

Stand der Technik von Membranverfahren

Einsatzmöglichkeiten bei der Vergärung von Abwässern

Projekt 23770 Vertrag 63369

Ausgearbeitet durch

engeli engineering, 8173 Neerach, arbi GmbH, 6340 Baar

Im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

Schlussbericht November 2001

Auftraggeber:

Forschungs- und P+D Programm Biomasse des
Bundesamtes für Energie

Auftragnehmer:

engeli engineering
Hohmatrainstr. 1
CH-8173 Neerach

Tel. 01-858 30 20, Fax 01-858 38 40, Email:engeli@compuserve.com

Autoren:

Hans Engeli, Dipl. sc. nat. ETH
Werner Edelmann, Dr. sc. nat. ETH

Dieses Dokument ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie erarbeitet worden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist alleine der/die Autor/in/en verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb:

ENET
Egnacherstrasse 69 · CH-9320 Arbon
Tel. 071 440 02 55 · Tel. 021 312 05 55 · Fax 071 440 02 56
enet@temas.ch · www.energieforschung.ch · www.energie-schweiz.ch

Dank

Wir danken dem Bundesamt für Energie, BFE, in Bern für die finanzielle Unterstützung, welche diesen Bericht ermöglicht hat. Last but not least danken wir allen beteiligten Herstellern von Anlagen und Komponenten, sowie all jenen, welche uns mit kritischen Fragen oder durch Unterstützung mit Daten bei der Verfassung des vorliegenden Berichtes unterstützt haben.

INHALTSVERZEICHNIS

	<u>Seite</u>
0 ZUSAMMENFASSUNG - SUMMARY - RESUME	1
1 EINLEITUNG	5
1.1 Ausgangslage	5
1.2 Zielsetzung des Projektes	6
1.3 Grundlagen	6
2 VERFAHRENSTECHNIK	6
2.1 Grundlagen der Membranfiltration	6
2.2 Einsatzbereiche der Membrantechnik	8
2.2.1 Modul- und Membrantypen	8
2.2.2 Aufbau von häufig verwendeten Modulkonfigurationen	9
2.2.3 Membran- und Modulwahl	11
2.3 Einsatz der Membrantechnik in der Abwasserbehandlung	12
2.3.1 Aerobe Anwendungen	12
2.3.2 Anaerobe Anwendungen	12
2.3.3 Ersatz von Belüftungsanlagen	13
3 MASSEN- UND ENERGIEFLÜSSE	13
3.1 Typische Anwendungen	13
3.1.1 Presswasseraufbereitung mit Membrantechnik	13
3.1.2 Membranverfahren als Vorstufe einer Anaerobie	16
3.2 Abschätzen des Energiesparpotenzials	17
4 KOSTEN	19
5 MACHBARKEIT	20
5.1 Energetische und ökonomische Grenzen des Verfahrens	20
5.2 Wiederverwertung des gewonnenen Permeates	20
6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	20
7 ABKÜRZUNGEN	21
8 LITERATUR	22
9 ANHANG	23

0 ZUSAMMENFASSUNG - SUMMARY - RESUME

- ⇒ Bei tiefen Konzentrationen von organischen Inhaltsstoffen in einem Abwasser arbeiten die anaeroben Bakterien nicht mehr wirkungsvoll und die Energiebilanz der Anlage wird negativ, da ein grosser Prozessenergiebedarf zur Erwärmung des „unproduktiven“ Wassers entsteht. Diesem Umstand kann entgegengewirkt werden, wenn die Abwässer mit Hilfe von Membranverfahren aufkonzentriert werden.
- ⇒ Eine Trennung schwach belasteter Ströme in gereinigtes Permeat und vergärbare Konzentrat erhöht daher das Potenzial der Vergärung von Industrieabwässern ganz signifikant.
- ⇒ Als Grundlage für die Erstellung des vorliegenden Berichtes dienten Kongresse und Ausstellungen, persönliche Kontakte zu Personen und Firmen, die in diesem Gebiet tätig sind bzw. publiziert haben, sowie durch Datenbankrecherchen gefundene Publikationen.
- ⇒ Nach dem Stand der Technik werden die Verfahren Nanofiltration, Ultrafiltration und Umkehrosmose zur Aufbereitung von industriellen und kommunalen Abwässern angewendet.
- ⇒ Dementsprechend bietet die Mehrheit der klassischen Anbieter in der Abwassertechnik Membranverfahren an.
- ⇒ Zu den typischen Anwendungen gehören die Membranbioreaktoren, in denen mittels Membrantrennung die Biomasse abgetrennt und zurückgehalten wird.
- ⇒ Durch diese Kombination lassen sich das Reaktorvolumen verringern und der Abbaugrad erhöhen.
- ⇒ Gleichzeitig entsteht ein Permeat welches Vorfluterqualität aufweisen und vielfältig wieder verwertet werden kann.
- ⇒ Das Aufkonzentrieren von schwach belasteten Abwässern zur Eignung für eine nachgeschaltete Vergärung kann den Energieverbrauch senken.
- ⇒ Weil bisher die technische Machbarkeit der Membrantechnik im Vordergrund stand, sind betreffend Energieverbrauch und Kosten noch weitere Abklärungen notwendig.
- ⇒ Es hat sich gezeigt, dass aufgrund der zunehmenden Verbreitung und Entwicklung der Membrantechnik sowohl der Energieverbrauch als auch die Anlagekosten tendenziell sinken.
- ⇒ Insbesondere die sogenannten Niederdruck oder Niedrigenergieverfahren sind vielversprechend.
- ⇒ Beispielsweise sind die Membrankosten im Zeitraum von 1992 bis 1999 von rund 400 USD/m² auf rund 100 USD/m² gesunken.

SUMMARY

- ⇒ In wastewater with low organic loadings anaerobic microorganisms are working at a low efficiency. The plant's energy balance becomes negative because a big need of process energy to warm up the "unproductive" water is created. This can be dealt with by concentrating the waste waters by means of membrane systems.
- ⇒ Separation of slightly loaded flows into purified permeate and digestible concentrate may therefore increase the potential of digestion in industrial waste water significantly.
- ⇒ As a basis for this report the following connections were used; congresses and exhibitions, personal contacts with people and companies who work and have published in this field as well as data base research.
- ⇒ According to the technical standard the different processes of nanofiltration, ultrafiltration and reverse osmosis are used to purify industrial or domestic waste water.
- ⇒ Therefore the majority of classic suppliers of waste water technology offer membrane systems.
- ⇒ The membrane bio-reactors belong to the typical systems used. In this system the biomass is separated and retained by a membrane.
- ⇒ Due to this combination the volume of the reactor can be reduced and the grade of degradation increased.
- ⇒ Simultaneously a permeate is produced which can reach the quality of the desired effluent and which can be re-used manifold.
- ⇒ Additional concentration of weakly loaded waste water to be used in a subsequent digestion can reduce energy consumption.
- ⇒ Due to the fact that mainly the technical feasibility of the membrane technology was emphasised, some further evaluation in regard of energy consumption and cost has to be made.

RESUME

- ⇒ à de faibles concentrations en composés organiques dans les eaux usées, les bactéries anaérobies ne travaillent plus efficacement et le bilan énergétique de l'installation devient négatif puisqu'une plus grande part d'énergie de procédé est requise pour le réchauffage de l'eau "improductive". Cet obstacle peut être évité en concentrant les eaux usées au moyen de procédés membranaires
- ⇒ une séparation des flux faiblement chargés en un perméat épuré et un concentrat méthanisable augmente de façon significative le potentiel de la digestion des eaux usées industrielles
- ⇒ les bases d'élaboration du présent rapport sont constituées par les congrès et expositions et les documents qui s'y réfèrent, par des contacts personnels avec des spécialistes et des entreprises actifs dans ce domaine ainsi que par les publications trouvées lors de recherches dans des banques de données
- ⇒ l'état de la technique montre que des procédés de nano-filtration, ultra-filtration et osmose inverse sont appliqués au traitement d'eaux usées urbaines et industrielles
- ⇒ la plupart des fournisseurs traditionnels de techniques d'épuration proposent des procédés à membranes
- ⇒ les bioréacteurs à membranes constituent des applications typiques dans lesquels la biomasse est séparée et retenue par séparation membranaire
- ⇒ grâce à cette combinaison on parvient à réduire les volumes des réacteurs et à augmenter le taux de dégradation
- ⇒ simultanément on produit un perméat qui respecte les normes de rejet et peut dans bien des cas, être réutilisé
- ⇒ la concentration d'effluents faiblement chargés en vue de permettre de les digérer peut diminuer la consommation d'énergie
- ⇒ d'autres investigations concernant la consommation énergétique et les coûts sont à réaliser jusqu'à ce que la faisabilité technique de la technique membranaire se manifeste au premier plan
- ⇒ on a pu constater qu'en raison de la diffusion et du développement croissant de la technique membranaire, tant la consommation d'énergie que le coût des installations tendent à baisser
- ⇒ en particulier, les procédés dits à basse pression ou à faible énergie sont prometteurs
- ⇒ à titre d'exemple, les coûts des membranes sont passés de 400 USD/m² à 100 USD/m² entre 1992 et 1999.

ANBIETER VON MEMBRANVERFAHREN IM ÜBERBLICK MANUFACTURERS OF MEMBRANE SYSTEMS

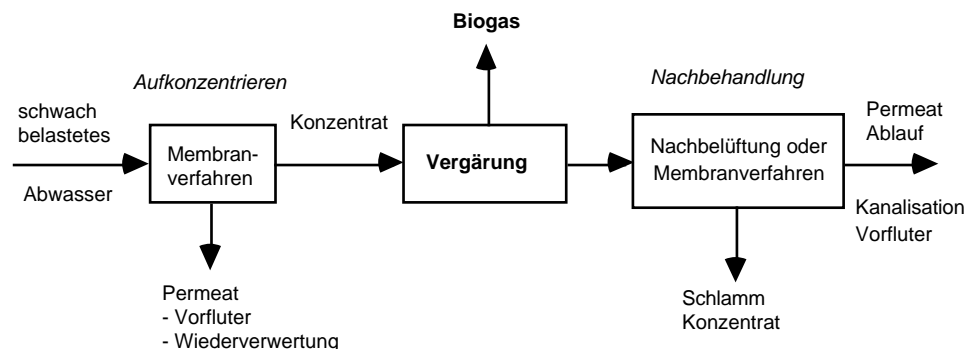
ANBIETER/MANUFACTURER	MF	UF	UO RO
AWATEC AG www.awatec.ch		X	X
Berghof Filtrationstechnik www.berghof.com	X	X	X
Bioscan A/S www.bioscan.dk		X	X
cm-celfa, Membrantrenntechnik AG www.folex.ch --> Link zu cm-celfa	X	X	X
DEGREMONT SA www.degremont.ch bzw. com		X	X
Electro-Union GmbH www.electrounion.it		X	X
Haase Energietechnik GmbH www.haase-energietechnik.de		X	X
Imecon AG www.imecon.ch		X	X
Koch-Glitsch GmbH www.kochmembrane.com	X	X	X
Membraflow GmbH email: membraflow@t-online.de	X	X	
membratec GmbH www.membratec.ch		X	X
MWT Membran- und Wassertechnik www.mwt-ag.com		X	X
Osmota Membrantechnik GmbH 106737.1431@compuserve.com www.osmota.de	X	X	X
Pall-Rochem Wassertechnik GmbH www.rochem.com		X	X
Philip Müller • Hager+Elsässer GmbH www.hager-elsaesser.com	X	X	X
Rhodia Orelis www.orelis.com	X	X	
Seitz-Filterwerke GmbH www.usf-seitz.de	X	X	
Somicon AG www.somicon.com	X	X	X
Stork-Friesland www.storkfriesland.com	X	X	X
VA TECH WABAG Schweiz AG www.vatech.ch	X	X	X
Wehrle-Werk AG www.wehrle-werk.de	X	X	X
X-Flow www.xflow.nl		X	
Zenon GmbH www.zenonenv.com	X	X	

1 EINLEITUNG

1.1 Ausgangslage

Anaerobe Bakterien sind in der Lage, organisch stark belastete Abwässer bei hoher Ausbeute an erneuerbarer Energie zu reinigen. Da neue anaerobe Prozesse entwickelt worden sind, welche bei hohem Wirkungsgrad in kurzer Zeit den Abbau ablaufen lassen, werden anaerobe Prozesse in der Industrieabwasserreinigung heute vermehrt als erste Reinigungsstufe eingesetzt.

Bei tiefen Konzentrationen von organischen Inhaltsstoffen in einem Abwasser arbeiten die anaeroben Bakterien nicht mehr wirkungsvoll und die Energiebilanz der Anlage wird negativ, da ein grosser Prozessenergiebedarf zur Erwärmung des „unproduktiven“ Wassers entsteht. Die Ergebnisse verschiedener Studien im Rahmen von Energie 2000 haben gezeigt, dass viele industrielle Abwässer aufgrund von tiefen CSB Konzentrationen für die Vergärung ungeeignet sind. Daher müssen heute leider in vielen Fällen immer noch energie- und platzintensive aerobe Systeme zur Vorreinigung eingesetzt werden. Dem Umstand kann entgegengewirkt werden, wenn die Abwässer mit Hilfe von Membranverfahren (Nanofiltration/Ultrafiltration/Umkehrosmose) aufkonzentriert werden.



Figur 1: Membranverfahren vor und nach der Vergärung

Wenn mit Membranverfahren schwach belastete Teilströme einerseits auf Vorfluterqualität gereinigt und andererseits auf für die Vergärung interessante Konzentrationen aufkonzentriert werden können, werden sehr viele der Standorte, welche in den E2000 Studien als nur zweite oder dritte Priorität eingestuft wurden, in die erste Priorität aufrücken. Eine Trennung schwach belasteter Ströme in gereinigtes Permeat und gärbare Konzentrat erhöht daher das Potential der Vergärung von Industrieabwässern ganz signifikant.

Neben der Aufkonzentrierung von schwach belasteten Abwässern können Membranverfahren auch die im Anschluss an die Vergärung notwendige energie- und platzintensive Nachbelüftung ersetzen. Dies kann sowohl im Anschluss an die Vergärung von konzentrierten bzw. hochbelasteten Abwässern wie auch bei der Behandlung von "Presswasser" aus der Feststoffvergärung oder der Co-Vergärung der Fall sein.

1.2 Zielsetzung des Projektes

Das vorliegende Projekt soll Auskunft geben über den Stand der Technik, den Markt, die Einsatzmöglichkeiten von Membranverfahren bei der Vergärung von Abwässern sowie über die energetische und ökonomische Machbarkeit.

1.3 Grundlagen

Als Grundlage für die Erstellung des vorliegenden Berichtes wurden folgende Quellen verwendet:

- Kongresse und Ausstellungen
- Persönliche Kontakte zu Personen und Firmen die in diesem Gebiet tätig sind bzw. publiziert haben
- Sämtliche relevanten Datenbanken:
 - CD-ROM Abfrage
 - Online Abfrage
- Eigene Erfahrungen mit dem Betrieb einer Praxisanlage zur ausföbereitung von Presswasser aus der Bioabfallvergärung

2 VERFAHRENSTECHNIK

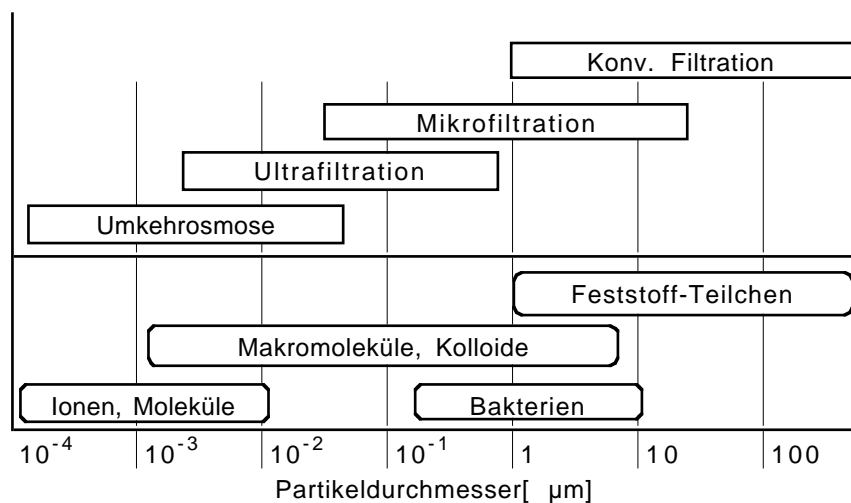
2.1 Grundlagen der Membranfiltration

Die Membranfiltration nutzt das aus der Natur bekannte physikalische Prinzip des Molekültransportes durch eine semipermeable Membran aufgrund einer Druckdifferenz. Hier werden Moleküle oder Partikel aufgrund von Grösse, Gewicht oder Struktur an der Membran zurückgehalten. Die Membran ist gekennzeichnet durch ihre Porengrösse, durch die Verteilung der Poren auf der Oberfläche sowie durch ihre Ladung und die chem. Zusammensetzung.

Die Membranverfahren Umkehrosmose (UO), Ultrafiltration (UF) und Mikrofiltration (MF) arbeiten nach dem Cross-Flow-Prinzip, das auch als Querstrom- oder Tangentialstrom-Prinzip bezeichnet wird. Die Triebkraft für den Trennvorgang ist in allen Fällen ein Differenzdruck über der Membran.

Verfahren	Zielesetzung: Abtrennung von	Druck- differenz	Modultyp
Mikrofiltration	Partikuläre Stoffe Kolloiden Bakterien, Hefe	1–2 bar	Rohrmodule (offene Fliesskanäle)
Ultrafiltration	Proteine Viren	1–10 bar	Rohrmodule Plattenmodule Hohlfasermodule
Nanofiltration	Farbstoffe Makromoleküle	6–60 bar	Rohrmodule Plattenmodule Hohlfasermodule
Umkehrosmose	Ionen, Moleküle Ammonium, Nitrat	30–200 bar	Spiral-Wickelmodule

Tabelle 1: Abgrenzung der Trennverfahren



Figur 2: Trennverfahren nach Partikeldurchmesser

2.2 Einsatzbereiche der Membrantechnik

Zur Gewinnung eines Überblicks über die Anwendung der Membrantechnik in der Abwassertechnik wurden Kongressunterlagen studiert, Ausstellungen besucht und Hersteller direkt kontaktiert.

Die Membrantechnik kommt beinahe überall zur Anwendung, wo es um die Trennung von Stoffgemischen geht. Folgende Bereiche werden in den Unterlagen der Hersteller von Membransystemen erwähnt:

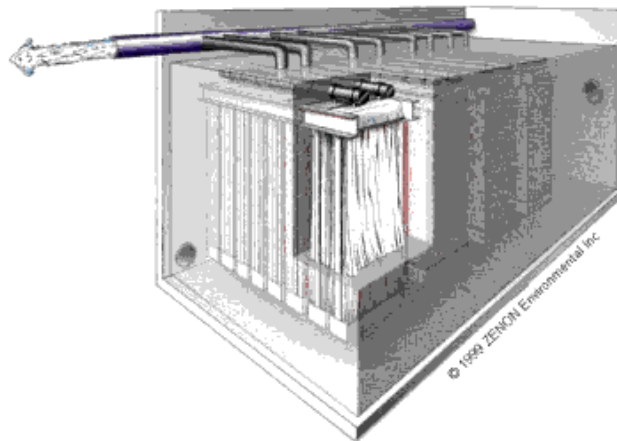
- Abwasseraufbereitung
- Metall-Industrie
- Lebensmittel-Industrie
- Textil-Industrie
- Papier und Druckindustrie
- Chemische Industrie
- Sonstige Industrie

2.2.1 Modul- und Membrantypen

In der Abwassertechnik werden folgende Modultypen verwendet:

Modultyp	Packungs- dichte [m ² /m ³]	Kosten	Anwendung
Rohrmodul	80-500	hoch	MF, UF, NF, UO bei hohem Feststoffanteil
Rohrscheibenmodul	ca. 250	hoch	UF, NF, UO
Plattenmodul	400 - 600	hoch	UF, UO
Hohlfasermodul	600 - 1200	niedrig	MF, OU
Wickelmodul	800 - 1000	niedrig	NF, UO bei tiefem Feststoffanteil

Tabelle 2: *Modultypen und deren Anwendung*



Figur 6: Aufbau von Hohlfasermodulen (Zenon-Weed)

Im Bereich der (kommunalen) Abwasserbehandlung spielen die getauchten Platten und Hohlfasermodule eine wichtige Rolle. Diese beiden Konzepte gehören zu den sogenannten Niedrigenergie-Membranverfahren. Mit dieser Technik kann auf engstem Raum eine Ablaufqualität erreicht werden, welche eine Wiederverwertung des gereinigten Abwassers erlaubt.

Im Gegensatz zu den bisher eingesetzten Verfahren (Rohrmodule) ist bei den Niedrigenergie- oder Niederdruckverfahren keine zusätzliche Energie zur Umwälzung und den Cross-Flow notwendig.

Der Filtrations-Energiebedarf dieser Verfahren liegt aufgrund der oben genannten Merkmale bei nur 0.05 bis 0.15 kWh/m³ Filtrat. Im Vergleich dazu benötigen konventionelle Mikro- und Ultrafiltrationsverfahren zwischen 4.5 und 9 kWh/m³ Filtrat.

Getauchte Membranen werden oft auch als Hybrid zwischen Dead-End und Cross-Flow bezeichnet: Weil ein tangential zur Membran gerichteter Kreislauf fehlt, wird für das Abtragen der Deckschicht ein aufsteigender Blasenstrom angewendet. Der Transmembrandruck wird durch das Absaugen des Permeates mit einer Pumpe erzeugt. Der Energieaufwand für die Permeatabförderung beträgt typischerweise zwischen 0.1 und 0.2 kWh/m³ bei einer Permeatleistung von 20 bis 40 l/m²·h. Diese geringe Permeatleistung erfordert jedoch einen im Vergleich zu druckbetriebenen Systemen einen höheren Membranflächeneinsatz.

2.2.3 Membran- und Modulwahl

Bei der Auswahl des Membranverfahrens und eines geeigneten Moduls ist wie folgt vorzugehen:

Festlegung der Zielsetzung

Welche Ziele sollen erreicht werden. Geht es in erster Linie um den Rückhalt bzw. die Abtrennung von Biomasse oder partikulären Stoffen, oder sollen auch gelöste Stoffe wie (Makro)- Moleküle sowie Salze bzw. Ionen abgetrennt bzw. aufkonzentriert werden. Aufgrund der Zielsetzung kann das Trennverfahren festgelegt werden. Häufig kommen auch Kombinationen in Frage.

Im Falle einer Vorbehandlung oder präziser Aufkonzentrierung eines schwach belasteten Abwassers, kann davon ausgegangen werden, dass der Gehalt an partikulären Stoffen gering ist. Es geht also im Wesentlichen darum, die Konzentration an gelöstem CSB zu erhöhen. Um dies zu erreichen müssen in der Regel Nanofiltrations- oder Umkehrosmosemembranen eingesetzt werden. Dazu eignen sich je nach Beschaffenheit des Abwassers Rohr oder Wickelmodule.

Im Falle einer Nachbehandlung ist der Gehalt an partikulären Stoffen in der Regel höher, insbesondere wenn Biomasse abgetrennt werden muss. Geht es nur um die Abtrennung bzw. den Rückhalt der Biomasse, so wird häufig eine Ultrafiltration mit Rohrmodulen oder getauchten Hohlfasern- oder Plattenmodulen angewendet.

Müssen zusätzlich noch refraktärer Kohlenstoff (CSB, TOC) und Salze abgetrennt werden, kann nach der Ultrafiltration eine Umkehrosmose nachgeschaltet werden. Weil allfällige Feststoffe durch die Ultrafiltration bereits abgetrennt worden sind, kann für die Umkehrosmose ein kostengünstiges Wickelmodul eingesetzt werden.

Zielsetzung	Trennverfahren	Modultyp
Vorbehandlung bzw. Aufkonzentrieren	<ul style="list-style-type: none">• Nanofiltration• Umkehrosmose	<u>Viel Feststoffe:</u> - Rohrmodule <u>Wenige Feststoffe:</u> - Wickelmodule
Nachbehandlung	<ul style="list-style-type: none">• Ultrafiltration• Umkehrosmose	<u>Abtrennung von Biomasse:</u> - Rohrmodule - Hohlfasernmodule <u>Rückhalt von Salzen:</u> - Wickelmodule

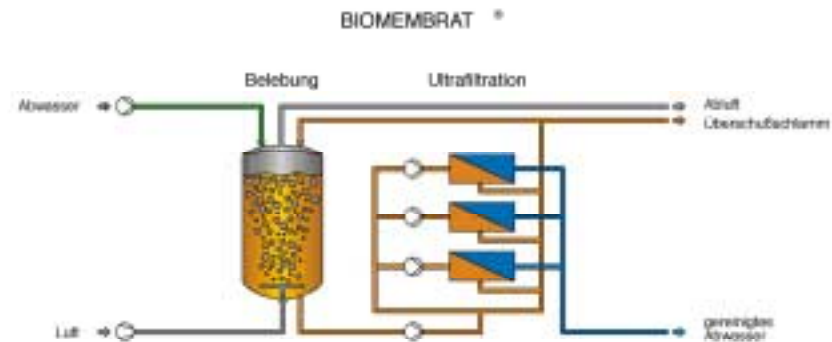
Tabelle 3: Auswahl von Verfahren und Modultypen

2.3 Einsatz der Membrantechnik in der Abwasserbehandlung

2.3.1 Aerobe Anwendungen

Das weltweit am häufigsten eingesetzte Verfahren zur biologischen Abwasserbehandlung ist das Belebungsverfahren. Die klassische Anwendung mit einem Nachklärbecken (NKB) zur Abtrennung bzw. zum Rückhalt der Biomasse hat jedoch erhebliche Nachteile:

- Biomassekonzentrationen im Reaktor $> 5\text{g/l}$ sind kaum zu erreichen
- Eine vollständige Abtrennung der Biomasse im NKB ist nicht möglich
- Aufgrund der hohen Schlammbelastung entsteht viel Überschussschlamm



Figur 7: Biomembrat-Verfahren mit Ultrafiltration

Um die oben genannten Nachteile zu reduzieren wurden sogenannte Membranbioreaktoren entwickelt, bei denen das Nachklärbecken durch eine Membranfiltration ersetzt wurde. Damit lassen sich folgende Vorteile erzielen:

- Die Biomassekonzentration lässt sich um das 10 bis 15-fache erhöhen
- Der Ablauf ist frei von partikulären Stoffen, sowie von Bakterien und Viren
- Durch die Keimfreiheit kann das Wasser wieder verwertet werden
- Die Überschussschlammproduktion ist gering.

2.3.2 Anaerobe Anwendungen

Konventionelle anaerobe Reaktoren sind, mit Ausnahme der Kontaktreaktoren, Durchflussreaktoren ohne Biomasserückhalt. Aus diesem Grund sind in der Regel die hydraulische Verweilzeit und die Feststoffverweilzeit identisch. Daraus ergeben sich bei einzelnen Reaktorsystemen Einschränkungen in Bezug auf die Raumbelastung und die Biomassekonzentration im Reaktor.

Durch die Kombination von anaeroben Bioreaktoren mit Membransystem ergeben sich folgende Vorteile:

- Erhöhung der Biomassekonzentration
- Erhöhung der Raumbelastung
- Erhöhung des Abbaugrades
- Verringerung des Reaktorvolumens im Vergleich zu konventionellen Systemen

Diese Ergebnisse können wie folgt interpretiert werden:

- Durch den Biomasserückhalt mittels Membranen können extrem hohe Biomassekonzentrationen im Reaktor erreicht werden
- Aufgrund der verfügbaren aktiven Biomasse kann die Raumbelastung bis über 30 kg/m³*d erhöht werden
- Durch die Aufkonzentrierung der nicht abgebauten Stoffe im Reaktor kann ein wesentlich höherer Abbaugrad erreicht werden
- Insgesamt lässt sich durch diese Massnahmen das Reaktorvolumen verringern

2.3.3 Ersatz von Belüftungsanlagen

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit besteht im Ersatz von Belüftungsbecken zur Nachbehandlung des Ablaufs aus Anaerobien. Damit kann einerseits der Ablauf von suspendierten Stoffen befreit und andererseits eine weitergehende Elimination der Fracht erreicht werden.

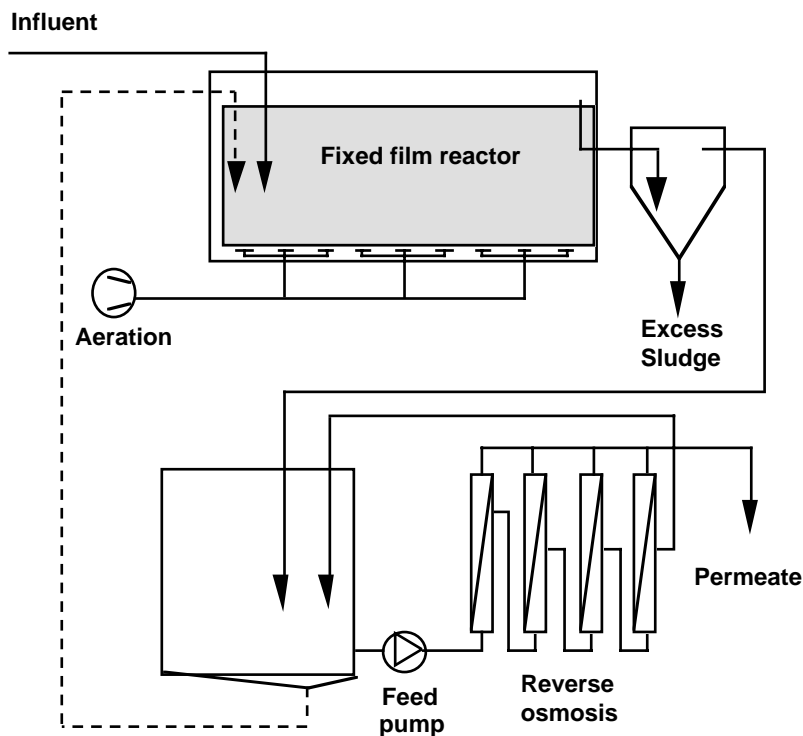
3 MASSEN- UND ENERGIEFLÜSSE

3.1 Typische Anwendungen

Zur Beschreibung der Massen und Energieflüsse werden im folgenden typische Anwendungen vorgestellt. Es handelt sich dabei um ein kombiniertes Verfahren zur Behandlung von Überschusswasser aus der Bioabfallvergärung sowie um die Aufkonzentrierung von einem Abwasser mit einem CSB < 1000 mg/l als Vorstufe einer anaeroben Behandlung.

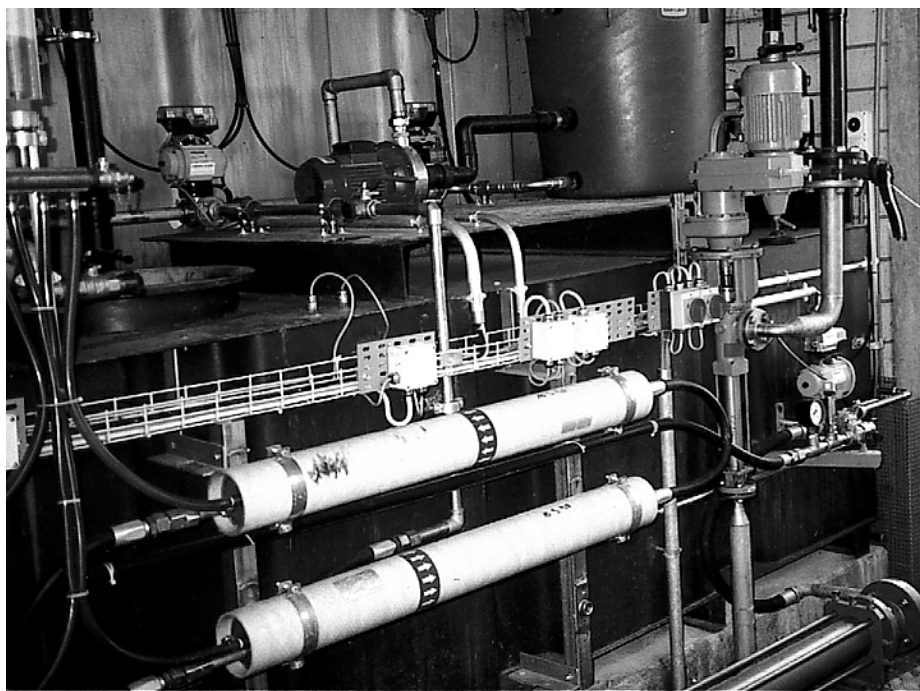
3.1.1 Presswasseraufbereitung mit Membrantechnik

Figur 8 zeigt eine kombinierte Anlage zur Presswasseraufbereitung mit vorgeschalteter Nitrifikation/Denitrifikation im Festbett-Reaktor und anschließender Endreinigung in einer Umkehrosmoseeinheit.



Figur 8: Kombiniertes Verfahren zur Presswasserreinigung mit Nitrifikation/Denitrifikation im Festbett Reaktor mit anschliessender Umkehrosmose

Die in Figur 8 dargestellte Anlage wurde auf der Kompogas-Anlage in Otel-fingen realisiert. Die biologische Stufe zur Kohlenstoff- und Stickstoffelimi-nation besteht aus einem intermittierend belüfteten Behälter mit einem Vo-lumen von rund 25m³. Der Behälter ist mit einem getauchten Festbett (NSW, D-Nordenham) und mit Membrantellerbelüftern (Huber-Suhner AG, CH-Pfäffikon) ausgerüstet. Für die Umkehrosmose wurden vier Spiralwickel-module der Firma CM-Celfa eingesetzt. Figur 9 zeigt im Vordergrund die Umkehrosmoseeinheit. Hinter den Druckrohren, welche die Spiralwickel aufnehmen, sind die verschiedenen, für den Betrieb notwendigen, Behälter (Rezirkulationsbehälter, Spülbehälter) sichtbar.



Figur 9: Die Umkehrosmoseeinheit in Otelfingen

Versuche mit der biologischen Stufe ohne Nachreinigung zeigten, dass es kaum möglich ist, den CSB im Presswasser um mehr als 60% zu reduzieren, da ein grosser Teil der organischen Inhaltsstoffe schwer abbaubar ist. Der BSB₅ hingegen konnte sowohl mit submersen Systemen, wie auch mit Tauchtropfkörpern und getauchten Festbettsystemen vollumfänglich eliminiert werden. Auch die Stickstoffelimination lief bei entsprechender Prozessführung (vorgeschaltete Denitrifikation) beinahe vollständig ab.

Nach der biologischen Stufe blieben jedoch zwischen 3.5 und 7 g CSB/l zurück, was entschieden zu hoch für eine Einleitung in einen Vorfluter ist. Eine Nassoxidation mit Ozon stellte sich als zu kostspielig heraus. UV-aktiviertes Wasserstoffperoxid war auf der anderen Seite nicht genügend wirkungsvoll.

Diese Erkenntnisse führten dazu, den Einsatz der Umkehrosmose mit gewickelten Modulen näher zu untersuchen. Nach verschiedenen Anpassungen der Prozessführung konnten die in Tabelle 2 dargestellten Resultate erreicht werden. In erster Linie musste ein Vorfilter eingebaut werden, um allfällige im Zentrat vorhandene partikuläre Stoffe von den Spiralwickeln fernzuhalten. Im Verlauf der Betriebsoptimierung hat sich gezeigt, dass der periodischen Reinigung des Systems grosse Bedeutung zukommt. Aufgrund der hohen Stoffkonzentrationen an der Membranoberfläche können die Löslichkeitsgrenzen überschritten werden und es kommt zum Scaling. Zu erwähnen sind beispielsweise Magnesium-Ammonium-Phosphate (MAP) welche sich an der Membran anlagern und die Permeatleistung stark herabsetzen. Für die Anlage Otelfingen wurde eine automatisierte Membranreinigungsanlage entwickelt.

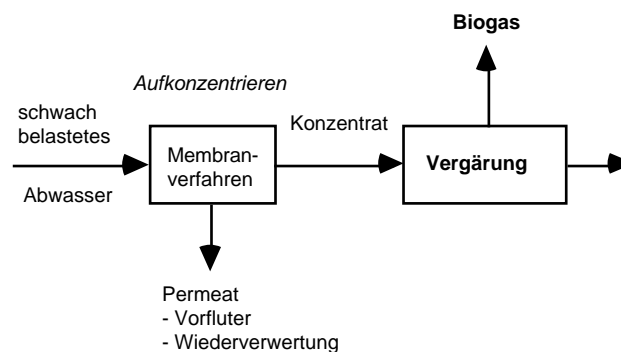
Parameter	Einheit	Zufluss	Permeat
Durchflussrate	m ³ /d	40	32
CSB	mg/l	12'000	30
BSB5	mg/l	3'000	15
Ammonium-Stickstoff	mg/l	1'200	40

Tabelle 4: Charakteristik von Zu- und Abfluss (Permeat) der Umkehrosmoseeinheit.

Das mit Umkehrosmose gereinigte Presswasser erreicht somit Vorfluterqualität. Weitere Untersuchungen zeigten, dass der Ersatz der biologischen Festbettstufe durch eine Ultrafiltration mit nachgeschalteter Umkehrosmose zu einem vergleichbaren Gesamtergebnis mit vertretbaren Kosten führen kann.

3.1.2 Membranverfahren als Vorstufe einer Anaerobie

Eine interessante Anwendung ist das Aufkonzentrieren von schwach belasteten Abwässern mit Hilfe von Membranverfahren (Nanofiltration, Ultrafiltration, Umkehrosmose). Eine Trennung schwach belasteter Abwässer in sauberes Permeat und mit Energiegewinn vergärbares Konzentrat erhöht das Potenzial der Vergärung von Industrieabwässern ganz signifikant.



Figur 10: Aufkonzentrieren von Abwasser

Untersuchungen an einer Pilotanlage haben gezeigt, dass Rohabwasser maximal bis zu 10-fach aufkonzentriert werden kann:

Parameter		Rohabwasser	Konzentrat	Permeat
Menge	[m ³ /d]	360	25	335
CSB-Konz.	[mg/l]	1'200	12'600	350
CSB-Fracht	[kg/d]	432	315	117

Tabelle 5: Aufkonzentrieren von Abwasser

Damit lässt sich das gewonnene Konzentrat mit Energiegewinn in einer Anaerobie vergären. Das Permeat kann in der Regel im Betrieb für Wasch- und Spülzwecke wiederverwendet werden.

3.2 Abschätzen des Energiesparpotenzials

1. Annahmen

Volumenstrom	200	m ³ /d		
CSB-Fracht	200	kg/d		
CSB-Konz.	1000	mg/l		
BSB5-Fracht	120	kg/d		
BSB5-Konz.	600	mg/l		
Energie Biologie	0.7	kWh/kg CSB		
Energie Ultrafiltration getaucht	1.5	kWh/m ³		
Energie Ultrafiltration Rohr	6	kWh/m ³		
Schlammprod. Aerob	0.7	kgTS/kg CSB el.	140	kg TS/d
Schlammprod. Anaerob	0.1	kgTS/kg CSB el.	20	kg TS/d
Schlammmentwässerung	60	kWh/tTS		
Pumpen, Mischen	0.15	kWh/m ³		
Biogasertrag	0.5	m ³ /kg CSB		
Heizwert unterer	6.5	kWh/m ³		
Wirkungsgrad elektrisch	32	%		

Tabelle 6: Grundlagedaten für den energetischen Vergleich

2. Energetischer Vergleich

VERBRAUCH	Einheit	Belebung	UF/Vergärung	
			Getaucht	Rohr
Biologie				
• Belüftung	kWh/d	140		
Ultrafiltration				
• Pumpen, Umlauf	kWh/d		300	1200
Schlammmentwässerung				
• Dekanter	kWh/d	8.4	1.2	1.2
Pumpen/Mischen	kWh/d	30	30	30
Total Verbrauch	kWh/d	178.4	331.2	1231.2
Ertrag	kWh/d	0	208	208
VERBRAUCH	kWh/d	178.4	123.2	1023.2
	%	100	69	574
EINSPARUNG	kWh/d		55.2	

Tabelle 7: Ermittlung der Energieeinsparungen durch die Kombination von Membranverfahren mit Anaerobie

Das oben dargestellte Ergebnis basiert auf Literaturangaben und eigenen Daten. Zusammengefasst können folgende Aussagen gemacht werden:

- Im Falle einer Belebung (Aerobe Biologie) müssen pro Tag rund 178 kWh Strom aufgewendet werden
- Im Falle der Kombination Vergärung mit einem Niedrigenergie-Membranverfahren (getaucht) sind es pro Tag rund 123 kWh
- Durch die Kombination von Membrantrennung mit einer Anaerobie können folglich pro Tag rund 55 kWh Strom eingespart werden
- Im Falle der Anwendung eines konventionellen Membranverfahrens mit Rohrmodulen erhöht sich der Energieverbrauch trotz Gewinn infolge der Biogasgewinnung auf rund 1'000 kWh pro Tag.

Fazit

Die Kombinationsvariante Membrantrennung/Vergärung bei "dünnen" Abwässern scheint nur im Falle der Verwendung von getauchten Niederdruckmembranen energetische Vorteile gegenüber einer reinen Belüftung zu bieten.

4 KOSTEN

Die indirekte Abwassereinleitung ist fallweise mit einem Starkverschmutzerzuschlag behaftet, der neben der CSB-Fracht die täglichen Frachten an absetzbaren Stoffen sowie an Stickstoff und allenfalls Phosphor berücksichtigt.

Unter dieser Optik macht es Sinn, eine weitergehende Reinigung des Ablaufs aus einer anaeroben Vorbehandlung zu prüfen.

Die nachfolgenden Betrachtungen basieren auf einer Abwassermenge von 36'000 m³ pro Jahr:

	CSB hom. [mg/l]	NH₄-N [mg/l]	P-tot [mg/l]	abfil. Stoffe [mg/l]
Zulauf	2'590	390	78	2'070
Ablauf	126	4	45	n.n.
Reduktion	85%	99%		99%

Tabelle 8: Zu- und Ablaufwerte einer der Anaerobie nachgeschalteten Belebung mit getauchten Membranen

Das feststofffreie Abwasser ist aus hygienischer Sicht unbedenklich und direkt als Brauchwasser verwendbar. Im vorliegenden Fall ist zunächst die Verwendung zur Fahrzeugwäsche und zur Befeuchtung des Kompostfilters geplant. Je nach Wasserpreis kann sich eine weitergehende Behandlung, beispielsweise eine UV-Desinfektion zur Verhinderung einer Wiederverkeimung, lohnen.

Vor dem Bau einer Abwasservorbehandlung schlugen die Abwasserkosten mit ca. DM 850'000.- zu Buche. Durch die Realisierung einer anaeroben Vorbehandlung liessen sich die Kosten auf ca. DM 506'000.- reduzieren. Darin enthalten sind Abwasserabgaben für die Restfracht aus der Anaerobie von rund DM 283'000.-.

Durch die Realisierung der Nachbelüftung mit getauchten Membranen, was Investitionskosten von rund DM 95'000.- mit sich zog, konnten die Gesamtkosten auf rund DM 430'000.- gesenkt werden. Mit andern Worten, die Zusatzinvestitionen konnten bereits im ersten Jahr vollumfänglich eingespart werden.

Dieses Beispiel zeigt, dass mit Hilfe einer membrangestützten Nachbehandlung die Wirtschaftlichkeit einer anaeroben Vorreinigung weiter erhöht werden kann. Auch die Ökologie kommt dabei nicht zu kurz. Der Verbrauch von wertvollem Trinkwasser kann wesentlich gesenkt werden.

5 MACHBARKEIT

5.1 Energetische und ökonomische Grenzen des Verfahrens

Bis heute wurde in der wissenschaftlich geprägten Literatur hauptsächlich die technische Machbarkeit der oben beschriebenen Anwendungen dargestellt. In Bezug auf den Energieverbrauch und die Kosten variieren die Angaben je nach Herkunft beträchtlich.

Zudem hat sich gezeigt, dass aufgrund der zunehmenden Verbreitung und Entwicklung der Membrantechnik sowohl der Energieverbrauch als auch die Anlagekosten tendenziell sinken. Insbesondere die sogenannten Niederdruck oder Niedrigenergieverfahren sind vielversprechend. Beispielsweise sind die Membrankosten im Zeitraum von 1992 bis 1999 von rund 400 USD/m² auf rund 100 USD/m² gesunken.

5.2 Wiederverwertung des gewonnenen Permeates

Für die Gesamtkosten von Bedeutung ist die Möglichkeit der Wiederverwertung des Permeates, was zu Einsparungen beim Trinkwasserverbrauch führen kann. Mit steigenden Trinkwasserpreisen wird die Aufbereitung von Abwässern zur Wiederverwertung, in Anwendungen wo keine Trinkwasserqualität gefordert wird, zunehmend interessanter.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Obwohl in den letzten Jahren die Anzahl Publikationen in der Fachpresse und Membranprozessen gewidmeten Tagungen exponentiell zugenommen haben, bleiben noch eine Reihe von Fragen offen. Insbesondere im Zusammenhang mit der integrierten Anwendung von Membranprozessen in der Abwasserbehandlung. Auch fehlen zum Teil noch Erfahrungen über das Langzeitverhalten von Membranen. Trotz allem nahm die installierte Membranfläche in den letzten Jahren exponentiell zu. Daraus kann abgeleitet werden, dass das notwendige Vertrauen in diese zukunftsweisende Technologie vorhanden ist.

Der interessierte Anwender findet im Anhang eine Liste von Anbietern mit den entsprechenden Websites. Auf den meisten Websites findet man die neusten Informationen über Membranen, Modultypen und Anwendungen.

7 ABKÜRZUNGEN

MF	Mikrofiltration
UF	Ultrafiltration
NF	Nanofiltration
UO	Umkehrosmose
RO	Reverse Osmosis (Umkehrosmose)
d	Tage
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
CSB el.	Chemischer Sauerstoffbedarf eliminiert (abgebaut)
CSB filt.	Chemischer Sauerstoffbedarf im Filtrat
OS	Organische Trockensubstanz
kWh	Kilowattstunde

8 LITERATUR

- GVC•VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (1997): *Aachener MembranKolloquium*, Preprints
- Rautenbach R., Melin T., Dohmann M [Eds.] (1998): *Membrantechnik in der öffentlichen Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung*, Begleitbuch zur 2. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, Aachen
- Rautenbach R., Melin T., Dohmann M [Eds.] (2000): *Membrantechnik in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung*, Begleitbuch zur 3. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, Aachen
- Stephenson T., Judd S., Jefferson B., Brinle K. [Eds.] (2000): *Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment*, IWA Publishing, London; ISBN 1900222078
- Edelmann W., Engeli H., Joss A. (1999): *Behandlung von Abwässern aus der Abfallvergärung mit der Membrantechnik*, Berichte aus der Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Technische Universität München, Bericht Nr. 154
- Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium an der Universität Stuttgart (1997): *Einsatz von Membranen in der Abwassertechnik*, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 145
- Müller E.A., Thommen R., Stähli P. (1994): *Energie in ARA*, Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern
- Ryhiner G. (2000): *Aerobe und Anaerobe Industrieabwasserreinigung: Neue Entwicklungen*. In Behandlung stark belasteter Abwässer. Tagungsdokumentation VSA/VSM Fachtagung 17.3.2000, Luzern

9 ANHANG

LIEFERANTENVERZEICHNIS

ANBIETER	MEMBRANTYPEN	ANWENDUNGSGEBIETE
AWATEC AG CH- 8810 Horgen www.awatec.ch		
Berghof Filtrationstechnik D-72800 Eningen www.berghof.com	Mikro-, Nano, Ultra- filtration und Um- kehrosmose	
Bioscan A/S DK-5230 Odense www.bioscan.dk	Ultrafiltration, Um- kehrosmose	Gülleaufbereitung im Zusammen- hang mit der Biogasgewinnung
cm-celfa, Membrantrenntechnik AG CH- Seewen www.folex.ch --> Link zu cm-celfa	Ultrafiltration, Um- kehrosmose	Metall-, Textil-, Papier-, Lebens- mittel- und Chemische-Industrie, Abwasser
DEGREMONT SA CH-Vevey www.degremont.ch bzw. com		Abwasser, Trinkwasser
Electro-Union GmbH I-39042 Brixen www.electrounion.it	Ultrafiltration, Um- kehrosmose	Metall-, Textil-, Papier-, Lebens- mittel- und Chemische-Industrie, Abwasser
Haase Energietechnik GmbH D24531 Neumünster www.haase-energietechnik.de	Ultrafiltration Umkeh- rosmose	Deponiesickerwasser, Industrie- abwasser
Imecon AG CH-9030 Abtwil www.imecon.ch		
Koch-Glitsch GmbH D-40219 Düsseldorf www.kochmembrane.com	Mikro-, Nano, Ultra- filtration und Um- kehrosmose	
Membraflow GmbH D-73457 Essingen email: membraflow@t-online.de		
membratec GmbH CH-3960 Sierre www.membratec.ch		Trinkwasser
MWT Membran- und Wassertechnik CH-4528 Zuchwil www.mwt-ag.com		
Osmota Membrantechnik GmbH D-71277 Rutesheim 106737.1431@compuserve.com www.osmota.de		
Pall-Rochem Wassertechnik GmbH D-21107 Hamburg www.rochem.com	Umkehrosmose	Metall-, Textil-, Papier-, Lebens- mittel- und Chemische-Industrie, Abwasser

ANBIETER	MEMBRAN-TYPEN	ANWENDUNGSGEBIETE
Philip Müller • Hager+Elsässer GmbH D-70191 Stuttgart www.hager-elsaesser.com	Mikro-, Nano, Ultrafiltration und Umkehrosmose	
Rhodia Orelis F-01703 Miribel Cedex www.orelis.com	Mikrofiltration	Metall-, Textil-, Papier-, Lebensmittel- und Chemische-Industrie, Abwasser
Seitz-Filterwerke GmbH D-55543 Bad Kreuznach www.usf-seitz.de		Metall-, Textil-, Papier-, Lebensmittel- und Chemische-Industrie, Abwasser
Somicon AG CH-4002 Basel www.somicon.com	Mikro-, Nano, Ultrafiltration und Umkehrosmose	Metall-, Textil-, Papier-, Lebensmittel- und Chemische-Industrie, Abwasser
Stork-Friesland NL-8400 AA Gorredijk www.storkfriesland.com	Ultrafiltration Um- kehrosmose	Deponiesickerwasser
VA TECH WABAG Schweiz AG CH-8401 Winterthur www.vatech.ch	Ultrafiltration, Umkehrosmose	Abwasser, Trinkwasser
Wehrle-Werk AG D-79311 Emmendingen www.wehrle-werk.de	Nanofiltration, Ultrafiltration, Umkehrosmose	Deponiesickerwasser (Biomembrat)
X-Flow NL-7602 KK Almelo www.xflow.nl	Mikro- und Ultra- filtration	Trinkwasser
Zenon GmbH D-40712 Hilden www.zenonenv.com	Ultrafiltration	Nachklärung auf kommunalen Kläranlagen

21. November 2001

MEMBRANE TREATMENT OF EFFLUENTS FROM ANAEROBIC DIGESTION OF SOLID WASTE

engeli engineering



AABio GmbH

Hans Engeli⁺, Adriano Joss*, Werner Edelmann*, Andreas J. Maier**

⁺ engeli engineering, Hohmattstrasse 1, CH-8173 Neerach, Switzerland

* arbi GmbH, CH-8933 Maschwanden, Switzerland; www.biogas.ch/arbi

** AABio GmbH, Postfach, CH-4450 Sissach, Switzerland

ABSTRACT

Wastewater coming from the solid liquid separation is a drawback of the anaerobic digestion of solid waste. Thus a series of treatment methods have been studied in order to determine the most suitable treatment process. Among these methods biological as well as physical processes have been investigated.

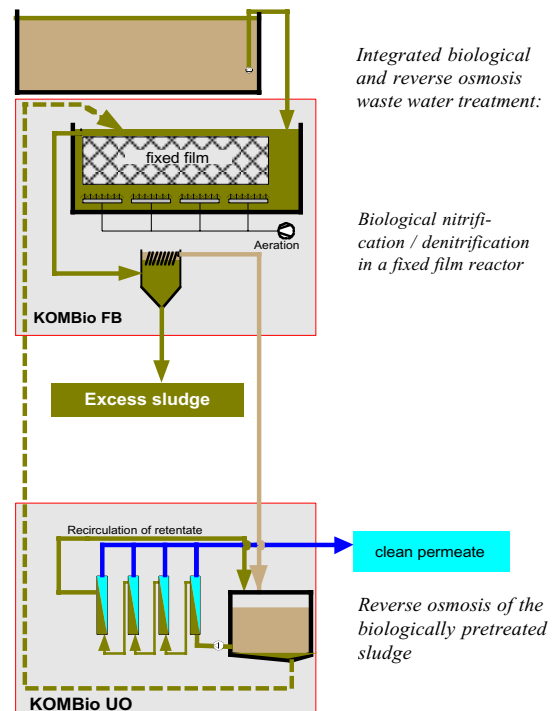
The aim of the treatment was to reduce the COD as well as to achieve nitrification and denitrification. The process of choice was a fixed film reactor in combination with a reverse osmosis unit. By means of this combination more than 90 % of the organic and nitrogen load can be eliminated. The final conclusion is that membrane technologies eventually combined with N-elimination is a cost effective process for the treatment of wastewater from anaerobic digestion processes of solid waste.

INTRODUCTION

In the past eight years anaerobic digestion of biodegradable solid waste has become very popular in Switzerland. During this period eight industrial anaerobic digestion plants were constructed. In the meantime it has become evident that the liquid coming from the solid liquid separation at the end of the digestion process has to be further treated before disposal. This is due to high loading of COD and ammonia nitrogen. Thus, the aim of the wastewater treatment was to reduce COD as well as to achieve nitrification and denitrification. Throughout these investigations different biological and physical/chemical systems have been studied, such as rotating disc reactor, fixed film reactor, ultrafiltration and reverse osmosis.



RO plant in Otelfingen, Switzerland, treating the effluent of solid waste digestion



RESULTS

Experiments carried out with biological systems showed that it is hardly possible to achieve COD reduction > 60% in the liquid. This is due to COD being partly recalcitrant. Compared to COD, BOD₅ is fully degradable. Nitrogen removal was almost complete. No significant differences in performance could be observed among the tested biological systems. This shows, that the limits of microbiological breakdown is not strictly depending on the type of biological system. But the remaining COD concentrations between 3.5 and 7 g/l are clearly too high to release the effluent into the sewer. In order to increase the biological breakdown of COD, wet oxidation with ozone or hydrogen peroxide have been tested. Ozone treatment was too expensive and UV activated hydrogen peroxide oxidation was not effective enough. An adequate solution was found in the combination of a fixed film reactor with a reverse osmosis unit.

Parameter	Units	Influent	Permeate
Flow rate	m ³ /d	40	32
COD	mg/l	12'000	30
BOD ₅	mg/l	3'000	15
Ammonia-Nitrogen	mg/l	1'200	40

Influent and permeate characteristics

CONCLUSIONS

Two years of operation have proven the KOMBio process to be reliable and effective. This shows that a micro- or ultrafiltration normally put in front of the reverse osmosis is not compulsory. Instead, the fixed film reactor in front of the RO was of great support by lowering the ionic strength. Increased fouling and scaling was observed, if the wastewater was not pretreated biologically.

Our thanks for supporting membrane research go to



Behandlung von Abwässern aus der Abfallvergärung mit der Membrantechnik

W.Edelmann*, H.Engeli⁺, A.Joss*

** arbi GmbH, CH-8933 Maschwanden, Switzerland; www.biogas.ch/arbi
+ engeli engineering, Hohmatrainstrasse 1, CH-8173 Neerach, Switzerland*

Abstract

Wastewater resulting from the solid-liquid separation is a bottleneck of the anaerobic digestion of solid wastes with relatively high moisture contents. Therefore, a series of treatment methods has been studied in order to determine the most suitable treatment process. Among these methods, biological as well as physical processes have been investigated.

The aim of the treatments was to reduce the COD and to achieve nitrification and denitrification. The process with the best performance was a fixed biofilm reactor in combination with a reverse osmosis unit. By means of this combination more than 90 % of the organic and of nitrogen load can be eliminated. It may be concluded that membrane technologies - eventually in combination with N-elimination - are a cost effective solution for the wastewater treatment of effluents from anaerobic solid waste digestion processes, as long as there are no other solutions to use and recycle the nutrients of the effluent. On the Kompogas plant of Otelfingen, different additional solutions, such as aquaculture of plants and fish, are tested. Membrane technologies may be integrated into such ecological, holistic concepts.

Ausgangslage

Die Vergärung fester biogener Abfälle hat in der Schweiz in den letzten Jahren grosse Fortschritte erzielt. Bei Grossanlagen handelt es sich vorwiegend um Feststoffgäranlagen, wo die Abfälle mit etwas Presswasser des ausgegorenen Abfalls angemaischt und dann bei Gehalten von 20-35% Trockensubstanz (TS) vergoren werden. Da bei der Vergärung durch den Übergang der organischen Verbindungen in die Gasphase eine Verflüssigung auftritt, muss das aus dem Reaktor austretende Material vor der Nachkompostierung abgepresst werden, da beim Kompostierprozess Trockensubstanzgehalte von über 40% erwünscht sind.

Ein Teil des Presswassers wird bei Pfropfstrom- und pfropfstromähnlichen Prozessen (z.B. Kompogas, Dranco) und bei Batchverfahren (RomOpur, EREP) zur Rückimpfung eingesetzt. Ein weiterer Anteil wird insbesondere bei kombinierten Gär-und Kompostierverfahren (BRV, RomOpur) - zur Mietenbewässerung und ggf. zur Versorgung von holzreichen Mieten mit Nährstoffen eingesetzt. Weil jedoch speziell auf den reinen Gäranlagen häufig Materialien mit tieferen Trockensubstanzgehalten verarbeitet werden, weisen diese Anlagen oft einen

Wasserüberschuss auf. Es bieten sich zur Verwertung dieses überschüssigen Presswassers eine Palette von Möglichkeiten an:

- Einerseits kann das nährstoffreiche Presswasser von Landwirten aus der Umgebung der Vergärungsanlage ohne weitere Behandlung zur Bewässerung bzw. zur Düngung der landwirtschaftlichen Nutzflächen verwendet werden,
- andererseits kann das überschüssige Presswasser im Anschluss auf eine biologische Nitrifikation/Denitrifikation mit Hilfe einer Umkehrosmoseanlage auf Reinwasserqualität (Einleitung in einen Vorfluter) aufbereitet werden.
- Als zusätzliche Option ist kürzlich eine erste Anlage in Betrieb genommen worden, wo das überschüssige Presswasser nach einer biologischen Vorbehandlung mittels Nitrifikation/Denitrifikation zur Algenzucht für eine Aufzucht von Nilbarschen (*Tilapia*) und Karpfen in warmem Wasser sowie zur Produktion von Gemüse im Gewächshaus eingesetzt wird.

Zielsetzung der hier vorgestellten Versuche war es einerseits den CSB und andererseits den Stickstoffgehalt des Presswassers zu reduzieren. Dazu wurden verschiedene biotechnologische und physikalische Optionen verglichen. Im folgenden wird im Detail auf die verschiedenen Untersuchungen eingegangen.

Zusammensetzung des Presswassers

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich wird, ist das Presswasser in der Regel hoch belastet mit Nährstoffen (insbesondere Ammonium/Ammoniak) sowie mit gelösten und suspendierten organischen Komponenten. Bei einer zweistufigen Abpressung/Zentrifugierung liegt der TS-Gehalt der ersten Stufe normalerweise zwischen 10 und 20%.

Das Presswasser ist mit rund 14% Trockensubstanz eine dickflüssige Gülle. Bezogen auf die Trockensubstanz liegt der Anteil der organischen Substanz mit 46% hoch. Der Gesamtstickstoff beträgt um 20 kg pro t TS und rund die Hälfte davon liegt als Ammonium-N vor. Die Gehalte an Phosphat und Kalium sind, bezogen auf die Trockensubstanz, höher als beim Kompost. Pro Kubikmeter Flüssigdünger betragen sie um 1,8 kg P₂O₅ und 4,3 kg K₂O.

Die Höchstmenge Presswasser, die in der Schweiz jährlich pro Hektare eingesetzt werden kann (als t TS), wird bei fachgerechter Düngung durch die Nährstofffracht begrenzt. Die Schwermetallgehalte liegen zwar generell höher als im Kompost, aber in der Regel unter den Grenzwerten für Kompost. Die Phosphatmengen werden ebenfalls in der Klärschlamm- und Kompostbuchhaltung der Kantone erfasst. Das Presswasser aus der Vergärung von rund 30000 Tonnen Bioabfall im Kanton Zürich ist 1997 von mehr als 40 Landwirten verwertet worden. (Schleiss 1998)

Falls das Presswasser nicht über die Landwirtschaft verwertet werden kann, müssen vor einer weitergehenden Reinigung die organischen Schwebestoffe mit Hilfe einer Dekanterzentrifuge

abgetrennt werden. Bei dieser zweiten Fest/Flüssig-Trennung wird neben dem entwässerten Feststoff, welcher wieder dem Rottegut beigemischt werden kann, ein relativ klares Zentrat mit einem TS-Gehalt von 1-1.5 % gewonnen. Dieses Zentrat weist in Form von gelösten und fein suspendierten organischen Komponenten nach wie vor hohe Stickstoff- und CSB-Konzentrationen auf (1.5 - 2 g NH₄-N/l, 12-15'000 mg CSB/l).

Allgemein	TS	OS	pH	C/N	NH₄-N	N-Min
13 Proben	% FS	% TS		Verhältnis	g/t TS	g/t TS
Mittelwert	14.2	44.8	8.2	10.2	11.24	11.25
Median	13.9	44.9	8.2	10.1	10.41	10.40
Minimum	8.3	34.9	7.7	8.7	5.12	5.14
Maximum	20.4	53.3	8.6	11.9	22.88	22.88
Standardabweichung	2.9	4.4	0.2	1.1	4.81	4.81

Nährstoffe	N-tot	P₂O₅ (tot.)	K₂O (tot.)	Ca (tot.)	Mg (tot.)
13 Proben	kg/t TS	kg/t TS	kg/t TS	kg/t TS	kg/t TS
Mittelwert	21.0	12.8	31.6	36.4	9.7
Median	21.4	13.2	31.4	36.3	9.8
Minimum	13.8	9.2	23.6	25.3	8.7
Maximum	26.1	14.6	42.8	52.8	11.8
Standardabweichung	3.6	1.6	6.5	7.8	0.8

Schwermetalle	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr	Hg
13 Proben	g/t TS	g/t TS	g/t TS	g/t TS	g/t TS	g/t TS	g/t TS
Mittelwert	0.62	77.9	28.2	59.5	269.7	36.7	0.18
Median	0.62	75.3	28.8	53.6	263.0	37.0	0.16
Minimum	0.49	70.5	19.9	36.8	229.6	26.2	0.12
Maximum	0.90	90.3	41.4	111.0	336.0	53.0	0.31
Standardabweichung	0.10	6.3	6.7	21.9	29.0	8.2	0.06

Tabelle 1: Beispiel der durchschnittlichen Zusammensetzung von Presswassers aus 13 Proben aus thermophilen Feststoffgäranlagen (*Schleiss, 1998*)

Die für die weitergehende Reinigung notwendige Verfahrenstechnik hängt beispielsweise von den Einleitungsbedingungen ab. Falls Direkteinleitung in ein Fließgewässer angestrebt wird, so sind die Anforderungen wesentlich höher als im Falle einer Indirekteinleitung über die örtliche Kanalisation.

Im Falle der Direkteinleitung kommt man nicht um ein mehrstufiges Verfahren herum. Da mit einer biologischen Reinigungsstufe insbesondere der hauptsächlich durch Huminsäuren verursachte, refraktäre CSB nur schwer bis auf die Einleitergrenzwerte reduziert werden kann, muss eine weitere Stufe nachgeschaltet werden. Von den verschiedenen geprüften Verfahren erwies sich die Membrantechnik als vorteilhaft.

Presswasseraufbereitung mit Membrantechnik

Abbildung 1 zeigt eine kombinierte Anlage zur Presswasseraufbereitung mit vorgeschalteter Nitrifikation/Denitrifikation im Festbett-Reaktor und anschliessender Endreinigung in einer Umkehrosmoseeinheit.

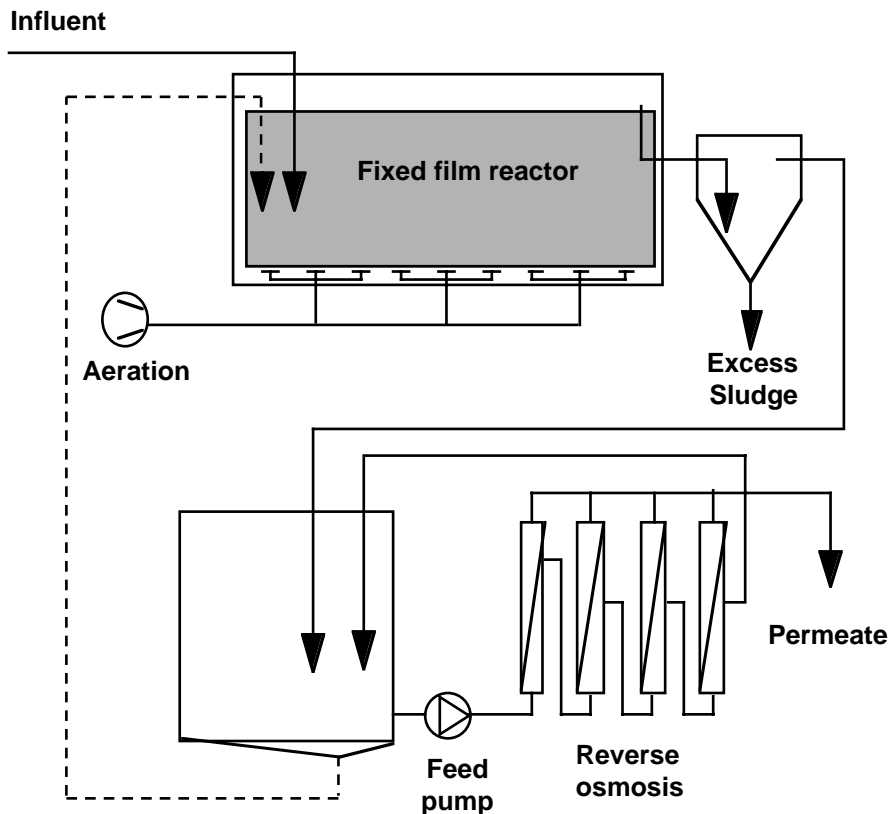


Abbildung 1: Kombiniertes Verfahren zur Presswasserreinigung mit Nitrifikation/Denitrifikation im Festbett Reaktor mit anschliessender Umkehrosmose

Die in Abbildung 1 dargestellte Anlage wurde auf der Kompogasanlage in Otelfingen realisiert. Die biologische Stufe zur Kohlenstoff- und Stickstoffelimination besteht aus einem intermittierend belüfteten Behälter mit einem Volumen von rund 25m³. Der Behälter ist mit einem getauchten Festbett (NSW, D-Nordenham) und mit Membrantellerbelüftern (Huber-Suhner AG, CH-Pfäffikon) ausgerüstet. Für die Umkehrosmose wurden vier Spiralwickelmodule der Firma CM-Celfa eingesetzt. Abbildung 2 zeigt im Vordergrund die Umkehrosmoseeinheit. Hinter den Druckrohren, welche die Spiralwickel aufnehmen, sind die verschiedenen für den Betrieb notwendigen Behälter (Rezirkulationsbehälter, Spülbehälter) sichtbar.

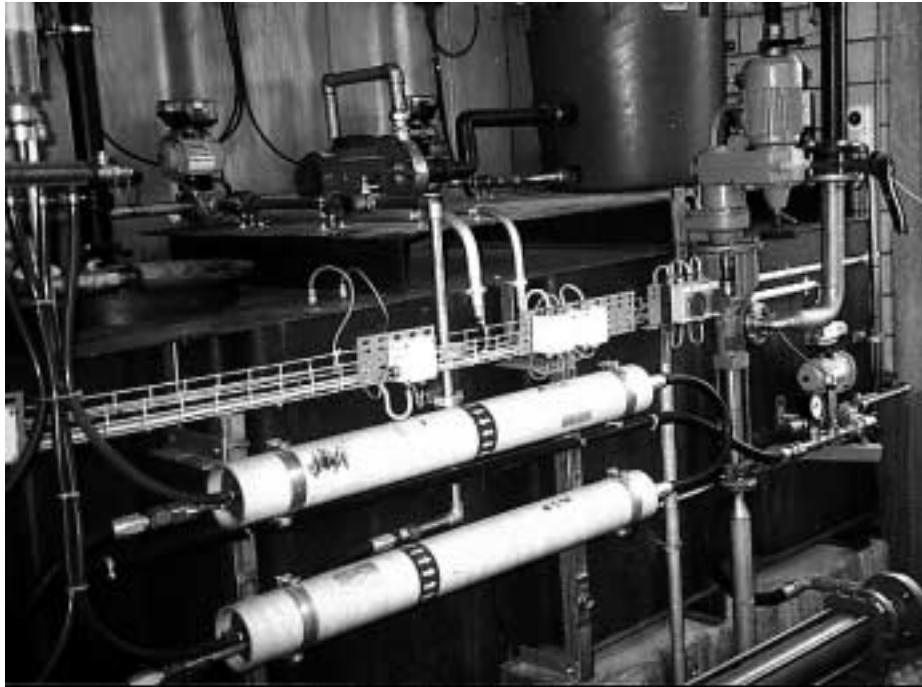


Abbildung 2: Die Umkehrosmoseeinheit in Otelfingen

Resultate

Versuche mit der biologischen Stufe ohne Nachreinigung zeigten, dass es kaum möglich ist, den CSB im Presswasser um mehr als 60% zu reduzieren, da ein grosser Teil der organischen Inhaltstoffe schwer abbaubar ist. Der BSB₅ hingegen konnte hingegen sowohl mit submersen Systemen, wie auch mit Tauchtropfkörpern und getauchten Festbettsystemen vollumfänglich eliminiert werden. Auch die Stickstoffelimination lief bei entsprechender Prozessführung (vorgeschaltete Denitrifikation) beinahe vollständig ab.

Nach der biologischen Stufe blieben jedoch zwischen 3.5 und 7 g CSB/l zurück, was entschieden zu hoch für eine Einleitung in einen Vorfluter ist. Eine Nassoxidation mit Ozon stellte sich als zu kostspielig heraus. UV-aktiviertes Wasserstoffperoxid war auf der anderen Seite nicht genügend wirkungsvoll.

Diese Erkenntnisse führten dazu, den Einsatz der Umkehrosmose mit gewickelten Modulen näher zu untersuchen. Nach verschiedenen Anpassungen der Prozessführung konnten die in Tabelle 2 dargestellten Resultate erreicht werden. In erster Linie musste ein Vorfilter eingebaut werden, um allfällige im Zentrat vorhandene partikuläre Stoffe von den Spiralwickeln fernzuhalten. Im Verlauf der Betriebsoptimierung hat sich gezeigt, dass der periodischen Reinigung des Systems grosse Bedeutung zukommt. Aufgrund der hohen Stoffkonzentrationen an der Membranoberfläche

können die Löslichkeitsgrenzen überschritten werden und es kommt zum Scaling. Zu erwähnen sind beispielsweise Magnesium-Ammonium-Phosphate (MAP) welche sich an der Membran anlagern und die Permeatleistung stark herabsetzen. Für die Anlage Otelfingen wurde eine automatisierte Membranreinigungsanlage entwickelt.

Parameter	Einheit	Zufluss	Permeat
Durchflussrate	m ³ /d	40	32
CSB	mg/l	12'000	30
BSB ₅	mg/l	3'000	15
Ammonium-Stickstoff	mg/l	1'200	40

Tabelle 2: Charakteristik von Zu- und Abfluss (Permeat) der Umkehrosmoseeinheit.

Das mit Umkehrosmose gereinigte Presswasser erreicht somit Vorfluterqualität. Weitere Untersuchungen zeigten, dass der Ersatz der biologischen Festbettstufe durch eine Ultrafiltration mit nachgeschalteter Umkehrosmose zu einen vergleichbaren Gesamtergebnis mit vertretbaren Kosten führen kann.

Integration der Membrantechnik in ein Gesamtkonzept der Presswasserbehandlung

Presswasser ist mit seinem Nährstoffgehalt und seinen schwer abbaubaren organischen Verbindungen ein wertvoller Rohstoff. Es ist schade, mit Hilfe von (fossil und nuklear erzeugter) Fremdenergie den pflanzenverfügbaren Ammoniumstickstoff zu eliminieren, bzw. in wertlosen Luftstickstoff zurückzuverwandeln. Gleichzeitig müssen dann Nährstoffe über Mineraldünger auf die Felder gebracht werden, wobei die Mineraldüngerproduktion wiederum hochwertige, treibhausaktive Fremdenergie benötigt (Für die Nährstoffe, welche in einer Tonne Kompost enthalten sind, müssen beispielsweise beinahe 90 kWh Primärenergie aufgewendet werden, *Edelmann, Schleiss, 1999*).

Für einen zukünftige, auch aus ökologischer Sicht vertretbare Abfallbewirtschaftung ist es notwendig, Stoffkreisläufe mit möglichst wenig Fremdenergie möglichst vollständig zu schliessen. Unter diesem Gesichtspunkt ist das Pilotprojekt von Otelfingen von grossem Interesse: Da nicht zu jeder Jahreszeit überschüssiges Presswasser an die Landwirtschaft abgegeben werden kann, läuft zusätzlich zur Presswasserreinigung ein Pilotversuch zur Rückführung der Nährstoffe in den natürlichen Kreislauf mittels Treibhaus- und Aquakulturen und anschliessender Endreinigung des Wassers im Binsenteich. Das Projekt wird gemeinsam von der HSW (Hochschule Wädenswil) und der W. Schmid AG, Umwelttechnik, betreut (*Staudenmann, J. et al., 1999*).

Anorganische Nährstoffüberschüsse im Wasser werden dabei in wertvolle Biomasse übergeführt. Eine mit Abwasser gespeiste Aquakultur stellt in erster Linie eine Produktionsanlage dar: In einer

kontrollierten aquatischen Nahrungskette werden Biomasse und gereinigtes Abwasser produziert. Mit der Aquakultur werden in einer Abfolge verschiedener Becken gleichzeitig zwei Ziele verfolgt:

- Zum einen werden attraktive Endprodukte wie Zierpflanzen, Speisefische, Gemüse und Edelkrebse erzeugt, die vermarktet werden können.
- Auf der anderen Seite wird die Nährstoffkonzentration im Wasser über die verschiedenen Prozessstufen sukzessive verringert, so dass am Ende gereinigtes Abwasser die Anlage verlässt.

Die Aquakultur-Pilotanlage in Otelfingen (ZH) ist ein Novum für Mitteleuropa. Bisher wurden Aquakulturen zur Abwasserbehandlung fast ausschliesslich in tropischen und subtropischen Regionen betrieben. Die Anlage in Otelfingen umfasst 36 Becken auf etwa 450 m², bzw. 360 m² Wasserfläche, von welcher 300 m² mit Gewächshäusern überdeckt sind. Das Zuflusswasser hat etwa folgende Charakteristika aufgezeigt: TOC: 670 mg/l, NO₃-N: 150 mg/l, NH₄-N: 95 mg/l, P_{tot}: 50 mg/l (Staudenmann, Junkge-Berberovic, 1998). (Das nicht weitergehend behandelte Abwasser aus der Dekanterzentrifuge ist damit ohne (zumindest partielle) Zusatzbehandlung zu konzentriert für den direkten Einsatz in der Aquakultur). In einer Kaskade von trophischen Stufen wachsen zunächst Macrophyten, wie *Eichhornia*, *Pistia* und Wasserlinsen etc., dann folgen Module mit Algen sowie mit *Daphnia*, Wasserschnecken und weiteren Futterquellen für Fische (div. Karpfen, Schleien, *Tilapia* und Crustaceen), welche z.T. in aussengelegenen und mit Frisch- bzw. Regenwasser versorgten Teichen aufwachsen. Weitere Versuche laufen mit Zierpflanzen und Aquakultur von Gemüsen.

Die Forschungsanlage soll Erkenntnisse über die Anwendung dieses Verfahrens in Regionen mit gemässigtem Klima und Angaben über die ökologischen wie auch ökonomischen Aspekte des Nährstoffrecyclings liefern. Abbildung 3 zeigt eine Ansicht der Aquakultur von Pflanzen.



Abbildung 3: Sicht auf einen Bereich der Aquakultur in Otelfingen, wo Zierpflanzen gewonnen werden.

In der Kompogasanlage Otelfingen wird ein Teil des Biogases für den Betrieb von Automobilen aufbereitet. Ein weiterer Teil wird verstromt. Die Abwärme des Blockheizkraftwerks wird zum Beheizen des Fermenters eingesetzt. Andererseits könnte Abwärme und allenfalls CO₂-reiches, warmes Abgas durchaus auch für das Gewächshaus und das Wasser der Aquakultur eingesetzt werden.

Zukünftige Lösungen müssen von einem ganzheitlichen Ansatz unter Berücksichtigung der ökologischen Kreisläufe ausgehen. Da Presswasser nicht ganzjährig auf das Feld ausgebracht werden kann, muss je nach Dimensionierung der Aquakultur zu gewissen Zeiten das Wasser vor Zugabe zur Aquakultur zumindest teilweise behandelt werden. Hier bietet sich die Membrantechnologie als optimale Option im Gesamtkonzept an.

Literatur:

- Edelmann W., Schleiss K. (1999): *Ökologischer, energetischer und ökonomischer Vergleich von Vergärung, Kompostierung und Verbrennung fester biogener Abfallstoffe*, Schlussbericht zu Handen von BFE/BUWAL, 3003 Bern (120 Seiten, in Druck).
- Henze M., Harrenmoës P., Hansen J., Arvin E. (1995): *Waste Water Treatment*, Springer-Verlag, Berlin
- Rautenbach R., Melin T., Dohmann M [Ed.] (1998): *Membrantechnik*, Begleitbuch zur 2. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, Aachen
- Schleiss K. (1998): *Kompostier- und Vergärungsanlagen im Kanton Zürich*, AWEL, Amt für Abfall, Wasser und Energie, 1998/4, Zürich
- Staudenmann, J., Junge-Berberovic R. (1999): *Wastewater-fed Aquaculture in Temperate Climates - the Pilot Plant Otelfingen after one Year*. 4th International Conference on Ecological Engineering for Wastewater Treatment - Managing the Wastewater Resource, June 7-11, 1999 - Aas Norway
- Staudenmann, J., Junge-Berberovic R. (1998): *Treating biogas plant effluent through aquaculture: First results and experiences from the pilot plant Otelfingen (Switzerland)*, 6th Int. Conf. on Ecological Engineering, Calcutta.
- Tschui M. (1993): *Nitrifikation mit submersen Festbettreaktoren*, VSA-Tagung, 5.11.93, VSA Zürich

Neue Anlagenkonzepte – Das Modell BIOSCAN

Totalaufbereitung durch Separierung der Wertstoffe von Gülle, flüssigen organischen Reststoffen oder organisch hoch belasteter Abwässer

Mit dem Verfahren wird eine neue Technologie zu dem seit langem anvisierten Ziel einer Totalaufbereitung von organisch hoch belasteten Abwässern bzw. Gülle in kompakten, dezentralen Anlagen realisiert. Zielgruppe für diese Technologie sind im ersten Schritt die lebensmittelverarbeitende Industrie und Fleischproduktionsbetriebe in der Landwirtschaft.

In den Abwässern der Industrie, in den flüssigen organischen Reststoffen und der Gülle sind zahlreiche Nährstoffe enthalten, die in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden sollen. Ebenso sind die Wertstoffe aus der Gülle, den flüssigen organischen Reststoffen und den industriellen Abwässern wichtiger Bestandteil der landwirtschaftlichen Kreislaufwirtschaft. Stickstoff und Nährsalze sind in organischen Verbindungen gebunden. Zur Pflanzenverfügbarkeit müssen diese herausgelöst und die organischen Verbindungen aufgelöst werden.

Die anorganisch vorliegenden Wertstoffe werden in Fraktionen separiert:

- Stickstoff liegt als Ammoniakstarkwasser vor.
- Nährsalze liegen in flüssiger Konzentratlösung vor.
- Die organischen Anteile werden in Biogas umgewandelt.

Ziel der Totalaufbereitung ist die Bereitstellung von Düngerfraktionen in marktgängigen Qualitäten, die Inhaltsstoffe des Restwassers sollen unter den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung liegen.

Das Verfahren heißt BIOREK[®], in dem das gesteckte Ziel mit kompakten, ökonomisch interessanten Anlagen erreicht wird. Die erste Anlage im Vollausbau zur Gülletotalaufbereitung ist seit September 1997 in Dänemark auf einem Schweinemastbetrieb im Betrieb. Die Endprodukte sind durch die eingesetzte Filtrationstechnologie in hochwertigem und sterilem Zustand.

Das von der dänischen BIOSCAN A/S entwickelte BIOREK[®]-Verfahren vereint bewährte, traditionelle dänische Biogastechnologie mit Hochleistungs-Reaktortechnik. Das Ergebnis ist ein kompaktes, gleichzeitig sehr robustes Design.

Das Herz der BIOREK[®]-Anlage ist ein von der südafrikanischen Firma MEMBRATEK entwickelter ADUF[®]-Membranreaktor. ADUF[®] steht für „Anaerobic Digestion with Ultra-Filtration“ (Anaerobes Faulverfahren mit Ultrafiltration) und besteht aus einem äußerst kompakten Biogasreaktor, der mit einem Ultrafilter gekoppelt ist.

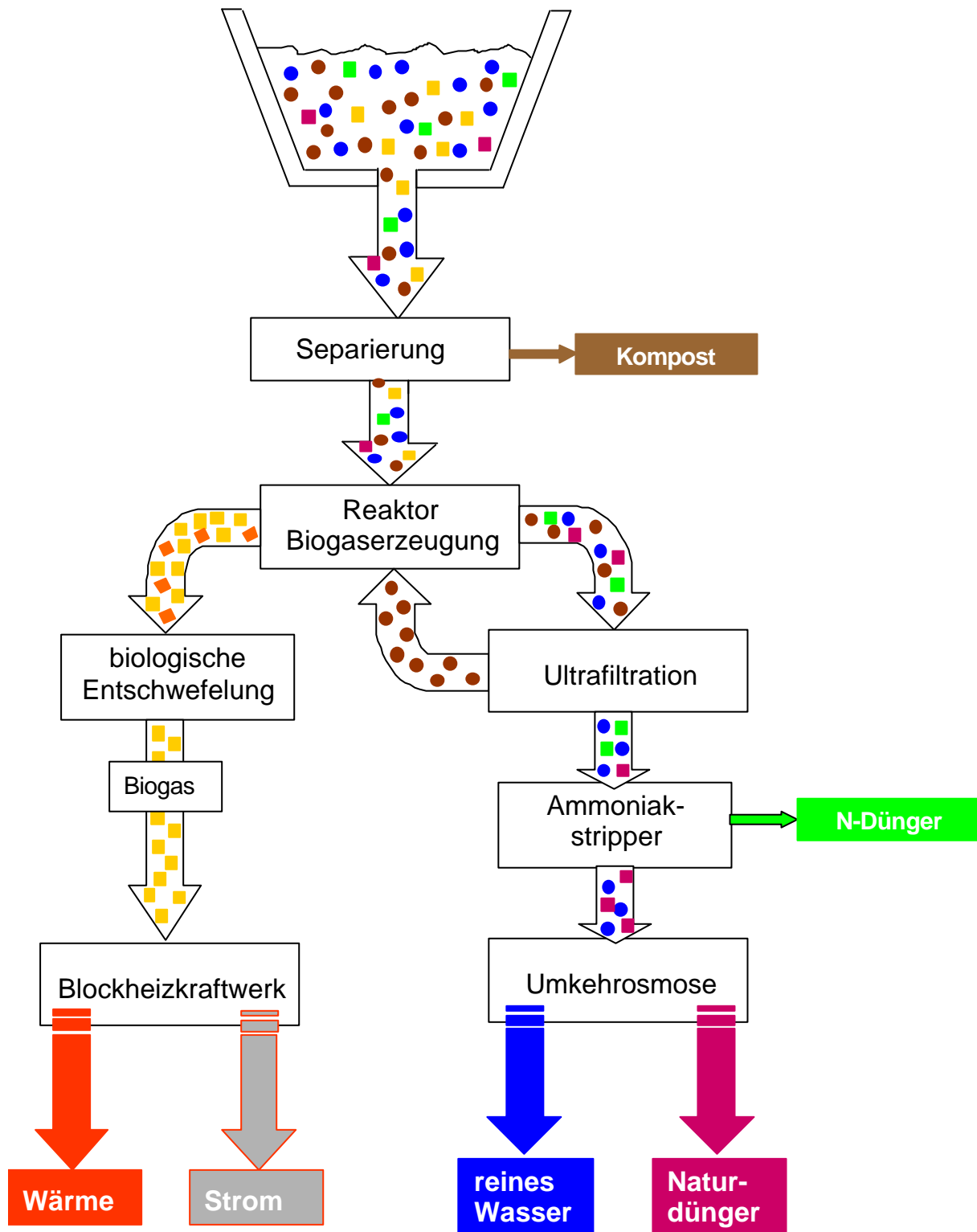
Die von nicht vergärbaren Grobpartikeln befreite dünne Fraktion der Gülle oder des Abwassers wird in diesem Reaktor ausgefault. Durch die Ultrafilter werden die Biogasbakterien im Reaktor zurückgehalten. Außerdem können die Inhaltsstoffe erst nach vollständigem organischen Abbau den Reaktor über die Membranen verlassen. Die hohe Bakterienkonzentration im Reaktor bedeutet eine starke Verkürzung der zum Abbau notwendigen Verweilzeit, der vollständige Abbau der organischen Substanzen bewirkt eine erheblich größere Biogasausbeute im Vergleich zu traditionellen Biogasanlagen..

Die ultrafiltrierte Flüssigkeit, die den Reaktor verläßt, ist steril. Dieser Flüssigkeit wird in einem einfachen Schritt das Ammoniak entzogen. Dabei entsteht Ammoniakstarkwasser.

Anschließend durchläuft die Flüssigkeit eine Umkehrosmose, in der sämtliche Nährsalze entzogen werden. Dabei entsteht eine vollständige Konzentratlösung und reines (entmineralisiertes) Wasser.

BIOREK[®]-Anlagen können einen ökonomisch sehr interessanten Beitrag zur Schließung der Stoffkreisläufe in der lebensmittelverarbeitenden Industrie und für die Fleischproduktionsbetriebe der Landwirtschaft leisten. Die Anforderungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes werden mit dieser Technologie vollständig erfüllt.

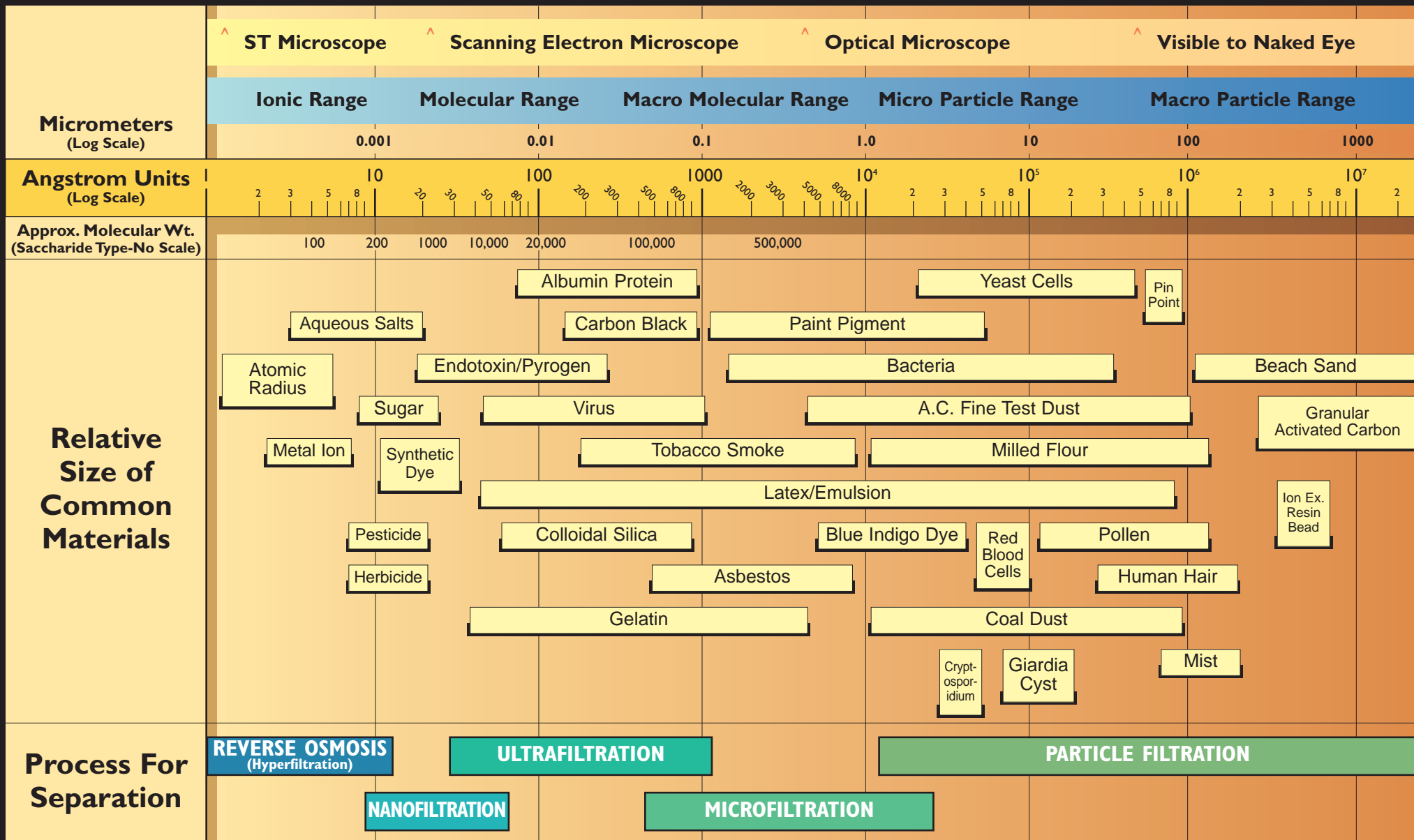
BIOREK[®]-Anlagenfließschema





OSMONICS

The Filtration Spectrum



Note: 1 Micron (1×10^{-6} Meters) $\approx 4 \times 10^{-5}$ Inches (0.00004 Inches)
 1 Angstrom Unit = 10^{-10} Meters = 10^{-4} Micrometers (Microns)

© Copyright 1996, 1993, 1990, 1984 Osmonics, Inc., Minnetonka, Minnesota USA

Osmonics, Inc.
 Corporate Headquarters
 5951 Clearwater Drive • Minnetonka, Minnesota 55343-8990 USA
 Toll Free: 800/848-1750 Fax: 612/933-0141

Osmonics Asia/Pacific, Ltd.
 Bangkok, Thailand Fax: 011-66-2-39-18183
 Tokyo, Japan Fax: 011-81-48-622-6309

Osmonics Europa, S.A.
 LeMee Sur Seine (Paris), France
 Fax: 011-331-64-37-9211