



Aktenzeichen IV-7-042 600 003 I

Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen - Phase I

KURZBERICHT

Im Auftrag von:

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



Projektleitung:



Projektpartner:



Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V. · www.fiw.rwth-aachen.de
Kackertstraße 15 – 17 · 52056 Aachen · Fon 0241 80 2 68 25 · Fax 0241 80 2 28 25 · fiw@fiw.rwth-aachen.de



Aktenzeichen IV-7-042 600 003 I

Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen - Phase I

KURZBERICHT

Aachen, im Dezember 2011
FiW an der RWTH Aachen

ISA der RWTH Aachen

Dr.-Ing. F.-W. Bolle

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp

Inhaltsverzeichnis

1.	Veranlassung und Zielsetzung.....	1
2.	Energieverbrauch kommunaler Membranbioreaktoren.....	2
3.	Faulgasertrag.....	2
4.	Schlammfiltrierbarkeit und Membranfouling.....	4
5.	Entwässerungseigenschaften.....	6
6.	Energiebilanz.....	7
7.	CO ₂ -Bilanz.....	8
8.	Kostenberechnungen und -vergleichsbetrachtungen.....	9
9.	Entscheidungsmatrix als Planungshilfe.....	11
10.	Ausblick.....	12
11.	Literaturverzeichnis.....	13

1. Veranlassung und Zielsetzung

Membranbioreaktoren (MBR) weisen gegenüber konventionellen Anlagen einen erhöhten Energieverbrauch auf. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Phasenseparation von belebtem Schlamm und Wasser nicht durch Sedimentation, sondern durch Filtration mittels getauchter Membranen stattfindet. Um die filtrationsbedingte Deckschichtbildung zu begrenzen, werden die Membranen mit einer grobblasigen Belüftung beaufschlagt. Diese Membranbelüftung oder Cross-Flow-Belüftung macht ca. 50 % [PINNEKAMP, 2011] des Gesamtenergieverbrauchs eines MBR aus. Zum anderen werden MBR mit hohen Trockensubstanzgehalten und niedrigen Schlammbelastungen als simultan aerob stabilisierende Anlagen betrieben, was den Energieverbrauch durch die Erhöhung des Sauerstoffbedarfs zur Versorgung der Biozönose steigen lässt. Zudem ist somit keine bzw. nur eine eingeschränkte Eigenenergieerzeugung durch die anaerobe Faulung des Klärschlammes und Verstromung des entstehenden Faulgases möglich.

Die ökonomische Implementierung einer anaeroben Schlammstabilisierung auf kommunalen MBR macht Eingriffe in den Prozess der Abwasserreinigung erforderlich. Zum Erreichen einer optimalen Gas- und damit auch Energieausbeute sind die Installation einer Vorklärung zum Primärschlammabzug und das Herabsetzen des Schlammalters in der Belebungsstufe zur Erhöhung des in die Faulung eingetragenen organischen Materials anzustreben. Beide Eingriffe reduzieren auch den Anteil des im Belebungsbecken zu oxidierenden organischen Materials und liefern damit einen Beitrag zur Energieeinsparung bei der Abwasserreinigung.

Neben rein wirtschaftlichen Überlegungen sind bei einem derart umgestellten Betrieb eines MBR zusätzlich die Auswirkungen auf die Schlammeigenschaften und damit der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Membranstufe zu berücksichtigen. Zur Verbesserung der Gesamtenergiebilanz eines MBR ist daher zu untersuchen, ob trotz der besonderen Betriebsbedingungen eine anaerobe Faulung des Primär- und Überschussschlammes wirtschaftlich möglich ist, und welche Auswirkungen die Implementierung einer Vorklärstufe auf den Faulgasertrag, die Schlammeigenschaften und den Betrieb der Gesamtanlage hat.

In Phase 1 des Projektes werden neben der Recherche bisheriger Erkenntnisse zur Thematik anhand einer Literaturstudie die möglichen Gasausbeuten von Primär- und Sekundärschlämmen verschiedener kommunaler MBR anhand von Versuchen im Labormaßstab ermittelt. Zudem werden die Entwässerungseigenschaften dieser Schlämme vor und nach der anaeroben Stabilisierung bestimmt. Die Ermittlung von Energie- und Kostenbilanzen am Beispiel einer Modellanlage mit und ohne Vorklärung und anaeroben Stabilisierungsstufe sowie die Bilanzierung der CO₂-Äquivalente für die Modellanlage hinsichtlich des Energieaufwandes für die Abwasser- und Klärschlammbehandlung runden die erste Phase des Projektes ab.

2. Energieverbrauch kommunaler Membranbioreaktoren

Der verfahrenstechnisch entscheidende Unterschied des Membranbelebungsverfahrens gegenüber der konventionellen Technik besteht in der Phasenseparation des Belebtschlamm-Wasser-Gemisches mittels getauchter Mikro- oder Ultrafiltrationsmembranen. Der Energieverbrauch kommunaler MBR liegt höher als der konventioneller Anlagen. Konventionelle Anlagen verbrauchen 20 bis 60 kWh/(E a) (0,22 bis 0,67 kWh/m³) [BAUMANN UND LOPP, 2008], im bundesweiten Durchschnitt über alle Größenklassen 35 kWh/(E a) (0,39 kWh/m³) [HABERKERN ET AL., 2008]. Der Gesamtenergieverbrauch kommunaler MBR liegt doppelt bis vierfach so hoch [KRAUSE, 2005]. Diese Angabe konnte im Projekt „Prozessoptimierung von Membranbelebungsanlagen“ (ProM) [PINNEKAMP, 2011] bestätigt werden, bei dem Energieverbräuche in der Spannbreite von 0,73 – 1,83 kWh/m³ bzw. 49 bis 208 kWh/(E a) ermittelt wurden. Da bei einer Membrankläranlage der größte Energieverbrauch aus dem Betrieb der Membranfiltration resultiert, der sich mit der Zulaufwassermenge ändert, ist es hier üblich, den Energieverbrauch in kWh/m³ anzugeben. Eine Umrechnung kann über den einwohnerspezifischen Abwasseranfall (inkl. Regen- und Fremdwasser) erfolgen. In PINNEKAMP (2011) erfolgte dies mit der tatsächlich im untersuchten Zeitraum behandelten Wassermenge; die anderen Angaben sind mit pauschal 245 L/(E d) [MURL, 1999] umgerechnet worden. Für eine optimierte Anlage mit günstigen Randbedingungen liegt der Strom-Mehrverbrauch nur noch bei rund 40 %. Dies stellt allerdings eine Ausnahme dar, für übliche Anlagen lag er in PINNEKAMP (2011) meist beim Faktor 2 bis 3, in einem Fall fünffach höher als der entsprechende Vergleichswert konventioneller Anlagen. Dieser Mehrverbrauch ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Membranen zur Begrenzung der Deckschichtbildung während der Filtration mit Luft aus Cross-Flow-Gebläsen beaufschlagt werden. Diese verursachen im Durchschnitt ca. 50 % des Gesamtenergieverbrauchs dieser Anlagen.

3. Faulgasertrag

Die Menge und Zusammensetzung des Faulgases hängt von einer Reihe von Faktoren ab: Abgesehen vom Betrieb der Schlammfaulungsanlage mit der gewählten Verfahrenstechnik, Faulbehältertemperatur und Faulzeit haben vor allem Menge und Beschaffenheit des Schlammes großen Einfluss auf den Gasertrag. Diese hängen von den Abwässern in Verbindung mit dem gewählten Abwasserreinigungsverfahren ab. Ein entscheidender Faktor für den Faulgasanfall ist die dem Faulbehälter mit dem Rohschlamm zugeführte Fracht an organischer Trockenmasse, ausgedrückt als organischer Trockenrückstand (oTR). Das Schlammalter (t_{TS}) im Belebungsbecken nimmt wesentlichen Einfluss auf den oTR-Anfall, wobei ein höheres Schlammalter in der simultan aeroben Stabilisierung zu einem geringeren oTR-Anfall führt. Ohne den in einer Vorklärung anfallenden energiereichen Primärschlamm (PS) ist der oTR-Anfall für die Gesamtanlage geringer. Weiterhin ergeben sich Unterschiede in der Zusammensetzung und Abbaubarkeit des oTR. PS hat einen hohen Abbaugrad und liefert hohe Gaserträge. Wird demnach eine Vorklärung betrieben, beeinflusst der PS den Abbaugrad und den Gasanfall des in den Faulbehälter eingebrachten Gemisches positiv. Die anaerobe Abbaubarkeit von

Überschussschlamm (ÜSS) hängt insbesondere vom Schlammalter der biologischen Stufe der Kläranlage ab. Bei höherem Schlammalter sind die einfacher zu erschließenden Organik-Anteile des Schlammes bereits umgesetzt, eine weitere Umsetzung in der anaeroben Stufe ist dann erschwert. Tabelle 1 sind Faulgasausbeuten in Abhängigkeit des zugeführten oTR zu entnehmen.

Tabelle 1: Faulgasausbeute bezogen auf den zugeführten oTR [L/(kg oTR)] [MURL, 1999]

	ohne VK	mit Vorklärung*		
		ca. 0,5 h	ca. 1 h	ca. 2 h
N+DN; t_{TS} ca. 13 d	295 – 340	380 - 440	400 - 465	425 - 470
N+DN; t_{TS} ca. 25 d	275 – 320	370 - 425	395 -455	420 - 460

*Aufenthaltszeit Vorklärung bei max. Q_t N: Nitrifikation DN: Denitrifikation

Alternativ kann ein einwohnerspezifischer Faulgasertrag verwendet werden. HABERKERN ET AL. (2008) geben auf Grundlage der vom Statistischen Bundesamt jährlich erhobenen Daten über die erzeugten und verwerteten Faulgasmengen einen spezifischen Faulgasanfall von 19,7 L/(E d) an.

Im Rahmen des Projektes wurden die Faulgaserträge von Schlämmen aus drei verschiedenen MBR sowie konventionelle Referenzschlämme im Labormaßstab untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 1 dargestellt.

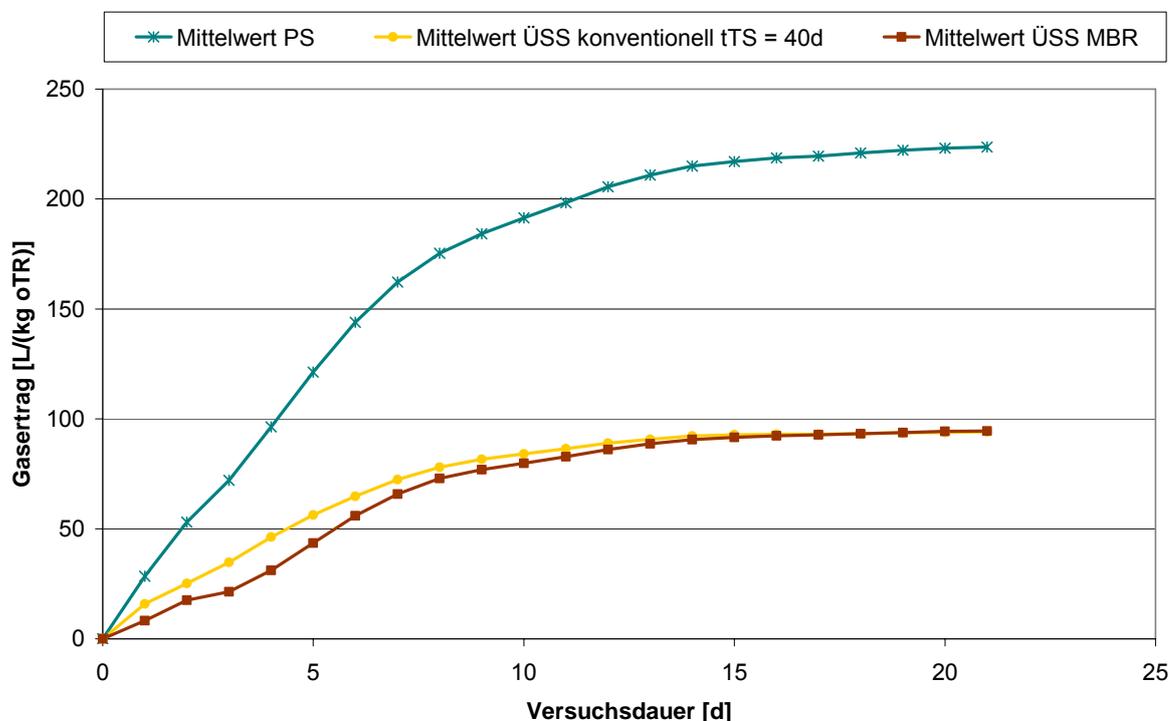


Bild 1: Mittelwerte der im Laborversuch ermittelten Gaserträge verschiedener Schlämme

Hierbei wurde die Erwartung bestätigt, dass die PS den höchsten Gasertrag erreichen. Bei ÜSS aus konventioneller Behandlung mit einem Schlammalter von rund 40 Tagen liegt der durchschnittlich erzielte Gasertrag auf gleicher Höhe wie derjenige der MBR-Schlämme. Es kann geschlussfolgert werden, dass MBR-Schlämme und Schlämme aus einer konventionellen simultan aerob stabilisierenden Anlage sich in der Faulung kongruent verhalten, auch wenn das Schlammalter der MBR-Schlämme teilweise noch wesentlich höher liegt.

Insgesamt liegen die Gaserträge unterhalb von Literaturangaben, was auf die Bedingungen bei den Batch-Laborversuchen und den sehr kleinen Maßstab zurückzuführen ist. Nach derzeitigem Kenntnisstand kann für MBR ohne Vorklärung von einem ähnlichen Gasanfall ausgegangen werden, wie er für konventionelle Anlagen mit hohem Schlammalter in der Literatur dokumentiert ist, d.h. rund 300 L/(kg oTR). Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass MBR-Schlämme, vor allem in Verbindung mit PS, einen wertvollen Beitrag zur Gasbildung in einer anaeroben Faulung leisten können.

Für den Methangehalt in Faulgas aus Klärschlammfaulungsanlagen gibt das ATV-DVWK-M 363 (2002) einen Wertebereich von 60 Vol.-% bis 70 Vol.-% an. Die Analyse der Faulgase ergab einen mittleren Methangehalt im Faulgas der PS von knapp 64 Vol.-% mit einer Schwankungsbreite von 61 Vol.-% bis 68 Vol.-%. Die mittleren Methangehalte der Faulgase der konventionellen ÜSS und der Membranschlämme sind sehr ähnlich und liegen im Bereich um 61 Vol.-%, wobei die Schwankungsbreite bei den MBR-Schlämmen etwas größer ist.

4. Schlammfiltrierbarkeit und Membranfouling

Von der Schlammfiltrierbarkeit und dem Zustand der Membran werden die Höhe des Transmembrandrucks (TMP- transmembrane pressure) bzw. der erreichbare Fluss und damit der Energieverbrauch einer Membrananlage maßgeblich beeinflusst. Außerdem werden vom Membranzustand das Intervall und die Intensität der chemischen Reinigung beeinflusst, welche wiederum Auswirkungen auf die Standzeit der Membranen hat. Von besonderer Bedeutung im Hinblick auf Membranfouling scheinen extrazelluläre polymere Substanzen (EPS) zu sein. Hierbei handelt es sich um organische Makromoleküle mikrobiellen Ursprungs. Sie werden von Mikroorganismen produziert. Es kann unterschieden werden zwischen gelösten EPS und EPS, welche an die Schlammflocke gebunden sind. In vielen Studien wird der Einfluss der gelösten EPS auf die Foulingneigung hervorgehoben. Bestimmte Betriebsparameter beeinflussen das Membranfouling bzw. die Schlammfiltrierbarkeit, wobei sich die Effekte überlagern und oft nicht eindeutig einer Einflussgröße zuzuordnen sind. Nach LE-CLECH ET AL. (2006) ist das Schlammalter der wichtigste Betriebsparameter mit Einfluss auf die Foulingneigung. MELIN ET AL. (2007) geben an, dass sich ein höheres Schlammalter günstig auf das Entwässerungsverhalten und die Foulingneigung auswirkt, was unter anderem durch die geringere Konzentration von EPS erklärt werden kann. Andere Untersuchungen kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Zu beachten ist jedoch, dass diese nur im Rahmen der untersuchten Schlammalter gelten. MELIN ET AL. (2007) sowie diverse andere Autoren fanden in einer verringerten Schlammbelastung einen positiven Einfluss auf die Filtrierbarkeit. Beim Einfluss des TR auf

die Schlammfiltrierbarkeit und Foulingneigung kommen Studien zu entgegengesetzten Ergebnissen. Nach KRAUSE (2005) und ITONAGA ET AL. (2004) wird bei geringerem TR-Gehalt die Viskosität des Schlamm-Wassergemisches kleiner, so dass die Filtrierbarkeit verbessert wird. In die gleiche Richtung gehen die Erkenntnisse von CICEK ET AL. (1999). WETT (2005) bringt hingegen einen niedrigen TR auch mit einer feineren Flockenstruktur und somit mit der Gefahr der Verstopfung in Zusammenhang. Des Weiteren sieht WETT (2005) in einer mit dem TR steigenden Deckschicht auch einen Schutz der Membranen vor weiteren Foulants und somit langfristig eine höhere hydraulische Leistungsfähigkeit der Membranstufe bei höherem TR. BRUUS ET AL. (1992) geben an, dass durch einen höheren TR die Stabilität der Flocke erhöht wird, wodurch die Entwässerbarkeit verbessert wird. Gemäß ROSENBERGER ET AL. (2005) hat der TR in einem Bereich von 8 bis 12 g/L keinen signifikanten Einfluss auf das Fouling, unterhalb von 6 g/L wirkt sich eine Erhöhung des TR positiv auf die Foulingneigung aus, oberhalb von 15 g/L negativ. ROSENBERGER (2003) schlussfolgert, dass der Faktor TR zu pauschal und damit alleine nicht aussagekräftig genug ist, um die Filtrierbarkeit zu charakterisieren.

Da die Einflussfaktoren auf die Foulingneigung und die Filtrierbarkeit zahlreich und die Zusammenhänge komplex sind, lässt sich nicht abschließend beurteilen, wie sich eine Änderung von TR-Gehalt, Schlammalter und Schlammbelastung auf die Membranperformance auswirken wird, zumal sich die hier identifizierten positiven und möglicherweise negativen Effekte überlagern, und der Beitrag der einzelnen Auswirkungen ebenfalls unklar ist. Die Schlammbelastung würde beispielsweise durch die Reduzierung des TR-Gehaltes im Belebungsbecken steigen, aber durch die Implementierung einer Vorklärung sinken.

Die Einführung einer Vorklärung wird auch aus weiteren Gründen positiv bewertet. Gerade für MBR, die im Hinblick auf die mechanische Vorbehandlung sehr anspruchsvoll sind, ist die Einführung einer Vorklärung vor allem günstig bezüglich der Betriebssicherheit. Als besonders problematisch erweisen sich faserige Abwasserinhaltsstoffe und Haare, die zu Verzopfungen und in der Folge zu Verschlammungen führen können und oft von der bestehenden mechanischen Vorreinigungsstufe nicht zufriedenstellend entfernt werden können. Aufwendige Feinstdsiebwerke mit sehr kleinen Maschenweiten führen ihrerseits zu betrieblichen Problemen. Diese Stoffe können jedoch auch in einer Vorklärung abgeschieden werden ggf. unter Berücksichtigung von Maßnahmen, die aufschwimmende faserige Stoffe zurückhalten. Gelangen sie hingegen in die Membrankammern, sind die Verunreinigungen in manchen Fällen nur noch durch Ausbau der Platten und Reinigung per Hand zu entfernen. ITOKAWA ET AL. (2008) berichten über Betriebsprobleme großtechnischer MBR in Europa, wobei viele Anlagen Verzopfungen und Verschlammungen aufweisen und nur eine einzige Anlage über eine Vorklärung verfügt. MBR-Anlagen mit Vorklärung sind äußerst selten und nur bei Aus- und Umbau bestehender Anlagen vorzufinden [LESJEAN ET AL., 2009].

5. Entwässerungseigenschaften

Die Entwässerungseigenschaften eines Schlammes hängen von vielen Faktoren ab, wie z.B. der Herkunft des Abwassers, der Art der Abwasserbehandlung, dem Schlammalter, der Partikelgrößenverteilung, dem oTR oder dem EPS-Gehalt. Aufgabe der Schlammkonditionierung ist eine Beschleunigung des Entwässerungsvorganges, um hohe Durchsatzleistungen und hohe Abscheidegrade bei der maschinellen Schlammmentwässerung erreichen zu können [DICHTL UND KOPP, 2001]. Die optimale Dosiermenge muss in Versuchsserien bestimmt werden. Primärschlamm enthält viele Strukturstoffe und ist daher besser entwässerbar als ÜSS, der durch einen hohen Bakterienanteil geprägt ist. Weiterhin nimmt das Schlammalter Einfluss auf die Entwässerungseigenschaften. Bei steigendem Schlammalter sinkt die Flockengröße, wodurch das erreichbare Entwässerungsergebnis selbst mit zunehmender Dosierung an Flockungshilfsmitteln (FHM) schlechter wird [KOPP, 2009]. In der Regel weist ein Schlamm mit einem hohen Glühverlust eine geringe Dichte auf, bildet kompressible Filterkuchen und hat einen relativ hohen Bedarf an Konditionierungsmitteln, d.h. der Schlamm ist oftmals schlecht entwässerbar. Die organischen Anteile sind kompressibel, während einige anorganischen Anteile inkompressibel sind und als Drainagematerial zur Verbesserung der Entwässerungseigenschaften beitragen [ATV-DVWK-M 366, 2000]. Ein weitgehender Stabilisierungsgrad im Klärschlamm begünstigt gemäß ATV-DVWK-M 366 (2000) im Allgemeinen das Entwässerungsverhalten. In ATV (1996) wird darauf hingewiesen, dass die Entwässerbarkeit von simultan aerob stabilisierten Schlämmen ungünstiger ist als bei allen anderen biologischen Stabilisierungsverfahren. DICHTL UND KOPP (1999) verglichen den erreichbaren Feststoffgehalt und den Polymerbedarf von Faulschlämmen, aerob stabilisierten Schlämmen konventioneller Kläranlagen und Schlämmen aus MBR-Anlagen. Dabei stellten sie fest, dass sich die untersuchten Proben aus Anlagen mit Membranbiologie vergleichbar zu aerob stabilisierten Schlämmen darstellen, dass das Entwässerungsverhalten jedoch auch schlechter sein kann. Dies führten sie auf eine feinere Flockenstruktur zurück.

Bei den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens in Laborversuchen ermittelten Entwässerungseigenschaften konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen MBR-Schlämmen und Schlämmen einer konventionellen Stufe mit hohem Schlammalter erkannt werden. Die überwiegende Anzahl der Messungen ergab nach der Faulung kürzere CST-Werte (capillary suction time – kapillare Fließzeit [s]) als vorher, was auf verbesserte Entwässerungseigenschaften hinweist. Diese Datenpunkte liegen in Bild 2 unterhalb der Winkelhalbierenden.

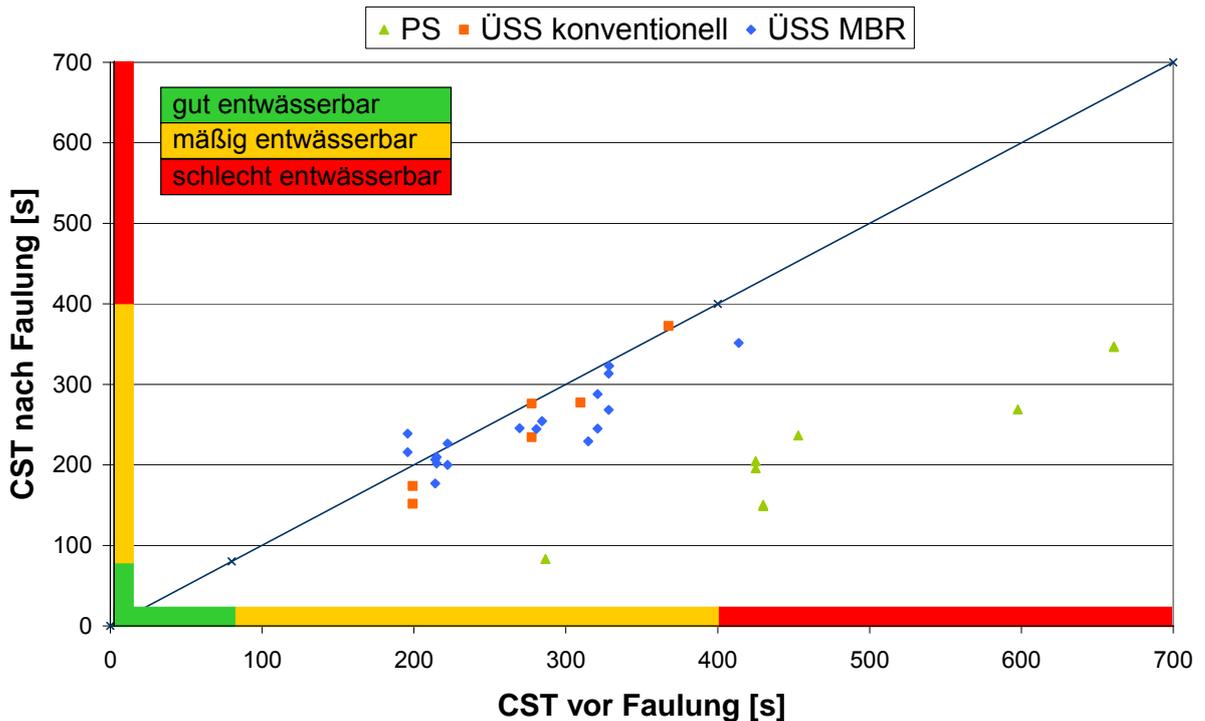


Bild 2: CST vor und nach der Faulung

Bei den ÜSS, sowohl aus der konventionellen Stufe mit hohem Schlammalter als auch aus den MBR-Anlagen, lag der Mittelwert der CST-Messungen vor der Faulung bei 271 s, danach bei 247 s. Die durchschnittliche Verbesserung beträgt also rund 9 %. Für die PS waren die CST-Werte vor der Faulung wesentlich höher, im Mittel bei 485 s. Die Änderungen der CST lagen für die PS im Mittel bei 55 %. Hieran ist zu erkennen, dass der Nutzen für die Entwässerungseigenschaften bei den bisher noch nicht oder wenig stabilisierten Schlämmen erwartungsgemäß größer ist.

Werden die Ergebnisse in die drei Kategorien gut (< 80 s), mittelmäßig (80-400 s) und schlecht entwässerbar (> 400 s) eingeteilt, befinden sich die konventionellen ÜSS sowie die MBR-Schlämme, sowohl vor als auch nach der Faulung, im mittelmäßigen Bereich. Die PS lagen vor der Faulung zumeist im schlecht entwässerbaren Bereich, danach stets im mittelmäßigen.

6. Energiebilanz

Modellanlagen wurden erstellt und Idealwerte des Energieverbrauchs aufgrund theoretischer Berechnungen ermittelt, die unter optimalen Voraussetzungen erreicht werden können, wie es für konventionelle Anlagen in MURL (1999) und für MBR in KRAUSE (2005) sowie in PÖYRY (2009a und b) dokumentiert ist. Die Modellanlagen sind auf 130.000 E und 20.000 E ausgelegt und der Energiebedarf wurde für die tatsächlich angeschlossenen Einwohnerwerte von 100.000 E und 14.000 E berechnet. Vor allem wurden die Unterschiede herausgearbeitet, die sich durch die Implementierung einer Vorklärung und einer anaeroben Faulung auf den Energiebedarf ergeben. Ebenfalls wurde der potentielle Energiegewinn, der durch eine Verstromung des anfallenden Faulgases entsteht, berücksichtigt. Hierbei ergaben sich die in Tabelle 2 aufgeführten Ergebnisse.

Tabelle 2: Energiebilanz der MBR-Modellanlagen

	100.000 E		14.000 E	
	mit	ohne	mit	ohne
	Vorklärung/ Faulung Wh/m ³	Vorklärung/ Faulung Wh/m ³	Vorklärung/ Faulung Wh/m ³	Vorklärung/ Faulung Wh/m ³
Verbraucher				
Hebewerk	13,63	13,63	13,63	13,63
Rechen	0,8	0,8	0,8	0,8
Sandfang	5,09	5,09	7,84	7,84
Vorklärung	4,7		4,7	
Membrangebläse	240,57	240,57	240,59	240,59
Rezi intern	5,84	5,84	5,84	5,84
Rezi extern	11,68	11,68	11,68	11,68
Permeatpumpen	7,4	7,4	7,4	7,4
Belüftung BB	102,86	160,86	119,12	169,99
Rührwerk	11,52	12,4	8,38	12,67
Voreindickung	5,54		5,04	
Faulung	13,5		13,37	
Zentrifuge	8,16	8,16	7,77	7,77
Infrastruktur	17,78	17,78	16,92	16,92
Gesamtenergieverbrauch	449	484	463	495
Energiegewinn	141	0	140	0
Restverbrauch	308	484	323	495
Energiebilanz	176		172	

Somit ergibt sich bei beiden Anlagengrößen bereits ein geringerer Gesamtenergieverbrauch bei der Konfiguration mit Vorklärung und Faulung. Dies ist auf die geringere zu oxidierende organische Fracht im Belebungsbecken zurückzuführen, so dass die Belüftung des Belebungsbeckens weniger Energie benötigt. Des Weiteren ist das Belebungsbecken kleiner, was sich auf den Energiebedarf der Rührwerke auswirkt. Wird dann zusätzlich der Energiegewinn aus der Verstromung des Faulgases berücksichtigt, ergibt sich eine um 176 Wh/m³ (15,7 kWh/(E a)) bei 100.000 E bzw. 172 Wh/m³ (15,4 kWh/(E a)) bei 14.000 E günstigere Energiebilanz für die Variante mit Vorklärung und anaerober Schlammstabilisierung. Dies entspricht einer Energieeinsparung von 36 % bzw. 34 %.

7. CO₂-Bilanz

CO₂-Emissionen auf Kläranlagen ergeben sich aus dem Energieverbrauch und durch direkte Emissionen bei den biologischen Abbauprozessen. Das direkt emittierte CO₂ ist jedoch in der CO₂-Bilanz nicht zu berücksichtigen, da es organischem Material entstammt, welches keinen fossilen Ursprung hat und darum als klimaneutral betrachtet wird [KAMPSCHREUR ET AL., 2009]. Die CO₂-Emission einer Kläranlage resultiert zu großen Teilen aus deren Energieverbrauch, welcher mittels des CO₂-Ausstoßes des deutschen Strommixes von 0,575 kg CO₂/kWh [UMWELTBUNDESAMT, 2010] in CO₂-Äquivalente umgerechnet werden kann. Bezüglich des Energieverbrauchs weisen MBR gegenüber konventionellen Anlagen eine höhere CO₂-Emission entsprechend ihrem Energie-Mehrverbrauch auf.

Werden weitere Treibhausgase wie Methan und Lachgas mitbetrachtet und in CO₂-Äquivalente umgerechnet, macht der Stromverbrauch nur einen Anteil von etwa 22 % der Emissionen im Abwasserreinigungsprozess aus [BOLLE ET AL., 2011]. Die Auswirkungen auf das Klima sind für Methan 25-fach und für Lachgas 298-fach stärker als für CO₂.

Direkte Methanemissionen entstehen unter anaeroben Bedingungen. Daher ist es von Bedeutung, ob eine Anlage mit anaerober Faulung betrieben wird, und Methan aus offenen Eindickern, durch Klärgasverluste oder im unverbrannten Restgas bei der Verstromung in die Atmosphäre gelangen kann. Der Unterschied zu Anlagen ohne anaerobe Faulung wird zu $0,0015 \text{ kg CH}_4 / \text{kg CSB}_{\text{Zufluss}}$ angenommen [VROM, 2008]. Direkte Lachgasemissionen resultieren überwiegend aus der Stickstoffelimination. Dabei sind der Gehalt an Sauerstoff, der Nitritgehalt, das Verhältnis von CSB zu Stickstoff und das Schlammalter von besonderer Bedeutung. Hierbei wirken sich einige Betriebsbedingungen eines MBR tendenziell günstig aus, wie die hohe Sauerstoffverfügbarkeit durch die Modulbelüftung im Nitrifikationsbereich und das hohe Schlammalter. Andere Parameter, wie die erhöhte Gefahr der Sauerstoffverschleppung in den Denitrifikationsbereich, wirken sich eher negativ aus. Da dies nicht zu quantifizieren ist, wurden Lachgasemissionen in der abschließenden Bewertung nicht berücksichtigt.

Ausgehend von den in CO_2 -Äquivalente umgerechneten Energieverbräuchen der Modellanlage wurden der Anlagenkonfiguration mit Vorklärung und anaerober Schlammstabilisierung die eingesparten CO_2 -Äquivalente durch die Stromproduktion gutgeschrieben und jeweils die sich aus den Methanemissionen der Faulung ergebenden CO_2 -Äquivalente addiert. Hierdurch ergibt sich folgende Bilanz.

Tabelle 3: CO_2 -Bilanz für die Modellanlagen mit 100.000 E und 14.000 E

		100.000 E	14.000 E
Ohne VK und anaerobe Schlammstabilisierung			
	Energiebedarf t CO_2/a	2.490	375
Mit VK und anaerobe Schlammstabilisierung			
	Energiebedarf t CO_2/a	2.309	350
	Energiegewinn t CO_2/a	- 724	- 106
	Methan Betrieb Faulung t CO_2/a	+ 164	+ 23
	t CO_2/a	= 1.749	= 267
	Δ t CO_2/a	- 741	- 108

Auf Basis der CO_2 -Emissionen ist die Konfiguration mit Vorklärung und anaerober Schlammstabilisierung demnach ebenfalls vorzuziehen.

8. Kostenberechnungen und -vergleichsbetrachtungen

Für die Kostenschätzung und -vergleichsbetrachtungen wurden für die vier Varianten der Modellanlage die Investitionskosten, die Betriebskosten und die Jahreskosten nach LAWA (1994) ermittelt und gegenübergestellt.

Die Ermittlung der Investitionskosten erfolgte gemäß der Veröffentlichung von PINNEKAMP (2007) sowie anhand der Kostenfunktionen von GÜNTHERT UND REICHERTER (2001) und des ATV-Handbuchs [ATV, 1995]. Die Literaturwerte wurden anhand der Indizes des

Statistischen Bundesamtes [DESTATIS, 2011] an die heutigen Güter- und Erzeugerpreise angepasst. Zusammenfassend ergeben sich für die Modellanlagen die in Tabelle 4 aufgeführten Investitionskosten.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Investitionskosten

		20.000 E ohne VK/ Faulung	20.000 E mit VK/ Faulung	130.000 E ohne VK/ Faulung	130.000 E mit VK/ Faulung
Gesamtinvestitions- summe	Mio. EUR	11,78	12,60	38,64	41,47
Spezifische Investitionskosten	EUR/E	589	630	297	319

Das MUNLV/ISA (2003) hat in seiner Veröffentlichung zur Membrantechnik eine Bandbreite für einwohnerspezifische Investitionskosten zwischen 250 und 1.400 EUR/E angegeben. Die hier ermittelten Investitionskosten für die Modellanlagen liegen innerhalb dieses Bereiches.

Für die Ermittlung der Betriebskosten wurden die Kostenblöcke Personal, Betriebsmittel einschl. Energie, Wartung/ Reparatur/ Instandhaltung, Reststoffentsorgung und Sonstiges abgebildet. Die Personalkosten wurden anhand des angepassten Ansatzes des ATV-M 271 (1998) ermittelt. Für die Betriebsmittel wurden Ansätze nach PÖYRY (2009c) herangezogen, welche bei auf die Membranfläche bezogenen Kosten in Höhe von 1,08 und 1,63 EUR/(m²·a) liegen, und ein pauschaler Zuschlag für Fällungsmittel wurde hinzuaddiert. Die Energiekosten für die Modellanlagen wurden einheitlich mit 0,15 EUR/kWh in den Betriebskosten bewertet. Für die jährlichen Betriebskosten für Wartung/ Reparatur/ Instandhaltung wurde ein pauschaler Ansatz gewählt unter Berücksichtigung, dass Membranbelebungsanlagen erfahrungsgemäß etwa 30 % mehr Maschinen- und Elektrotechnik benötigen als konventionelle Belebungsanlagen. Für die Modellanlagen mit 20.000 E wurden 1 % der Investitionssumme, für die Modellanlagen mit 130.000 E 0,7 % der Investitionssumme als jährlicher Betriebskostenansatz für Wartung/ Reparatur/ Instandhaltung gewählt. Die Reststoffentsorgung wurde in die Fraktionen Sieb- und Rechengut, Sandfanggut und Klärschlamm unterteilt. Für die Entsorgungskostenermittlung wurden die Daten aus SCHNEIDER (2006), IMHOFF (1999) UND MUNLV/ISA (2006) herangezogen. Summiert ergeben sich daraus jährliche Betriebskosten, die in Tabelle 5 dargestellt sind.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Betriebskosten

		20.000 E	20.000 E	130.000 E	130.000 E
		ohne VK/ Faulung	mit VK/ Faulung	ohne VK/ Faulung	mit VK/ Faulung
Betriebskosten	EUR/a	572.000	525.000	2.320.000	2.028.000
Spezifische Betriebskosten	EUR/m ³	0,43	0,40	0,26	0,23

Mittels des Kapitalwiedergewinnungsfaktors nach LAWA (1994) wurden die Investitionskosten ebenfalls in Jahreskosten umgerechnet, so dass sich daraus ein Vergleich der Modellanlagen für die Varianten mit und ohne Vorklärung und Faulung ermitteln lässt (Tabelle 6).

Tabelle 6: Gesamtjahreskostenvergleich nach LAWA (1994) in EUR/a

20.000 E	20.000 E	130.000 E	130.000 E
ohne VK/ Faulung	mit VK/ Faulung	ohne VK/ Faulung	mit VK/ Faulung
1,45 Mio.	1,47 Mio.	5,19 Mio.	5,11 Mio.
$\Delta + 14.188 \text{ EUR/a}$		$\Delta - 81.776 \text{ EUR/a}$	

Anhand der ermittelten Jahreskosten ist für die Modellanlage der Größenordnung 20.000 E noch keinen wirtschaftlicher Vorteil für den Betrieb der Anlage mit Vorklärung und Faulung zu erkennen, aber bei der Anlage mit 130.000 E ergeben sich jährliche Kosteneinsparungen in Höhe von 80.000 EUR/a oder 1,6 % der Jahreskosten.

9. Entscheidungsmatrix als Planungshilfe

Die folgende vorläufige Entscheidungsmatrix zur Gegenüberstellung möglicher Energieverbrauchsdaten, Energieerträge und CO₂-Emissionen aus MBR bei verschiedenen Verfahrenskonfigurationen kann nach bisherigem Bearbeitungsstand aufgestellt werden (Tabelle 7).

Tabelle 7: Entscheidungsmatrix der Variantenuntersuchung am Beispiel der Modellanlagen

Parameter \ Anlagengröße		14.000 E	14.000 E	100.000 E	100.000 E
		ohne VK/ Faulung	mit VK/ Faulung	ohne VK/ Faulung	mit VK/ Faulung
Gesamtenergiebedarf	Wh/m ³	495	463	484	449
Gesamtenergiebedarf	kWh/(E·a)	47	44	43	40
davon aus Membranstufe	Wh/m ³	260	260	260	260
davon aus Belebung	Wh/m ³	189	133	179	120
davon aus Schlammbeh.	Wh/m ³	8	27	8	27
Energieertrag aus Faulung	Wh/m ³	-	141	-	141
Fremdenergiebezug	Wh/m ³	495	322	484	308
CO₂-Bilanz	t CO ₂ /a	375	267	2.490	1.749

Es ergeben sich sowohl aus energetischen als auch aus ökologischen Gesichtspunkten Vorteile für die Variante mit Vorklämung und anaerober Schlammstabilisierung. Ob eine solche Lösung auch aus wirtschaftlichen Aspekten vorzuziehen ist, bleibt vor allem bei kleineren Anlagen eine Einzelfallentscheidung.

10. Ausblick

In einer zweiten 18-monatigen Projektphase soll der Fragestellung nachgegangen werden, welche Betriebseinstellungen zu möglichst hohen Gaserträgen der anaeroben Faulung bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung eines stabilen Filtrationsbetriebes mit guter Filtrierbarkeit des Schlammes und hoher hydraulischer Leistungsfähigkeit der Membranen führen. Auf der halbtechnischen Kläranlage des Landesumweltamtes NRW in Neuss sollen an einem MBR im Pilotmaßstab bei Variation der relevanten Betriebsparameter (Schlammbelastung, Schlammalter, Feststoffgehalt) und unter Implementierung einer Vorklämung die optimalen Randbedingungen zur Maximierung der Gasausbeute unter Berücksichtigung der Filtrationsleistung der Membranstufe ermittelt werden.

Die Arbeitsergebnisse der Variantenuntersuchungen sollen in eine Aktualisierung und Fortschreibung der Entscheidungsmatrix einfließen. Diese erlaubt eine schnelle Übersicht über mögliche Energieverbrauchsdaten und Energieerträge von Membranbelebungsanlagen mit anaerober Schlammstabilisierung.

11. Literaturverzeichnis

- ATV (1995): ATV-Handbuch Betriebstechnik, Kosten und Rechtsgrundlagen der Abwasserreinigung, 4. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, ISBN 3-433-00910-4
- ATV (1996): ATV-Handbuch Klärschlamm, 4. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, ISBN 3-433-00909-0
- ATV-M 271 (1998): Personalbedarf für den Betrieb kommunaler Kläranlagen. Merkblatt des ATV-DVWK Regelwerkes, ISBN 3-927729-52-3
- ATV-DVWK-M 363 (2002): Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen. Merkblatt des ATV-DVWK Regelwerkes, ISBN 3-936514-11-9
- ATV-DVWK-M 366 (2000): Maschinelle Schlammmentwässerung. Merkblatt des ATV-DVWK Regelwerkes, ISBN 3-933707-60-9
- BAUMANN, A., LOPP, M. (2008): Möglichkeiten zur Energieeinsparung in der Abwassertechnik. Im Tagungsband zur DWA – Landesverbandstagung, LV Nord-Ost, 30.05.2008 in Merseburg
- BOLLE, F.-W., GENZOWSKY, K. (2011): Treibhausgasemissionen bei der Abwasserreinigung. Acwa aktuell, Ausgabe 5, 01/2011, Herausgeber Acwa- Aachen Wasser
- BRUUS, J., NIELSEN, P., KEIDING, K. (1992): On the stability of activated sludge flocs with implications to dewatering. Water Research 26 (12) pp. 1597-1604
- CICEK, N., FRANCO, J.P., SUIDAN, M.T., URBAIN, V., MANEM, J. (1999): Characterization and comparison of a membrane bioreactor and a conventional activated-sludge system in the treatment of wastewater containing high-molecular-weight compounds. Water Environ. Res. 71 (1999) 64–70
- DESTATIS (2011): Internetseite des statistischen Bundesamtes am 13.04.2011 <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Navigation/Statistiken/Preise/>
- DICHTL, N., KOPP, J. (1999): Entwässerungsverhalten von Klärschlämmen aus Anlagen mit Membranfiltration, WAP Wasser Abwasser Praxis 01-1999, S. 35-38
- DICHTL, N., KOPP, J. (2001): Kennwerte zur Entwässerbarkeit von Klärschlämmen. 34. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, GWA 184. Hrsg. M. Dohmann
- GÜNTHERT, F.W., REICHERTER, E. (2001): Investitionskosten der Abwasserentsorgung, Oldenbourg Industrieverlag München, ISBN 3-486-26507-5
- HABERKERN, B., Maier, W., Schneider, U. (2008): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Text 11/08, Umweltbundesamt (Hrsg.), ISSN 1862-4804, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3347.pdf>
- IMHOFF, K., KLAUS R. (1999): Taschenbuch der Stadtentwässerung. 29. Auflage, Oldenbourg Verlag München Wien
- ITOKAWA, H., THIEMIG, C., PINNEKAMP, J. (2008): Design and operating experiences of municipal MBRs in Europe. Water Science and Technology, 58 (12) 2319 -2327

- ITONAGA, T., KIMURA, K., WATANABE, Y. (2004): Influence of suspension viscosity and colloidal particles on permeability of membrane used in membrane bioreactor (MBR); Water Science and Technology Vol 50 No 12 pp 301–309, 2004
- KAMPSCHREUR, M.J., TEMMINK, H., KLEEREBEZEM R., JETTEN, M. S.M, VAN LOOSDRECHT M. C.M. (2009): Nitrous oxide emission during wastewater treatment, Water Research 43 (2009), p.p. 4093 – 4103
- KOPP, J. (2009): Theoretische Grundlagen zur Entwässerbarkeit von Schlämmen, Fachtagung der VSA-Kommission «ARA» vom 13. März 2009
- KRAUSE, S. (2005): Untersuchungen zum Energiebedarf von Membranbelebungsanlagen; Dissertation am Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt; ISBN-Nr.: 3-932518-62-4
- LAWA (1994): Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen; Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.), 5. Auflage
- LE-CLECH, P., CHEN, V., FANE, T. A.G. (2006): Fouling in membrane bioreactors used in wastewater Treatment. Journal of Membrane Science 284 (2006) pp. 17–53
- LESJEAN, B., FERRE, V., VONGHIA, E., MOESLANG, H. (2009): Market and design considerations of the 37 larger MBR plants in Europe. Desalination and water treatment, 6, pp.227-233
- MELIN, T., DOTT, W., PINNEKAMP, J., LINDNER, W. (2007): Strategien zur Foulingkontrolle bei Membranbelebungsanlagen in der kommunalen Abwasserreinigung. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV)
- MUNLV/ ISA (2003): Membrantechnik für die Abwasserreinigung. (Hrsg.) Ministerium für Umwelt- und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp und Dr. rer. nat. H. Friedrich
- MUNLV/ ISA (2006): Klärschlamm Entsorgung: Eine Bestandsaufnahme. (Hrsg.): Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen und Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp
- MURL (1999): Energie in Kläranlagen- Handbuch, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen
- PINNEKAMP, J. (2011): Prozessoptimierung von Membranbelebungsanlagen (ProM), Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, in Bearbeitung (bisher unveröffentlicht)
- PINNEKAMP, J. (2007): Optimierung der Gestaltung und des Betriebs von Membrananlagen in der kommunalen Abwasserreinigung – Obemeka; gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, Förderkennzeichen 02WA0596
- PÖRY (2009a): Ermittlung energetischer Beurteilungskriterien für Membrankläranlagen mit Hohlfasermodule und deren Verifizierung am Beispiel einer Großanlage, Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom

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

PÖYRY (2009b): Ermittlung energetischer Beurteilungskriterien für Membrankläranlagen mit Plattenmembranmodulen und deren Verifizierung an zwei Praxisbeispielen, Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

PÖYRY (2009c): Markterkundung im Rahmen des Variantenvergleich Zentrale Abwasserbehandlungsanlage Lippewerk, 2009

ROSENBERGER, S., EVENBLIJ, H., TE POELE, S., WINTGENS, T., LAABS, C. (2005): The importance of liquid phase analyses to understand fouling in membrane assisted activated sludge processes-six case studies of different European research groups. J. Membr. Sci. 263 (2005) 113–126

ROSENBERGER, S. (2003): Charakterisierung von belebtem Schlamm in Membranbelebungsreaktoren zur Abwasserreinigung. Dissertation am Institut für Verfahrenstechnik an der Technischen Universität Berlin, Fortschritts-Bericht VDI Reihe Nr. 796, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf

SCHNEIDER (2006): Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen, 17. Auflage, Werner Verlag (Hrsg.), 13.118 – 13.119 ISBN 978-3-8041-5228-1

UMWELTBUNDESAMT (2010): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2008 und erste Schätzung 2009. Berlin

VROM (2008): Op weg naar een klimaaneutrale waterketen. Studie im Auftrag des Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, ISBN 978.90.5773.411.3

WETT, M. (2005): Foulingverhalten des Membranbelebungsverfahrens und Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit. Wasser, Abwasser, Umwelt – Schriftenreihe des Fachgebiets Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kassel, ISBN: 3-89958-160-1