieeinsparung von etwa 40 bis 50 % entsprechen.

Die derzeit verfügbaren Daten lassen noch keine allgemeingültigen Ableitungen über den Energieverbrauch von Membrankläranlagen zu, da sie sich ausschließlich auf vereinzelte Kläranlagen beschränken. Daher besteht ein hohes wissenschaftliches und wirtschaftliches Interesse an einer ganzheitlichen Betrachtung der Problemstellungen

Prozesseffizienz und Energieoptimierung beim Membranbelebungsverfahren unter Einbeziehung der Bemessungsgrundlagen.

Der Fokus für weitere Forschungsaktivitäten muss daher sein, die Prozesseffizienz bereits in Betrieb befindlicher Membranbioreaktoren zu steigern und unterschiedliche Verfahrenskonfigurationen zu entwickeln, um somit die Wirtschaftlichkeit von Membranbioreaktoren auf ein (mindestens) mit konventionellen Anlagen vergleichbares Niveau zu erhöhen.

5.5 Elimination von Spurenstoffen

Das Land NRW untersuchte in bisherigen Forschungsvorhaben speziell den Eintrag und die Elimination gefährlicher Stoffe in Kläranlagen und entwickelte dabei eine Gruppierung relevanter Stoffe, für die bislang keine oder nur eine teilweise Elimination nachgewiesen wurde (vgl. Fahlenkamp et al., 2004). Neben einem Teil der in der Liste der prioritären Stoffe (gem. Anhang X der EU-WRRL) aufgeführten anthropogenen Schadstoffe zählen eine Reihe weiterer, dort nicht genannter Stoffe zu diesen Verbindungen, die eine Trinkwasserrelevanz besitzen. Einige Industriechemikalien (Phosphororganische Flammenschutzmittel, Nonylphenole, Bisphenol A, synthetische Moschusduftstoffe) und natürliche bzw. künstliche Hormone, insbesondere auch Pharmaka (Clarithromycin, Erythromycin, Roxithromycin, Sulfadiazin, Sulfamethazin, Sulfamethoxazol, Trimethoprim, Atenolol, Bisoprolol, Metoprolol, Nadolol, Propranolol, Sotalol, Carbamazepin, Bezafibrat, Phenazon, Naproxen, Diclofenac, Ibuprofen) und ihre Metaboliten (Clofibrinsäure) ebenso wie die in der Radiologie eingesetzten jodierten Röntgenkontrastmittel gehören zu den besonders schwer eliminierbaren Stoffen und konnten deshalb in vielfach noch in den Abläufen von Kläranlagen nachgewiesen werden (Fahlenkamp et al., 2004).

Kommunale Kläranlagen werden als Hauptemittenden dieser Stoffe gesehen (Ries et al., 2005). Demzufolge können bestehende Abwasserreinigungsverfahren bestimmte Substanzen nur unzureichend entfernen. Vor allem die persistenten, stark polaren Schadstoffe gelangen mit den Kläranlagenabläufen in die als Vorfluter genutzten Oberflächengewässer.

Im Rahmen zukünftiger FuE-Vorhaben sollte untersucht werden, wie hoch das Leistungspotenzial der Membrantechnik (insbesondere Nanofiltration, Photokatalyse-Ultrafiltration und Flockungs-Adsorptions-Ultrafiltration) in Bezug auf die Elimination ausgewählter Spurenstoffe ist und welche Vorteile sich aus einer Verfahrenskombination ergeben und welche positiven Synergieeffekte effizient genutzt werden können. Die zur Beantwortung der Fragestellungen notwendigen Untersuchungen sollten neben den Untersuchungen mit „reinen“ Membranverfahren auch Membran-Hybrid-Prozesse mit

einschließen. Das Ziel ist es, die einzelnen Verfahrensprozesse aufeinander abzustimmen und die jeweilige Leistungsfähigkeit der Kombination zu bestimmen. Ein besonderes Augenmerk sollte dabei auf der Konzentratentsorgung liegen, die bislang über i.d.R. über Eindampfung oder Verbrennung erfolgt und hohe Betriebskosten verursacht.

Wenngleich eine Vielzahl aktueller Projekte auf nationalem und internationalem Gebiet sich gegenwärtig mit der Elimination von Spurenstoffen und deren Einfluss auf die aquatische Umwelt auseinandersetzen, besteht auch weiterhin großer Forschungsbedarf. Dieser resultiert aus den bisherigen Erkenntnissen, dass allein durch den Einsatz der Membrantechnik i.d.R. kein vollständiger Rückhalt von Pharmaka und Röntgenkontrastmitteln gegeben ist, so dass zusätzliche verfahrenstechnische Applikationen wie z.B. oxidative oder adsorptive Verfahrensstufen erforderlich werden.

Die angestrebten Forschungsergebnisse können einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der zur Zeit zur Verfügung stehenden Technologie zur weitestgehenden Behandlung von Kläranlagenabläufen liefern. Neben grundlagenorientierten Erkenntnissen bzgl. der Leistungsfähigkeit verschiedener Membranverfahren dienen vor allem die Pilotversuche den Anlagenbetreibern als Empfehlung für die praxisorientierte Anwendbarkeit in der Ablaufbehandlung.

Die Voraussetzung für die Erstellung eines Maßnahmenprogramms als Umsetzungsstufe der EU-WRRL sind Kenntnisse über die Leistungsstärke verschiedener Behandlungsoptionen zur Abwasserbehandlung. Dieser Forschungsschwerpunkt soll auch die Verfahrensoption Membrantechnik dahingehend bewerten und sieht sich als konsequente Weiterführung begonnener Forschungsprojekte des Landes NRW zur Förderung der Membrantechnik.

Durch den Eingang der neu gewonnenen Ergebnisse und Informationen in die BAT-Merkblätter zu den besten verfügbaren Technologien (gemäß IVU-Richtlinie), soll eine Fortentwicklung des verfahrenstechnischen Standes der Technik der Abwasserreinigungsverfahren bzgl. der Entfernung „gefährlicher Stoffe“ ermöglicht werden.

6 Multiplikation der Projektergebnisse

Die Verbreitung der gewonnenen Erkenntnisse erfolgte mittels Fachzeitschriften, in Aufsätzen und Referaten sowie übers Internet. Zentrale Schnittstelle war dabei ein Workshop als Auftakt einer international anerkannten Fachtagung, deren großer Zuspruch die Bedeutung der Thematik belegte.

Gemäß Antrag war die Entwicklung einer Struktur einer jährlich erscheinenden Broschüre zur Membrantechnik vorgesehen. Nach Abstimmung mit dem MUNLV wurde dies nicht weiter verfolgt, da die Membrantechnik als eigenständiges Kapitel in der jüngsten Broschüre des Ministeriums unter der Rubrik „Innovative Technologien“ enthalten ist (vgl. MUNLV, 2007) und zukünftig nicht separat sondern im Zusammenhang mit alternativen Technologien zur weitergehenden Abwasserreinigung betrachtet werden soll.

Am 29. Oktober 2007 veranstaltete das ISA der RWTH Aachen im Eurogress Aachen einen eintägigen Workshop mit dem Titel „Membrantechnik in Aachen“. Dort wurden die Ergebnisse aus ausgewählten FuE-Vorhaben dargestellt, welche durch das MUNLV NRW in den letzten Jahren gefördert wurden. Kurzfassungen der Berichte wurden nach Abstimmung mit dem MUNLV in einem über den Auftragsinhalt hinaus gehenden Tagungsband dargestellt und veröffentlicht.

Das Land Nordrhein-Westfalen zählt zu den Vorreitern im Bereich der Forschung und Anwendung der Membrantechnik. Zahlreiche Institutionen haben in der Vergangenheit membranbasierte FuE-Vorhaben erfolgreich bearbeitet und den Wissensstand entscheidend erweitert.

Es wurden verschiedene Anwendungsfelder der Membrantechnik zusammengestellt, die sowohl die Abwasserreinigung als auch die Trinkwasseraufbereitung umfassen. Die Beiträge belegen eindrucksvoll, wie innovativ die Membrantechnik gegenwärtig eingesetzt werden kann und welche Betriebs- und Reinigungsergebnisse erzielt werden können.

Jede Technologie kann nur dann zukunftsfähig bleiben, wenn sie kontinuierlich angewandt und weiterentwickelt wird. Daher thematisierte der Workshop auch zukünftige Forschungsschwerpunkte. Als wichtige zukünftige Forschungsfelder kristallisierten sich insbesondere die Reduzierung des Energieverbrauchs von Membranbelebungsanlagen auf ein mit konventionellen Kläranlagen vergleichbares Niveau sowie die Reduzierung des betrieblichen Aufwandes für die Reinigung von Membranen heraus. Weitere Forschungsschwerpunkte sind z.B. die Eliminierung von Arzneimittelrückständen, die Optimierung des großtechnischen Anlagenbetriebes und die Einbindung der Membrantechnik zur Aufbreitung industrieller Teilströme zur Schließung von Wasserkreisläufen.

Der Workshop umfasste folgende Aspekte:

1. Status und Entwicklung der Membrantechnik
2. Ausbildung und Schulung in der Membrantechnik
3. Aktivkohleadsorption und Ozonung als attraktive Möglichkeiten zur Elimination organischer Spurenstoffe
4. Aufbereitung, Recycling und Wiederverwendung von Abwasser, Restflotten und Konzentraten der Membrantechnik aus der Textilveredlungsindustrie
5. Potentiale und Grenzen der Membrantechnologie in der Zellstoff- und Papierindustrie
6. Einsatz des Membranbelebungsverfahrens zur Behandlung von Abwässern aus der Molketrocknung
7. Betriebserfahrungen mit dem Membranbelebungsverfahren insbesondere bei industriellen Anwendungen
8. Betriebliche und wirtschaftliche Aspekte der separaten Erfassung und Behandlung von Krankenhausabwässern mit Membrantechnik
9. Einsatz von Membranverfahren zur Schließung von Wasserkreisläufen in der metallverarbeitenden Industrie
10. Betriebserfahrungen mit einer UF Membrananlage zur Trinkwasseraufbereitung
11. Optimierung des Betriebes der Membrankläranlage Xanten-Vynen
12. Membrananlage Simmerath – Betriebserfahrungen und Entwicklungen in vier Jahren Versuchsbetrieb
13. Vorbeugender Grundwasserschutz mit dem Membranbelebungsverfahren am Beispiel der Kläranlage Bergheim - Glessen
14. Optimierung und Weiterentwicklung der Strategien für die Reinigung von Membranen am Beispiel der Kläranlagen Nordkanal und Rödingen
15. Betriebserfahrungen auf den Membrankläranlagen Woffelsbach und Konzen

7 Empfehlungen für das MUNLV

Auf Grundlage der Projektergebnisse können folgende Empfehlungen für das MUNLV formuliert werden:

- Um das Foulingpotential und die Reinigungsintervalle zu reduzieren, sind weiterführende Forschungsaktivitäten im Bereich der Membranentwicklung erforderlich. Aus dem Bereich der Biomaterialforschung ist bekannt, dass hydrophobe Polymere dazu neigen, in hohem Maße Proteine und Bakterien zu adsorbieren. Dieser Tendenz könnte beispielsweise dadurch entgegengewirkt werden, dass die Oberfläche hydrophober Materialien hydrophiliert wird bzw. das ein Hydrogel die Oberfläche benetzt. Hierfür sind jedoch weiterführende Untersuchungen notwendig, die die Praxistauglichkeit dieser Maßnahme verifizieren.
- Im Bereich der Membraninnovation (Technikentwicklung) ist daher zu prüfen, ob neben der Oberflächenmodifizierung der Membran selbst ein Laminat entwickelt werden kann, das einerseits aus der Membran und andererseits aus einer vernetzten, mesoporigen hoch hydrophilen, aber ebenso einer entsprechenden hoch hydrophoben Folie besteht, um Kontaminationen der Oberfläche und des Inneren der wirksamen Membran zu vermeiden.
- Die Membrantechnik ist eine Technologie zur Wasser- und Abwasseraufbereitung, die zwar mehrfach erprobt aber dennoch nicht abschließend betriebstechnisch optimiert wurde. Gerade die Aufwendungen für Energie und chemische Reinigungen stellen exponierte Kostenfaktoren dar, die den Betrieb derartiger Anlagen im Vergleich zu konventionellen Kläranlagen wesentlich verteuern. Um die vorhandenen Anlagen zukunftsfähig zu gestalten und auch unter steigenden Kostengesichtspunkten weiter betreiben zu können, sind daher Bestrebungen zur Energieoptimierung unerlässlich. Diese sollten insbesondere auf Untersuchungen zur Verbesserung des Lufteintrages und der Modifizierung des Prozessdesigns wie z.B. der Implementierung einer Vorklärung mit anschließender anaeroben Klärschlammbehandlung abzielen.
- Beim Einsatz der Membrantechnologie für die Elimination von Spurenstoffen wird der Aspekt der Konzentratbehandlung bzw. -entsorgung zukünftig stärker fokussiert werden müssen. Es existiert diesbezüglich sowohl international als auch national ein großer Forschungsbedarf. Sollte es gelingen, durch eine optimierte Prozessgestaltung bzw. Konzentratbehandlung, die zur Entsorgung anfallenden Mengen entscheidend zu reduzieren, würden die Membrananwendungen weiter gesteigert werden können und evtl. Risiken wie z.B. die Entstehung und

langfristige Wirkung von Oxidationsnebenprodukten bei der Ozonung ausschließen.

Sowohl Betreiber von Membranbelebungsanlagen als auch Forschungsinstitutionen haben ein ausgeprägtes Interesse, die Anwendung der Membrantechnik weiter auszubauen. Dies wird jedoch nur möglich sein, wenn die o.g. weiterführenden Untersuchungen, die in enger Abstimmung mit Entwicklern und Anwendern durchzuführen sind, kurzfristig erfolgen. Nur so kann die Membrantechnologie zukunftsfähig ausgerichtet werden. Alternativ wird die Membrantechnik in der kommunalen Abwasserreinigung auf Dauer keine flächendeckende Verbreitung finden können, da diese derzeit nur bei erhöhten Ablaufanforderungen wirtschaftlich vorteilhaft gegenüber konventionellen Kläranlagen ist.

8 Literatur

DORGELOH, E. (2000)

Betriebserfahrungen mit Membranbioreaktoren im Ausland. GWA Band 177, 33. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. M. Dohmann, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen

ENGELHARDT, N. (2002)

Wirtschaftlichkeit einer großtechnischen kommunalen Membranbelebungsanlage am Beispiel der Kläranlage Nordkanal (80.000 EW) des Erftverbandes. In GWA Band 188. Begleitbuch zur 35. Essener Tagung. Aachen.

FAHLENKAMP, H.; HANNICH, C. B.; MÖHLE, E.; NÖTKE, N.; RIES, T. (2004)

Eintrag und Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunalen Kläranlagen. Chemie Ingenieur Technik, 76 (8), S. 1179 - 1189.

GIMBEL, R. (2007)

Stand der Technik und Wissenschaft beim Einsatz der Membrantechnik bei der Trinkwassergewinnung – State of the art of membrane technology to produce drinking water. Vortrag /. Aachener Tagung Wasser und Membranen. 30.10.2007, Aachen.

KRAUSE, S. (2005)

Untersuchungen zum Energiebedarf von Membranbelebungsanlagen. Schriftenreihe WAR 166. Diss. Technische Universität Darmstadt.

LESJEAN, B.; HUISJES, E. H. (2007)

Survey of European MBR market, trends and perspectives. Proceedings of IWA 4th International Membrane Technologies Conference, 15 - 17 May 2007, Harrogate, UK

LIPP, P. (2007)

Membrantechnik in der öffentlichen Trinkwasserversorgung (Stand 2007) Vortrag /. Aachener Tagung Wasser und Membranen. 30.10.2007, Aachen.

PINNEKAMP, J.; ITOKAWA, H.; THIEMIG, CH. (2006)

Membrantechnik in Europa; 39. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp, Aachen

PINNEKAMP, J. (2007)

Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben „Optimierung der Gestaltung und des Betriebes von Membranbelebungsanlagen in der kommunalen Abwasserreinigung“, gefördert durch das BMBF, AZ: 02WA0596

RIES, T.; MERTSCH, V. (2004)

Vorschläge zur Überarbeitung der Anhänge gem. § 7a WHG. Begleitbuch zur 38. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. GWA – Band 198. (Hrsg.) Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.. Aachen.

Anhang

Tagungsprogramm zum Workshop Membrantechnik in NRW