

Abschlussbericht
zum Forschungsvorhaben:

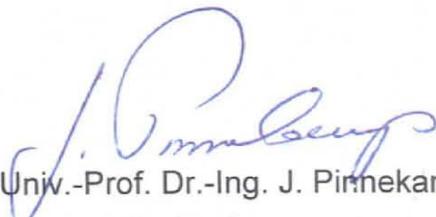
**„Begleitprojekt zu FuE-Vorhaben im Bereich der
Membrantechnik in Nordrhein-Westfalen (FEMem)“**

AZ IV – 9 – 042 1C4

für das



Aachen, im März 2008


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

Projektbearbeitung

Partner	Bearbeiter
 <p>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</p>	<p>Dipl.-Ing. S. Beier Dipl.-Ing. D. Arndt Dr.-Ing. S. Köster</p>

Inhalt

1	Zusammenfassung	6
2	Veranlassung und Zielsetzung	13
3	Vorgehensweise	15
3.1	Komponente 1: Auswertung der großtechnischen Projekte	15
3.2	Komponente 2: Erarbeitung von Empfehlungen zu zukünftigen Förderschwerpunktthemen.....	15
3.3	Komponente 3: Multiplikation der Projektergebnisse.....	16
4	Komponente 1 – Stand der Anwendung der Membrantechnik	17
4.1	Theoretische Grundlagen	17
4.2	Kommunale Abwasserreinigung	21
4.2.1	Stand weltweiter Anwendungen	21
4.2.2	Stand europäischer Anwendungen	23
4.2.3	Stand nationaler Anwendungen	24
4.3	Industrielle Abwasserreinigung.....	27
4.4	Trinkwasseraufbereitung	28
4.4.1	Stand weltweiter Anwendungen	28
4.4.2	Stand nationaler Anwendungen	30
5	Auswertung verschiedener FuE-Projekte	32
5.1	Angeschlossene Einwohner	32
5.2	Vergleich der erzielten Ablaufqualitäten	33
5.3	Vorreinigung	40
5.4	Energieverbrauch	44
6	Komponente 2 – Ableitung von zukünftigen Forschungsaktivitäten und Empfehlungen für das MUNLV	48
6.1	Entwicklung eines nachvollziehbaren und reproduzierbaren Bewertungskataloges für das MUNLV	48
6.2	Membraninnovation	48

6.3	Reinigung Membranflächen.....	50
6.4	Energieoptimierung / Prozesseffizienz	53
6.4.1	Konventionelle Kläranlagen.....	54
6.4.2	Membrankläranlagen.....	57
6.5	Elimination von Spurenstoffen	58
7	Komponente 3 – Multiplikation der Projektergebnisse	61
8	Empfehlungen für das MUNLV.....	63
9	Literatur	65

ANHANG

Anhang 1	Verzeichnis der geförderten FuE-Projekte
Anhang 2	Kenndaten der Membranbelebungsanlagen
Anhang 3	Bewertungsbogen für FuE-Vorhaben Membrantechnik
Anhang 4	Tagungsprogramm und Tagungsband zum Workshop „Membrantechnik in Nordrhein-Westfalen“

Verzeichnis der Abbildungen

Bild 1-1: Leistungsvergleich für die Parameter CSB, Nges und Pges	8
Bild 1-2: Energieverbräuche ausgewählter MBR.....	9
Bild 4-1: Einteilung der druckbetriebenen Membranverfahren (IVT, 2007)	18
Bild 4-2: Dead-End-, Cross-flow- und Semi-Cross-flow-Betrieb (nach Kramer, 2007).....	19
Bild 4-3: Weltweite Entwicklung kommunaler Membranbelebungsanlagen	22
Bild 4-4: Kommunale Membranbelebungsanlagen in Europa	23
Bild 4-5: Entwicklung der Membranbelebungsanlagen in Deutschland.....	25
Bild 4-6: Entwicklung der Membrantechnik im Trinkwassersektor weltweit (GIMBEL, 2007)	28
Bild 4-7: Entwicklung der Membrantechnik im Trinkwassersektor in Deutschland (Gimbel, 2007).....	30
Bild 5-1: Größenklassenverteilung aller in Deutschland im Betrieb befindlichen Membrankläranlagen im Vergleich zu den 1999 in NRW betriebenen konventionellen Kläranlagen	33
Bild 5-2: Vergleich der CSB-Konzentrationen im Ablauf	36
Bild 5-3: Vergleich der BSB-Konzentrationen im Ablauf.....	36
Bild 5-4: Vergleich der Gesamtphosphor-Konzentrationen im Ablauf	37
Bild 5-5: Vergleich der NH ₄ -N-Konzentrationen im Ablauf.....	38
Bild 5-6: Vergleich der Gesamtstickstoff-Konzentrationen im Ablauf	39
Bild 5-7: Vergleich des Energieverbrauchs deutscher kommunaler Membranklär- anlagen.....	45
Bild 5-8: Spez. Stromverbrauch der KA Monheim (WEDI ET AL., 2006)	47
Bild 6-1: Aufbau des Projektes Membraninnovation.....	49

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 4-1: Verteilung Membranbelebungsanlagen weltweit, Stand 2007 (PINNEKAMP, 2007; PINNEKAMP ET AL., 2006; LESJEAN UND HUISJES, 2007; DORGELOH, 2000)	21
Tabelle 4-2: Behandelte Abwassermengen in Membranbelebungsanlagen weltweit, Stand 2007 (PINNEKAMP, 2007; PINNEKAMP ET AL., 2006; LESJEAN UND HUISJES, 2007; DORGELOH, 2000)	22
Tabelle 4-3: Membranbelebungsanlagen in Deutschland.....	25
Tabelle 4-4: Aufstellung der größten MF- und UF-Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung (GIMBEL, 2007).....	29
Tabelle 4-5: Aufstellung der größten MF- und UF-Anlagen zur Trinkwasser-aufbereitung in Deutschland (LIPP, 2007).....	31
Tabelle 5-1: Beurteilung der Ablaufqualität (DWA, 2003).....	34
Tabelle 5-2: Vergleichende Gegenüberstellung von ablaufrelevanten Parametern konventionelle Kläranlagen gegenüber Membrankläranlagen (MÜLLER-CZYGAN, 2004).....	35
Tabelle 5-3: Mittlere Zulaufkonzentrationen bei kommunalen Kläranlagen mit häuslichem Abwasser und Anforderungen an den Ablauf nach Anhang 1 zur Abwasserverordnung in Abhängigkeit von Größenklassen.....	40
Tabelle 5-4: Ausgeführte Vorbehandlungsstufen an MBR-Anlagen (FRECHEN ET AL., 2008)	41
Tabelle 6-1: Energieverbrauch im Rahmen der Abwasserreinigung (MURL, 1999)	55

1 Zusammenfassung

Druckgetriebene Membranverfahren wie die Mikro-, Ultra-, Nanofiltration und Umkehrosmose nehmen mittlerweile sowohl in der Trinkwasseraufbereitung als auch in der Abwasserbehandlung eine Schlüsselrolle ein. Die Membrantechnik bietet innovative verfahrenstechnische Lösungsansätze und etabliert sich daher zunehmend in der Praxis. In Deutschland – und hier insbesondere in Nordrhein-Westfalen (NRW) – wurden in den letzten Jahren zahlreiche großtechnische Umsetzungen realisiert. International spielt die Membrantechnologie ebenso eine wichtige und vielseitige Rolle. Neben der Meerwasserentsalzung findet die Membrantechnik z.B. bei der weitergehenden Abwasserbehandlung und dem Wasserrecycling Anwendung.

Das ausgeprägte Interesse, mit dem die Membrantechnologie begleitet wird, drückt sich in einer Vielzahl wissenschaftlicher Publikationen, nationaler und internationaler Konferenzen sowie in der Arbeit zahlreicher Expertengremien aus, die die Weiterentwicklung der Membrantechnologie zum Ziel haben.

NRW 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 Forschungskennnisse, 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 (vgl. Anhang 3).

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.

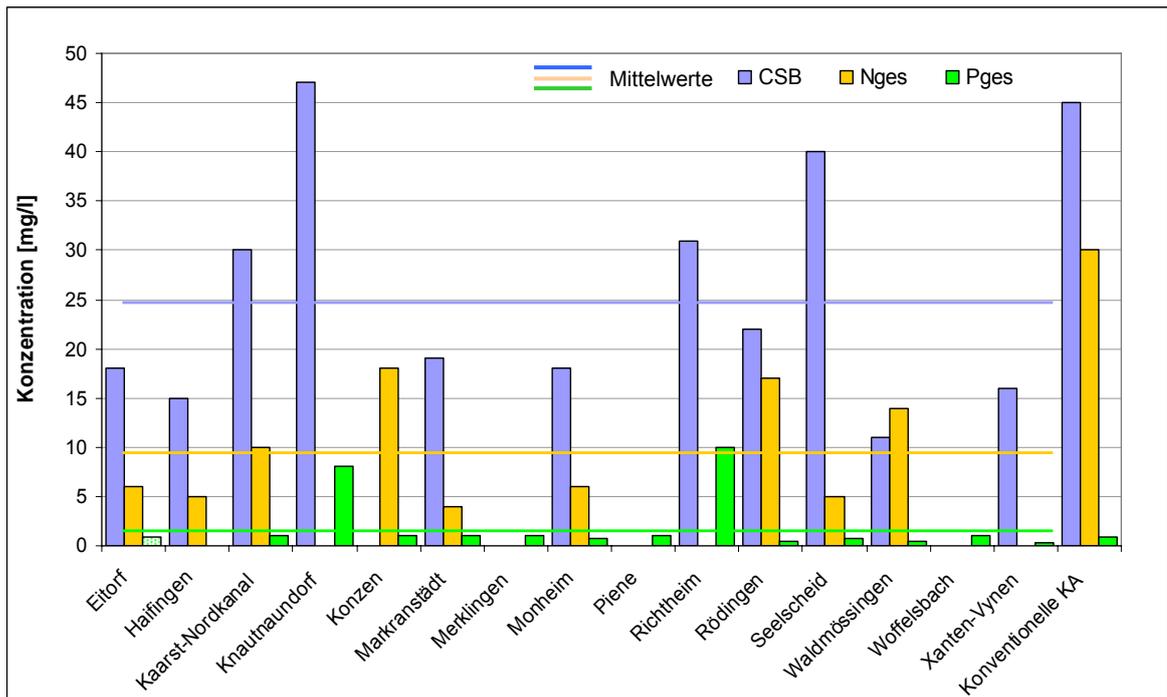


Bild 1-1: Leistungsvergleich für die Parameter CSB, Nges und Pges

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 filtriertes 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.

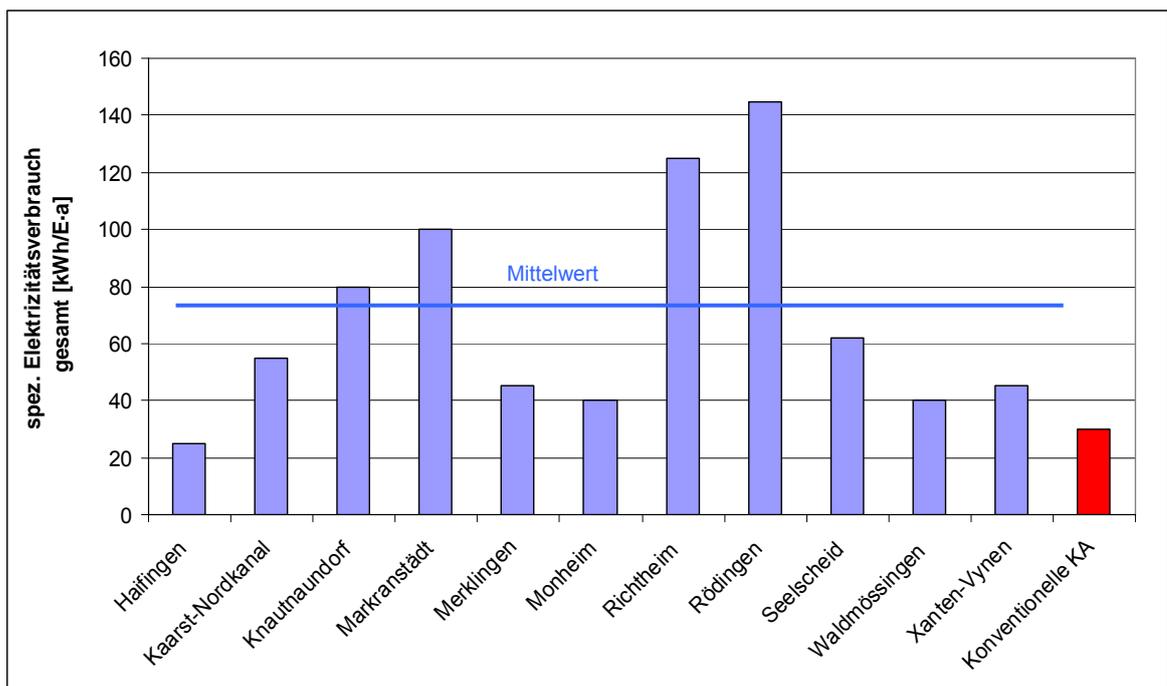


Bild 1-2: Energieverbräuche ausgewählter MBR

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 gewonnenen 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. dass 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. Dieser ist als Anlage diesem Bericht beigelegt.

2 Veranlassung und Zielsetzung

Die EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) definiert europaweit verbindliche Qualitätsvorgaben für Oberflächengewässer und das Grundwasser. Primäre Zielsetzung ist, bis zum Jahr 2015 einen guten ökologischen Zustand zu erreichen. Vor diesem Hintergrund gilt es, bzgl. der Abwasserreinigung das bisher Erreichte zu bewahren bzw. weiterzuentwickeln und neue Herausforderungen anzunehmen. Hier ist insbesondere die Elimination gefährlicher Stoffe aus dem Abwasser zu nennen. Als gefährliche Stoffe werden im Sinne der WRRL Art. 2 die Stoffe oder Stoffgruppen verstanden, die toxisch, persistent und bioakkumulierbar sind und weitere, die in ähnlichem Maße Anlass zur Besorgnis geben (RICHTLINIE 2000/60/EG).

Perspektivisch soll jeglicher Eintrag beziehungsweise jegliche Einleitung von gefährlichen Stoffen in die aquatische Umwelt unterbunden werden. Entsprechende Quellen für gefährliche Stoffe sind industrielle bzw. gewerbliche Abwässer, häusliche Abwässer (z. B. durch Haushaltschemikalien und Medikamente) und belastetes Niederschlagswasser (z. B. durch Straßenabrieb, verschmutzte Dachflächen). Somit stellen auch Einleitungen aus kommunalen und industriellen Abwasserreinigungsanlagen einen maßgeblichen Eintragspfad für gefährliche Stoffe dar.

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, Anwendern 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, der als Anhang diesem Bericht enthalten ist.

4 Komponente 1 – Stand der Anwendung der Membrantechnik

Druckgetriebene Membranverfahren wie die Mikro- und Ultrafiltration, Nanofiltration und Umkehrosmose nehmen mittlerweile im Bereich der Trinkwasseraufbereitung und Abwasserbehandlung eine Schlüsselrolle ein. Die Membrantechnik hat sich in der Praxis etabliert und wird zunehmend großtechnisch eingesetzt und bildet das Kernstück vieler moderner Behandlungssysteme. International spielt die Membrantechnik eine bedeutende und vielseitige Rolle insbesondere in Form von Membranbioreaktoren in der kommunalen und industriellen Abwasserbehandlung.

Die Technologie unterliegt einer ständigen Weiterentwicklung durch umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeit, die neben technisch-wirtschaftlichen Aspekten auch entscheidend von politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen beeinflusst werden.

4.1 Theoretische Grundlagen

Das Membranbelebungsverfahren modifiziert die konventionelle biologische Abwasserreinigung mit einer Phasenseparationseinheit, der so genannten Membranfiltration. Durch die dabei im Belebungsbecken eingesetzten Membranfilter ist es möglich, auf eine Nachklärung zu verzichten, da die Membranen das gereinigte Abwasser von der im Belebungsbecken suspendierten Biomasse separieren.

Bedingt durch höhere Biomassekonzentrationen im Belebungsbecken können Membranbelebungsanlagen mit geringeren Belebungsbeckenvolumina betrieben werden. Unter Umständen können die Belebungsbecken um bis zu 80% im Vergleich zu konventionellen Belebungsbecken verkleinert werden (PINNEKAMP UND FRIEDRICH, 2006).

Grundsätzlich gibt es unterschiedliche Möglichkeiten zur integrierten Anordnung der Membranenstufe. Zum Teil werden diese intern in die Belebungsstufe getaucht oder alternativ in einem separaten Becken der Belebung nachgeschaltet.

Alle bisher in Betrieb genommenen oder geplanten kommunalen Membranbelebungsanlagen wurden bzw. werden entweder als Mikrofiltrations- oder als Ultrafiltrationsanlage betrieben. Die Zuordnung zum jeweiligen Verfahren erfolgt über die Porenweite der Membran, ausgedrückt als spezifische Partikel- bzw. Molekülgröße der eingesetzten Membranen. Im Allgemeinen wird bei Poren zwischen 0,1 und 10 μm von einem Mikrofiltrationsverfahren gesprochen und bei einer Porengröße zwischen 0,01 und 0,1 μm von einer Ultrafiltration (vgl. Bild 4-1).

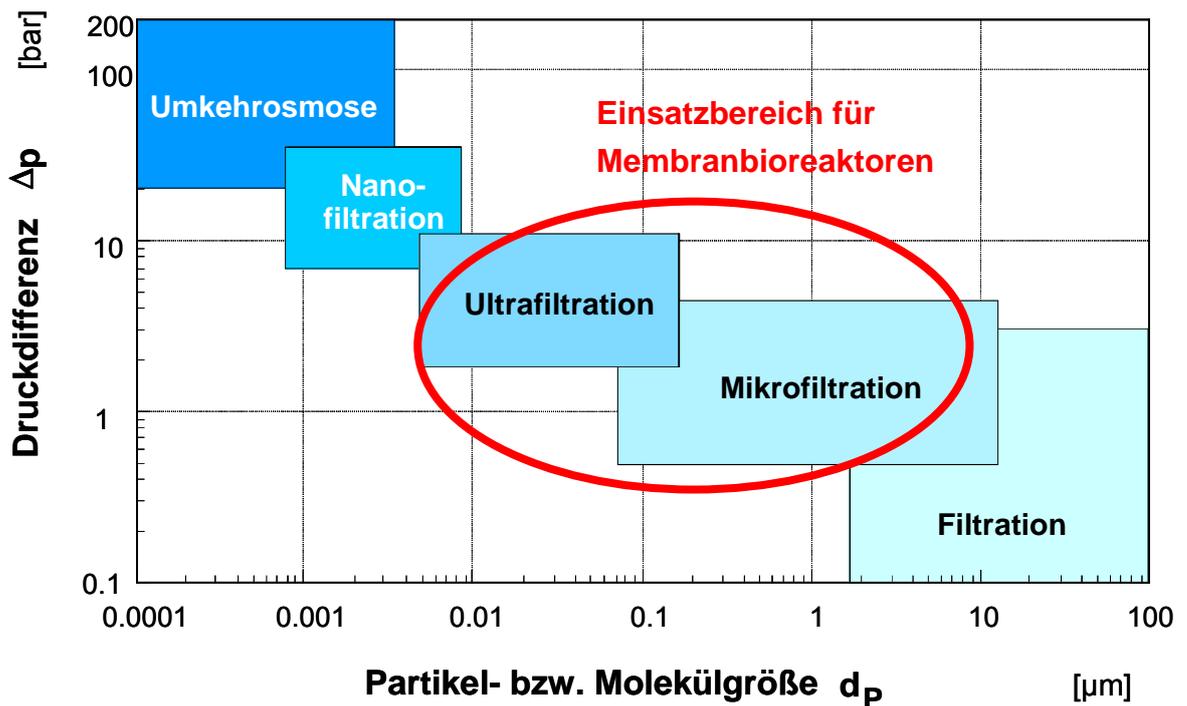
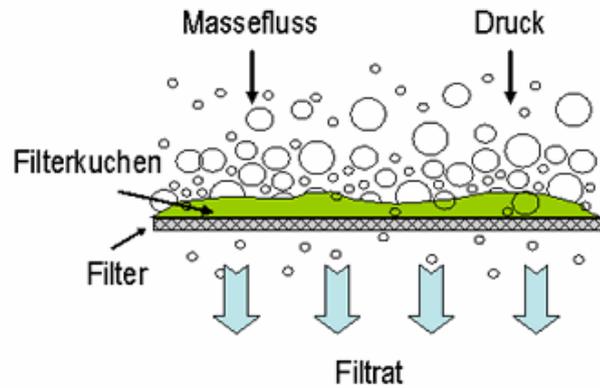


Bild 4-1: Einteilung der druckbetriebenen Membranverfahren (IVT, 2007)

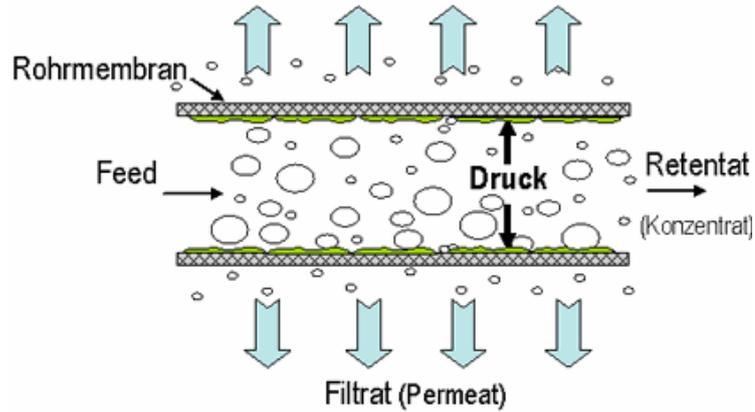
Die Leistungsfähigkeit der Mikrofiltration unterscheidet sich deutlich von der Ultrafiltration. Die Porengröße der Mikrofiltration schließt ein Durchdringen der Membran von allen Partikeln mit der Größe von Bakterien (z. B. E.coli) aus. Diese Reinigungsleistung ist zur Abtrennung von Feststoffen aus dem Rohabwasser völlig ausreichend. Die Ultrafiltration hingegen ist in der Lage, makromolekulare und kollidal gelöste Stoffe zu separieren und so eine Entkeimung zu gewährleisten. Beide Verfahren vereint, dass ein Virenrückhalt aus dem Abwasser nicht vollständig erfolgt. Hierfür müsste auf Nanofiltrations- bzw. Umkehrosmosemembranen zurückgegriffen werden.

Neben der Unterscheidung zwischen den zwei Verfahrensarten Mikro- und Ultrafiltration werden beim Membranbelevungsverfahren drei Betriebsarten unterschieden: dem Dead-End-Betrieb, dem Cross-flow-Betrieb und dem Semi-Cross-flow-Betrieb. Die Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich des Anströmwinkels des Rohabwassers zur Membran (vgl. Bild 4-2).

Dead-End-Betrieb:



Cross-flow-Betrieb:



Semi-Cross-flow-Betrieb:

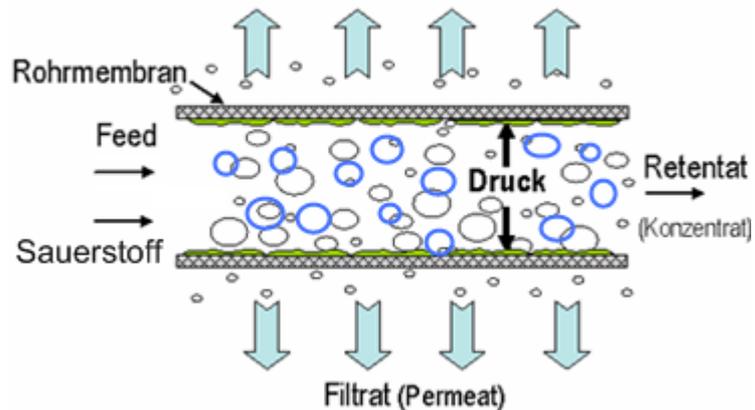


Bild 4-2: Dead-End-, Cross-flow- und Semi-Cross-flow-Betrieb (nach Kramer, 2007)

Beim Dead-End-Betrieb wird das Feed senkrecht durch die Membranen gedrückt. Diese Beschickung der Membran führt nach kurzer Zeit zur Bildung einer Deckschicht. Dieser Umstand ist hauptverantwortlich dafür, dass die Reinigungsleistung einer Membran mit Deckschicht oft wesentlich besser ist als die ohne Deckschicht. Bedeutender Nachteil ist aber, dass mit zunehmender Schichtdicke ein höherer Transmembrandruck nötig ist, um gleiche Volumina zu filtrieren. Da dieser Druck überwiegend in Form von Unterdruck mittels Pumpen erzeugt wird, ist es wichtig, die Schichtdicke auf ein bestimmtes Maß zu begrenzen. Im Dead-End-Betrieb geschieht dies z.B. durch diskontinuierliches Rückspülen der Membranen mit Filtrat.

Beim Cross-flow-Betrieb wird die Deckschichtbildung dadurch reduziert, dass das Feed parallel an der Membran vorbei geführt wird. Dieser Wasserstrom in Hauptfließrichtungen löst dabei permanent Deckschichtpartikel von der Membranoberfläche ab.

Beim Semi-Cross-flow-Betrieb handelt es sich um eine Kombination aus den beiden voran genannten Betriebsarten. Das Feed wird wie im Cross-Flow-Betrieb parallel zur Membran geführt. Es hat sich aber in der Praxis gezeigt, dass die Überströmung mit Feed meist nicht ausreicht, um eine gleichmäßige Deckschicht zu erzeugen. Um das ständige Anwachsen der Deckschicht zu verhindern, wird beim Semi-Cross-flow-Betrieb eine zusätzliche Belüftung in der Hauptstromrichtung etabliert.

Weltweit gibt es mittlerweile zahlreiche Anbieter von Membranen für Membranbelebungsanlagen. Diese Hersteller produzieren zwei grundsätzlich zu unterscheidende Membranformen: röhrenförmige oder flache.

Kapillar- und Hohlfasermodule sind die gebräuchlichsten röhrenförmigen Membranen. Sie können preisgünstig hergestellt werden und erreichen eine hohe Packungsdichte, neigen aber häufig zu Verzopfungen.

Die in der kommunalen Abwasserreinigung am häufigsten eingesetzten Modulformen sind Plattenmodule. Im Gegensatz zu den röhrenförmigen Modulen kann bei dieser Bauform jede einzelne Membran ausgewechselt werden. Grundsätzlich neigen sie weniger zu Verzopfungen; jedoch ist die Packungsdichte im Vergleich zu Kapillar- und Hohlfasermodulen geringer.

In den letzten Jahren hat sich der Einsatz der Membrantechnik für eine Vielzahl von Anwendungen in der Wasser- und Abwasserbehandlung bewährt. Ist z.B. eine weitgehende Entkeimung der Einleitungen aus biologischen Reinigungsanlagen erforderlich, stellen Membranbelebungsanlagen ein sinnvolles Verfahren dar. Zunehmend setzen sich auch im industriellen Bereich produktionsintegrierte Maßnahmen, z.B. Membranstufen zur Aufbereitung und Rückführung von Prozesswässern, durch.

4.2 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.

4.2.1 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 4-3 wird die weltweite Entwicklung der Anlagenzahlen und -kapazitäten für die Jahre 1999 bis 2007 grafisch dargestellt.

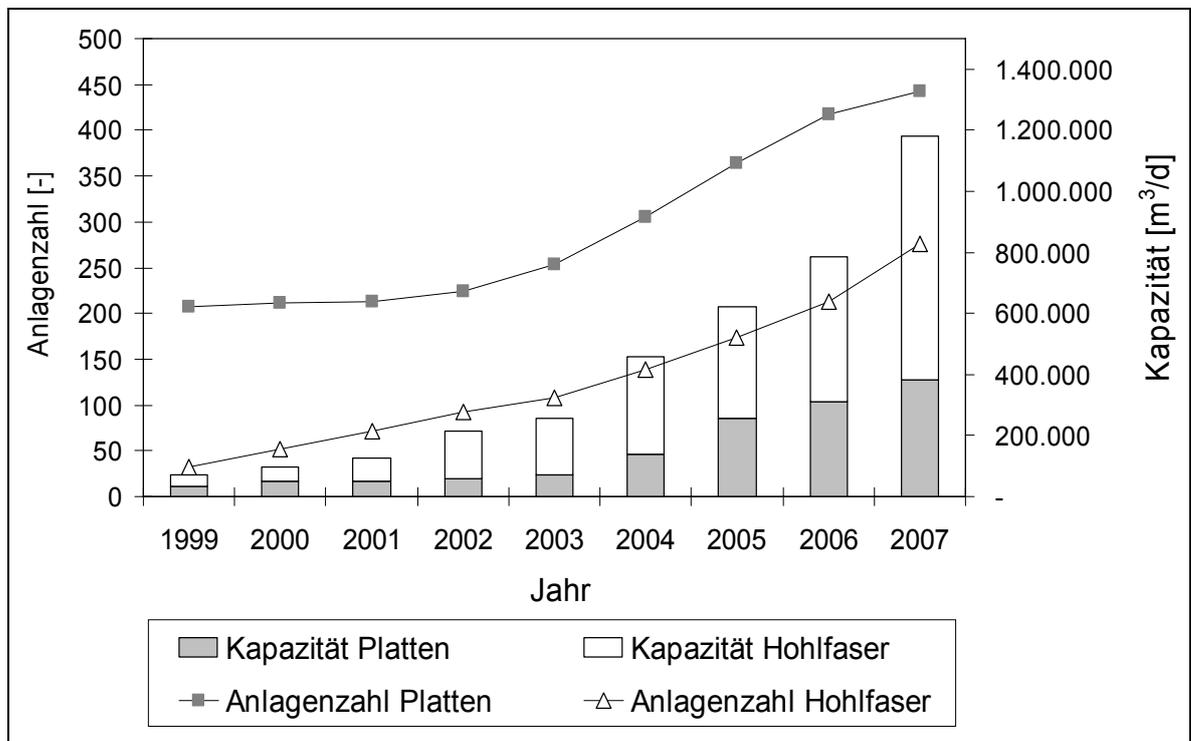


Bild 4-3: Weltweite Entwicklung kommunaler Membranbelebungsanlagen

4.2.2 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 4-4 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).

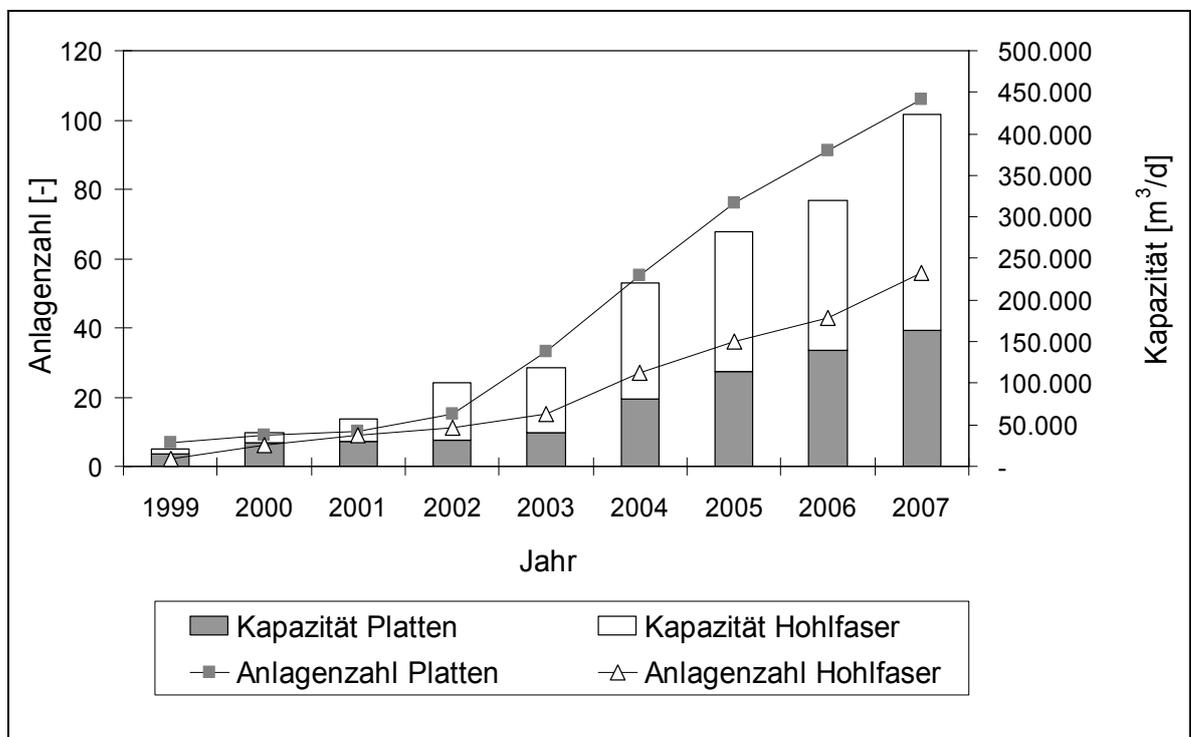


Bild 4-4: Kommunale Membranbelebungsanlagen in Europa

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.

4.2.3 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 Rödigen 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 4-5 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.

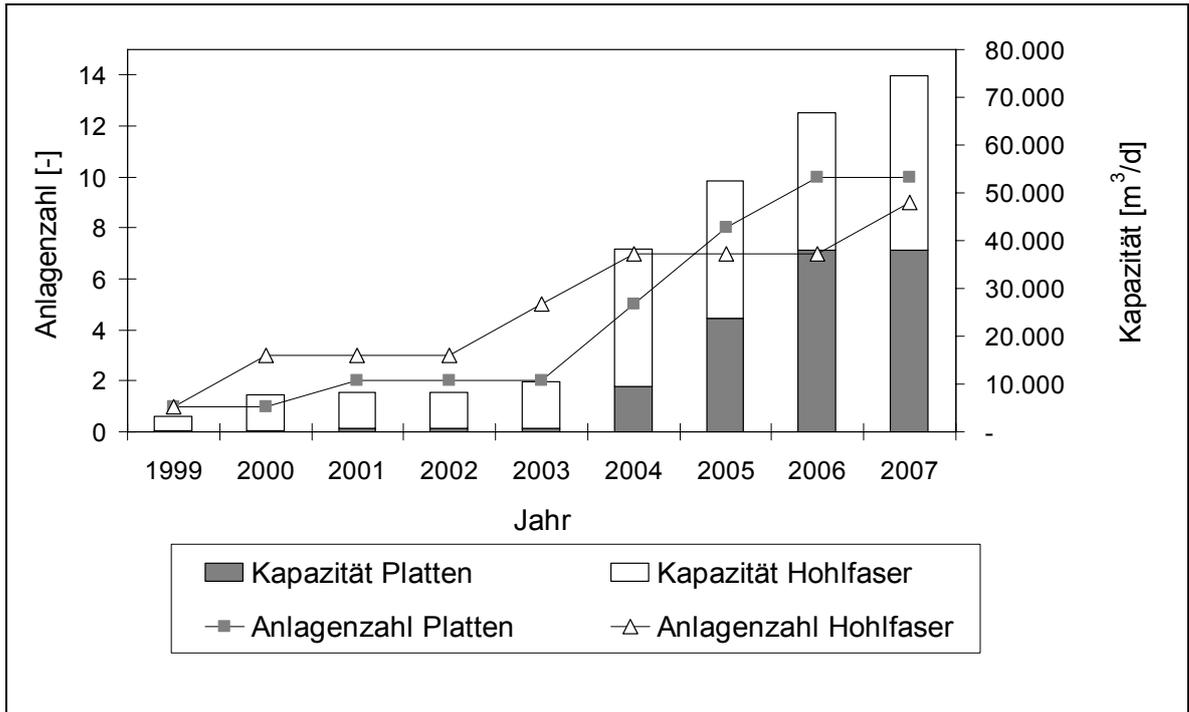


Bild 4-5: Entwicklung der Membranbelebungsanlagen in Deutschland

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 Betriebs-erfahrungen 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.

4.3 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, 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 –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.

4.4 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.

4.4.1 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 4-6).

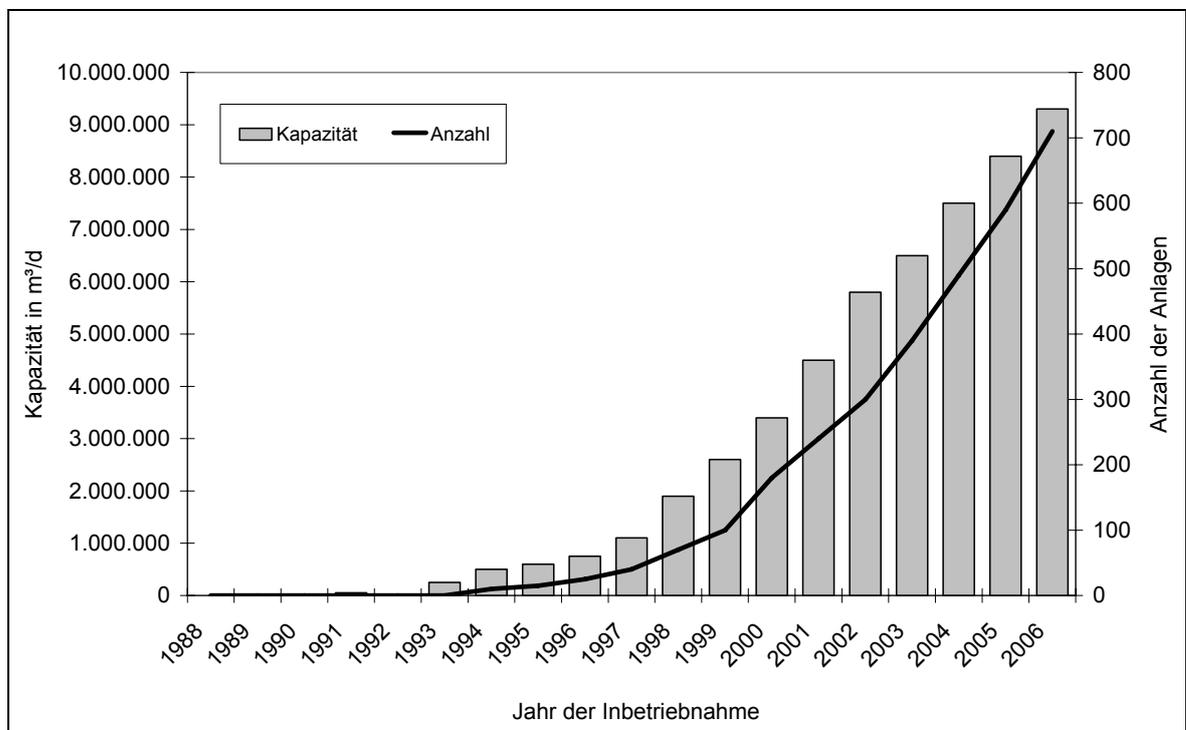


Bild 4-6: Entwicklung der Membrantechnik im Trinkwassersektor weltweit (GIMBEL, 2007)

Beginnend in 1988 hat ein stetiger 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.

4.4.2 Stand nationaler Anwendungen

In Deutschland hat sich der Einsatz von Membrananlagen zur Trinkwasseraufbereitung ebenfalls bewährt und gewinnt zunehmend an Bedeutung (siehe Bild 4-7). 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.

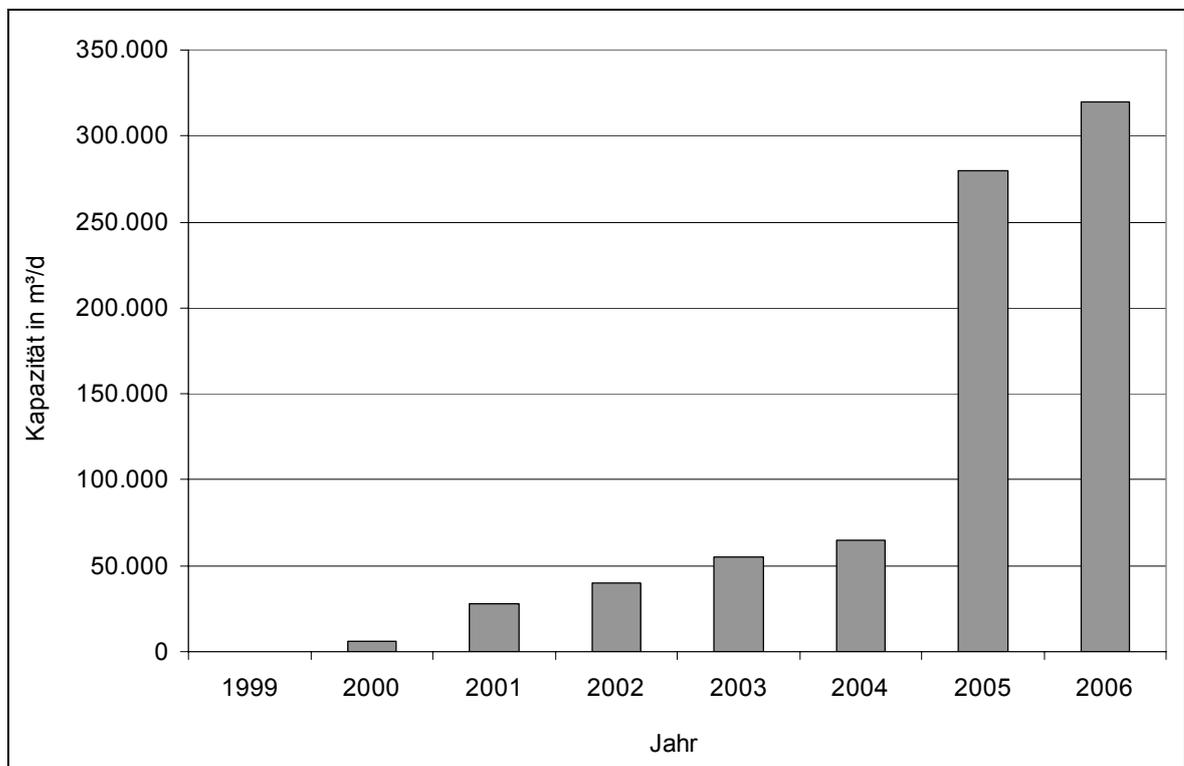


Bild 4-7: Entwicklung der Membrantechnik im Trinkwassersektor in Deutschland (GIMBEL, 2007)

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 Auswertung verschiedener FuE-Projekte

Derzeit werden in Deutschland insgesamt 19 kommunale Kläranlagen mit einer Membranfiltration betrieben. Mit Ausnahme der KA Simmerath befinden sich alle Anlagen im Dauerbetrieb. Darüber hinaus gibt es noch zwei Anlagen, bei denen *nur* das Prozesswasser einer Membranfiltration zugeführt wird (KA Dormagen und Kohlfurth) sowie eine Anlage, in der das Membranverfahren als Tertiary Treatment (Nachbehandlung des Kläranlagenablaufs) angewendet wird (KA Bondorf-Hailfingen).

Die in NRW betriebenen Anlagen wurden zum großen Teil durch Mittel des MUNLV NRW unterstützt. Im Vorfeld zu der Realisierung dieser Anlagen wurden, ebenfalls mit finanzieller Mithilfe des MUNLV NRW, Forschungsprojekte zur Umsetzung und Machbarkeit an den jeweiligen Standorten durchgeführt. Eine detaillierte Übersicht über die bewilligten und durchgeführten nationalen und internationalen FuE-Vorhaben ist im Anhang 1 dargestellt.

Im Anhang 2 sind die Kenndaten und Verfahrensschema einschlägiger Membranbelebungsanlagen in Abhängigkeit des Membrantyps aufgeführt. Bei der Einordnung der Kläranlagen in Mikro- und Ultrafiltrationsanlagen ist zu beachten, dass alle Module der Firma Kubota mit einer Porengröße von 0,4 µm ausgestattet sind und somit genau im Übergangsbereich von Mikro- und Ultrafiltration liegen. Sie wurden im Folgenden „auf der sicheren Seite“ der Mikrofiltration zugeordnet.

Ein Vergleich der Leistungsfähigkeit kommunaler Membrankläranlagen kann auf verschiedenen Ebenen erfolgen. Hier wurde ein Vergleich vornehmlich auf die angeschlossenen Einwohnerwerte bezogen vorgenommen sowie der sich daraus ergebenden Ausbaugrößen und die Ablaufwerte. Ein weiteres Augenmerk liegt auf dem Vergleich der Vorreinigung von Membranbelebungsanlagen und des Energieverbrauchs der Anlagen. Dieser entspricht im Folgenden dem Stromverbrauch. Der Energieverbrauch in Form von Wärme oder Kraft (z. B. zur thermischen Schlammbehandlung oder zu Verdichtungszwecken) sowie eine mögliche Energierückgewinnung aus energetisch verwerteten Faulgasen wurde nicht weiter verfolgt.

5.1 Angeschlossene Einwohner

Das Spektrum der angeschlossenen Einwohner erstreckt sich von sehr kleinen Anlagen mit 100 angeschlossenen Einwohnern bis zu großen Anlagen mit rund 80.000 angeschlossenen Einwohnern. Bild 5-1 zeigt die Bandbreite der angeschlossenen Einwohner in Größenklasse. Diese Abbildung zeigt, dass weniger als 1% der Einwohner an Anlagen kleiner 1.000 Einwohnerwerte angeschlossen sind. Bild 5-1 stellt zudem einen Vergleich der untersuchten Membrankläranlagen mit konventionellen kommunalen

Kläranlagen aus dem Jahr 1999 in Nordrhein-Westfalen dar. Die Daten für Nordrhein-Westfalen stammen aus einer umfassenden Befragung kommunaler Kläranlagenbetreiber. Bei der Auswertung dieser Befragung wurde wenig Wert auf eine differenzierte Betrachtung kleiner Anlagen gelegt. Sie werden alle in der Größenklasse kleiner 10.000 Einwohnern zusammengefasst.

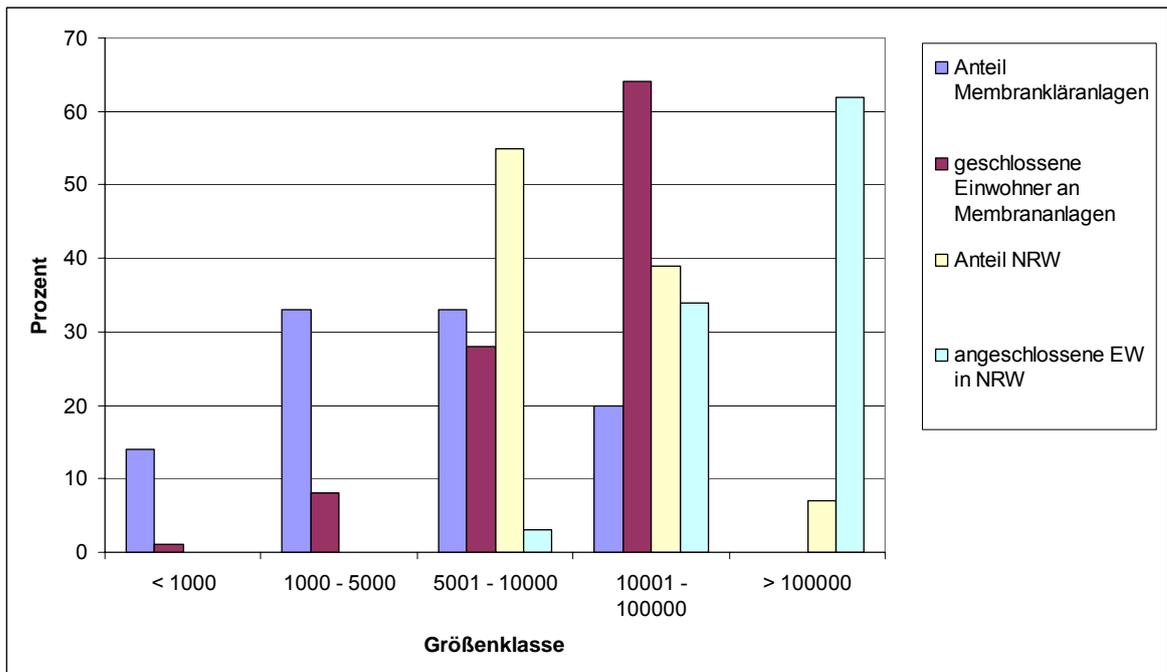


Bild 5-1: Größenklassenverteilung aller in Deutschland im Betrieb befindlichen Membrankläranlagen im Vergleich zu den 1999 in NRW betriebenen konventionellen Kläranlagen

5.2 Vergleich der erzielten Ablaufqualitäten

Sehr häufig entscheiden sich Kläranlagenbetreiber für den Einsatz der Membrantechnik um den hohen Anforderungen an die Ablaufqualität gerecht werden zu können. Die geforderten Ablaufqualitäten werden mit z.T. sehr unterschiedlicher Membrananlagentechnik und mit unterschiedlich angeordneten Anlagenteilen der ersten und zweiten Reinigungsstufe erreicht.

Damit ist ein Vergleich der unterschiedlichen Verfahrensweisen schwierig, auch weil die Anlagen unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen. Infolgedessen werden die Ergebnisse hier neben einander aufgeführt, ohne diese zu bewerten. Dargestellt werden die Ablaufwerte, soweit bekannt. Zusätzlich werden die fünf Stufen der Restverschmutzung im Ablauf einer Kläranlage, welche 2003 von der DWA als Hilfestellung veröffentlicht

wurden, aufgezeigt. Hier wurden den 5 Parametern BSB₅, CSB, NH₄-N, N_{ges} und P_{ges} Grenzwerte zugewiesen, die der verbleibenden Restverschmutzung im Ablauf einen Sauerstoffbedarf oder eine Nährstoffbelastung zuordnen. Dieser Bedarf kann zwischen „sehr gering“ und „sehr groß“ schwanken (vgl. Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Beurteilung der Ablaufqualität (DWA, 2003)

Stufe	Restverschmutzung	Sauerstoffbedarfsnutzung			Nährstoffbelastungsstufen	
		BSB ₅	CSB	NH ₄ -N	N _{ges}	P _{ges}
		mg/l				
1	sehr gering	bis 5	bis 30	bis 1	bis 8	bis 0,5
2	gering	6 bis 10	31 bis 50	2 bis 3	9 bis 13	0,6 bis 1,0
3	mäßig	11 bis 20	51 bis 90	4 bis 10	14 bis 18	1,1 bis 2,0
4	groß	21 bis 30	91 bis 120	11 bis 20	19 bis 35	2,1 bis 5,0
5	sehr groß	über 30	über 120	über 20	über 35	über 5,0

Nicht für alle Anlagen sind entsprechende Ablaufwerte bekannt. Zu beachten ist weiterhin, dass die Betriebswerte einiger Anlagen nur relativ kurze Betriebszeiträume beschreiben. Ablaufwerte über mehrere Jahre liegen selten vor, da viele Anlagen noch nicht lange in Betrieb sind. Abgesehen davon ist es auch für ältere Anlagen nicht sinnvoll, auf sehr lange Analysezeiträume zurückzugreifen, denn auch dort werden relativ regelmäßig Veränderungen an der Anlagenkonfiguration und der Betriebsweise vorgenommen, um die Arbeitsabläufe und Betriebsergebnisse zu optimieren. So werden beispielsweise von Zeit zu Zeit ablaufrelevante Einstellungen wie die Belüftungsmenge oder die Spülzyklen verändert. Dennoch wurde angestrebt, die Ablaufwerte als Mittelwerte eines Jahres zu veröffentlichen.

Ein Vergleich ist darüber hinaus auch problematisch, da z.B. die Ablaufwerte der Kläranlage Richtheim nicht die Ablaufwerte in den Vorfluter beschreiben. Vielmehr handelt es sich um das Permeat aus der Membranbelebungsanlage, welches auch nicht in den Vorfluter gelangt, sondern nach einer Bodenfilterpassage in einem Versickerungsbeet in den Untergrund infiltriert.

Für den CSB liegen die Ablaufwerte von 11 Kläranlagen vor. Neun von ihnen erreichen einen sehr geringen Sauerstoffbedarf im Ablauf, 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 noch die Qualitätsstufe *gering*.

In den folgenden Abbildungen werden die Ablaufwerte von Anlagen mit Mikrofiltration **orange** und von Anlagen mit Ultrafiltration **gelb** dargestellt. Der letzte zeigt (soweit bekannt) die mittlere Ablaufqualität einer konventionellen Kläranlage (vgl. Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Vergleichende Gegenüberstellung von ablaufrelevanten Parametern konventionelle Kläranlagen gegenüber Membrankläranlagen (MÜLLER-CZYGAN, 2004)

Parameter	MBR	konventionell	
		ohne Erweiterung	mit Erweiterung (SF+UV)
Feststoffe	0 mg/l	10-15 mg/l	3-8 mg/l
CSB	<30 mg/l	40-50 mg/l	30-40 mg/l
P _{ges} (mit Simultanfällung)	<0,3 mg/l	0,8 – 1,0 mg/l	0,2 – 0,4 mg/l
mikrobiologische Qualität	Badewasserqualität	-	Badewasserqualität
TS _{BB}	>5 g/l	>5 g/l	<5 g/l

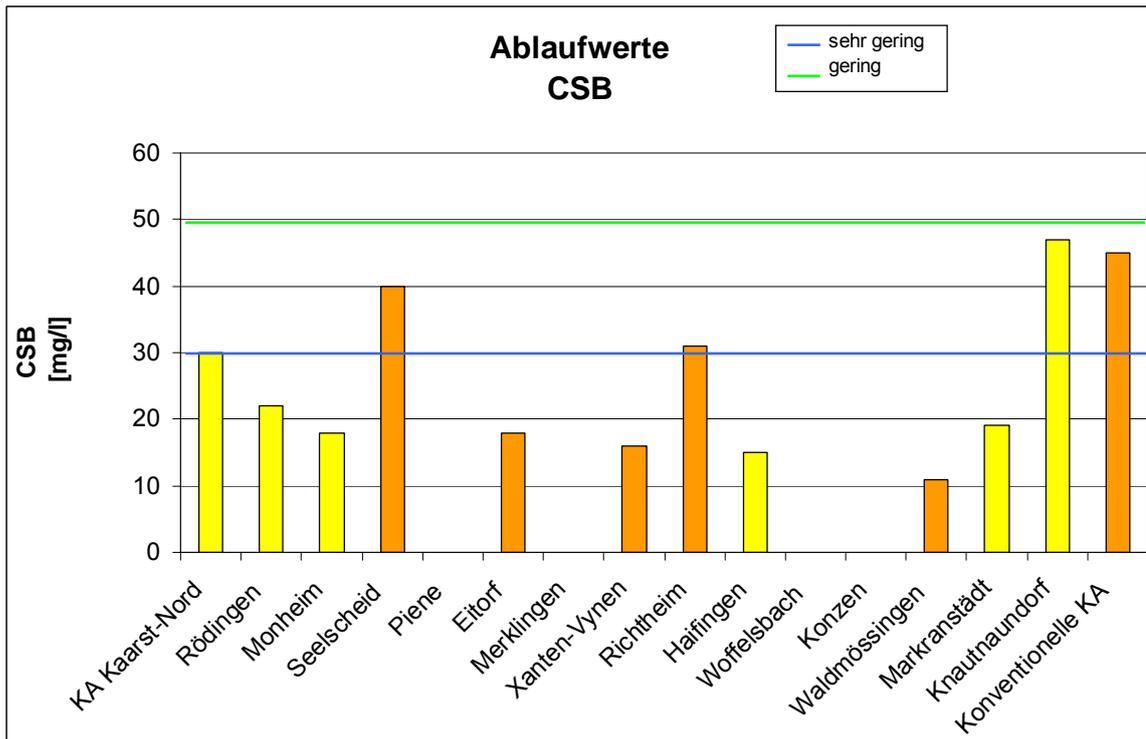


Bild 5-2: Vergleich der CSB-Konzentrationen im Ablauf

Für den Parameter BSB₅ kann festgestellt werden: 6 Anlagen erreichen die Qualitätsstufe *sehr gering*, 2 die Stufe *gering*.

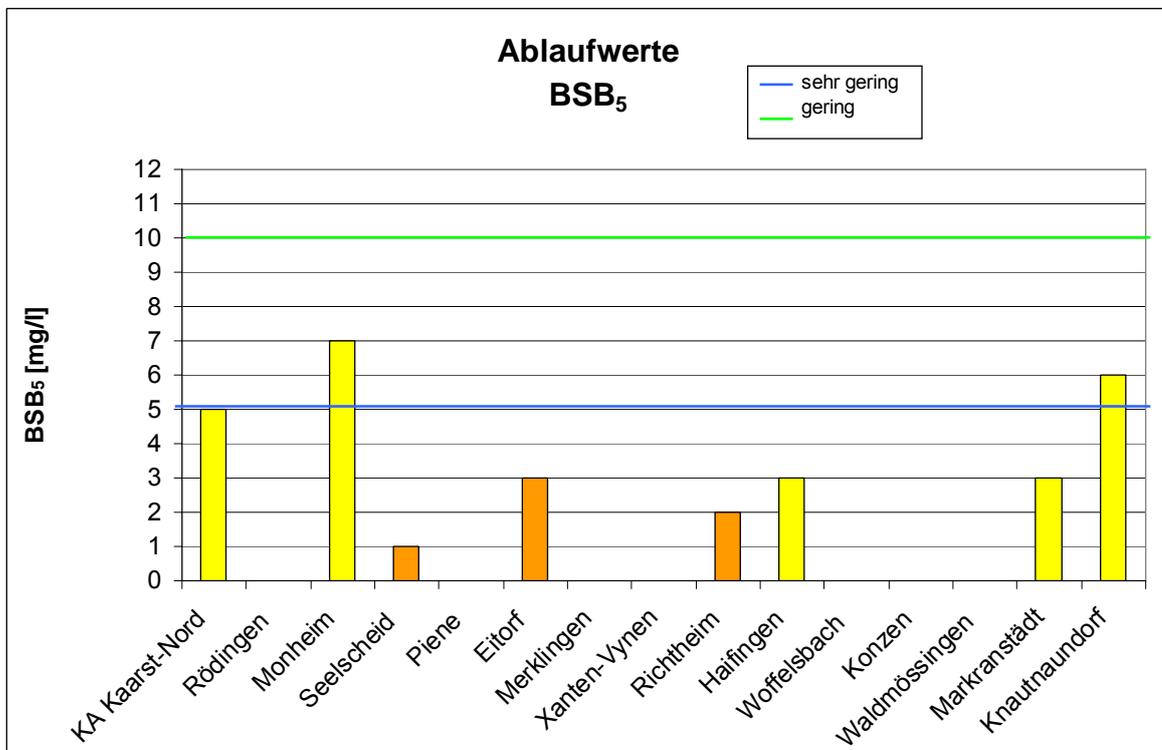


Bild 5-3: Vergleich der BSB-Konzentrationen im Ablauf

Der im Ablauf verbleibende Phosphor ist nur bei drei Anlagen in sehr geringer Konzentration vorhanden; die Phosphorkonzentration liegt unterhalb von 1 mg/l. Acht Anlagen erreichen die Qualitätsstufe *gering*, was 5 mg/l in Ablauf entspricht und die kleinste untersuchte Anlage emittiert ca. 9,3 mg/l in den Vorfluter. Damit liegen die erreichten Ablaufkonzentrationen vergleichsweise hoch. Bereits konventionell betriebene Anlagen können Ablaufwerte unterhalb von 1 mg/l erreichen. MÜLLER-CZYGAN (2004) beschreibt, dass Membrankläranlagen Werte kleiner 3 mg/l erreichen können. Vorliegenden Angaben zufolge können nur die Kläranlagen Rödigen, Hailfingen und Xanten-Vynen solch niedrige Konzentrationen nachweisen. Ein Grund für die hohen Ablaufwerte der KA Knautnaundorf kann die erteilte Einleiterlaubnis sein. Möglich sind danach Ablaufwerte von bis zu 17 mg/l Phosphor. Mit derzeit 5,8 mg/l erreicht die Anlage diesen Wert problemlos (STEIN, 2006).

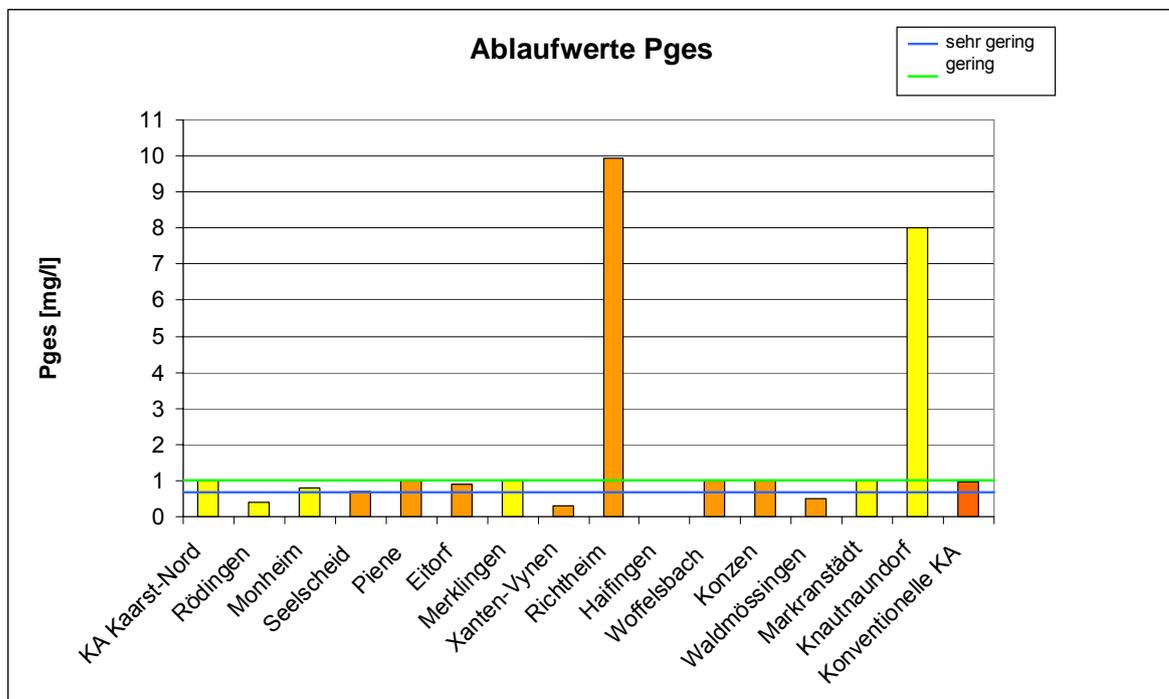


Bild 5-4: Vergleich der Gesamtphosphor-Konzentrationen im Ablauf

Eine sehr geringe Ablaufkonzentration bezogen auf den Parameter Ammonium-N (<1 mg/l) wird von insgesamt 8 Anlagen erzielt. 2 Anlagen überschreiten diesen Wert leicht; sie emittieren zwischen 1 und 2 mg/l NH₄-N. Konzen erreicht mit weniger als 3 mg/l das Qualitätsziel *gering*.

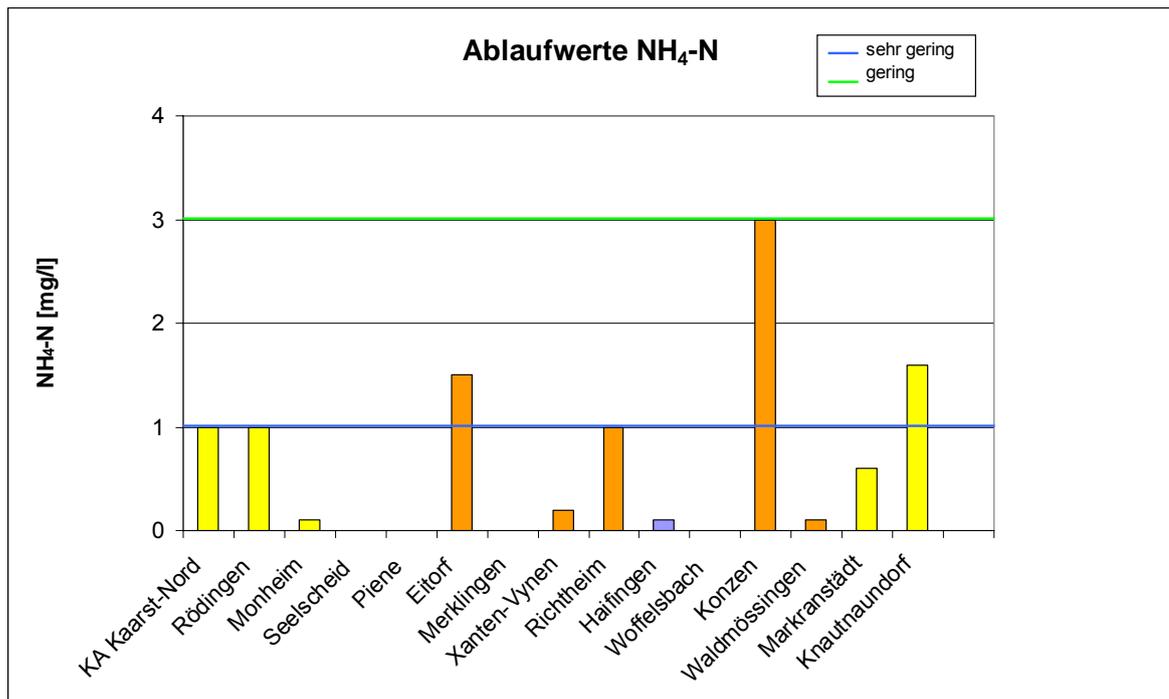


Bild 5-5: Vergleich der NH₄-N-Konzentrationen im Ablauf

Ablaufwerte bezüglich des Gesamtstickstoffs liegen nur für 9 Anlagen vor. 5 von ihnen unterschreiten dabei die DWA-Grenze *sehr gering* von 8 mg/l. Drei Anlagen überschreiten die Stufe *gering* von 13 mg/l.

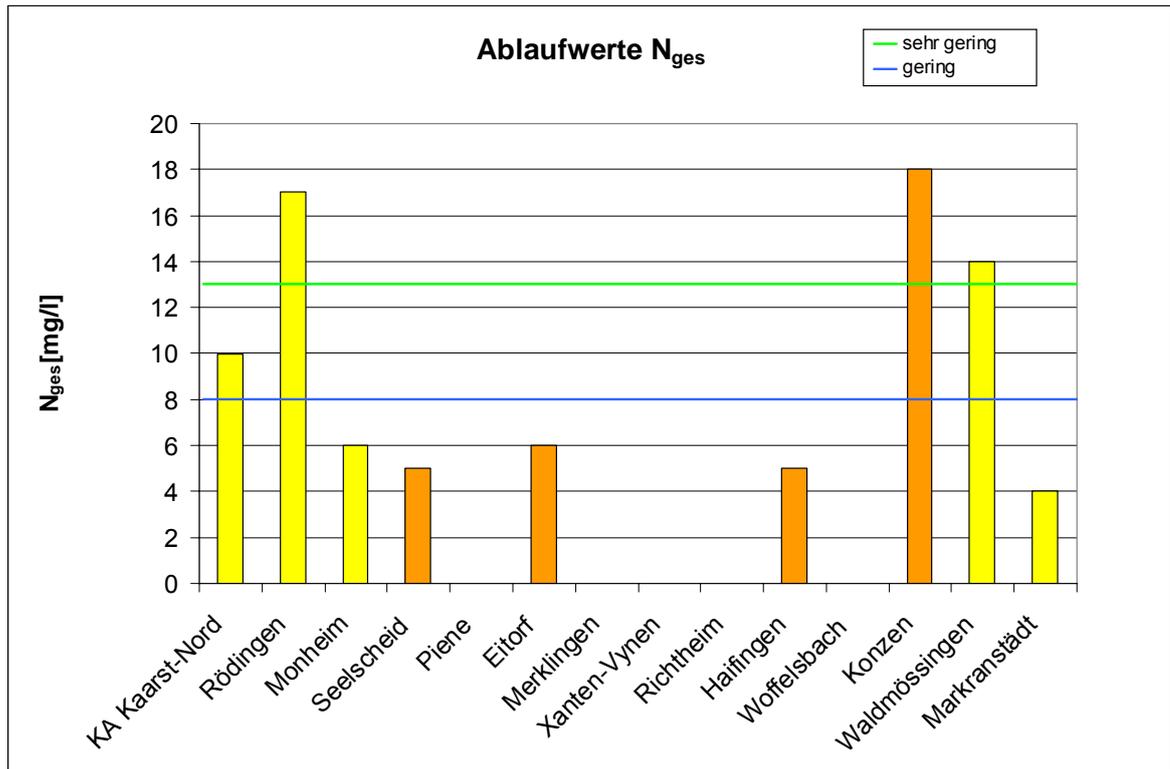


Bild 5-6: Vergleich der Gesamtstickstoff-Konzentrationen im Ablauf

Es ist ersichtlich, dass der Ablauf der meisten Membrankläranlagen eine „sehr geringe“ oder „geringe“ Restverschmutzung aufweist. Allerdings weist die Kläranlage Knautnaundorf abweichend davon recht große Restverschmutzungen bezüglich des Gesamtstickstoffs mit 36,9 mg/l und der Phosphorkonzentration mit 5,8 mg/l auf (Um die Übersichtlichkeit zu erhalten sind die Werte nicht in den Abbildungen dargestellt). Dies resultiert jedoch daraus, dass die Einleiterlaubnis für Knautnaundorf Grenzwerte von 80 mg/l N_{ges} und 17 mg/l P_{ges} fest schreibt. Die Abwasserordnung, nach der die Kläranlage mit 1.300 angeschlossenen Einwohnern zur Größenklasse 2 gehört, schreibt gar keine Grenzwerte für den anfallenden Gesamtstickstoff oder die Phosphormenge vor (Tabelle 5-3).

Tabelle 5-3: Mittlere Zulaufkonzentrationen bei kommunalen Kläranlagen mit häuslichem Abwasser und Anforderungen an den Ablauf nach Anhang 1 zur Abwasserverordnung in Abhängigkeit von Größenklassen

	Ausbaugröße in Einwohnerwerten EW	CSB	BSB₅	NH₄-N	Nges	Pges
Mittlere Zulaufkonzentration in mg/l		700	350	40	70	12
Anforderung an den Ablauf in mg/l						
Größenklasse 1	bis 1.000 EW	150	40	-	-	-
Größenklasse 2	bis 5.000 EW	110	25	-	-	-
Größenklasse 3	bis 10.000 EW	90	20	10	-	-
Größenklasse 4	bis 100.000 EW	90	20	10	18	2
Größenklasse 5	ab 100.001 EW	75	15	10	13	1

5.3 Vorreinigung

Für den sicheren Betrieb einer Membranbelebungsanlage ist eine über den Einsatz üblicher Rechen- und Sandfanganlagen hinausgehende Vorreinigung des zu reinigenden Abwassers erforderlich, sofern auf der Kläranlage keine Vorklärung betrieben wird. Dieses Erkenntnis wurde nicht zuletzt aus dem Betrieb der o.g. Anlagen gewonnen. Eine besondere bzw. zusätzliche mechanische Vorreinigungsstufe wurde bei den ersten Anlagen planerisch seinerzeit nicht vorgesehen.

Im Betrieb konnten v.a. im Kopfbereich der Membranmodule Verzopfungen und infolgedessen Verschlammungen festgestellt werden. Durch Haare und faserige Stoffe entstehen Verzopfungen, die sich um die Membranfasern schlingen und nicht aus dem System herausgespült werden können. Dies wiederum hat Verschlammungen zur Folge, wenn sich Belebtschlamm an diesen Verzopfungen abgelagert. Zusätzlich resultieren Verschlammungen aus der Sedimentation von Schlammbestandteilen in unzureichend durchmischten (belüfteten) Zonen des Membranmoduls. Die aktive Filtrationsfläche wird durch Verzopfungen und Verschlammungen reduziert und somit auch die hydraulische Leistungsfähigkeit beeinträchtigt.

Die sich üblicherweise anschließende chemische Reinigung der Membran ist lediglich dann wirksam durchführbar, wenn die Membranflächen vorher von solchen Verschmutzungen befreit worden sind. Dies ist jedoch nur manuell möglich, bedingt entsprechende mechanische Einwirkungen auf die Membranfasern und ist mit einem entsprechend hohen Kostenaufwand (Personal, Zeit) verbunden. Deshalb ist es für einen wirtschaftlichen Betrieb und eine lange Standzeit der Membran wichtig, dass die Faserstoffe in möglichst großem Umfang von der Filtrationsstufe ferngehalten werden.

Bei einigen Anlagen wurden daraufhin Feinsiebanlagen mit Sieböffnungen von 0,50 mm (KA Rödingen; Teilstromsiegung von 35%) und 0,75 mm (KA Markranstädt) nachgerüstet.

Aufgrund dieser Erfahrungen wurden alle später in Betrieb genommenen kommunalen Membranbelebungsanlagen prinzipiell mit einer zusätzlichen Vorreinigungsstufe (Feinsiegung) oder einer über das übliche Maß hinausgehenden mechanischen Abwasserreinigungsstufe geplant und gebaut.

Tabelle 5-4 stellt eine Zusammenstellung hinsichtlich der Art der installierten Vorbehandlungsmaßnahmen bezüglich Öffnungsgeometrien und Öffnungsweite von Rechen und Sieben dar.

Tabelle 5-4: Ausgeführte Vorbehandlungsstufen an MBR-Anlagen (FRECHEN ET AL., 2008)

	Kläranlage	EW	IBN	Membrantyp	Öffnungsgeometrie/ weite ¹⁾	
					Stufe 1 [mm]	Stufe 2 [mm]
D	Rödingen	3.000	1999	Hohlfaser	Spalt, h 3,00	Spalt, h 0,50 ²⁾
	Markranstädt	12.000	2000	Hohlfaser	Spalt, v 3,00	Masche 0,75
	Knautnaundorf	1.500	2002	Flach	Loch 1,00	-
	Monheim	9.700	2003	Hohlfaser	Spalt, h 1,00	-
	Kaarst-Nordkanal	80.000	2004	Hohlfaser	Spalt, v 5,00	Masche 1,00
	Seelscheid	11.500	2004	Flach	Spalt, v 3,00	-
	Woffelsbach	6.200	2005	Flach	Spalt, v 3,00	Spalt, v 0,50
	Konzen	9.700	2006	Flach	Spalt, v 3,00	Spalt, v 0,50
	Bergheim-Glessen	9.000	2007	Hohlfaser	Spalt, v 6,00	Masche 1,00
EUROPA	Porlock/UK	3.000	1998	Flach	Loch 3,00	-
	Swanage/UK	23.000	2000	Flach	Loch 6,00	Loch 2,00
	Brescia/I	46.000	2002	Hohlfaser	Spalt, h 3,00	Loch 2,00

	Kläranlage	EW	IBN	Membrantyp	Öffnungsgeometrie/ weite ¹⁾	
					Stufe 1 [mm]	Stufe 2 [mm]
	Schilde/B	10.000	2003	Hohlfaser	Spalt, v 2,00	Masche 1,00
	Guéthary/F	10.000	2003	Hohlfaser	?, 1,00	-
	Buxton/UK	30.000	2004	Hohlfaser	Loch 6,00	Loch 3,00
	Jinamar/E	40.000	2004	Hohlfaser	Spalt, v 6,00	Loch 0,80
	Ballyclare/UK	30.000	2005	Hohlfaser	Loch 6,00	Loch 1,00
	Varsseveld/NL	23.000	2005	Hohlfaser	Spalt, v 5,00	Loch 0,80
	Rietliu/CH	22.000	2005	Hohlfaser	Spalt, v 6,00	Masche 0,75
	Heenvliet/NL	3.330	2006	Flach	Spalt, v 6,00	Loch 3,00
	Arenas de Iguna/E	20.000	2006	Flach	Loch, 3,00	-
	Ootmarsum/NL	7.000	2007	ext. Rm ³⁾	Spalt, v 6,00	?, 0,75

¹⁾ Spalt,h/v: horizontal/vertikal; ²⁾ Schlamm-siebung im Teilstrom; ³⁾ externes Rohrmodul

Der Blick sowohl in die einschlägige Grundlagenliteratur (z.B. ATV-Handbuch „Mechanische Abwasserreinigung“, 1997) als auch in weiterführende Fachliteratur zeigt, dass dem Thema Siebung bislang keine große Beachtung geschenkt wurde. Bestenfalls finden sich Definitionen von Grob-, Fein- oder Mikrosiebung in Abhängigkeit der gewählten Öffnungsweite, einige betriebliche und konstruktive Erläuterungen und womöglich Hinweise, dass die Verfahren der mechanischen Abwasserreinigung in der breiten Öffentlichkeit gewöhnlich kaum Beachtung finden bzw. dass über Betriebserfahrungen bislang wenig veröffentlicht wurde (KLEFFNER UND MÜLLER, 1976; ROTH, 1985; SEYFRIED, 1994). Folgerichtig fehlen Hinweise zur Leistungsfähigkeit von Siebanlagen, bspw. Entnahmeeleistungen bezüglich gängiger Abwasserparameter. Das Rückhaltevermögen von Siebaggagaten hinsichtlich der Fraktionen von Haaren und faserigen Stoffen wurde bis dato nicht untersucht. Durch den Betrieb von Membranbelebungsanlagen in der kommunalen Abwasserreinigung hat sich diese Situation grundlegend verändert, da Siebe zu einem elementaren Bestandteil der mechanischen Abwasserreinigungsstufe einer Membranbelebungsanlage geworden sind.

Publizierte Untersuchungen und Untersuchungsergebnisse zum Thema Vorreinigung finden sich z.B. bei STOWA (2002). Gegenstand dieser Untersuchung war der Rückhalt an C_{CSB} , abfiltrierbaren Stoffen (X_{TS}) sowie Fetten und Ölen im Rahmen einer viermonatigen Testphase mit vier unterschiedlichen Siebaggagaten (Öffnungsweiten 0,25 mm bis 0,75 mm; Öffnungsgeometrien: Spalt, Masche, Loch; unterschiedliche Maschinentypen: Rotationssieb, Vibrationssieb, Trommelsieb) auf der holländischen

Kläranlage Beverwijk. Der Rückhalt von Haaren und Fasern wurde per Inaugenscheinnahme bewertet, jedoch nicht messtechnisch quantifiziert.

Eine weitere Untersuchung wurde von der Universität Kassel auf der Kläranlage Markranstädt an zwei Trommelsieben mit Spalt- und Maschengometrie (Öffnungsweite jeweils 0,75 mm) durchgeführt (FRECHEN UND SCHIER, 2005). Ermittelt wurde der Rückhalt an C_{CSB} , abfiltrierbaren Stoffen (X_{TS}), C_N und C_P . Der Rückhalt von Haaren und Fasern wurde auch hier per Inaugenscheinnahme bewertet, jedoch nicht messtechnisch quantifiziert.

Beide Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass bei Sieben gleicher Öffnungsweite eine Spaltgeometrie eine geringere Entnahmeleistung aufweist als eine Maschen- oder eine Lochgeometrie. Derartige Untersuchungen sind aber erst der Anfang und müssen fortgeführt und im Hinblick auf die Beantwortung folgender Fragestellungen ergänzt werden:

1. Welche Feststoff- und welche Faserstoffbelastungen sind bei einem gegebenen Membransystem langfristig tolerierbar?

Aus der Fragestellung ergibt sich, dass für ihre Beantwortung nur und ausschließlich Untersuchungen über einen längeren Zeitraum erforderlich sind.

2. Wie hoch ist die Entnahmeleistung verschiedener Siebssysteme und wie hoch ist die Entnahmeleistung verschiedener mehrstufiger Vorreinigungssysteme (Kombination aus Rechen und Sieb)?

Es müssen Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt werden, weg von einer reinen maschinentechnischen Beschreibung hin zu einer Beschreibung der Leistungsfähigkeit bezüglich der Entnahme von Feststoffen und Faserstoffen zu kommen. Nur dann kann die Effizienz der Vorreinigung definiert werden und nur dann ist es auch möglich, den Einfluss von Störstoffen auf die Standzeit von Membranen darzustellen.

3. Welche Vorreinigungssysteme (einstufig oder zweistufig) sind betriebsfähig und unter Berücksichtigung welcher grundlegenden Überlegungen sind zweistufige Vorreinigungssysteme aufeinander abzustimmen?

Es ist bekannt - und dies war auch auf der IFAT 2005 zu erkennen -, dass es hocheffiziente Vorreinigungssysteme gibt, jedoch ist nicht ohne weiteres klar, ob solche Vorreinigungssysteme auch im langfristigen Betrieb problemlos zu betreiben sind. Seitens der Betreiber wird zweifellos verlangt, dass das einzusetzende Vorreinigungssystem auch betrieblich machbar sein muss. Auch dieser Punkt kann durch kurzzeitige Untersuchungen nicht umfassend und abschließend geprüft werden, es sei denn, dass sich binnen kurzer Zeit eine völlige Untauglichkeit

herausstellt.

Auch seitens der Membranproduzenten im kommunalen Abwasserreinigungssektor wird konstatiert: Es fehlen belastbare Untersuchungen zu unterschiedlichen Sieböffnungsgeometrien (Spalt, Loch, Masche) und deren Abscheideleistung in Bezug auf Faserstoffe und Haare, Abhängigkeit der Trennleistung von der Betriebsweise des Siebes (direkt durchströmt, tangential überströmt etc.) sowie Informationen über den Rechengutanfall und den betrieblichen Aufwand der verschiedenen Systeme. Ferner ist von Interesse, welche Feststoff- und Faserstoffbelastung bei einem gegebenen Membransystem langfristig zu tolerieren ist.“ Dies entspricht den vorher genannten Fragestellungen 1 und 2, deren Beantwortung sowohl kurz- als auch langfristig angelegte Untersuchungen erfordert.

5.4 Energieverbrauch

Schon heute liegt der durchschnittliche Energieverbrauch von kommunalen Kläranlagen bei 20 Prozent des gesamten kommunalen Stromverbrauchs (vgl. CRIST, 2006). Mit steigenden Anforderungen an die Abwasserqualität und dem zunehmenden Einsatz von Membrantechnik ist mit einem weiteren Anstieg dieses Energieverbrauchs zu rechnen, da Membrankläranlagen aufgrund eines erhöhten Belüftungsaufwands nach heutigem Stand der Technik insgesamt deutlich mehr Strom brauchen als konventionelle Anlagen. Im Allgemeinen wird der Verbrauch bestehender Anlagen größer gleich 3.000 Einwohnerwerten mit 0,8 bis 1,4 Kilowattstunden pro Kubikmeter angegeben (vgl. PINNEKAMP UND FRIEDRICH, 2006).

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 der Bild 5-7 werden nur die Anlagen aufgeführt, deren Energieverbrauch bekannt ist. Sortiert ist die Darstellung nach Anschlussgröße, beginnend bei der KA Kaarst-Nordkanal

mit 80.000 E und endend mit der KA Richtheim mit 100 E. Alle hier gemachten Anlagen können lediglich als Richtwerte verstanden werden, da sie aus sehr unterschiedlichen Ablesezeiträumen stammen.

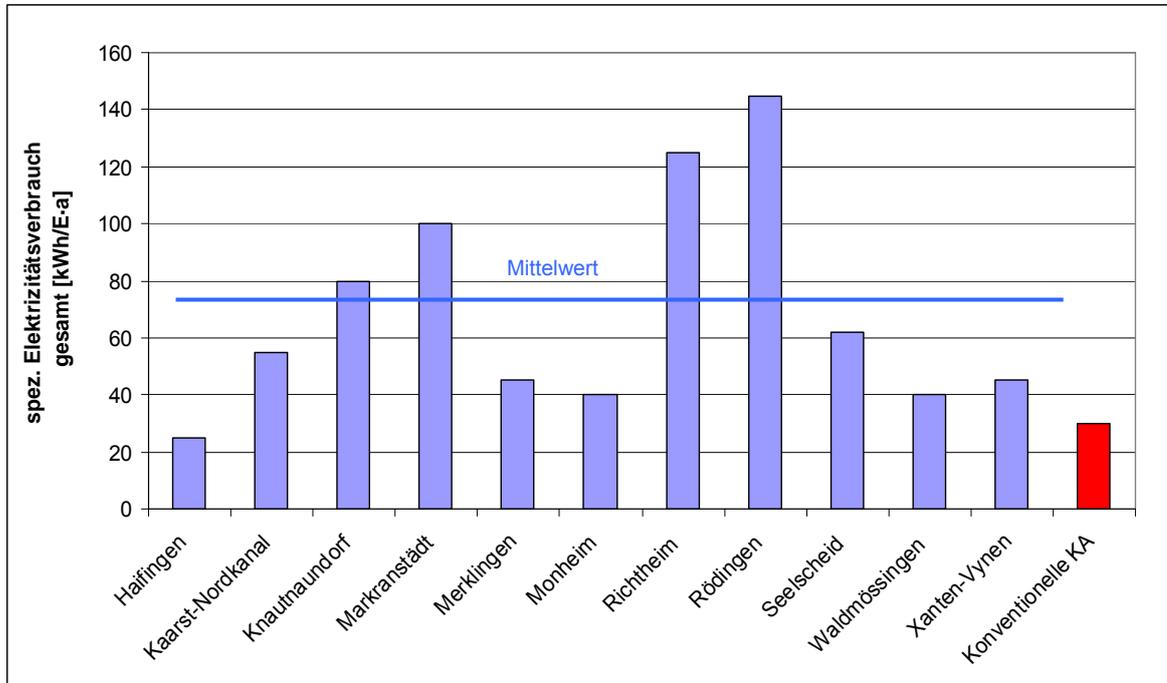


Bild 5-7: Vergleich des Energieverbrauchs deutscher kommunaler Membrankläranlagen

Im Mittel ergibt sich ein Energieverbrauch von 70 kWh/E*a oder 1,6 kWh/m³ gereinigtem Abwasser. STEIN ET AL. (2001) gibt aufgrund von Betriebsergebnissen und Hochrechnungen von mehrstraßigen Membranenbelebungsanlagen einen Stromverbrauch von 1 kWh/m³ bezogen auf einen durchschnittlichen Zufluss und die gesamte Anlage an. Diesen Richtwert unterschreiten derzeit nur vier der 11 aufgeführten Anlagen. Zusätzlich ist in Bild 5-8 die Spannweite der möglichen Energieverbräuche nach PINNEKAMP UND FRIEDRICH (2006) dargestellt. Im Vergleich dazu benötigt eine konventionelle Anlage, die energieoptimiert mit den ähnlichen Reinigungszielen (Sandfiltration und UV) arbeitet, zwischen 0,6 und 0,7 kWh/m³ (WEDI, 2003) und erfordert somit mit nur rund 40% des Energiebedarfes einer Membrankläranlage.

Problematisch ist aber vor allem, dass der spezifische Stromverbrauch sehr stark von dem momentanen Zufluss zur Kläranlage abhängt. In der Literatur finden sich dazu verschiedenste Quellen, hier ist beispielhaft der Stromverbrauch der Kläranlage Monheim dargestellt (Bild 5-8). Je geringer die Zuflussmenge, desto stärker steigt der spezifische Stromverbrauch.

Dieser Zusammenhang kann nicht nur für eine einzelne Anlage festgestellt werden, er trifft auch auf den Vergleich verschiedener Anlagen zu, an die unterschiedliche viele Einwohner angeschlossen sind.

Darüber hinaus ist auch die eingesetzte Anlagentechnik entscheidend. Kleine Kläranlagen, wie die Anlage in Richtheim, setzen wesentlich weniger unterschiedliche Reinigungsstufen ein. Aufwendigere Anlagen haben einen höheren Stromverbrauch z. B. für Pumpen, Regel- oder Reinigungseinrichtungen. Orientierungswerte für den Energiebedarf verschiedener Anlagenteile lassen sich aus der Literatur zusammentragen:

- 0,024 kWh/m³ für Hebewerke, Rechen, Sandfang und Feinsiebung (MURL NRW, 1999 bzw. KRAUSE UND CORNEL, 2005)
- 0,022 kWh/m³ für Licht und Strom im Labor und Werkstatt, Trink- und Brauchwasserversorgung, Heizung und Lüftung (MURL NRW, 1999)
- 0,016 kWh/m³ für Rezirkulationspumpen bei 0,5 m Verlusthöhe (KRAUSE UND CORNEL, 2005)
- 0,042 kWh/m³ für Denitrifikationsrührwerke (KRAUSE UND CORNEL, 2005)
- 0,23 kWh/m³ für die Belebung mit feinblasiger Druckbelüftung zur Sauerstoffversorgung (bei externer Anordnung der Filtration sind 0,34kWh/m³ nötig) (KRAUSE UND CORNEL, 2005)
- 0,43 kWh/m³ für die Filtration mit grobblasiger Belüftung zur Deckschichtkontrolle (KRAUSE UND CORNEL, 2005)

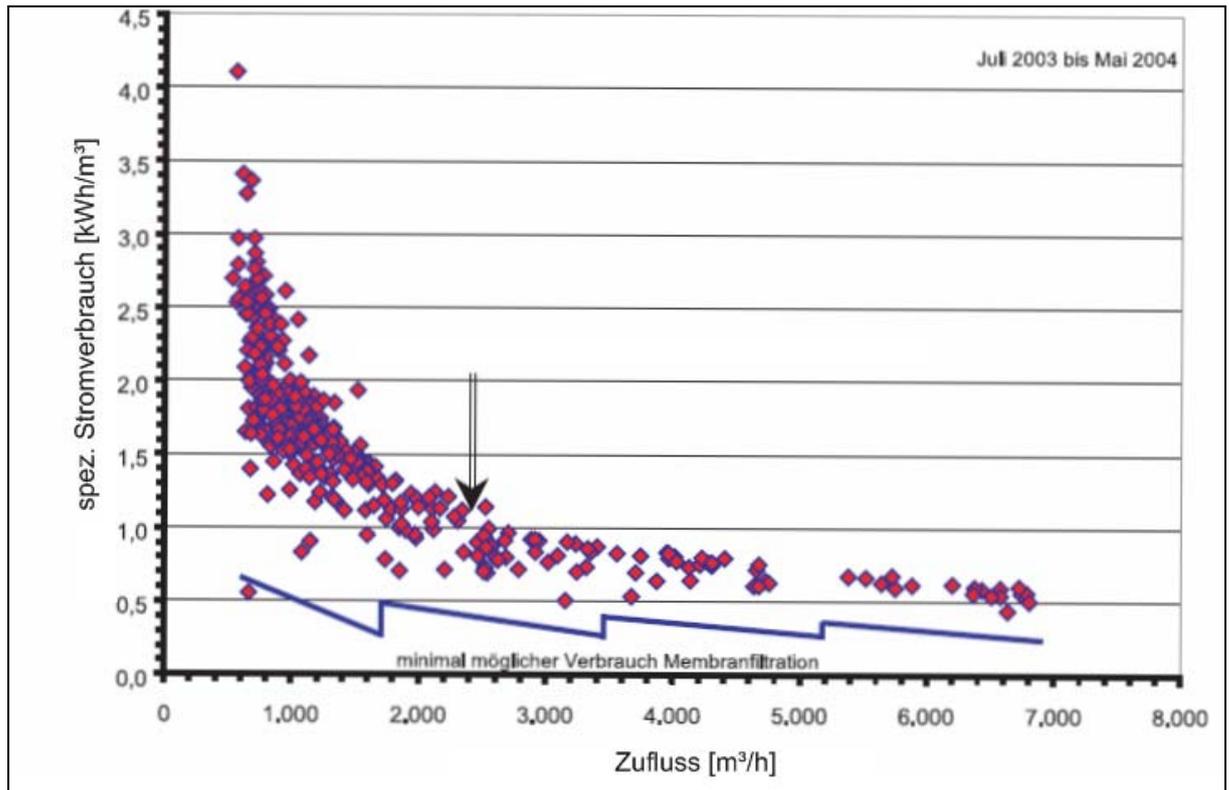


Bild 5-8: Spez. Stromverbrauch der KA Monheim (WEDI ET AL., 2006)

Der größte Verbraucher ist eindeutig die Belüftung. BRAUTLECHT UND GREDIGK (1999) weisen der Sauerstoffzufuhr der Belebung 60 % des Gesamtenergieverbrauchs zu, wobei diese frachtabhängig tageszeitlichen und betriebsbedingten Schwankungen unterliegt.

Zusätzlicher Energieeinsatz ist nötig, um den erforderlichen Unterdruck einer Membranbelebung zu erzeugen. Im Vergleich ist dabei der Dead-End-Betrieb sparsamer als der Cross-flow-Betrieb und eine Mikrofiltration auch sparsamer als eine Ultrafiltration.

Diese allgemeinen Erkenntnisse lassen sich nur schwer mithilfe der hier zur Verfügung stehenden Daten belegen. Häufig scheint auch seitens der Betreiber wenig Interesse an der Erhebung konkreter Verbrauchsdaten zu bestehen. Dies kann auch daraus resultieren, dass häufig erst einmal die geforderten Ablaufqualitäten erreicht und sichergestellt werden müssen, bis dann zu einem späteren Zeitpunkt auch die eingesetzte Energie in der Vordergrund tritt.

6 Komponente 2 – Ableitung von zukünftigen Forschungsaktivitäten und Empfehlungen für das MUNLV

6.1 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 ist im Anhang 3 dargestellt.

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.

6.2 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. Die Überschneidungen der verschiedenen Themenbereiche und Akteure sind in Bild 8.1 dargestellt.

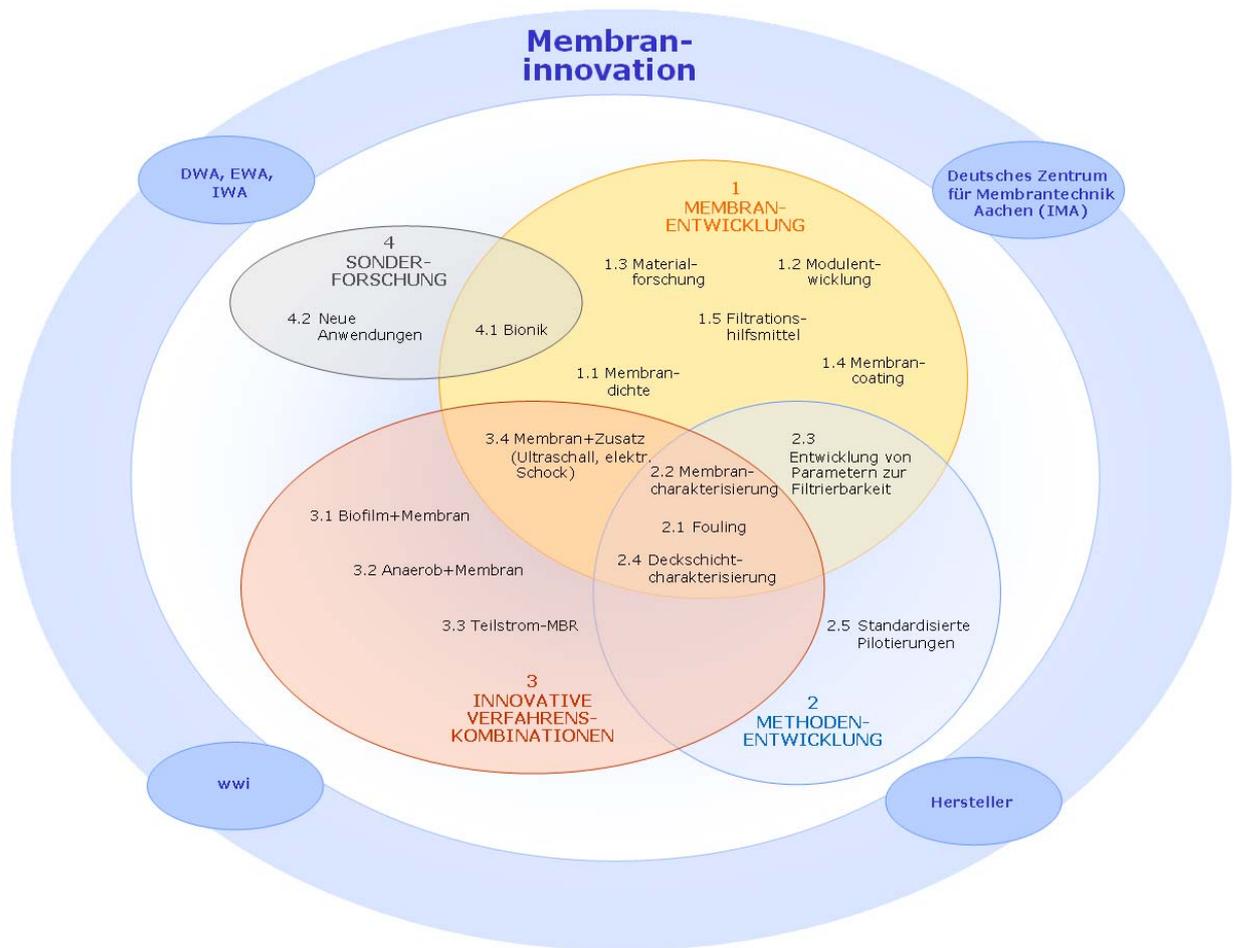


Bild 6-1: Aufbau des Projektes Membraninnovation

Nachfolgend werden die wesentlichen Inhalte besonders bedeutender Einzelthemen vorgestellt.

6.3 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 Reinigungskemikalien

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.

Mögliche Ansatzpunkte bieten:

- Literaturlauswertungen

- Analyse der Reinigungsprozesse auf verschiedenen Anlagen (Aufwand zu Wirkung)
- Ermittlung von Kennzahlen zum Vergleich der Reinigungseffizienz zwischen verschiedenen Anlagen
- Ermittlung der Alterung der Membranmodule in Abhängigkeit von der Beanspruchung durch chemische Reinigungen
- Ermittlung von anlagenspezifischen Problemen (Verteilung der Reinigungslösung auf die angeschlossenen Membranmodule, Luftpolster in Permeatleitungen, Ermittlung der idealen und tatsächlichen Reinigungseffizienz (Reinigung und Permeabilitätsmessung von Einzelmodulen mit Hilfe des mobilen Permeabilitätsmessstandes) u.ä.)
- Ökonomische und ökologische Bewertungen des Optimierungspotentials
- Bewertung der unterschiedlichen Reinigungsstrategien und Ableitung von Optimierungsmaßnahmen und Handlungsempfehlungen für Anlagengestaltung und Betrieb
- Kritische Diskussion der Bestandsaufnahme und Ergebnisse aus den begleitenden Untersuchungen in Workshops

Darauf aufbauend könnten auf Grundlage begleitender analytischer und halbtechnischer Untersuchungen folgende Aspekte erforscht werden:

- Charakterisierung der permeabilitätsmindernden Beläge an Modulen verschiedener Anlagen
- Ermittlung Belagsangepasster Reinigungsmethodiken und Erprobung alternativer Methodiken (bzgl. Chemikalien, Reihenfolgen etc.) in Platten- bzw. Fasertestständen
- Ermittlung und Erprobung alternativer Maßnahmen zur Permeabilitätssteigerung
- Erprobung der optimalen Reinigerkonzentration mit paralleler Analyse einer potentiell membranschädigenden Wirkung; der optimalen Reinigertemperatur, geeigneter Reinigungsmittelkombinationen (pH-Wert Wechsel), einer veränderten Durchführung der chemischen Reinigung z.B. Zwischen- und/oder Abschlussbelüftung unter Beachtung der potentiellen Gasbildung, der chemischen Reinigung bei entleertem Becken (permeatseitige Dosierung), der chemischen Reinigung in dem mit Reinigungschemikalien gefüllten Becken ggf. zusätzliches Belüften oder Rühren (ergänzende feedseitige Zugabe und Schaffung von Turbulenzen)

- Ausarbeitung eines effektiven Konzeptes zum sicheren Abziehen, Speichern, Nachbehandeln und Entsorgen des Konzentrates
- Übertragung und Erprobung der Ergebnisse auf die großtechnischen Erfordernisse von Membrananlagen
- Überprüfung und Bewertung der Effektivität der ermittelten Optimierungsmaßnahmen an Modulkassetten (Permeabilitätsteststand) bzw. an Membranstraßen großtechnischer Anlagen

6.4 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.

6.4.1 Konventionelle Kläranlagen

Kläranlagen zählen zu den größten Energieverbrauchern innerhalb der gemeindeeigenen Gebäude bzw. Anlagen. Etwa 1/6 der entstehenden Betriebskosten entfallen auf Energiekosten. Betriebswirtschaftliche Energiesparmaßnahmen sind auf fast allen Kläranlagen möglich. Im Herbst 1998 wurde durch das Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen eine Umfrage bei den nordrhein-westfälischen Kläranlagen durchgeführt, bei der Daten von 344 Kläranlagen mit

insgesamt 30,5 Mio. Einwohnerwerten ausgewertet wurden. Daher liegen bereits Ansätze für Optimierungsmaßnahmen vor. Derartige Ansatzpunkte sind vor allem die Auslastung der Anlage, das Verfahren der Abwasser- und Schlammbehandlung sowie das angewandte Schlammstabilisierungsverfahren.

Der Verbrauch der kommunalen Kläranlagen in NRW belief sich 1997 auf insgesamt 1,2 Mrd. kWh/a Elektrizität und 0,9 Mrd. kWh/a Wärme, wobei 20% des Elektrizitätsverbrauchs von den Kläranlagen selbst durch das Faulgas gedeckt wird. Die Kosten für den Ankauf der benötigten Energie beliefen sich 1997 auf ca. 100 Mio. €/a (MURL, 1999). Insgesamt fällt auf den Kläranlagen in NRW jährlich eine Faulgasmenge von 200 Mio. m³ an, womit eine Strommenge von 400 Mio. kWh/a produziert werden könnte. Momentan werden etwa 190 Mio. kWh/a Energie genutzt. Ca. 138 der im Rahmen einer Studie befragten Kläranlagen mit einem Ausbau über 10.000 EW verfügen nicht über ein BHKW, so dass das Faulgas dort nur zu Heizzwecken genutzt oder sogar abgefackelt wird. Doch auch in den Anlagen mit BHKW kann die Energieproduktion gesteigert werden (MURL, 1999). Eine Modellanlage, die nach dem neusten Stand der Technik ausgerüstet war, dient zur Beantwortung der Frage, wie viel Energie eine energetisch optimierte Kläranlage während ihrer Verfahrensschritte verbraucht. Die Bemessung erfolgte nach dem „Hochschulgruppenansatz“ mit der Software ARA-BER (BÖHNKE ET AL., 1989; DOHMANN, 1993).

Die nachfolgende Tabelle zeigt beispielhaft für die einzelnen Verfahrensstufen der Modellanlage den Verbrauch an Elektrizität.

Tabelle 6-1: Energieverbrauch im Rahmen der Abwasserreinigung (MURL, 1999)

Verfahrensstufe	Elektrizitätsverbrauch der Modellanlage 100.000 EW		
	spezifisch		Modellanlage
	Wh/m ³ Abwasser ¹⁾	kWh/EWa	kWh/d
Außerhalb der Kläranlage Regenüberlaufbecken (Fangbecken)	4,0		³⁾
Innerhalb Kläranlage Abwasserhebewerk für 3 m Förderhöhe	13,9	1,24	340
Rechen	1,0	0,09	25

	Elektrizitätsverbrauch der Modellanlage 100.000 EW		
	spezifisch		
Sandfang belüfteter Langsandfang	5,5	0,49	134
Vorklärung einschl. Primärschlammumpwerk	1,1	0,10	28
Belebung mit Stickstoffelimination			
Belüftung/Gebälse	153,5	13,72	3.760
Umwälzung (DN-Zone)	19,6	1,75	480
Rezirkulation	5,7	0,51	140
Rücklaufschlamm	6,9	0,62	170
Biologische Reinigungsstufe insgesamt	185,7	16,61	4.550
Belebung nur C-Elimination insgesamt	110,2	9,86	2.700
Belebung / gemeinsame aerobe Stabilisierung (10.000 EW)	313,1	28,00	
Variante Tropfkörper mit Nitrifikation	84,9	7,59	2.080
Variante Scheibentauchkörper mit Nitrifikation (10.000 EW)	24,6	2,20	
Nachklärung einschl. Überschussschlammumpwerk	1,6	0,15	40
Fällmitteldosierung Simultanfällung	0,5	0,004	12
Filtration, jeweils einschl. Hebewerk			
Abwärts durchströmter Raumfilter ²⁾	22,5	2,01	551
<i>Kontinuierlich gespülte Upflow-Filter</i>	17,9	1,60	439
<i>Filtertrommelsysteme als Raumfilter</i>	9,8	0,88	241
<i>Mikrosiebung</i>	22,0	1,97	539
Summe Modellanlage 100.000 EW (ohne Berücksichtigung kursiv gedruckter alternativer Verfahrensstufen)	232,0	20,7	5.680

- 1) Basis Modellanlage 24.500 m³/d Abwasseranfall
- 2) Inkl. Anwasserhebewerk mit 3 m Förderhöhe
- 3) Bezug auf Modellanlage nicht sinnvoll

6.4.2 Membrankläranlagen

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

6.5 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 Flammschutzmittel, 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 Forschungsprojektes 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.

7 Komponente 3 – 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 (siehe Anhang 3) 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

Das Tagungsprogramm und die Veröffentlichung sind im Anhang 4 dargestellt.

8 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 u 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.

9 Literatur

ABWASSTERTECHNISCHE VEREINIGUNG E.V., ATV (1997)

ATV-Handbuch Mechanische Abwasserreinigung, 4. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, ISBN 3-433-01461-2

ABWV (2000)

Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer – Abwasserverordnung, Anhang 1.

AGGERVERBAND (2008)

Projektdatenblätter der Membrananlagen
<http://www.aggerwasser.de/download/Datenbl%E4tter/>

BAUMGARTEN, S.; GRINWIS, S. (2005)

Dimensionierung von Membrankläranlagen. Vortrag beim BEW-Seminar „Membrankläranlagen“. 12.0.9.2005, Essen.

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2008

http://www.lfu.bayern.de/wasser/forschung_und_projekte/abwasserentsorgung_im_karst/laeranlage_richtheim/index.htm

BÖHNKE, B. ET AL. (1989)

Bemessung der Stickstoffelimination in der Abwasserreinigung – Ergebnisse eines Erfahrungsaustausches der Hochschulen. Korrespondenz Abwasser, Nr. 9, Seiten 1046-1061.

BORNEMANN, C.; LONDONG, J.; FREUND, M.; NOWACK, O.; OTTERPOHL, R.; ROLFS, T. (1998)

Hinweise zur dynamischen Simulation von Belebungsanlagen mit dem Belebtschlammmodell Nr. 1 der IAWQ. Korrespondenz Abwasser, Nr. 3, 45.

BRANDS, E.; REETZ, S. (1998)

Biologische Aktivität des belebten Schlammes in Membranbioreaktoren. Im Begleitbuch zur 2. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik. Aachen.

CORNEL, P.; WAGNER, M. (2001)

Sauerstoffeintrag in Membranbelebungsverfahren. Im Begleitbuch zur 4. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik. Aachen.

DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSER, ABWASSER UND ABFALL E.V., DWA (2005)

2. Arbeitsbericht des Fachausschusses KA-7 "Membranbelebungsanlagen; KA – Abwasser, Abfall 2005 (52) Nr. 3; ISSN 1616-430X

DIN 19569 TEIL 2 (2002)

Kläranlagen: Baugrundsätze für Bauwerke und technische Ausrüstungen, Teil 2: Besondere Baugrundsätze für Einrichtungen zum Abtrennen und Eindicken von Feststoffen; Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

DOHMANN, M. ET AL. (1993)

Bemessung der Belebungsbecken nach dem Ansatz der Hochschulgruppe (HSG-Ansatz).
Korrespondenz Abwasser, Nr. 8, Seite 1240.

DOHMANN, M.; BUER, T.; HÖHN, P.; OWERDIECK, C. (2003)

Bemessung von Membranbioreaktoren in kommunalen Kläranlagen. Abschlussbericht
zum Forschungsvorhaben AZ IV-9-042 161 im Auftrag des Ministerium für Umwelt und
Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

DOHMANN, M.; BAUMGARTEN; S., BRANDS; E., SCHILLING, S. (2001)

Einsatz der Membrantechnologie bei der Ertüchtigung der Kläranlage Büchel.
Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministerium für Umwelt und
Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

DOHMANN, M.; HÖHN, P.; OWERDIECK, C.; BUER, T. (2003)

Bemessung von Membran-Bioreaktoren in kommunalen Kläranlagen. Abschlussbericht
zum Forschungsvorhaben AZ IV-9-042 161 im Auftrag des Ministerium für Umwelt und
Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

DOHMANN, M.; THIEMIG, C. (2004)

Simulation der Leistungsfähigkeit einer kommunalen Kläranlage mit
Membranbelebungsstufe bei unterschiedlichen Belastungsszenarien, Becken-
anordnungen und Vorbehandlungsverfahren. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben
(Kennzeichen 1251/01) im Auftrag der Oswald-Schulze-Stiftung.

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

DWA (2000)

Arbeitsblatt ATV–DVWK-A 131 Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. (Hrsg.):
GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V.. Hennef.

DWA (2000A)

Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe IG-5.5 „Membrantechnik“ im DWA-Fachausschuss
IG-5 „Industrieabwasserreinigung“ – Teil 1 „Aufbereitung von Industrieabwasser und
Prozesswasser mit Membranverfahren und Membranbelebungsverfahren“.
Korrespondenz Abwasser, Nr. 10, Seiten 1423-1431.

DWA (2002)

Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe IG-5.5 „Membrantechnik“ im DWA-Fachausschuss
IG-5 „Industrieabwasserreinigung“ – Teil 2 „Aerobe Membranbelebungsverfahren“.
Korrespondenz Abwasser, Nr. 11, Seiten 1563-1571.

DWA (2003)

Arbeitsblatt ATV–DVWK-A 198. Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten
für Abwasseranlagen. (Hrsg.): ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft,
Abwasser und Abfall e.V.. Hennef.

EARTHTECH (2008)

Projektdatenblätter der Membrananlagen. Online unter:
http://www.earthtech.de/docs/ref_detail.php?ref_id=11

ERFTVERBAND (2008)

Internetpräsenz KA Nordkanal
http://www.erftverband.de/projekte/membran_tec/mem_nordkanal/mem_nordkanal.shtml

ENGELHARDT, N.; FIRK, W.; WARNKEN, W. (1997)

Erfahrungen mit der Membranfiltration beim Erftverband. Im Begleitbuch zur 1. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik. 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.

ENGELHARDT, N. (2003)

Membranbelebungsverfahren – eine beherrschbare und erfolgreiche Technik – Erfahrungen nach vierjährigem Betrieb. Im Begleitbuch zur 3. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik. Aachen.

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

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

FIRK, W., GRINWIS, S., VOLMERING, D. (2005):

Demonstrationsvorhaben Membranfiltration – Kläranlage Simmerath / Nord-Eifel. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AZ 54-2-3.3-1820-vMe im Auftrag des Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

FLEMMING, H.C. (1995)

Biofouling bei Membranprozessen. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.

FLEMMING, H.C.; WINGENDER, J. (2000)

Extrazelluläre Polymere Substanzen (EPS) – der Baustoff für Biofilme. In: Vom Wasser. Band 94, Seiten 245 - 266.

FRECHEN, F.-B.; SCHIER, W. (2005)

Mechanische Abwasservorbehandlung bei kommunalen Membranbelebungsanlagen; DWA/DVGW Membrantage, Osnabrück, Juni 2005

FRECHEN, F.-B.; SCHIER, W.; CH. LINDEN (2008)

Mechanische Abwasservorbehandlung auf kommunalen Membranbelebungsanlagen. In Korrespondenz Abwasser, Abfall (55), 2008, S. 39 - 44

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.

GRINWIS, S. (2005)

Einsatz des Bemessungsprogramms ARA-BER zur Auslegung von Membrankläranlagen in der kommunalen Abwasserreinigung. Vortrag beim BEW-Seminar „Membrankläranlagen“. 12.0.9.2005, Essen.

GUJER, W.; HENZE, M.; TAKAHASHI, M.; VAN LOOSDRECHT, M. (1999)

Activated sludge model No. 3. Water Science and Technology, Vol. 29, No. 1, Seiten 183-193.

HENZE, M.; GRADY, C.P.L.; GUJER, W.; MARAIS, G.; MATSUO, T. (1987)

Activated sludge model No. 1. Scientific and Technical Report No. 1, IAWPRC, London.

HÜBNER, M.; ROLFS, T. (2007)

Betriebserfahrungen mit den Membrankläranlagen Woffelsbach und Konzen. In: Begleitbuch zur 7. Aachener Tagung Wasser und Membranen am 30. und 31. Oktober 2007, Hrsg. Prof. T. Melin, Prof. J. Pinnekamp, Prof. M. Dohmann, ISBN 3-86130-888-6

HUANG, X. (2007)

MBR Real Plants Survey in China, Miyun Municipal Wastewater MBR Plant, Beijing. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing, China

ITOKAWA, H. (2005)

Persönliche Mitteilung.

JUDD, S. (2004)

Fouling control in submerged membrane bioreactors. Im Begleitbuch zur IWA Specialty Conference – Water Environment – Membrane Technology. Seoul, Korea.

KLEFFNER, I.; MÜLLER, P. (1976)

Siebe als Möglichkeit zur Verbesserung und Vereinfachung von Kläranlagen; Korrespondenz Abwasser 2/76, 23. Jahrgang; Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik, Bonn

KOCH, G.; KÜHNI, M.; GUJER, M.; SIEGRIST, H. (2000)

Calibration and validation of activated sludge model No. 3 for swiss municipal wastewater. Water, Science and Technology, Vol. 29, No. 14, Seiten 3580-3590.

KRAUSE, S. (2005)

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

KREBS, P. (2003)

Auswirkungen der Mischwasserdynamik in Kanalisationen auf Abwasserbehandlung und Fließgewässer. Im Begleitbuch zur 36. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. GWA – Band 190. (Hrsg.) Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.. Aachen.

KREBS, P.; KÜHN, V. (1999)

Dynamik in der Siedlungsentwässerung. Beitrag im Rahmen der 12. Ostsee-Tagung . 15.-16. November 1999. Travemünde.

KUBIN, K.; ROSENBERGER, S.; KRAUME, M.

Bedeutung der Betriebsweise für die Auslegung von Membranbelebungsreaktoren. Im Begleitbuch zur 4. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik. Aachen.

KUBIN, K (2004)

Einfluss unterschiedlicher Verfahrenskonzepte auf Substratabbau und Nährstoffverwertung in Membranbelebungsanlagen zur kommunalen Abwasserreinigung. Dissertationsschrift. Fakultät III - Prozesswissenschaften - Technische Universität Berlin, Berlin.

LANGERGRABER, G.; RIEGER, L.; WINKLER, S.; ALEX, J.; WIESE, J.; OWERDIECK, C.; AHNERT, M.; SIMON, J.; MAURER, M. (2004)

A guideline for simulation studies of wastewater treatment plants. Water, Science and Technology, Vol 50, No. 7, Seiten 131-138.

LEE, W.; KANGS, S., SHIN, H. (2003)

Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors. Journal of Membrane Science. No. 216, Seiten 217 – 227.

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

LIEBESKIND, M. (1999)

Parameter für die dynamische Simulation kommunaler Abwasserreinigungsanlagen. Dissertationsschrift. GWA, Band 171, Aachen.

LINEG (2005)

Foto und persönliche Mitteilungen

LIPP, P. (2007)

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

MARTIN SYSTEMS (2008)

Projekt Darstellung KA Knautnaundorf http://www.martin-systems.de/de/referenzen/downloads/KA_KNAUTNAUNDORF_Leipzig.pdf

MUNLV (2007)

Forschung und Entwicklung im Bereich der Gewässergüte und Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen. Online unter: https://www.munlv.nrw.de/umwelt/wasser/abwasser/forschung_entwicklung/index.php

MUNLV (2003)

Abwasserreinigung mit Membrantechnik – Membraneinsatz im kommunalen und industriellen Bereich. (Hrsg.): Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.

MURL (1999)

Handbuch Energie in Kläranlagen. (Hrsg.): Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein- Westfalen. Düsseldorf.

N.N. (1992)

Das mikroskopische Bild bei der aeroben Abwasserreinigung. Informationsbericht des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft. Heft 1/90. München.

NOWACK, O., SVARDAL, K. (1998)

Die Modelle ASM 1 und ASM 3 im Vergleich. Vortrag im Rahmen des 5. SIMBA-Anwendertreffen in Gommern, 9.-10.11.1998.

OHLE, P. (2002)

Bemessung von Membranbioreaktoren für die kommunale Abwasserreinigung. Dissertationsschrift. GWA – Band 187. (Hrsg.) Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.. Aachen.

OHLE, P.; BAUMGARTEN, S. (2000)

Bemessung von Membranbioreaktoren zur Reinigung kommunalen Abwassers. Im Begleitbuch zur 33. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. GWA – Band 177. (Hrsg.) Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.. Aachen.

OHLE, P.; BRANDS, E.; GEISLER, S.; VOßENKAUL, K. (2000)

Bemessung von Membranbioreaktoren und Erfahrungen beim Semi-Cross-Flow-Betrieb. Im Begleitbuch zur 33. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. GWA – Band 177. (Hrsg.) Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.. Aachen.

OWERDIECK, C. (2005)

Persönliche Mitteilung.

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

PINNEKAMP, J.; BEIER, S.; ARNDT, D. (2007)

Status und Entwicklung der Membrantechnik. Schriftenreihe Gewässerschutz – Wasser – Abwasser Band 210, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp, Aachen, 2007, ISBN 978-3-938996-16-4

RAUTENBACH, R.; ALBRECHT, R. (1981)

Membran-Trennverfahren – Ultrafiltration und Umkehrosmose. Verlag Salle und Sauerländer. Frankfurt.

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.

ROTH, M. (1985)

Feinsiebe in der mechanischen Stufe kommunaler Kläranlagen; Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 87; ISBN 3-486-26361-7

SCHIER, W. ; FRECHEN, F.-B. (2004)

Siebsysteme zur Abwasservorbehandlung bei kommunalen Membranbelebungsanlagen; Präsentation im Rahmen der DGMT-Veranstaltung „Vorbehandlung und Reinigung in der Membrantechnik“ am 23./24.11.2004 in Kassel

SCHIER, W. (2005)

Abwasservorbehandlung beim Membranbelebungsverfahren; 10. Kasseler Siedlungswasserwirtschaftliches Symposium, Schriftenreihe WASSER • ABWASSER • UMWELT des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kassel, Band 27, 2005, ISBN 3-89958-161-X

SCHIER, W. (2003)

Ein exemplarischer Ansatz zur Einbindung neuer Bemessungswege und neuer Reinigungstechnologien bei der Ertüchtigung von Kläranlagen. Disserationsschrift. Schriftenreihe der Fachgebiete Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik Universität Kassel. Band 22.

SCHIER, W., FRECHEN, F.-B., WETT, M. (2005)

Mechanical Pre-Treatment Stages of Municipal MBR Applications In Germany - Current Status and Treatment Efficiency -, 78th Annual Technical Exhibition and Conference WEFTEC 2005, November 2005, Washington D.C./USA

SEYFRIED, A. (2002)

Bemessung von Membranbioreaktoren kommunaler Kläranlagen. Im Begleitbuch zur 35. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. GWA – Band 188. (Hrsg.) Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V. Aachen.

SCHILLING, S. (2005)

Einsatz der Membrantechnik in Europa. Vortrag beim BEW-Seminar „Membrankläranlagen“. 12.0.9.2005, Essen.

SCHLEYPEN, P.; MEIßNER, E. (1999)

Abflüsse aus Kanalisationsgebieten und Zuflüsse zu kommunalen Kläranlagen bei Trockenwetter- und Regenwetterverhältnissen. Korrespondenz Abwasser. Nr. 46, Seiten 42-46.

SEYFRIED, C.F. (1994)

Rechen, Siebe und Sandfänge – Betriebserfahrungen und Entwicklungen; Schriftenreihe des Institutes für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung, Band 75; ISBN 3-923419-68-6

STADT MERKLINGEN (2008)

Imagebroschüre der Kläranlage Merklingen. Online unter: <http://www.merklingen.de/fileadmin/Downloads/ultrafiltration.pdf>

STADT MONHEIM (2008)

Imagebroschüre der Kläranlage Monheim, http://www.monheim-bayern.de/index.php/monheim/monheim/oeffentliche_einrichtungen/stadt_monheim/klaeranlagen/portrait_praesentation/klaeranlage_monheim

STADTWERKE SCHRAMBERG (2008)

Imagebroschüre der KA Waldmössingen, http://www.stadtwerke-schramberg.de/pdf/Flyer_Klaeranlage.pdf

STOWA (2002)

MBR for Municipal Wastewater Treatment, Supplementary report with side studies, Hageman Fulfilment, Zwijndrecht, ISBN 90.5773.167.3

VANROLLEGHEM, P.; INSEL, G.; PETERSEN, B.; SIN, G.; DE PAUW, D.; NOPENS, I.; DOVERMANN, H.; WEIJERS, S.; GERNAEY, K. (2003)

A comprehensive model calibration procedure for activated sludge models. WEFTEC 2003: 76th Annual Technical Exhibition and Conference, October 11-15, 2003, Los Angeles.

VAN DER ROEST, H. (2003)

MBR Technology for municipal wastewater treatment – The Dutch experience. Im Begleitbuch zur 5. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik. Aachen.

VAN DER ROEST, H., VAN BENTEM, A. (2003)

Kläranlage Werne, Membrantechnik. DHV-Präsentation, 05.02.2003.

VAN DER ROEST, H. (2005)

Persönliche Mitteilung

WAGNER, W. (2004)

Abwassertechnik und Gewässerschutz. Entsorgungsverband Saar. Band 2, Abschnitt 7224.2. Saarbrücken.

WEDI, D.; RESCH, H.; WILD, W.; BLEISTEINER, S. (2005)

Betriebsergebnisse der MBR Monheim – Abwasserreinigung und Erhalt der Permeabilitäten mittels chlorfreier chemischer Reinigung. Im Begleitbuch zur 6. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik. Aachen.

WETT, M. (2005)

Foulingverhalten des Membranbelegungsverfahrens und Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit. Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft. Universität Kassel. Kassel.

WITZIG, R. (1999)

Mikrobiologische Untersuchungen an hochkonzentriertem Belebtschlamm aus einer membrangestützten Mikrofiltration zur biologischen Reinigung kommunaler Abwässer. Diplomarbeit am Institut für technischen Umweltschutz. TU Berlin.

WVER (2008 A)

Imagebroschüre der Kläranlage Woffelsbach. Online unter: <http://www.wver.de/>

WVER (2008 B)

Imagebroschüre der Kläranlage Konzen. Online unter: <http://www.wver.de/>

YUN, M.-A.; YEON, K.-M.; PARK, J.-S.; LEE, C.-H.; CHUN, J.; LIM, D. J. (2006)

Characterization of biofilm structure and its effect on membrane permeability in MBR for dye wastewater treatment. Water Research, Vol. 40, No.1, Seiten 45 -52.

ZENON (2008)

Referenzprojekte. Online unter:

<http://www.zenon.com/lang/deutsch/anwendungen/abwasser/referenzen.shtml>

Anhang

Anhang 1

Verzeichnis der geförderten FuE-Projekte

Tabelle A-1: Übersicht nationale Forschungsvorhaben

Bezeichnung des Vorhabens	Bearbeitende Institution
Optimierte Integration der Membrantechnik in die biologische Stufe kommunaler Kläranlagen	RWTH Aachen
Optimierung des Betriebes einer Belebungsanlage mit Membranfiltration	Erftverband
Ertüchtigung der Kläranlage Büchel unter Einsatz der Membrantechnologie	Aggerverband
Bemessung von Membranbioreaktoren in kommunalen Kläranlagen	RWTH Aachen
Vergleichende Untersuchungen zur Anreicherung von Arzneiwirkstoffen aus Gewässern mit Membranen	Uni GH Paderborn:
Selekt. Reduz. des Nitratanteils in Wasser bei erhöhtem Chloridgehalt mitt. Membranfiltration und -präparation zum Ausschluss bzw. Minderung des Donnan-Effekt	Degebran GmbH Herne
Behandlung von Abwässern der Chemischen Industrie und der Textilindustrie mit Hilfe von Membranbioreaktoren	RWTH Aachen
Demonstrationsvorhaben Membranfiltration - Kläranlagen Simmerath/Nordeifel	Wasserverband Eifel-Rur
Einsatz der Membrantechnik zur Abwasserbehandlung auf Binnenschiffen	RWTH Aachen
Großtechnischer Betrieb von Membrananlagen auf Fahrgast-schiffen - Demonstrationsprojekt an Bord der MS RheinEnergie -	RWTH Aachen
Wissenschaftliche Begleitung de großtechnischen Betriebs einer Membrankläranlage an Bord der MS RheinEnergie	RWTH Aachen
Studie zur Erweiterung von kommunalen Kläranlagen durch Membrantechnik am Beispiel der Kläranlage Eitorf/Sieg	gpc mbH
Erweiterung der Kläranlage Neunkirchen-Seelscheid unter	Aggerverband

Bezeichnung des Vorhabens	Bearbeitende Institution
Einsatz der Membrantechnologie	
Bau einer Membranbelebungsanlage in Monschau-Konzen	Wasserverband Eifel-Rur
Erweiterung der Kläranlagen in Rurberg, Woffelsbach und Konzen unter Einsatz der Membrantechnologie	Wasserverband Eifel-Rur
Erprobung eines neuartigen Membranfilters für die kommunale Abwasserreinigung	Ruhruniversität Bochum
Erweiterung der Kläranlage Eitorf unter Einsatz der Membrantechnologie	Gemeinde Eitorf
Modifizierung von Polymer-Membranen zur nachhaltigen Leistungssteigerung beim Einsatz in der Abwasseraufbereitung	RWTH Aachen
Erprobung eines Membranteilstromverfahrens zur Optimierung der Stickstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen	Wupperverband
Konzeptstudie zur Ertüchtigung der Kläranlage Netphen mittels Membrantechnik	Stadt Netphen
Machbarkeitsuntersuchungen zum Einsatz einer Membranbelebungsanlage am Kläranlagen-Standort Wuppertal-Buchenhofen	RWTH Aachen
Strategien zur Foulingkontrolle bei Membranbelebungsanlagen in der kommunalen Abwasserbehandlung	RWTH Aachen
Entwicklung von Kleinkläranlagen mit Membrantechnik	Fachhochschule Südwestfalen
Errichtung einer Kleinen Kläranlage nach dem Membran-Belebungsverfahren	Stadtwerke Gummersbach
Erweiterung der Kläranlage Glessen unter Einsatz der Membrantechnologie	Erftverband
Untersuchungen zum Membransystem der Fa. A3 als Membranbelebungsverfahren auf der KA Xanten-Vynen der LINEG im technischen Maßstab	LINEG

Bezeichnung des Vorhabens	Bearbeitende Institution
Aufbereitung, Recycling u. Wiederverwertung von Abwasser, Restflotten u. Konzentraten der Membrantechnik aus der Textilveredlungsindustrie	Hochschule Niederrhein
Bewertung von Membranbelebungsanlagen im industriellen Bereich im Hinblick auf die Elimination gefährlicher Stoffe am Beispiel der Fa. Schering	RWTH Aachen
Separate Erfassung u. Behandlung von Krankenhausabwasser u. großtechnische Erprobung der Membrantechnik zur Eliminierung von Spurenstoffen - 1. Teil: Studie zur Datenermittlung u. Konzeptplanung	Aggerverband
Separate Erfassung u. Behandlung von Krankenhausabwasser u. großtechnische Erprobung der Membrantechnik zur Eliminierung von Spurenstoffen - 2. Teil: Errichtung und Betrieb der Abwasseranlage	Kreiskrankenhaus Waldbröl
Einsatzmöglichkeiten der Membrantechnologie beim Ausbau/Erweiterung von Tropfkörperanlagen zur weitergehenden Stickstoffelimination	BRW
Handbuch "Abwasserbehandlung mit Membrantechnik"	RWTH Aachen
Errichtung einer Schulungseinrichtung für Membrantechnik in der Abwasserreinigung	Aggerverband
Überarbeitung und Übersetzung des Buches "Abwasserreinigung mit Membrantechnik" in die englische Sprache	RWTH Aachen
Erstellung eines Marketingkonzeptes und Schulungskonzeptes für die Schulungseinrichtung für Membrantechnik Kläranlage Seelscheid	BEW
Begleitprojekt zur Forschungs- u. Entwicklungsvorhaben im Bereich der Membrantechnik in NRW	RWTH Aachen

Tabelle A-2: Übersicht internationaler Forschungsvorhaben

Bezeichnung des Vorhabens	Bearbeitende Institutionen
POSEIDON- 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 Removal of pharmaceuticals and PCPs in MBR	BfG- Bundesanstalt für Gewässergüte (DE) EAWAG- Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (CH) Tampere University of Technology (FI) Vienna University of Technology (AT) USC- University of Santiago de Compostela (ES) Silesian University of Technology (PL) ECT- Oekotoxikologie GmbH (DE) CIRSEE, Suez Environment (FR)
P-THREE- Removal of Persistent Polar Pollutants Through Improved Treatment of Wastewater Effluents	ESWE- Institut für Wasserforschung und Wassertechnologie GmbH (DE) CSIC- Consejo Superior de Investigaciones Cientificas (ES) IAWR- Internationale Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet (DE) HLUG- Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (DE) TU Berlin (DE) University Leiden (NL) AGBAR- Sociedad General de Aguas de Barcelona (ES) Vito (BE) ARC Seibersdorf Research GmbH (AT)
AQUAREC- Integrated Concepts for Reuse of Upgraded Wastewater	RWTH Aachen (DE) UK-Aachen (DE) DUT- Delft University of Technology (NL) Cranfield University (UK) Ben-Gurion University of the Negev (IL) Mekorot Water Company (IL) Centre for Research and Technology Hellas, CPERI (GR)

Bezeichnung des Vorhabens	Bearbeitende Institutionen
	<p>Exeter University (UK)</p> <p>GEONARDO Environmental Technologies (HU)</p> <p>Brno University of Technology (CZ)</p> <p>Aquafin NV (BE)</p> <p>University of Valencia (ES)</p> <p>University of Wollongong (AUS)</p> <p>S.C. APANOVA BUCURESTI (RO)</p> <p>University of Lodz (PL)</p> <p>Fundacion Gaiker (ES)</p> <p>University of Barcelona (ES)</p>
<p>AMADEUS- Accelerate membrane development for urban sewage purification</p>	<p>KWB- Kompetenzzentrum Wasser Berlin (DE)</p> <p>TU Berlin (DE)</p> <p>Tecnotessile (IT)</p> <p>VITO (BE)</p> <p>inge AG (DE)</p> <p>AR- Anjou Recherche / Veolia Water (FR)</p> <p>AQF- Aquafin (BE)</p> <p>POLYM- Polymem (FR)</p> <p>A3 water solutions GmbH (DE)</p> <p>ENVI- Envi-Pur, Ltd. (CZ)</p> <p>UNSW- University of New South Wales (AU)</p>
<p>EUROMBRA- Membrane bioreactor technology for advanced municipal wastewater treatment strategies</p>	<p>NTNU- Norwegian University of Science and Technology (NO)</p> <p>CU- Cranfield University (GB)</p> <p>RWTH Aachen (DE)</p> <p>IBET- Instituto de Biologia Experimental e Biológica (PT)</p> <p>INSA- Institut National des Sciences Appliquées (FR)</p> <p>UM II- University of Montpellier II (FR)</p> <p>DUT- Delft University of Technology (NL)</p>

Bezeichnung des Vorhabens	Bearbeitende Institutionen
	UNITN- Università degli Studi di Trento (IT) POLYM- Polymem (FR) IKZN- University of KwaZulu-Natal (ZA) UTS- University of Technology of Sydney (AU) UNESCO-IHE- Institute for Water Education (NL) EAWAG- Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (CH) WHD- Water board Hollandse Delta (NL) EV- Erftverband (DE) KMS- KOCH Membrane Systems (DE) FLCO- FlowConcept (DE)
RECLAIM WATER- Water reclamation technologies for safe artificial groundwater recharge	RWTH Aachen (DE) Water Research Institute (CNR) TU Berlin (DE) EAWAG- Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (CH) Cranfield University (GB) University of Barcelona (ES) DHI (DK) IEI (SI) Mekorot National Water Co. (IL) UNESCO-IHE (NL) BfG- Bundesanstalt für Gewässergüte (DE) Tsinghua University, Beijing (CN) BRGM Service EAU (FR) Aquafin NV (BE) United Water (AU) UNAM- National Autonomous University of Mexico (MX) CSIR- The Council for Scientific and Industrial Research (ZA) PUB- Public Utilities Board (SG)

Bezeichnung des Vorhabens	Bearbeitende Institutionen
	NUS- National University of Singapore (SG)
REMOVALS- Reduction, modification and valorisation of sludge	URV- University Rovira I Virgili (ES) University of Nantes (FR) UAB- University of Barcelona (ES) UOG- University of Glamorgan (GB) INP- National Polytechnic Institute of Toulouse (FR) EDA- Gestió Ambiental i Abastament, S.A. (ES) TRI- Tratamientos y Recuperaciones Industriales S.A. (ES) ICT- Institute of Chemical Technology Prague (CZ) TUL- Technical University of Łódź (PL) TU Berlin (DE) COI- University of Coimbra (PT) COS- Cosvalado-Indústria, Comércio e Serviços Vitivinícolas e Alimentares, S.A. (PT) IRC- Insitute for Research on. Catalysis and the Environment, CNRS (FR) ICL- Imperial College of Science, Technology and Medicine (GB) Salnes Filter AS (NO) Chemviron Carbon Ltd (GB) Seen Technologie Ltd (PL) K&H KINETIC A.S. (CZ)
INNOWATECH- Innovative and integrated technologies for the treatment of industrial wastewater	IRSA- CNR Water Research Institute (IT) RWTH Aachen (DE) DUT- Delft University of Technology (NL) IVL- Swedish Evironmental Research Institute (SE) CU- Cranfield University (GB) EPFL- Swiss Federal Institute of Technology (CH) PSA- Plataforma Solar de Almeria (ES) NIVA- Norwegian Institute for Water Research (NO) SOLSEP BV (NL) Bayer Material Science AG (DE)

Bezeichnung des Vorhabens	Bearbeitende Institutionen
	ITT Wedeco (DE) AUSTEP- Austream Environmental Protection S.r.l. (IT) ALBA- Albania Recursos Naturales y Medio Ambiente S.A. (ES) ANOX- AnoxKaldnes AB (SE) WAT-INN- Water Innovate Ltd (GB) DHV B. V. (NL) AWMC- Advanced Wastewater Management Centre, University of Queensland (AU)
AQUAbase- Organic Micropollutants in the Aquatic Environment – Interdisciplinary Concepts for Assessment and Removal	RWTH Aachen (DE)
MBR-TRAIN- Process optimisation and fouling control in membrane bioreactor for wastewater and drinking water treatment	RWTH Aachen (DE) IRSA CNR Reparto di Bari (IT) AQF- Aquafin N.V. (BE) CU- Cranfield University (GB) KWB- Kompetenzzentrum Wasser Berlin (DE) UGent- Ghent University (BE) BUT- Brno University of Technology (CZ) POLIMI- Politecnico di Milano (IT) TW- Thames Water (GB) DUT- Delft University of Technology (NL)
MBR-RECYCLING- Water recycling and reuse by application of membrane bioreactors: textile and municipal wastewater as examples	TU Clausthal (DE) IAP- Algerian Petroleum Institute (DZ) CBS- Centre of Biotechnology of Sfax (TN)
EMCO- Reduction of environmental risks, posed by Emerging Contaminants, through advanced treatment of municipal and industrial wastes	CSIC- Consejo Superior de Investigaciones Cientificas (ES) IRB- Rudjer Boskovic Institute (HR) FKIT- Faculty of Chemical Engineering and Technology (HR)

Bezeichnung des Vorhabens	Bearbeitende Institutionen
	PBF- Faculty of Food Technology and Biotechnology (HR) TMF- Faculty of Technology and Metallurgy (SCG) EFF- Europa Fachhochschule Fresenius (DE) AGBAR- Sociedad General de Aguas de Barcelona (ES) HEIS- Hydro-Engineering Institute –Sarajevo (BIH) SGLEnv- State General Laboratory, Ministry of Health of Cypurs (CY)
PURATREAT- New energy efficient approach to the operation of MBR for decentralised wastewater treatment	TTZ- Technologie-Transfer-Zentrum Bremerhaven (DE) CBS- Centre of Biotechnology of Sfax (TN) UOB- University of Bath (GB) FSS- University of Cadi Ayyad (MA) ABU- University of Al-Baath (SY) EMI Twente- European Membrane Institute Twente (NL) ONAS- National Agency for Sanitation (TN) INW- The Inter-Islamic Network on Water Resources Development and Management (JO) BIO- Bioazul (ES) KSU- King Saud University (SA)
AsiaBioMem- Feasibility study for evaluating the client application of the Membrane Bioreactor (MBR) Technology for decentral municipal treatment	Chulalongkorn University (TH) CETASD- Research Centre for Environmental Technology and Sustainable Development (VN) Brno University of Technology (CZ)
IWAPIL- Innovative Wastewater Treatment Application for Isolated Locations	KMS- KOCH Membrane Systems (DE) Triqua B.V. (NL) Züllig Deutschland GmbH (DE) Camping Las Lomas S.A. (ES) Fornella Camping (IT)

Bezeichnung des Vorhabens	Bearbeitende Institutionen
	Bioazul S.L. (ES) TTZ- Technologie-Transfer-Zentrum Bremerhaven (DE) RWTH Aachen (DE) University of Brescia (IT)
Space2Tex- Wastewater recycling in textile finishing through the application and further development of membrane bioreactors used in space life support systems	Euratex (BE) D'Appolonia (IT) VITO (BE) IFTH (FR) InoTEX (CZ) ATI- Italian Textile Association (IT) FET- Fédération de l'Ennoblement Textile (FR) ATOK- Association of Textile-Clothing-Leather Industry (CZ) Comofil (IT) Alatex (IT) Castagna (IT) Stamperia di Lipomo (IT) Leucadia (IT) Tintea (IT) Tintoria Filati Portichetto (IT) Mottana S.p.a. (IT) Tintoria Nuovi Gregorini snc (IT) Giovanni Clerici e Figli S.p.a. (IT) Ambrogio Pessina s.r.l. Tintoria Filati (IT) C.E.L. srl (IT) T.C.C. srl (IT) Clerici srl Tintoria Filati (IT) Tintoria Fevit snc (IT) Apparecchiatura di Cernobbio di Frontini Giovanni & C. sas (IT) Societe' Mulhousienne Impressions Papiers et

Bezeichnung des Vorhabens	Bearbeitende Institutionen
	Produits Textiles (FR) Mathelin SA (FR) TdE Teinturerie de l'Est (FR) Pinatel Chapuis Textiles (FR) Licolor a.s. (CZ) TZP a.s.Hlinsko (CZ) Holzbecher (CZ) MC S.r.l. (IT)
LIWATEC- Demonstration of a laundry innovative waste water recycling technology	Textil-Service Klingelmeyer GmbH & Co. KG (DE) HsKA- Hochschule Karlsruhe (DE)
MBR-VARSSEVELD- Membrane bioreactor WWTP Varsseveld	Rhine and IJssel Water Board (NL) STOWA (NL) DHV, Consultancy and Engineering (NL)
SCST- Sanitation Concept for Separate Treatment	KWB- Kompetenzzentrum Wasser Berlin (DE) BWB- Berliner Wasserbetriebe (DE) Veolia Water (DE)
LAGOON-MEMB- Construction, Start-up and 16-months Performance Check of a Demonstration plant (Lagoon-Memb Prototype)	EVS- Entsorgungsverband Saar – Wasserwirtschaft (DE) upt- Gesellschaft für umweltkompatible Prozeßtechnik mbH (DE) BAMAG GmbH & Co. KG (DE) MfU- Ministerium für Umwelt des Saarlandes (DE)
ENREM- Enhanced nutrients removal in membrane bioreactor	KWB- Kompetenzzentrum Wasser Berlin (DE) BWB- Berliner Wasserbetriebe (DE) Veolia Water (DE)

Anhang 2

Kenndaten der Membranbelebungsanlagen

A 2.1 Anlagen mit Mikrofiltration

KA Seelscheid

Die Kläranlage Seelscheid wurde im Jahr 2004 von 7.500 bis auf 11.500 E ausgebaut. Dabei entschied sich der Aggerverband für das Membranbelebungsverfahren, denn infolge beengter Platzverhältnisse, hohe Reinigungsanforderungen und einer teilweise schwierigen Abwasserzusammensetzung (und infolge dessen schlechter Absetzeigenschaften des biologischen Schlammes) erwies sich nach einer Kosten-Nutzenrechnung dieses Verfahren als das Wirtschaftlichste. Hier wurden Membranmodule der Firma Kubota eingesetzt, die entweder mittels Gravity-Flow oder mittels Unterdruckfiltration betrieben werden. Der mittlere Energieverbrauch der gesamten Anlage lag im Jahr 2005 bei ca. 1,5 kWh/m³ (WEBER, 2005). Die Kenndaten der Kläranlage und das Verfahrensfießbild sind nachfolgend dargestellt.

Tabelle A2-1: KA Seelscheid (Egerland, 2007)

Ausbaugröße E	11.500	Reaktorvolumen [m³]	2.310
Status	Betrieb	Max. Zufluss [l/s]	99
Hersteller	Kubota	Kanalsystem	Mischsystem
Modultyp	EK 400	Inbetriebnahme	Aug. 04
Betriebsart	Cross-flow	Vorbehandlung	Filterstufenrechen 3 mm Sandfang biol. P-Elimination Nitrifikation/Denitrifikation
Verfahren	Mikrofiltration		
Membranfläche [m²]	12.480		

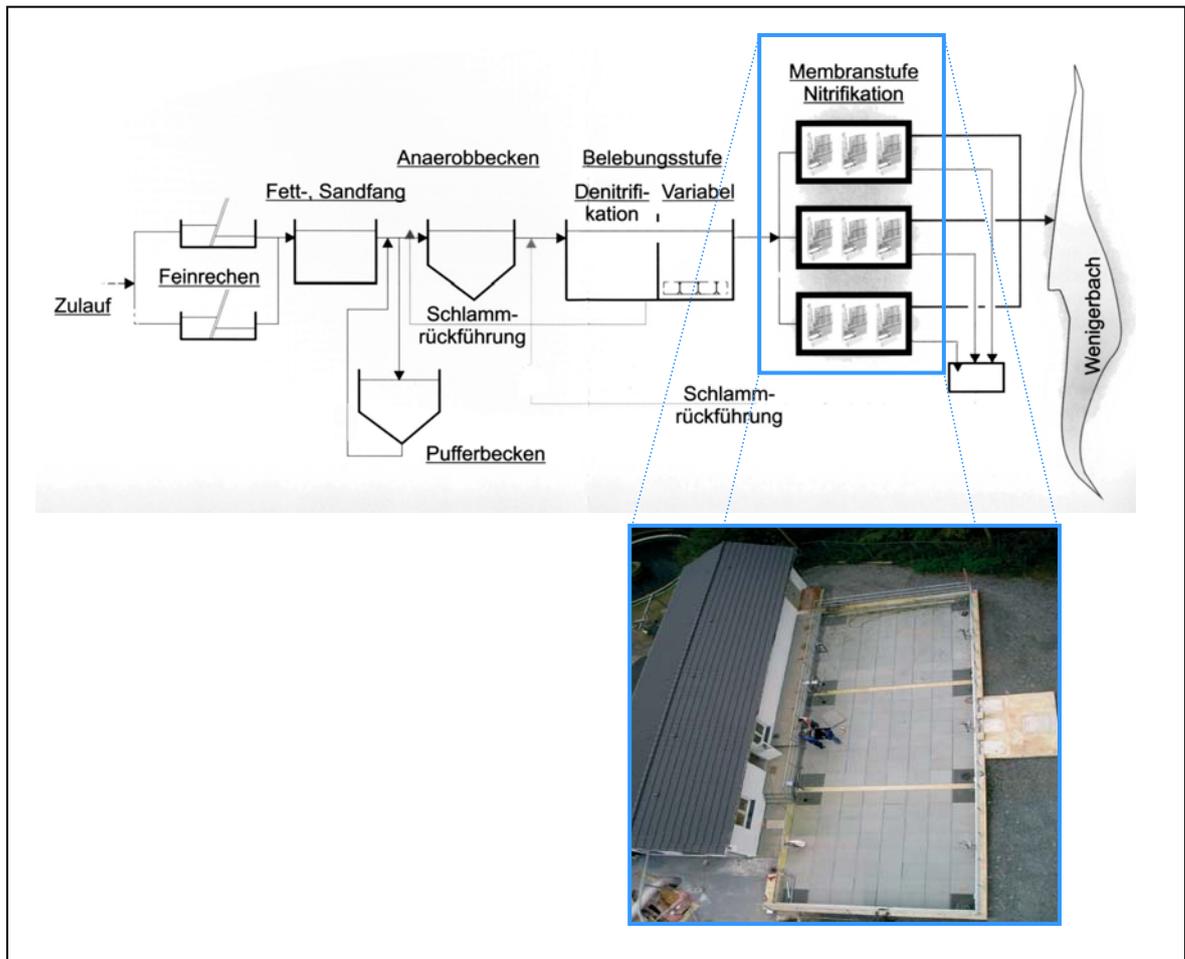


Bild A2.9-1: Verfahrensschema der KA Seelscheid (AGGERVERBAND, 2006)

KA Piene

Vor dem Bau der Membrankläranlage entwässerte der Ortsteil Piene der Stadt Gummersbach das Abwasser in Dreikammerklärgruben. Verschärfte Grenzwerte der Einleiterlaubnis infolge eines schwachen Vorfluters waren auch hier der Grund für den Einsatz der Membrantechnik. Der Betreiber dieser Anlage ist der Aggerverband.

Tabelle A2-2: KA Piene

Ausbaugröße E	170	Membranfläche [m²]	320
Status	Betrieb	Reaktorvolumen [m³]	40
Hersteller	Kubota	Max. Zufluss [l/s]	2
Modultyp	EK 400	Kanalsystem	kommunal
Betriebsart	Cross-flow	Inbetriebnahme	Feb. 06
Verfahren	Mikrofiltration	Vorbehandlung	Siebrechen 3 mm

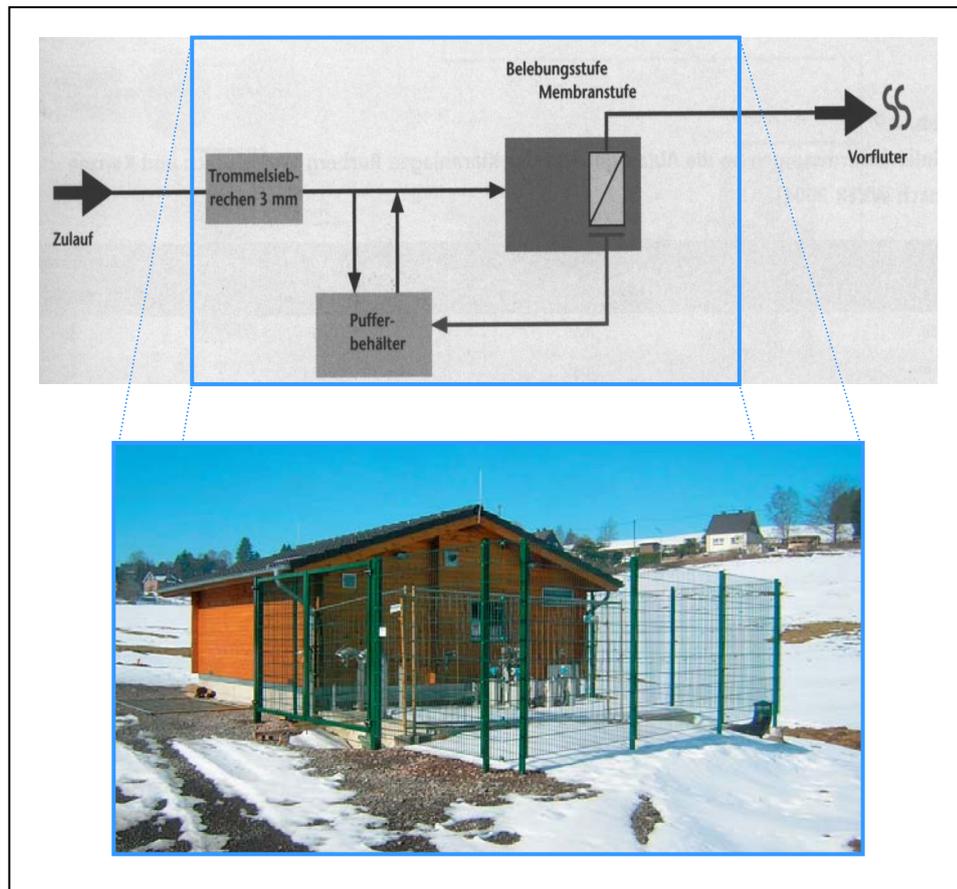


Bild A2.9-2: Verfahrensschema der KA Piene (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006)

KA Eitorf

Die Membranbelebung auf der KA Eitorf reinigt 25 % des Trockenwetterzuflusses der Gesamtkläranlage. Die erste mechanische Reinigung erfolgt über Mitstromrechen, wobei der Abwasserstrom im Trockenwetterfall einen 10 mm-Rechen passiert, im Regenwetterfall aber einen 50 mm-Rechen. Das Reaktorvolumen des Belebungsbeckens setzt sich aus 300 m³ Denitrifikations- und 300 m³ Nitrifikationsvolumen zusammen. Das Nitrifikationsbecken kann allerdings variabel auch als Denitrifikationsbecken genutzt werden. Die ausgewerteten Ablaufwerte wurden anhand der vermischten Abläufe von konventioneller Anlage (mit 33.500 E) und Membranbelebungsanlage ermittelt. Die Ablaufwerte der KA sind nach Auskunft des Aggverbandes vergleichbar, jedoch mit geringfügig höheren NO₃-N-Konzentrationen (entspr. höhere N_{ges}-Konzentration).

Tabelle A2-3: KA Eitorf

Ausbaugröße E	13.000	Kanalsystem	Misch- & Trennsystem
Status	Betrieb	Inbetriebnahme	Okt. 05
Hersteller	Kubota	Vorbehandlung	2-straßiger Rechen bel. Sand- und Fettfang Vorklärung Feinrechen 1 mm Denitrifikation/Nitrifikation mit Variozonen in der DN für die optionale Nitrifikation
Modultyp	EK 400		
Betriebsart	Cross-flow		
Verfahren	Mikrofiltration		
Membranfläche [m²]	10.240		
Reaktorvolumen [m³]	600		
Max. Zufluss [l/s]	80		

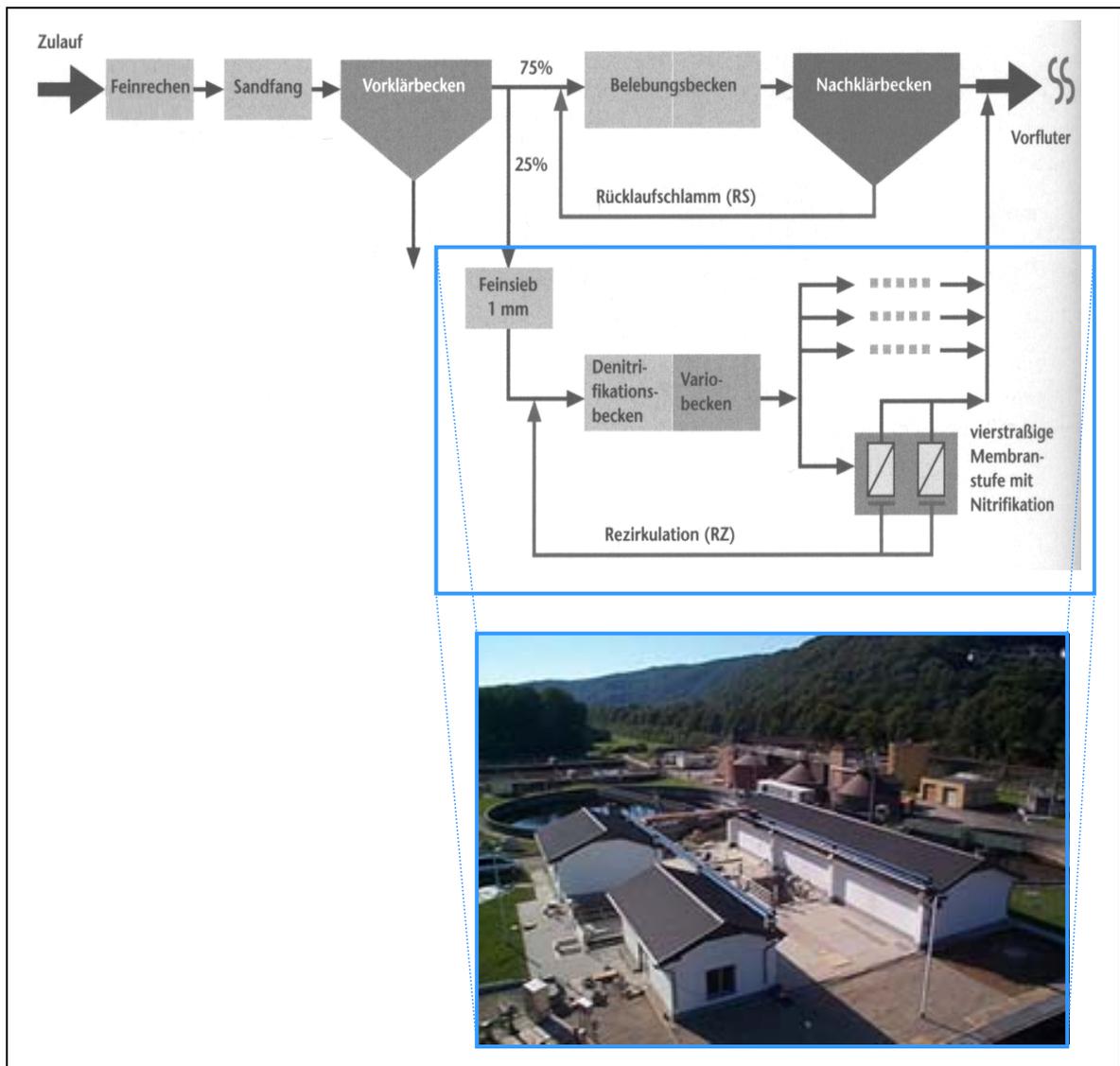


Bild A2.9-3: Verfahrensschema der KA Eitorf (nach PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006 und Earthtech, 2008)

KA Woffelsbach

Die Entscheidung für den Bau einer Membranbelebungsanlage in Woffelsbach fiel aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen. Zum einen müssen niedrige Ablaufwerte erreicht werden, denn der Ablauf der KA mündet direkt in den Rursee, der u. a. der Trinkwassergewinnung dient. Außerdem sprach die beengte Lage der alten KA im Uferbereich des Sees für den Ausbau mit Membrantechnologie. Das zur Verfügung stehende Reaktorvolumen mit 1.205 m³ ergibt sich aus einem Umlaufbeckenvolumen mit 279 m³ und einem Membrankammervolumen mit 929 m³ (bereits unter Abzug des Modulvolumens). Zu den betrieblichen tatsächlich erzielten Ablaufwerten lassen sich nach rund 2-jährigem Betrieb für die Kläranlagen Woffelsbach und Konzen folgende Aussagen ableiten:

- Die Reinigungsleistung für die Parameter CSB und Ammonium sind sehr gut. Relevante Konzentrationsspitzen bezüglich des Parameters NH₄-N konnten in Konzen auch bei einer Aufenthaltszeit von 4,5 h nicht festgestellt werden.
- Die Anlagen sind mit einstufiger simultaner Fällung in der Lage, die Ablaufwerte von 0,5 bzw. 0,2 mg/l Phosphor einzuhalten.
- Die mikrobiologische Beschaffenheit des Ablaufs ist als sehr gut zu bewerten.
- Die gemessenen Permeabilitäten sind vergleichsweise hoch.
- Der spezifische Energiebedarf ist stark abhängig von der hydraulischen Auslastung der Anlagen (HÜBNER, 2007).

Tabelle A2-4: KA Woffelsbach (WVER, 2007)

Ausbaugröße E	6.200	Reaktorvolumen [m³]	929
Status	Betrieb	Max. Zufluss [l/s]	22
Hersteller	Kubota	Kanalsystem	Misch- & Trennsystem
Modultyp	EK 400	Inbetriebnahme	Okt. 05
Betriebsart	Cross-flow	Vorbehandlung	Rechen 3 mm,
Verfahren	Mikrofiltration		bel. Rundsandfang mit Fettfang,
Membranfläche [m²]	13.440		Siebung 0,5 mm

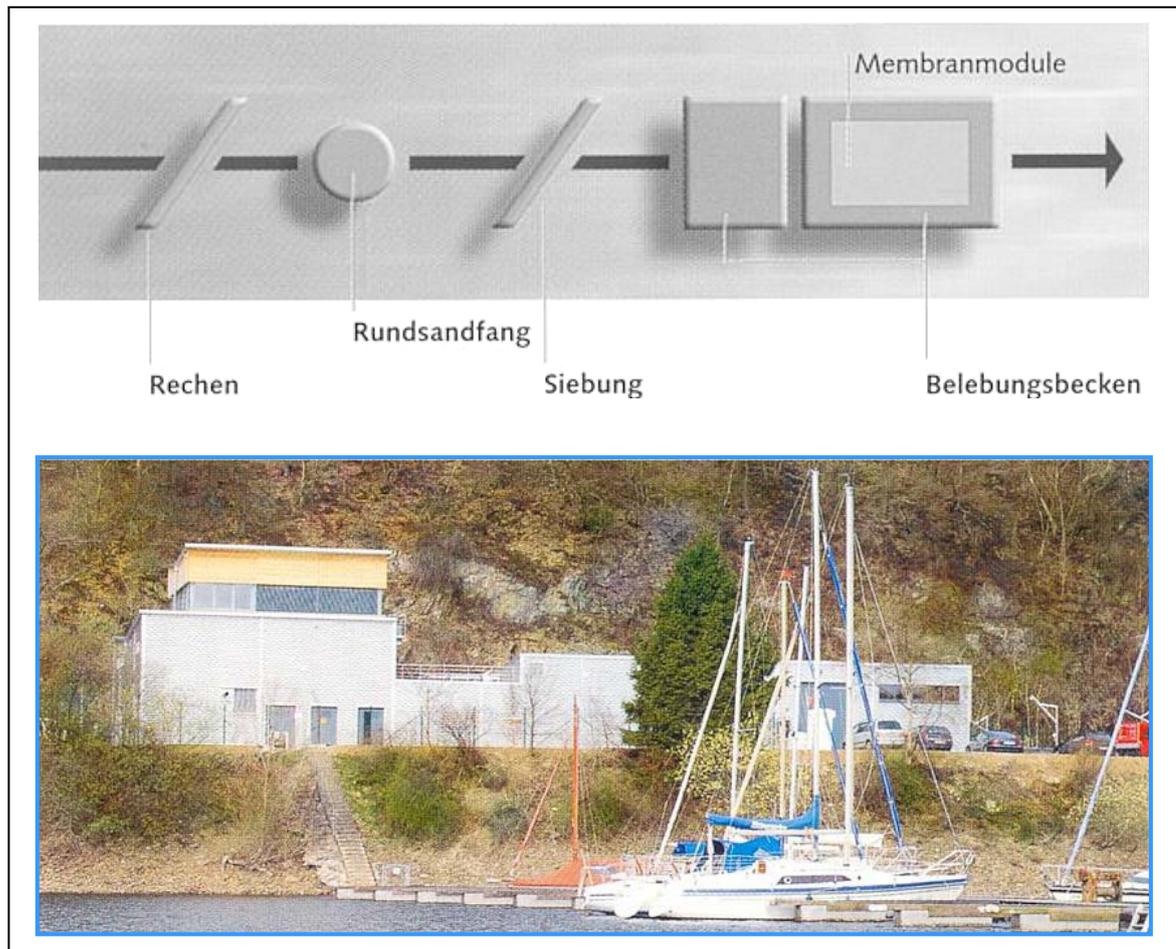


Bild A2.9-4: Verfahrensschema der KA Woffelsbach (WVER, 2008 a)

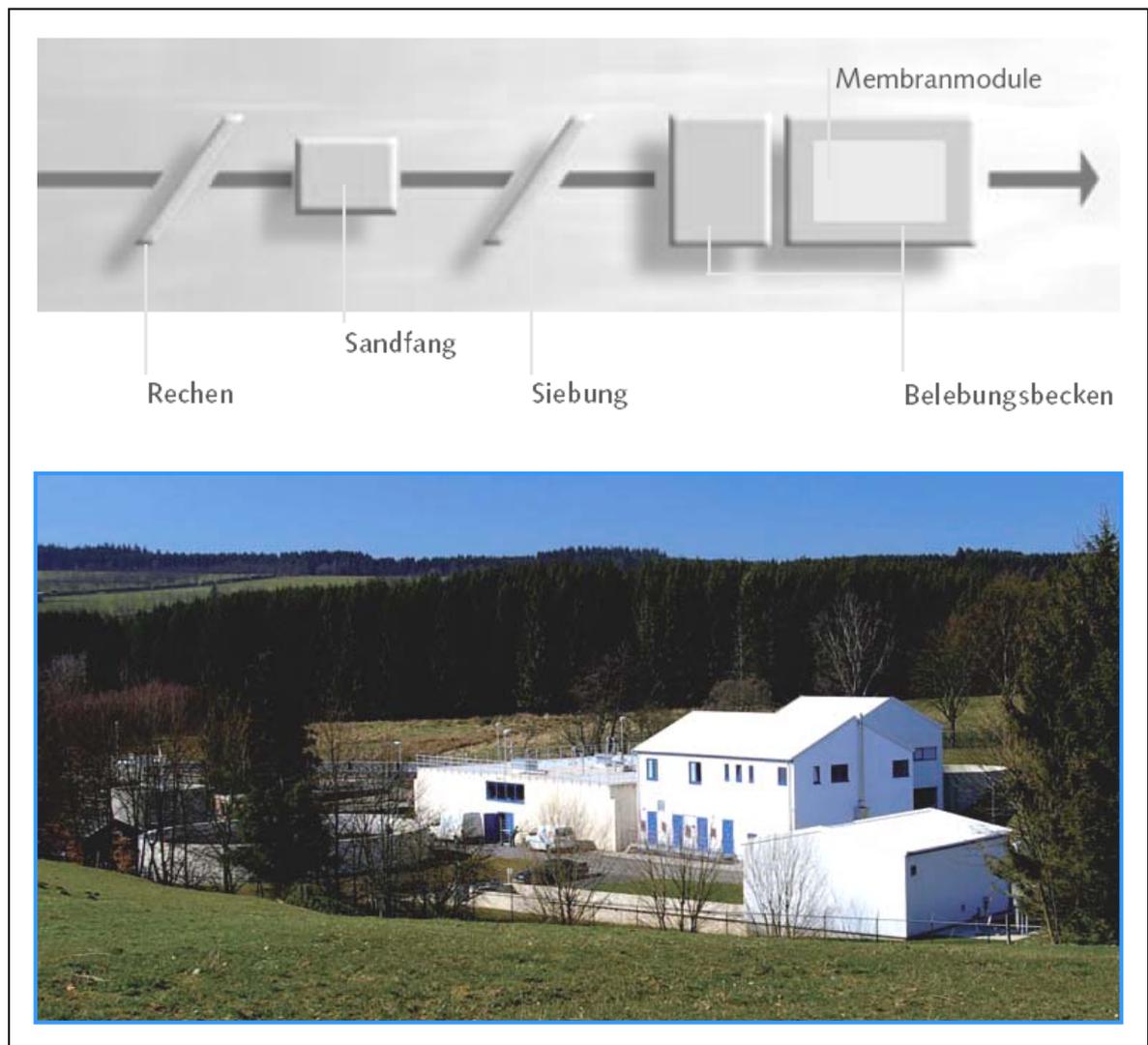
KA Konzen

Das Besondere an der Membranbelebungsanlage Konzen ist die Auslegung auf sehr niedrige Abwassertemperaturen ($T \approx 6^\circ\text{C}$) und die Mitbehandlung von relativ großen Mengen Fremdwasser.

Das Reaktorvolumen beträgt insgesamt 2.464 m^3 . Es setzt sich aus dem Belebungsbeckenvolumen von 903 m^3 und dem Volumen der Membrankammern von zusätzlich 1.561 m^3 (Verdrängungsvolumen der Membranmodule bereits abgezogen, welches zum Teil in der abwassertechnischen Bemessung berücksichtigt ist) zusammen.

Tabelle A2-5: KA Konzen (WVER, 2007)

Ausbaugröße E	9.700	Reaktorvolumen [m³]	1.700
Status	Betrieb	Max. Zufluss [l/s]	163
Hersteller	Kubota	Kanalsystem	Misch- & Trennsystem
Modultyp	EK 400	Inbetriebnahme	Apr. 06
Betriebsart	Cross-flow	Vorbehandlung	Feinrechen 3 mm
Verfahren	Mikrofiltration		Sand- und Fettfang
Membranfläche [m²]	23.040		Feinstrechen 0,5 mm

**Bild A2.9-5: Verfahrensschema der KA Konzen (WVER, 2008 b)**

KA Xanten-Vynen

Die Membranstufe der KA Xanten-Vynen wird derzeit parallel zur bestehenden Belebungsanlage betrieben. Damit kann das Abwasser von rund 2/3 der insgesamt 3.500 angeschlossenen Einwohner (wobei der Nachweis der Anlage von 3.300 E spricht) mit Membrantechnik behandelt werden. Das behandelte ausschließlich kommunale Abwasser stammt z. T. aus Trenn- und z. T. aus Mischsystemen.

Der Energieverbrauch liegt bei ca. 400 kWh/d.

Tabelle A2-6: KA Xanten-Vynen (LINEG, 2007)

Ausbaugröße E	3.500	Max. Zufluss [l/s]	12
Status	Betrieb	Kanalsystem	Misch- & Trennsystem
Hersteller	A3 GmbH	Inbetriebnahme	Jun. 05
Modultyp	Maxflow 65M1	Vorbehandlung	Rechen 5 mm
Betriebsart	Cross-flow		Sand- und Fettfang
Verfahren	Mikrofiltration		Feinrechen 1 mm
Membranfläche [m²]	2.100		(optionale)
Reaktorvolumen [m³]	412		Denitrifikation/ Nitrifikation

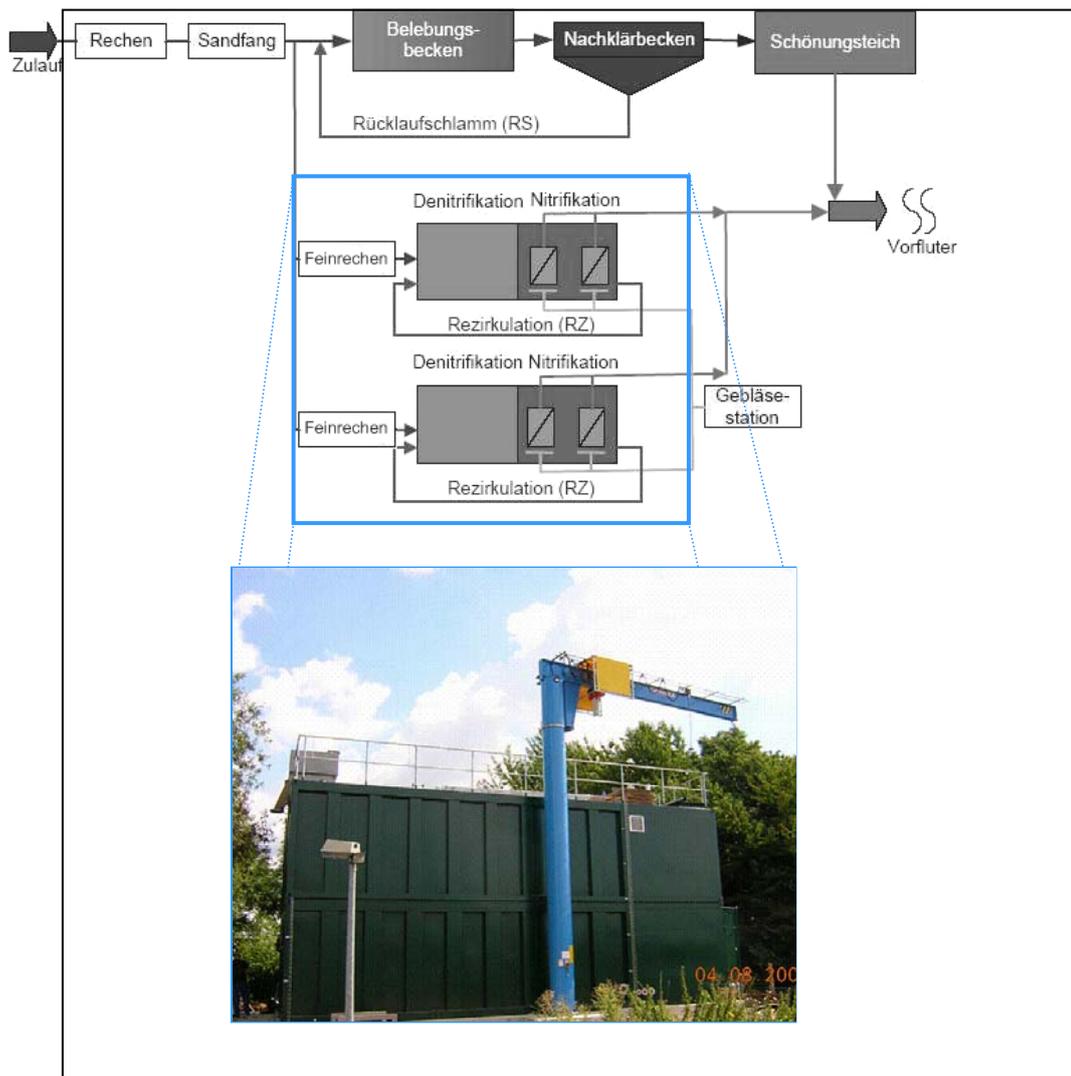


Bild A2.9-6: Verfahrensschema der KA Xanten-Vynen (nach KÜHN, 2006)

KA Richtheim

Das Abwasser des ländlich geprägten Einzugsgebiets der KA Richtheim wurde vor dem Bau der Membranbelebungsanlage in Dreikammerausfallgruben behandelt. Heute wird es mangels nahe gelegenen Vorfluter in den Untergrund infiltriert. Der durchschnittliche Wasserverbrauch im Einzugsgebiet beträgt etwa 80 l/d.

Der mitbehandelte Fremdwasseranteil ist sehr gering, da derzeit ein praktisch neuwertiges Trennsystem vorliegt. Der Energiebedarf schwankt je nach Jahreszeit. Im Sommer liegt er bei 25 kWh/d, im Winter bei 43 kWh/d. Auf den Betrieb der Membrananlage und die Belüftung entfallen dabei 21 kWh/d. Das Verfahrensschema ist im nachfolgenden Bild dargestellt.

Tabelle 9-7: KA Richtheim (WEDI, 2007)

Ausbaugröße E	100	Reaktorvolumen [m³]	18
Status	Betrieb	Max. Zufluss [l/s]	0,12
Hersteller	Kubota	Kanalsystem	Trennsystem
Modultyp	ES 100	Inbetriebnahme	Jun. 03
Betriebsart	Cross-flow	Vorbehandlung	Vorklärung
Verfahren	Mikrofiltration	Nachbehandlung	Bodenfilter
Membranfläche [m²]	160		Versickerungsbeet

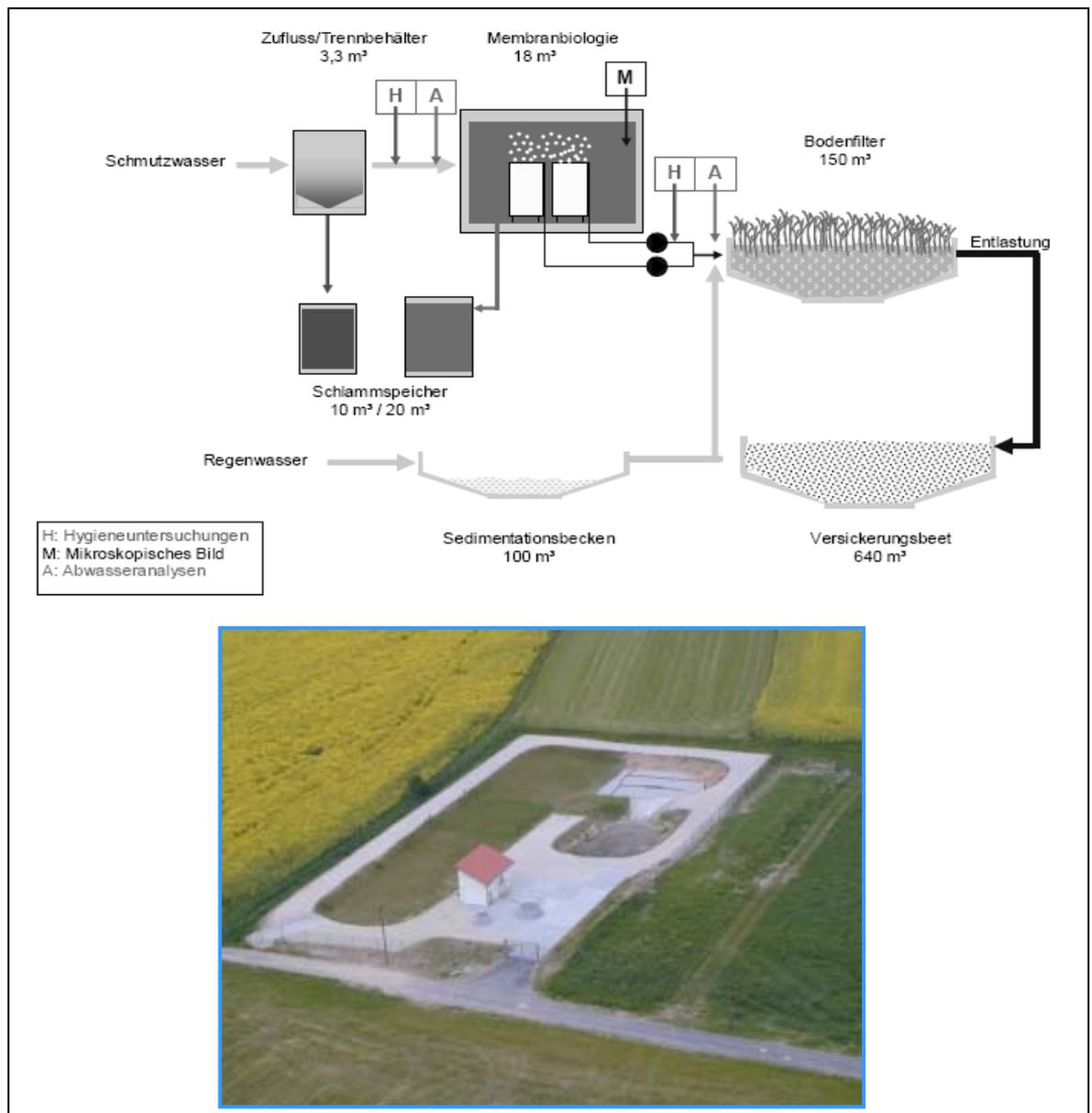


Bild 9-7: Verfahrensschema der KA Richtheim (WEDI, 2007)

KA Waldmössingen

Für den Einsatz der Membrantechnik beim Umbau der konventionellen Kläranlage in Waldmössingen sprachen zwei Gründe: Der Vorfluter führt oberhalb der Einleitung der Kläranlage ca. 30 l Wasser pro Sekunde (bei Trockenheit auch zeitweise nur 10 l/s). Die Kläranlage leitet jedoch im Trockenwetterfall rd. 13 l/s ein. Damit wird die Qualität des Vorfluters maßgeblich vom Ablauf der Kläranlage bestimmt. Des Weiteren sprach für den Einsatz der Membrantechnik eine Kostenschätzung, nach der unter Berücksichtigung von Fördermitteln die Variante „alter Standort mit Membrantechnik“ besonders günstig erschien.

Eine Besonderheit des Einzugsgebietes besteht in dem hohen Fremdwasseranteil. Nach Messungen im Zulauf der Kläranlage konnte festgestellt werden, dass nur ca. 30 % der zulaufenden Wassermenge häusliches Abwasser ist. Lagebedingt ist jedoch von mehr als 53 % Fremdwasser auszugehen. Der Energieverbrauch der Gesamtanlage beträgt im Durchschnitt über den Zeitraum zwischen Mai 2004 und Juni 2006 0,9 kWh/m³. Zur Verdeutlichung der zuflussabhängigen Schwankungen dient **Bild A2.9-8**. Bezogen auf eine Membranfläche von 4.400 m² und einen Durchsatz von 48.451 m³ (Mai 2005) errechnet sich der auf den Durchsatz bezogene Energieverbrauch der Membranstufe überschlägig zu 0,36 kWh/m³.

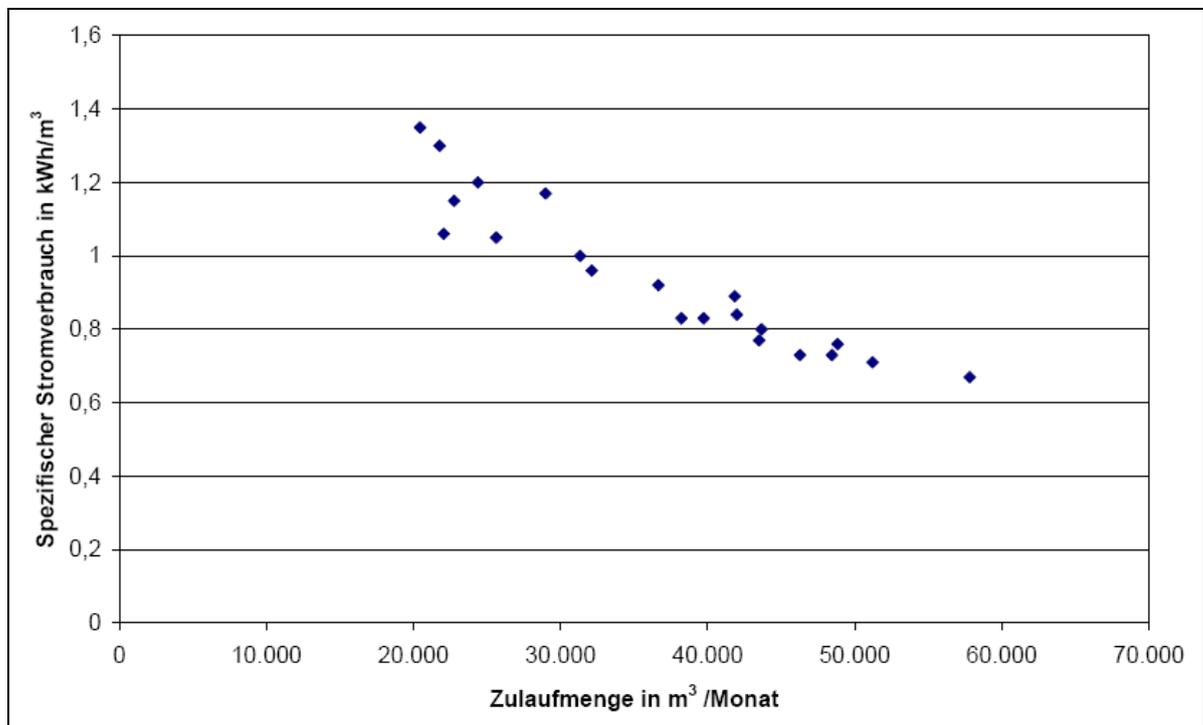


Bild A2.9-8: Einfluss des Anlagendurchsatzes auf den spezifischen Stromverbrauch (KRAMPE, 2006)

Die Kenndaten der KA und das Verfahrensschema sind nachfolgend dargestellt.

Tabelle A2-8: KA Waldmössingen (SCHRAMBERG, 2008)

Ausbaugröße E	2.600	Max. Zufluss [l/s]	25
Status	Betrieb	Kanalsystem	Mischsystem
Hersteller	Zenon	Inbetriebnahme	Mai 04
Modultyp	ZW 500 C	Vorbehandlung	Rechen 5 mm
Verfahren	Mikrofiltration		Sandfang
Membranfläche [m²]	4.400		Feinrechen 0,5 mm
Reaktorvolumen [m³]	700		Denitrifikation/Nitrifikation

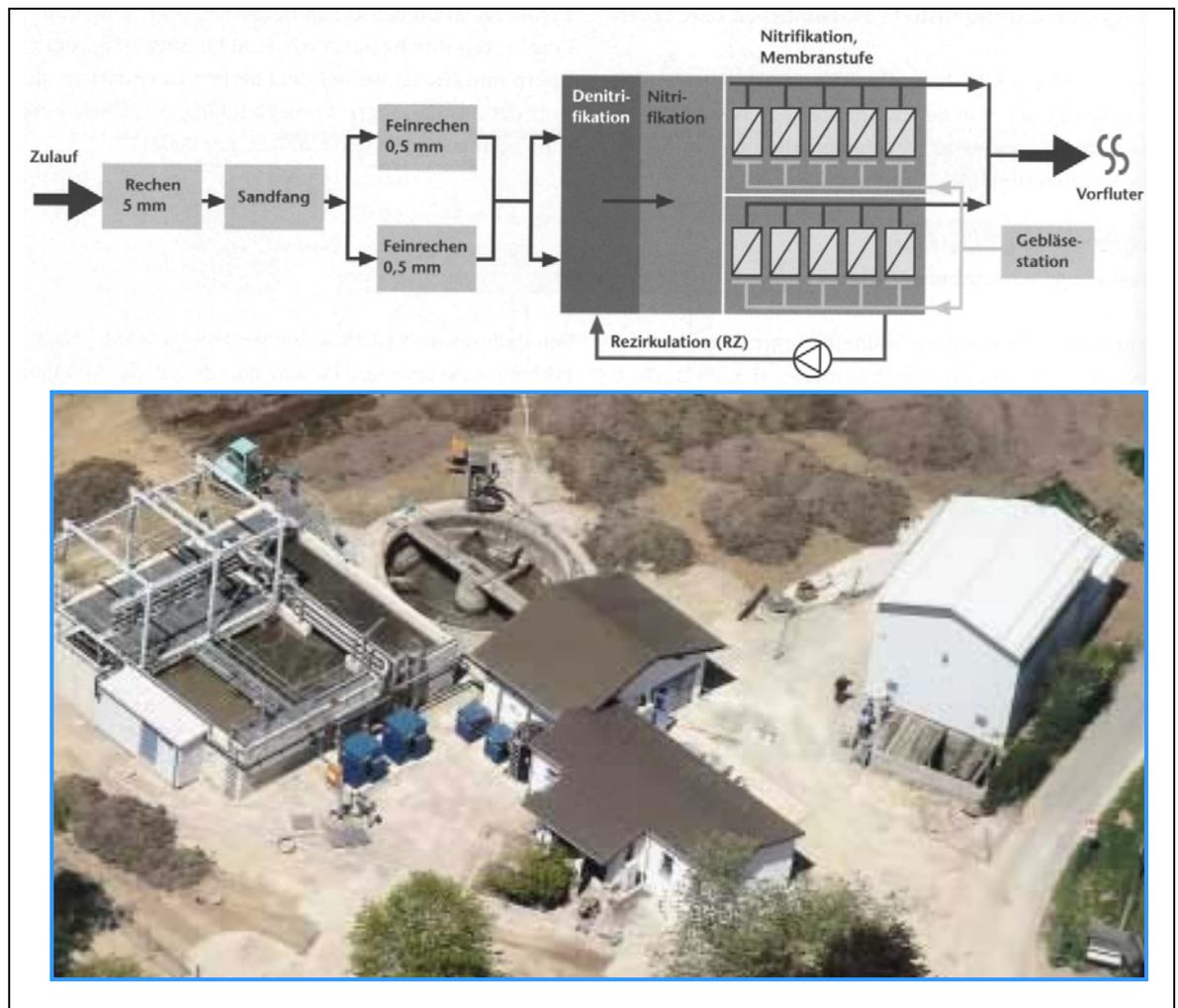


Bild A2.9-9: Verfahrensschema der KA Waldmössingen (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006; SCHRAMBERG, 2008)

A2.2 Anlagen mit Ultrafiltration

KA Kaarst-Nordkanal

Das Gruppenklärwerk Kaarst-Nordkanal des Erftverbands ist mit 80.000 angeschlossenen Einwohnern die größte Membrankläranlage in Deutschland. Auch hier waren die hohe Qualität des gereinigten Wassers und der geringe Flächenbedarf der Anlage ausschlaggebend für den Einsatz der Membrantechnik. Behandelt wird überwiegend häusliches Abwasser und Regenwasser.

Das Nitrifikationsbecken ist als Variozone ausgebildet und kann variabel auch als Denitrifikationsbecken genutzt werden.

Der Energieverbrauch bei Trockenwetter beträgt 10.500 kWh bei 8.500 m³ gereinigtem Abwasser pro Tag. Bild A2.10 stellt die unterschiedliche Empfindlichkeit der Leistungskurven verschiedener Verbraucher bzgl. schwankender hydraulischer Belastungen dar.

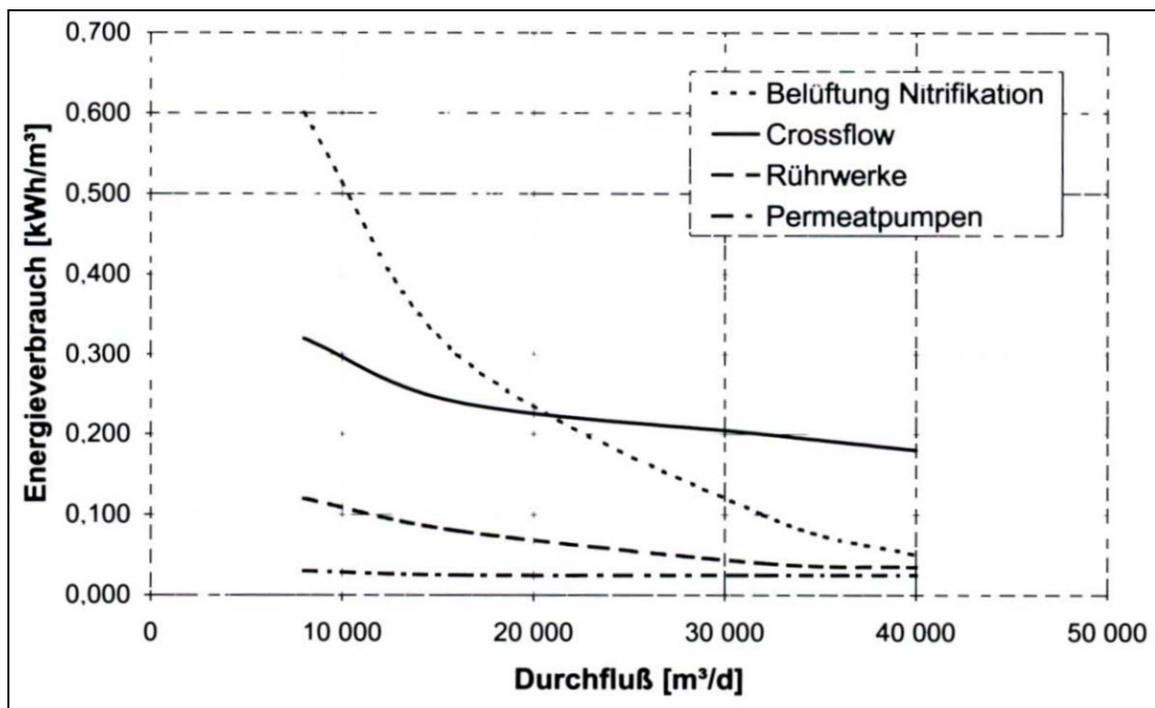


Bild A2.9-10: Energieverbrauch der Membranbelebungsanlage KA Kaarst-Nordkanal in Abhängigkeit der hydraulischen Anlagenbelastung (ENGELHARDT ET AL., 2005)

Tabelle A2-9: KA Kaarst-Nordkanal (Erftverband, 2007)

Ausbaugröße E	80.000	Max. Zufluss [l/s]	522
Status	Betrieb	Kanalsystem	Mischsystem
Hersteller	Zenon	Inbetriebnahme	Jun. 04
Modultyp	ZW 500 c	Vorbehandlung	Grobrechen
Betriebsart	Cross-flow		Filterstufenrechen 5 mm bel. Sand- und Fettfang
Verfahren	Ultrafiltration		Siebtrommel 1,0 mm
Membranfläche [m²]	84.480		Spaltsiebe
Reaktorvolumen [m³]	9.200		Denitrifikation/Nitrifikation mit Variozonen in der DN für die optionale Nitrifikation

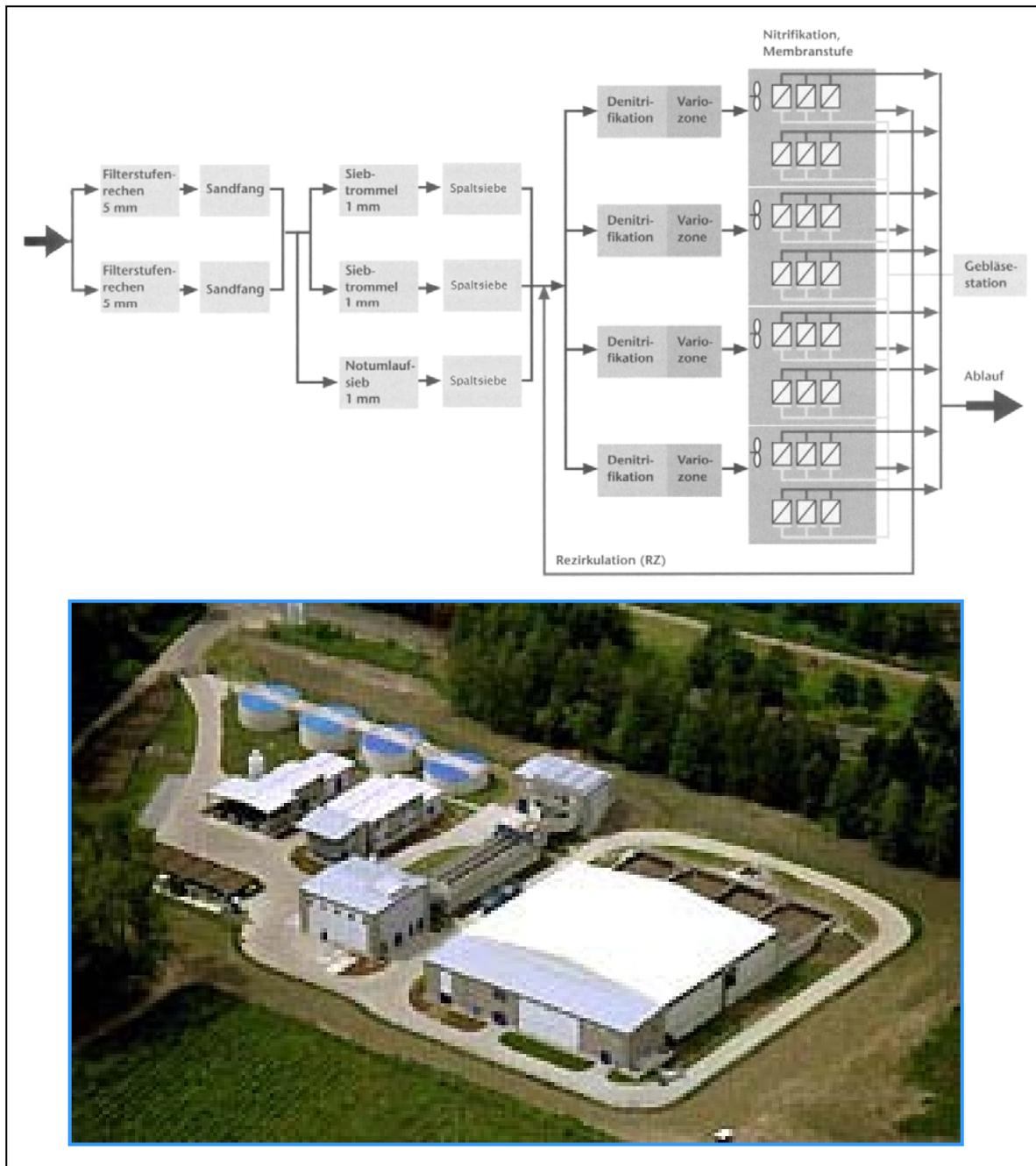


Bild A2.9-11: Verfahrensschema der KA Kaarst-Nordkanal (nach PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006; ERFTVERBAND, 2008)

KA Rödingen

Die im Juni 1999 in Betrieb genommene Membranbelebungsanlage Rödingen des Erftverbands wurde vornehmlich wegen des empfindlichen Vorfluters Finkelbach, dessen Qualität unterhalb der KA überwiegend vom Kläranlagenablauf bestimmt wird, gebaut. Das größtenteils ländliche Einzugsgebiet ist durch bergbaubedingte

Grundwasserabsenkungen geprägt. Gewerbliche und industrielle Abwassereinleitungen sind nicht vorhanden. Die eingesetzten Membranmodule sind in einem separaten Becken installiert. Der Energieverbrauch lag 2005 bei ca. 37.000 kWh pro Monat.

Tabelle A2-10: KA Rödingen (ERFTVERBAND, 2007)

Ausbaugröße E	3.000	Reaktorvolumen [m³]	480
Status	Betrieb	Kanalsystem	Mischsystem
Hersteller	Zenon	Inbetriebnahme	Jun. 99
Modultyp	ZW 500 C	Vorbehandlung	Rechen 3 mm bel. Sand- und Fettfang Denitrifikation/ Nitrifikation (Rezirkulations- schlamm-siebung 0,5mm im Teilstrom)
Verfahren	Ultrafiltration		
Membranfläche [m²]	4.846		
Max. Zufluss [l/s]	37,5		

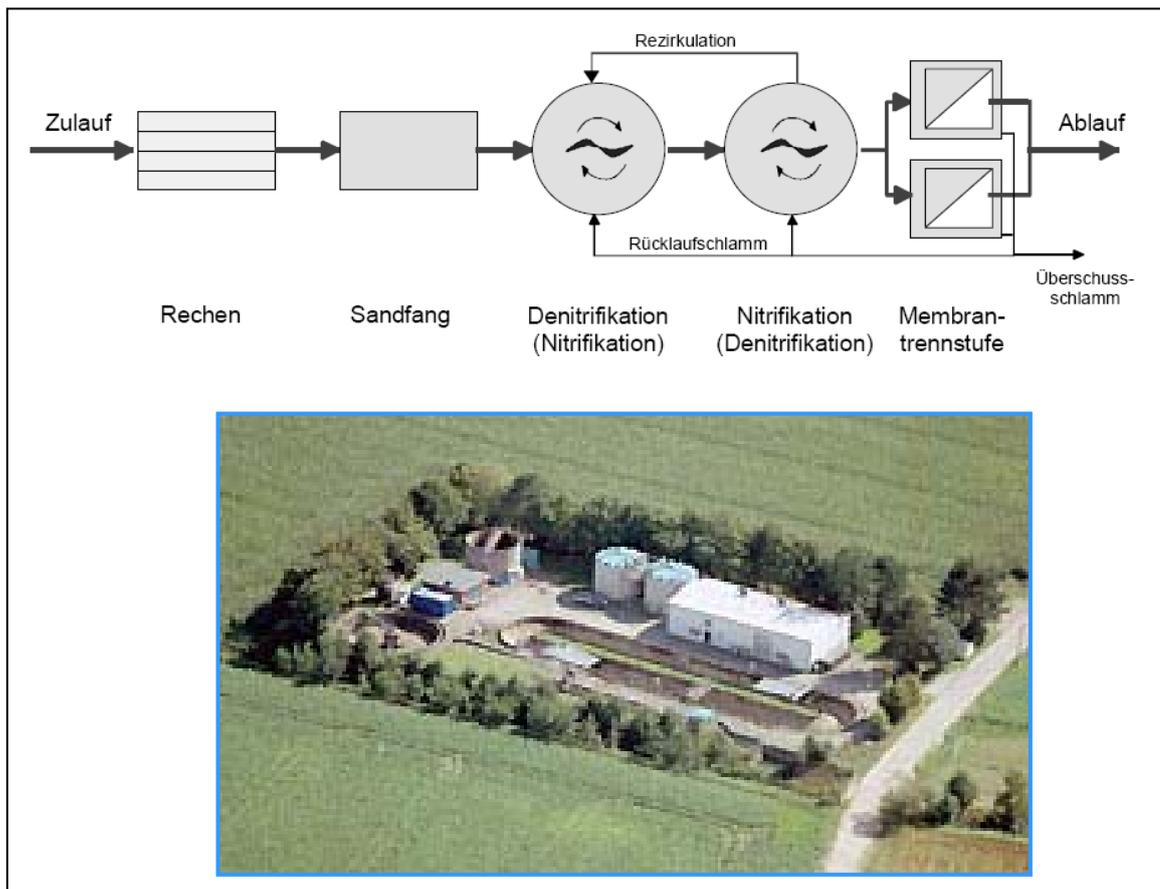


Bild A2.9-12: Verfahrensschema der KA Rödingen (KUBIN, 2005; ERFTVERBAND, 2008)

KA Monheim

Das ehemals großtechnische Pilotvorhaben der Kläranlage Monheim in Bayern zum Betrieb einer Membranbelebungsanlage ist vor allem durch den kleinen Vorfluter im Karst-Gebiet bedingt. Dieser Vorfluter versickert wenige Kilometer hinter der Kläranlage in den Untergrund. Es handelt sich dabei um eine Abwassereinleitung in grundwasserleitenden klüftigen Karst-Untergrund. Eine derartige Einleitung erfordert besonders niedrige Ablaufwerte.

Folgende Betreiberangaben wurden zum Energieverbrauch 2006 getätigt:

Tabelle A2-11: Energieverbrauch der KA Monheim

Biologie [kWh]	429.032
Filtration [kWh]	51.189
NT [kWh]	362.202
Gesamtanlage kWh [kWh/m³]	724.567 (0,907)

Tabelle A2-12: KA Monheim (WEDI, 2007)

Ausbaugröße [E]	9.700	Reaktorvolumen [m³]	1.640
Status	Betrieb	Kanalsystem	Mischsystem
Hersteller	Zenon	Inbetriebnahme	Jul. 03
Modultyp	ZW 500 c	Vorbehandlung	Feinsieb 1 mm
Betriebsart	Cross-flow		Langsandfang
Verfahren	Ultrafiltration		Fettfang
Membranfläche [m²]	123.200		Denitrifikation/ Nitrifikation
Max. Zufluss [l/s]	80		

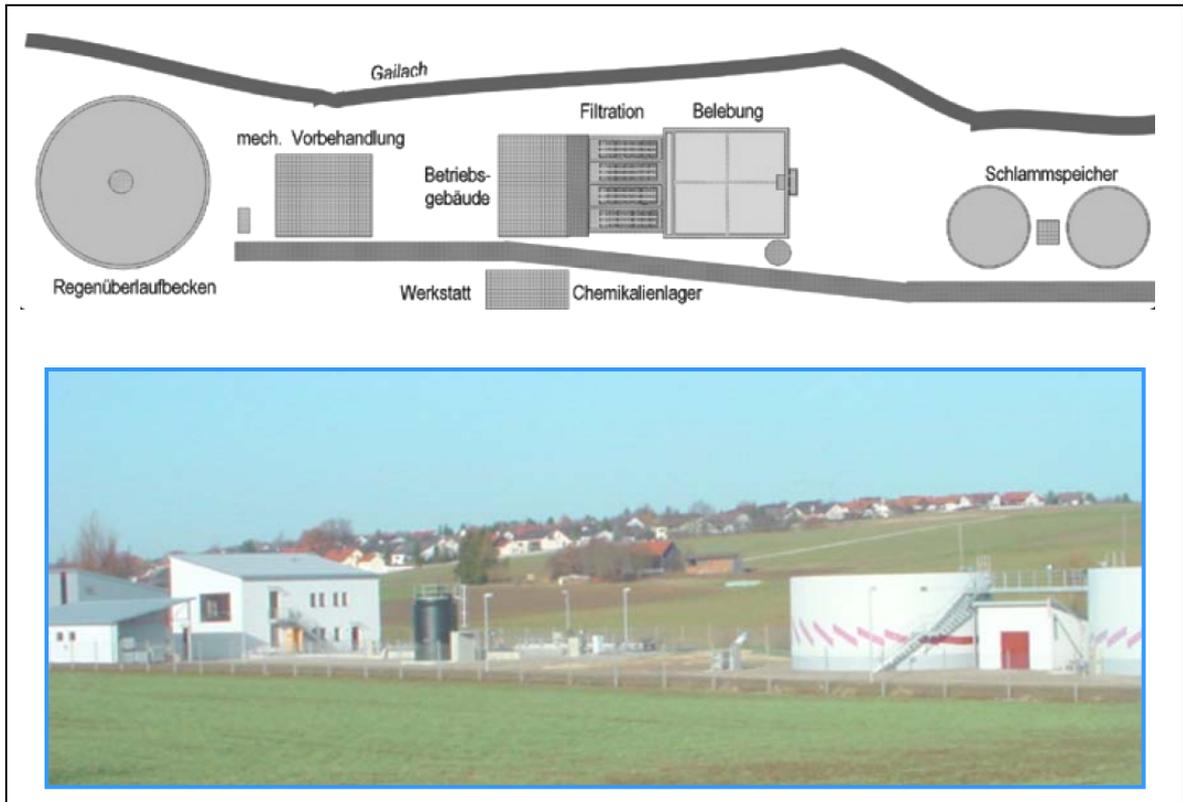


Bild A2.9-13: Schematischer Lageplan der KA Monheim (WEDI ET AL., 2004; STADT MONHEIM, 2008)

KA Merklingen

Eine Besonderheit der Kläranlage in Merklingen ist, dass das gereinigte Abwasser aufgrund besonderer geologischer Verhältnisse auf der Schwäbischen Alb direkt über einen Versickerungsschacht in den Untergrund geleitet wird. Um den Anforderungen der vorliegenden Wasserschutzzone III gerecht zu werden, werden derzeit 2 verschiedene Verfahren untersucht. Dazu wird der Ablauf der Nachklärung entweder einer Ultrafiltration oder einem Sandfilter zugeführt. In einem kleinen Versuchsbetrieb wird das Permeat der Membranbelebungsanlage anschließend noch über einen Aktivkohlefilter geschickt. Die Ergebnisse der Betriebsweisen werden in einem wissenschaftlichen Begleitprogramm verglichen.

Der Energieverbrauch der Membranbelebungsanlage bei Vollaustattung (bezogen auf den Durchsatz der Membrananlage mit 5 l/s) beträgt ca. 0,3 kWh/m³. Die Verbraucher sind die Feed-(Beschickungs-)pumpe und die Rückspülpumpe, ferner Dosierpumpen (u.a. für Reinigungsmittel) und ein Kompressor (für pneumatische Anlagenteile). Die Peripherie der Anlage, hierzu gehört insbesondere ein Vorlagebehälter mit Rührwerk sowie die Zulaufpumpe für den Vorlagebehälter, verbraucht zusätzlich etwa 0,3 -

0,4 kWh/m³. Daher liegt der gesamte Energieverbrauch für die biolog. Abwasserbehandlung zwischen 0,6 - 0,7 kWh/m³. Ergänzend kommt der Energieverbrauch der Vorbehandlung hinzu. Zur Abschätzung dieses Verbrauchs werden Orientierungswerte zugrunde gelegt aus denen sich ein zusätzlicher Energiebedarf von ca. 0,44 kWh/m³ ableitet.

Tabelle A2-13: KA Merklingen (HARTL, 2007; IAT, 2007)

Ausbaugröße E	2.300	Max. Zufluss [l/s]	5
Status	Betrieb	Kanalsystem	Mischsystem
Hersteller	X-flow	Inbetriebnahme	Sep 04
Modultyp	S-225-FSFC PVC UFC 1,5 M5	Vorbehandlung	Rechen 5 mm bel. Sand- & Fettfang Simultane Denitrifikation Nachklärung
Betriebsart	Dead-End		
Verfahren	420		
Membranfläche [m²]	2.300		

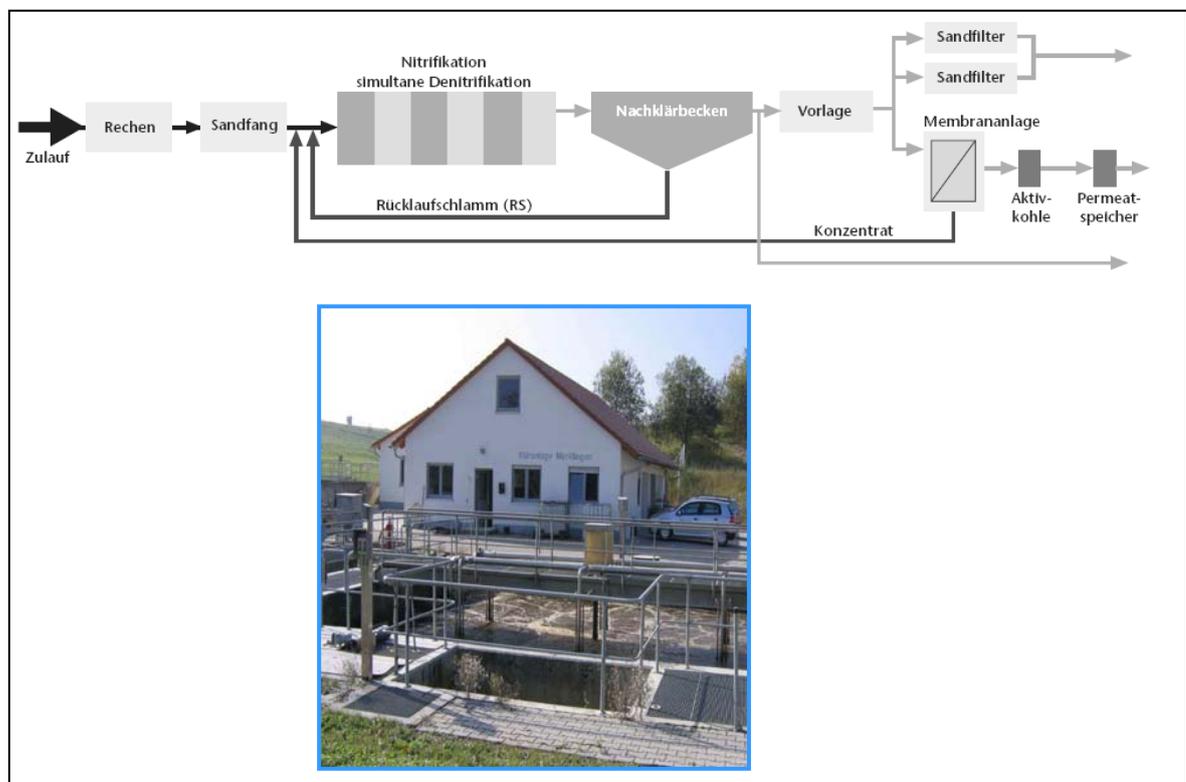


Bild A2.9-14: KA Merklingen (STADT MERKLINGEN, 2008)

KA Bondorf-Hailfingen

Auch bei der Kläranlage Bondorf-Hailfingen wurden besondere Anforderungen an die Ablaufqualität gestellt. Hauptursache dafür ist der Vorfluter Kochhartgraben, der in den Sommermonaten z.T. erst unterhalb der Kläranlage Wasser führt. Dieser Graben filtert nach wenigen Kilometern in den Untergrund. Diese Infiltration in das Grundwasser erfordert ganz besondere Sorgsamkeit, da die Kläranlage in einem Wasserschutzgebiet der Zone II A liegt. Um die erhöhten Anforderungen der Genehmigungsbehörde bezüglich des Phosphatgehaltes, der abfiltrierbaren Stoffe und der Hygienisierung einhalten zu können, wird heute das Wasser der Nachklärung (bei sehr großem KA-Zufluß nur teilweise) einer Membrananlage zugeführt und erst danach in den Vorfluter eingeleitet. Der Energiebedarf der Membrananlage liegt bei 0,134 kWh/m³ filtrierten Wassers. Bezüglich der erreichten Hygienisierung konnte der Betreiber folgende differenzierte Angaben liefern.

Tabelle A2-14: Betriebswerte bzgl. der erreichten Hygienisierung vom 05.10.06 (KLEIN, 2006)

Parameter	Einheit	Grenzwerte	Betriebswerte
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l	<5	
Fäkalcoliforme	MPN/100 ml	100	40
Gesamtkoliforme	MPN/100 ml	<500	230
Fäkalstreptokokken	KBE/100 ml	100	9l

Tabelle A2-15: KA Bondorf-Hailfingen (KLEIN, 2006)

Ausbaugröße E	9.000	Max. Zufluss [l/s]	36
Status	Betrieb	Kanalsystem	Mischsystem
Hersteller	Zenon	Inbetriebnahme	Dez. 04
Modultyp	ZW 1000	Vorbehandlung	Rechen 6 mm
Betriebsart	Dead-End		Sandfang, Fettfang
Verfahren	Ultrafiltration		biol. Phosphorelimination
Membranfläche [m²]	6.720		Denitrifikation/Nitrifikation
Reaktorvolumen [m³]	>5		Nachklärung

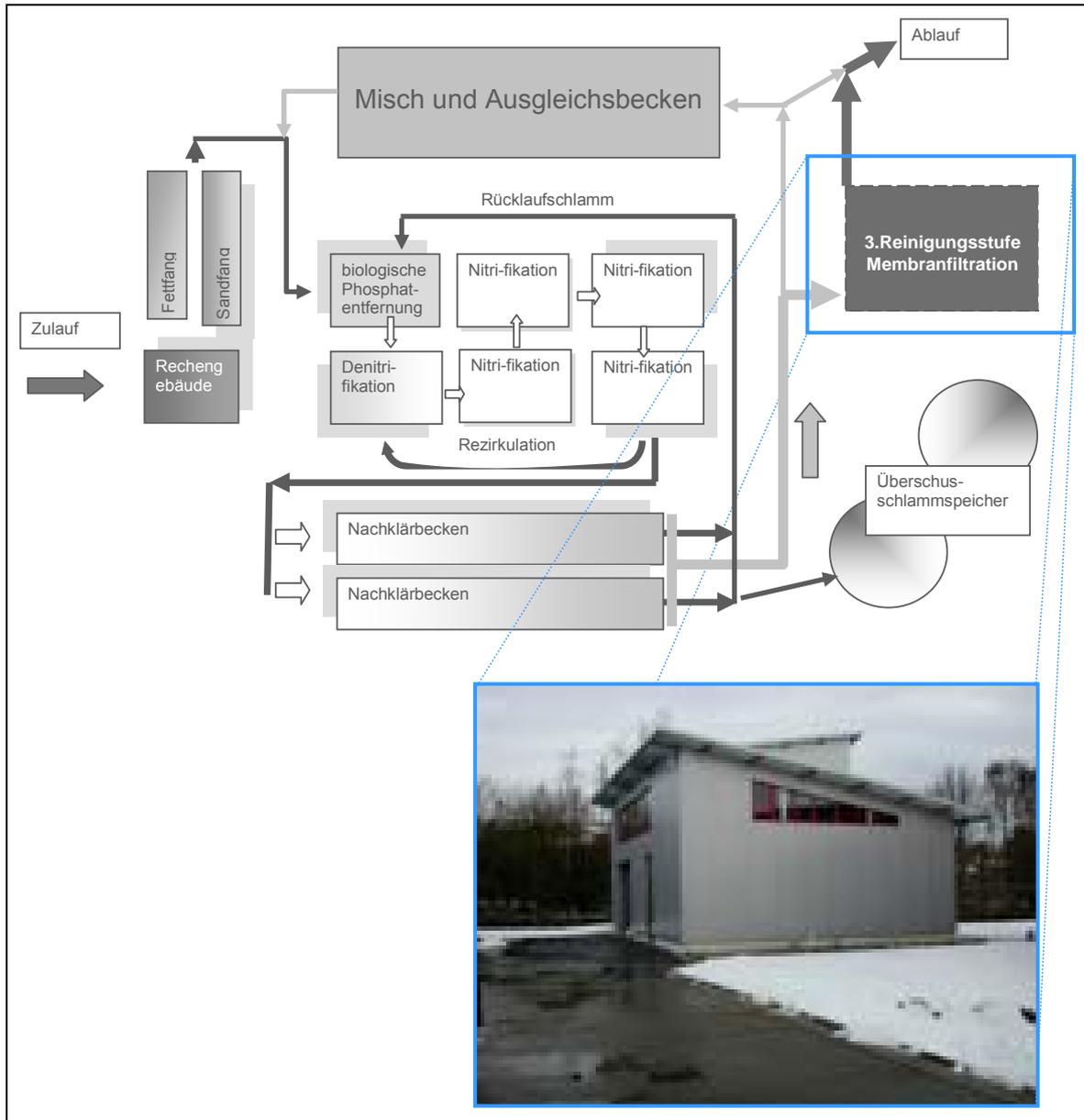


Bild A2.9-15: Fließschema der KA Bondorf-Hailfingen (KLEIN, 2006)

KA Markranstädt

Hauptgründe für die Installation der Membrantechnologie auf dieser KA war der belastungsschwache Vorfluter, großer Platzmangel und auch das günstige Trocken-/Regenwetterzuflussverhältnis ($Q_m=1,1Q_t$). Derzeit sind 10.000 E angeschlossen, geplant ist eine Anschlussgröße von ca. 12.000 E.

Der Energieverbrauch der Anlage wird vom Betreiber gem. Tab. A2-16 aufgeschlüsselt. Zur Reduzierung des Energiebedarfs bei der Cross-flow-Belüftung wird das so genannte Air-Cycling eingesetzt, wodurch nur noch die Hälfte der Module gleichzeitig belüftet wird.

Tabelle A2-16: Energieverbrauch der KA Markranstädt des Jahres 2005 (STEIN, 2006)

Verfahrenstufe	E-Verbrauch	Abwassermenge	E-Verbrauch	E-Verteilung
	kWh/a	m ³ /a	kWh/m ³	%
Mechanik	108.461	735.576	0,15	10,9
Biologie	433.863	735.576	0,59	43,4
Mikrofiltration	305.868	735.576	0,42	30,6
Schlamm und Sonstiges	150.531	735.576	0,20	15,1
Summe	998.723	735.576	1,36	100,0

Tabelle A2-17: KA Markranstädt (STEIN, 2007)

Ausbaugröße E	10.000	Max. Zufluss [l/s]	50
Status	Betrieb	Kanalsystem	Mischsystem
Hersteller	Zenon	Inbetriebnahme	Jan. 00
Modultyp	ZW 500 C	Vorbehandlung	Stufenrechen 3 mm
Betriebsart	Cross-flow		Feinsieb 0,75 mm
Verfahren	Ultrafiltration		bel. Sand- und Fettfang
Membranfläche [m²]	8.800		Denitrifikation/Nitrifikation
Reaktorvolumen [m³]	2.310		ation

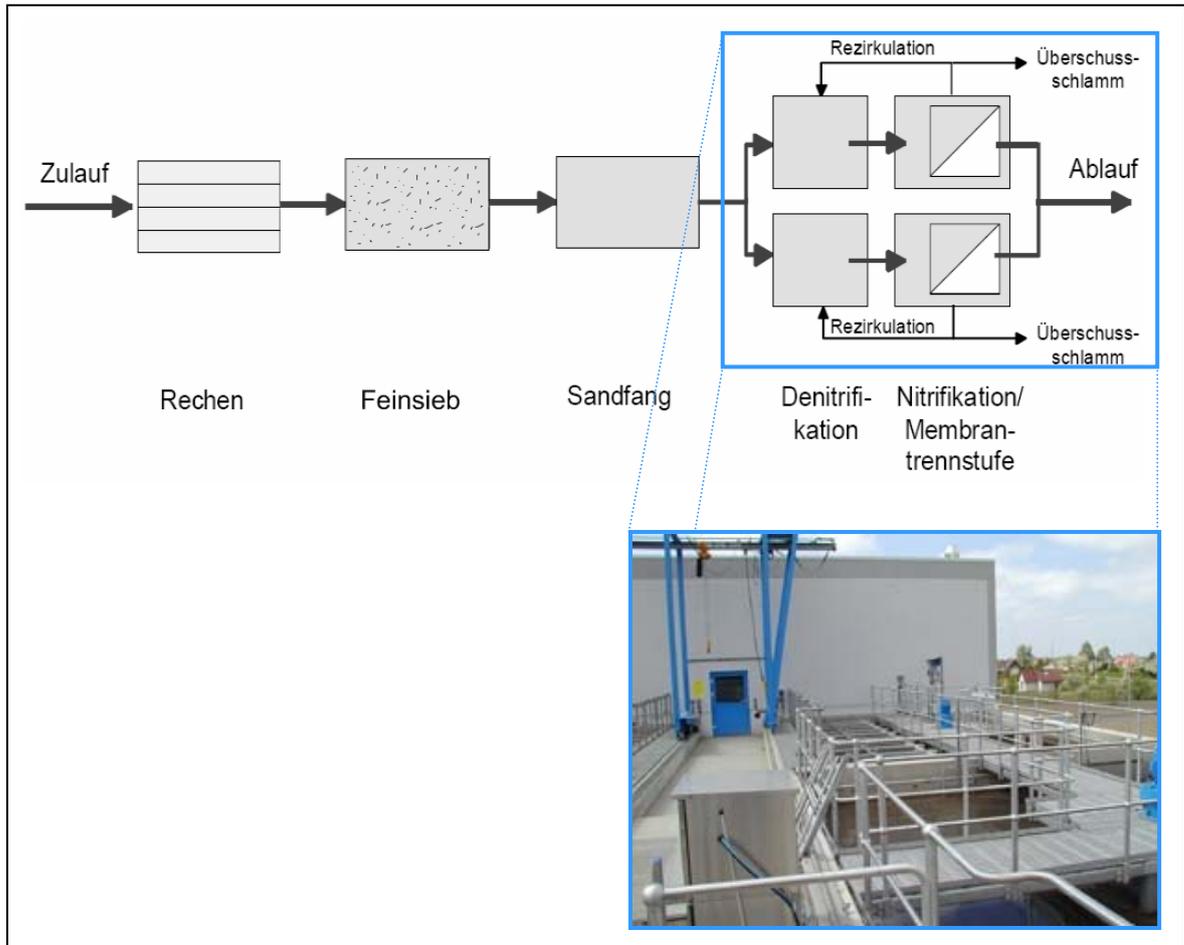


Bild A2.9-16: Verfahrensschema der KA Markranstädt (nach KUBIN, 2004; SAG, 2008)

KA Knautnaundorf

Die Mitte 2002 in Regelbetrieb genommene Anlage in Knautnaundorf wird mit einem z. T. problematischen Abwasserzulauf betrieben. Das ankommende Abwasser besteht zu 70 % aus industriellem Abwasser und weist eine extrem stark schwankende CSB-Konzentration auf. Zeitweilig treten auch hydraulische Überlastungen der Kläranlage durch Fehleinleitungen und Regenwasser auf, wobei unter Umständen dann auch biologische Hemmstoffe im Abwasser vorhanden sind. Aufgrund dieser besonderen Belastungen kam es im Anfangsbetrieb in unregelmäßigen Abständen zum Absterben des Belebtschlammes. Mittlerweile wurden aber verschiedene Erweiterungsmaßnahmen realisiert, um diesen Problemen zu begegnen (LANGBEIN, 2005). Die neuste Anpassung der Anlage wurde im März 2007 in Betrieb genommen. Alle Betriebswerte beschreiben aber die Anlagenkonstellation im Jahr 2005. Zu diesem Zeitpunkt betrug der durchschnittliche Energieverbrauch 101.355 kWh/a. Bei einer Abwassermenge von 33.224 m³/a ergibt sich daraus ein Verbrauch von 3,05 kWh/m³.

Tabelle A2-18: KA Knautnaundorf (STEIN, 2007)

Ausbaugröße E	1.300	Max. Zufluss [l/s]	5,25
Status	Betrieb	Kanalsystem	Trennsystem
Hersteller	Martin Systems AG	Inbetriebnahme	Okt. 01
Modultyp	VRM 20/252	Vorbehandlung	Rechen zweistufig 3/1 mm Sandfang Feinsieb 1 mm Denitrifikation/Nitrifikation
Betriebsart	Cross-flow		
Verfahren	Ultrafiltration		
Membranfläche [m²]	702		
Reaktorvolumen [m³]	68		

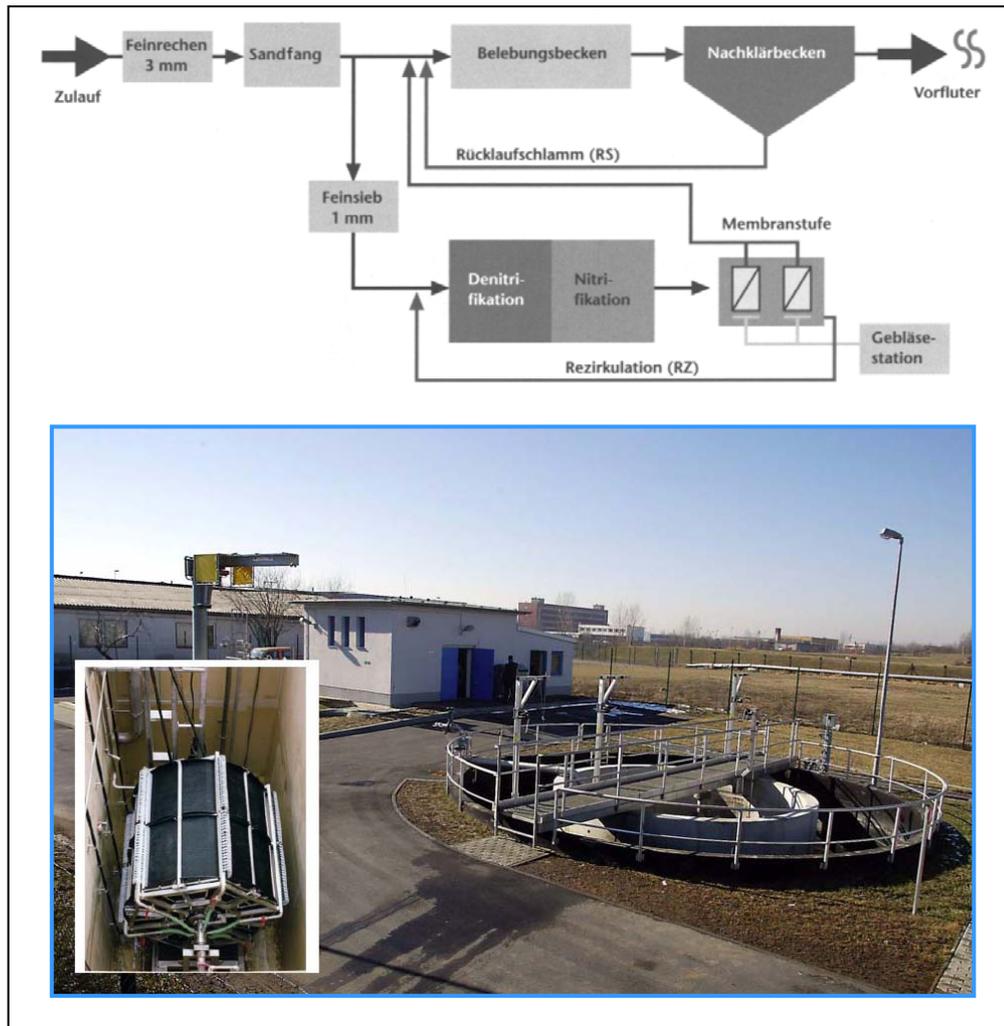


Bild A2.9-17: Verfahrensschema der KA Knautnaundorf (PINNEKAMP und FRIEDRICH, 2006; MARTIN SYSTEMS, 2008)

Anhang 3

Bewertungsbogen für das MUNLV

Begutachtungsbogen FuE-Vorhaben Membrantechnik			
I. Allgemeine Angaben			
Forschungsantrag Nr.:	Titel des Antrags:		
<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%; height: 100px;" type="text"/>		
Datum der Antragstellung:			
<input style="width: 100%;" type="text"/>			
Zur Begutachtung vorgelegt am:			
<input style="width: 100%;" type="text"/>			
Antragsteller:	Partner/Beteiligte:		
<input style="width: 100%; height: 60px;" type="text"/>	<input style="width: 100%; height: 60px;" type="text"/>		
Laufzeit:	Gesamtsumme* [€]:	Beantragte Summe* [€]:	Förderquote [%]:
<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>
	nach Prüfung:	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>
geplanter Beginn:	Sachmittel* [€]:	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>
<input style="width: 100%;" type="text"/>	Personalmittel* [€]:	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>
<small>* inkl. gesetzl. MwSt</small>			
Forschungsbereich:			
<u>Anwendungsgebiet</u>	<u>Membranverfahren</u>	<u>Sonstiges</u>	
<input type="checkbox"/> Trinkwasseraufbereitung	<input type="checkbox"/> Mikrofiltration	<input type="checkbox"/> Betriebsoptimierung	
<input type="checkbox"/> kommunale Abwasserreinigung	<input type="checkbox"/> Ultrafiltration	<input type="checkbox"/> Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen	
<input type="checkbox"/> Industrieabwasserreinigung	<input type="checkbox"/> Nanofiltration	<input type="checkbox"/> Analytik	
<input type="checkbox"/> Dienstleistung	<input type="checkbox"/> Umkehrosmose	<input type="checkbox"/> Technikerprobung	
<u>Maßstab der Untersuchung:</u>		<input type="checkbox"/> Ozonung	
<input type="checkbox"/> Großtechnischer Maßstab			
<input type="checkbox"/> Halbtechnischer Maßstab			
<input type="checkbox"/> Labormaßstab			
II. Formale Voraussetzungen (siehe VI.)			
<u>Antrag</u>		ja	nein
Vollständigkeit		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aktualität		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Angemessenheit der Bearbeitungsdauer		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ausreichende Beschreibung des Arbeitsplanes		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ausreichende Beschreibung der Verwertbarkeit der Projektergebnisse		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Liegen gleichartige Erkenntnisse bereits vor oder sind sie in kurzer Zeit zu erwarten?		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<small>Begutachtungsbogen FuE-Vorhaben Membrantechnik, Version 6.0</small>			
			<small>Seite 1</small>

III. Ergebnisse der Begutachtung

Empfehlung:

- Förderung mit Auflagen Verschiebung Ablehnung erneute Antragstellung nach Überarbeitung

Erläuterungen:

IV. Beschreibung des Vorhabens

Zielsetzung:

Geplantes Vorgehen:

V. Bedeutung, Nutzen und Notwendigkeit des Vorhabens

- aufgeführte Erläuterungen sind unzureichend

Bedeutung:

- | | |
|--------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> weltweit | <input type="checkbox"/> Ländlicher Raum |
| <input type="checkbox"/> Europaebene | <input type="checkbox"/> Gemeinde > 1.000 E |
| <input type="checkbox"/> Bundesebene | <input type="checkbox"/> Gemeinde > 10.000 E |
| <input type="checkbox"/> Landesebene | <input type="checkbox"/> Städte > 100.000 E |

Nutzen:

- sehr hoch
 hoch
 gering
 ohne

Notwendigkeit:

- kurzfristig
 mittelfristig
 langfristig

Erläuterungen:

VI. Erläuterungen zu II. „Formale Voraussetzungen“

VII. Beurteilung der beantragten Mittel

- angemessen teilweise Überprüfung erforderlich vollständige Überprüfung erforderlich unangemessen

Erläuterungen:

VIII. Beurteilung der geplanten Projektdauer

- angemessen teilweise Überprüfung erforderlich vollständige Überprüfung erforderlich unangemessen

Erläuterungen:

IX. Sonstiges

Düsseldorf, den
gez.

Verteiler:

Anhang 4

Tagungsprogramm und Tagungsband zum Workshop Membrantechnik in NRW