



Aktenzeichen IV-7-042 600 003 I

Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen - Phase II

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

Bietergemeinschaft

Bietergemeinschaft FiW/ RWTH/ Pöyry

Bevollmächtigter Vertreter



Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft (FiW) e.V. an der RWTH Aachen

Dr.-Ing. F.-W. Bolle

Kackertstr. 15-17

52056 Aachen

Tel.: 0241 / 80 26825

Fax: 0241 / 80 22825

Email: fiw@fiw.rwth-aachen.de

www.fiw.rwth-aachen.de

Bearbeiter

Dipl.-Ing. S. Gredigk-Hoffmann

gredigk@fiw.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bolle

bolle@fiw.rwth-aachen.de

Projektleitung



Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen

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

Mies-van-der-Rohe-Str. 1

52074 Aachen

Tel.: 0241 80 25207

Fax: 0241 80 22285

Email: isa@isa.rwth-aachen.de

www.isa.rwth-aachen.de

Bearbeiter

Dipl.-Ing. D. Bastian

bastian@isa.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. L. Palmowski

palmowski@isa.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. J. Werning

werning@isa.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. K. Krebber

Projektpartner



Pöyry Deutschland GmbH

Lazarettstr. 15

45127 Essen

Tel.: 0201 82054 - 36

Fax: 0201 82054 - 22

Bearbeiter

Dipl.-Ing. C. Simsheuser

caroline.simsheuser@poyry.com

Dr. M. Krüger

matthias.krueger@poyry.com

Dipl.-Ing. S. Eckers

sabrina.eckers@poyry.com

Zitiervorschlag:

PINNEKAMP, J.; BASTIAN, D.; SIMSHEUSER, C.; PALMOWSKI, L.; KRÜGER, M.; GREDIGK-HOFFMANN, S., BOLLE, F.-W. (2015): Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen – Phase 2. Kurzbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielsetzung	1
2	Energieeinsparung bei Planung und Betrieb von MBR.....	2
3	Untersuchungsprogramm und Versuchsaufbau	4
4	Faulgasertrag und Schlammproduktion.....	5
5	Reinigungsleistung.....	7
6	Schlammfiltrierbarkeit und Membranfouling	8
7	Entwässerungseigenschaften des Schlammes	10
8	Energiebilanz	10
9	Kostenberechnungen und -vergleichsbetrachtungen.....	12
10	CO ₂ -Bilanz	14
11	Entscheidungsmatrix als Planungshilfe.....	15
12	Ausblick.....	17
	Literaturverzeichnis	18

1 Veranlassung und Zielsetzung

Membranbioreaktoren (MBR) bieten in der kommunalen Abwasserreinigung gegenüber dem konventionellen Belebtschlammverfahren Vorteile aufgrund besserer Ablaufwerte für gängige Abwasserparameter und einem weitgehend keimfreien Ablauf. Aufgrund der energieintensiven Cross-Flow-Belüftung zur Deckschichtkontrolle, welche aktuell 50 % des Energiebedarfs kommunaler MBR ausmacht, ist der Gesamtenergiebedarf von MBR im Vergleich zum konventionellen Belebtschlammverfahren deutlich erhöht und liegt in NRW zwischen 49 kWh/(E·a) und 208 kWh/(E·a). Dies entspricht 0,73 kWh/m³ bis 1,83 kWh/m³. Die Grundlage für diese Zahlen bilden dabei sieben von PINNEKAMP ET AL. (2011A) untersuchte MBR.

PINNEKAMP ET AL. (2011A) und KREBBER (2013) konnten zeigen, dass bei angepasster Betriebsführung und Durchführung gezielter Optimierungsmaßnahmen ein hohes Einsparpotential vorliegt. So ließen sich allein durch die Anpassung der Cross-Flow-Belüftung 0,18 kWh/m³ einsparen. Durch die Realisierung des Sauerstoffeintrags mit feinblasiger Belüftung konnte zusätzlich 0,12 kWh/m³ eingespart werden. Weitere Optimierungsmaßnahmen sind in den Quellen zu finden. Insgesamt berechnete KREBBER (2013) bei der Auslegung einer 12.000 E Modellanlage, unter Berücksichtigung der Energieeinsparpotentiale, einen Energiebedarf von 0,64 kWh/m³ bzw. 40,7 kWh/(E·a) für Membrananlagen mit Plattenmodulen. Dies liegt im Bereich der Energieverbrauchswerte von konventionellen Kläranlagen der Größenklasse (GK) 3 mit 40 kWh/(E a) und etwa 15 % oberhalb der 35 kWh/(E·a) für GK 4 (HABERKERN ET AL., 2008).

Der Fokus dieser Forschungsarbeit liegt auf der kosteneffizienten Bereitstellung der benötigten Energie durch die Nutzung des im Klärschlamm enthaltenen Energiepotentials. Die Umstellung des Membranbelebungsverfahrens auf eine anaerob stabilisierende Fahrweise mit Vorklärung (VK) wurde im Abschlussbericht zu „Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen - Phase 1“ (EnReMem) durch PINNEKAMP ET AL. (2011B) anhand zweier Modellanlagen mit 14.000 E und 100.000 E Anschlussgröße bereits theoretisch betrachtet. Die Berechnungen des Energieertrags stützen sich dabei auf Literaturwerte aus großtechnischen Faulbehältern an konventionellen Kläranlagen, da keine verwertbaren Ergebnisse für Schlämme aus MBR vorlagen.

Die wesentlichen Ziele der Untersuchungen in Phase 2 waren die Ermittlung von Gasausbeuten aus MBR-Schlämmen im Pilotmaßstab bei Variation der relevanten Betriebsparameter und Implementierung einer Vorklärung unter Berücksichtigung der Filtrationsleistung. Die Ergebnisse der halbtechnischen Untersuchungen flossen in die in Phase 1 aufgestellte Planungshilfe in Form einer Entscheidungsmatrix ein, die unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und ökologischer Gesichtspunkte bei der zukünftigen Planung kommunaler MBR Verwendung finden kann. Es wurde erwartet, dass sich mit sinkendem Schlammalter der Anteil an nicht stabilisierter organischer Trockenmasse erhöht, welche im Überschussschlamm verbleibt und somit in der anaeroben Stabilisierungsstufe zu Biogas umgesetzt werden kann.

2 Energieeinsparung bei Planung und Betrieb von MBR

Im Rahmen der halbertechnischen Versuche konnten keine gesicherten Daten zur möglichen Energieeinsparung durch den optimierten Betrieb eines MBR gewonnen werden. Aus diesem Grund werden hier die Ergebnisse des Projektes „Prozessoptimierung bei Membranbelebungsanlagen“ (PINNEKAMP ET AL., 2011A), in dessen Verlauf mehrere großtechnische MBR auf ihr energetisches Optimierungspotential hin untersucht wurden, nach MALMS ET AL. (2014) kurz dargestellt.

In der Planung (siehe Tabelle 1) sind demnach hauptsächlich Anpassungen im Anlagenzufluss (Trennsystem, Fremdwasserminimierung) vorteilhaft, um den Gesamtenergiebedarf zu senken. Dies hat den Hintergrund, dass die Membranfläche auf den maximalen Fluss ausgelegt wird und sich innerhalb des Projektes zeigte, dass ein Betrieb bei geringerer genutzter Membranfläche, aber höherem Fluss energetische Vorteile bietet (siehe Tabelle 2). Zudem spiegelt sich die Auslegung auf einen geringeren Abwasserzufluss positiv in den Investitionskosten wider.

Tabelle 1: Empfehlungen zur Energieoptimierung bei der Planung von MBR (vgl. MALMS ET AL., 2014)

Planung	Allgemeine Planung
	<ul style="list-style-type: none"> • Bei der Planung sollte die Möglichkeit vorgesehen werden, Prozessparameter flexibel einzustellen. Dies ermöglicht die Anpassung an sich ändernde Randbedingungen und vereinfacht die Berücksichtigung neuer Erkenntnisse. • Eine eindeutige Empfehlung für eine integrierte Anordnung der Membranen in den Nitrifikationsbereich der Belebungsbecken oder in separaten Membrankammern konnte nicht gegeben werden. Bei Umbau bestehender Anlagen und Nutzung vorhandener Becken sind oftmals separate Membrankammern die einzige realisierbare Lösung. Im Einzelfall muss entschieden werden, ob die betrieblichen Vorteile die energetischen Nachteile einer separaten Anordnung überwiegen. • Aufgrund der Auslegung der Membranen auf den maximalen Anlagenzufluss sollte dieser nach Möglichkeit reduziert werden. MBR bieten sich demnach vor allem im Trennsystem an. Im Rahmen eines wasserwirtschaftlichen Gesamtkonzeptes ist es u.U. sinnvoll, das Kanalnetz zu sanieren, um unnötige Fremdwasserzuflüsse zu reduzieren sowie eine gezielte Bewirtschaftung zur Aktivierung von Puffervolumen zu betreiben. • Der spezifische Stromverbrauch nimmt mit steigender hydraulischer Anlagenlast ab. Diese ist jedoch bei den untersuchten MBR mit im Mittel 14 % bis 35 % eher gering. Somit ist eine Betriebsführung, die die Menge des Anlagenzulaufs berücksichtigt, energetisch sinnvoll. Es sollte daher eine Anpassung des Filtrationsgeschehens an den Anlagenzufluss zum optimalen Einsatz energieintensiver Aggregate stattfinden. Korrelieren die Laufzeiten der Aggregate mit der hydraulischen Auslastung der Anlage, ist dies ein Hinweis auf energieorientierte Betriebsweise.

Tabelle 2: Empfehlungen zur Energieoptimierung beim Betrieb von MBR (vgl. MALMS ET AL., 2014)

Betrieb	Fluss
	<ul style="list-style-type: none"> • Der Betrieb eines MBR mit möglichst hohem Fluss (bis zum vom Modultyp abhängigen Bemessungsfluss) ist aus energetischer Sicht vorteilhaft, da die energieintensive Membranbelüftung optimal ausgenutzt wird. Die ermittelten mittleren Nettoflüsse liegen bei den untersuchten MBR zwischen 11,3 und 30,4 l/(m²·h), so dass auf einigen Anlagen eine Steigerung des Flusses möglich ist.
	Belüftung
	<ul style="list-style-type: none"> • Die grobblasige Membranbelüftung sollte in keinem Fall zum primären Zweck des Sauerstoffeintrags aktiviert werden, sondern ausschließlich zur Begrenzung der Deckschicht während der Filtration. • Die Begrenzung der Zwangsbelüftung auf das minimal erforderliche Maß wird empfohlen. Hierzu sollte(n) die aktive(n) Membrankammer(n) oft, möglichst nach jedem Filtrationsintervall, gewechselt werden. • Die Intensität der Membranbelüftung ist zu prüfen, um eine Überbelüftung zu verhindern und ggfs. durch Frequenzumformung den Erfordernissen anzupassen.
	Filtration
<ul style="list-style-type: none"> • Die Anzahl der filtrierenden Module soll an den Zufluss angepasst werden. • Um den aus energetischer Sicht nicht sinnvollen Abbruch eines Filtrationszyklus zu vermeiden, sollte vor Filtrationsbeginn genügend Abwasser für einen vollständigen Filtrationszyklus gespeichert werden. • Wenn Gravity Flow von den topographischen Gegebenheiten her möglich ist, sollte dieser eingesetzt werden. 	
Allgemeiner Betrieb	
<ul style="list-style-type: none"> • Der externe Rezirkulationsstrom sollte aus energetischer Sicht auf ein sinnvolles Maß begrenzt und möglichst an den Anlagenzufluss angepasst werden. • Bei der Betriebsteuerung ist zu berücksichtigen, dass meist der Vollastbetrieb eines Aggregates energetisch sinnvoller ist als ein Teillastbetrieb mehrerer. Wenn die Möglichkeit besteht, sollten FU-geregelte Aggregate hochgeschaltet werden, anstatt ein weiteres gedrosseltes Aggregat hinzuzuziehen. • Rührwerke sollten an den tatsächlichen Bedarf an Umwälzung und Durchmischung angepasst werden. • Energetisch sinnvoll ist es, den TS-Gehalt unter Rücksicht auf die Reinigungsleistung zu senken und eventuell an eine Jahresganglinie der Temperatur anzupassen. • Zur Senkung des Sauerstoffsbedarfs kann bei einigen Anlagen das Schlammalter (von z.T. über 100 d) gesenkt werden. Zur Wahl des Schlammalters sollten unter Berücksichtigung des Erhalts guter Filtrationsfähigkeit die Anforderungen an den Stabilisierungsgrad durch einzelfallspezifische Schlammensorgungskonzepte definiert werden. • Relaxationsphasen können unter Berücksichtigung der kompletten Reinigungsstrategie anstelle von Rückspülungen in das Konzept des Filtrationsbetriebs implementiert werden. • Wenn Temperatur und Schlammeneigenschaften günstige Bedingungen für die Filtration zulassen, sollte hierauf reagiert werden und höhere Flüsse, geringere Belüftung oder die Relaxation statt Rückspülung umgesetzt werden. 	

3 Untersuchungsprogramm und Versuchsaufbau

Die Untersuchungen fanden im zweistraßigen Betrieb einer MBR-Versuchsstraße (MBR mit Vorklärung) und einer MBR-Referenzstraße (MBR ohne Vorklärung) statt. In der MBR-Referenzstraße wurden übliche Betriebsparameter bezüglich Schlammalter (25 Tage), Schlammbelastung ($0,04 \text{ kg BSB}_5/(\text{kg TS}\cdot\text{d})$) und TR (10-12 g/l) eingestellt und über vier Versuchsreihen beibehalten. In der Versuchsstraße fand eine Variation des Schlammalters statt. Die Versuche gliederten sich in die folgenden Unterziele:

- Ermittlung der Gasausbeuten von Primärschlämmen (PS) und Überschussschlämmen (ÜSS) unter verschiedenen Schlammaltern (15 und 25 Tage) eines halbtechnischen MBR mit Vorklärung
- Überwachung der Schlammeigenschaften und der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Membranstufe
- Überwachung der Reinigungsleistung des MBR, bzw. der Kombination MBR + Vorklärung
- Bestimmung der Entwässerungseigenschaften vor und nach anaerober Stabilisierung der Schlämme

Der Versuchsaufbau der halbtechnischen Straßen ist in Bild 1 dargestellt.

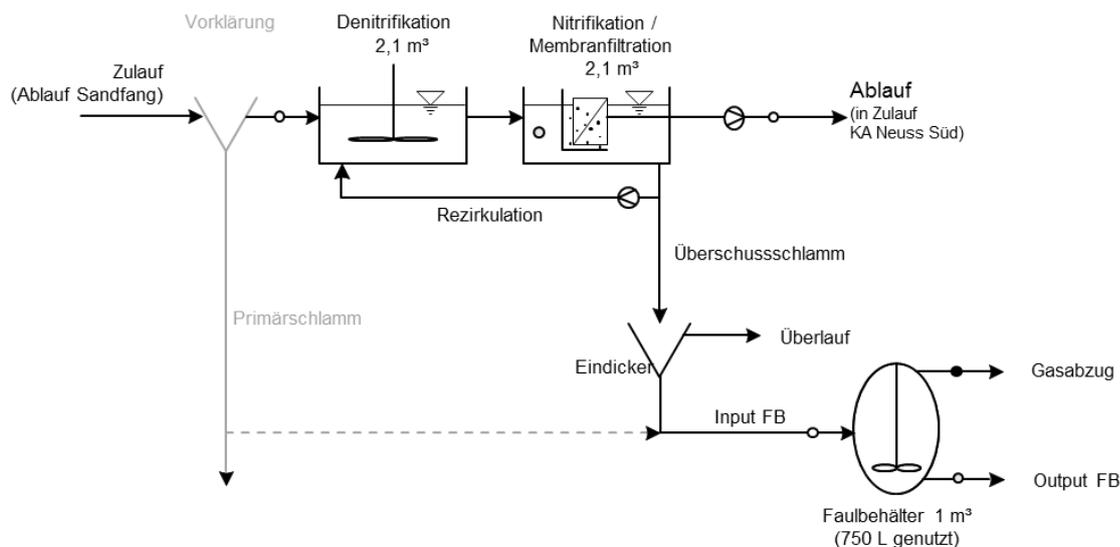


Bild 1: Aufbau der halbtechnischen Straßen bestehend aus MBR (+VK) und Schlammfäulung

Beide Straßen wurden mit kommunalem Abwasser aus dem Ablauf des Sandfangs der Kläranlage Neuss-Süd beschickt. Der Referenzstraße war ein gerührter Pegelbehälter vorgeschaltet, so dass sich keine Abwasserinhaltsstoffe absetzen konnten. Bei der MBR-Versuchsstraße wurde der Pegelbehälter nicht gerührt und fungierte als Vorklärung. Beide MBR-Straßen sind mit vorgeschalteter Denitrifikation ausgelegt. Die Membranmodule befinden sich in den Nitrifikationsbecken. Versuchs- und Referenzstraße wurden auf vorhandene Beckenvolumina hin bemessen. Die Schlammfäulung wurde mit einem repräsentativen Teilstrom des anfallenden Schlammes betrieben. In Tabelle 3 ist das Untersuchungsprogramm der einzelnen Versuchsreihen dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht über das Untersuchungsprogramm der Versuchsreihen (VR)

VR	Dauer	Straße	Schlammalter [d]	Vorklärung	Faulung
1	4 Monate (08/13 – 12/13)	Versuch	25	ja	ÜSS
		Referenz	25	nein	ÜSS
2	4 Monate (01/14 – 05/14)	Versuch	15	ja	ÜSS
		Referenz	25	nein	ÜSS
3	4 Monate (06/14 – 09/14)	Versuch	25	ja	PS + ÜSS
		Referenz	25	nein	ÜSS
4	4 Monate (10/14 – 02/15)	Versuch	15	ja	PS + ÜSS
		Referenz	25	nein	ÜSS

In den Versuchsreihen 1 und 2 wurde in der Versuchsstraße kein Primärschlamm mitgefaut, um die Auswirkung des geringeren Stabilisierungsgrades auf die erreichbare Faulgasproduktion des Überschussschlammes zu quantifizieren. Zusätzlich konnte so in den nachfolgenden Versuchsreihen 3 und 4 aus dem Mischungsverhältnis von PS/ÜSS im Input der Faulung – unter Annahme gleichbleibender spezifischer Gaserträge der Überschussschlämme – der spezifische Gasertrag des Primärschlammes rechnerisch bestimmt werden. Eventuelle positive Effekte aus der gemeinsamen Faulung von PS und ÜSS wurden dabei dem Primärschlamm hinzugerechnet, da diese nicht einzeln quantifizierbar waren.

4 Faulgasertrag und Schlammproduktion

Der Faulgasertrag ist abhängig von den erzielbaren Massenströmen an organischer Trockensubstanz und dem Verhältnis an Primär- und Überschussschlamm, da ersterer deutlich stärker zur Gasproduktion beiträgt. Durch die Einstellung eines niedrigen Schlammalters im Belebungsbecken kann zudem der Gasertrag aus dem Überschussschlamm gesteigert werden. Der spezifische Gasertrag des ÜSS erhöht sich bei geringerem Stabilisierungsgrad und die Schlammproduktion steigt aufgrund der erhöhten Schlammbelastung an. In den ersten beiden Versuchsreihen konnten verlässliche Daten zum mittleren spezifischen Gasertrag des Überschussschlammes aus der Versuchsstraße gewonnen werden. Dabei lag dieser für 25 Tage Schlammalter bei 264 l/kg oTR_{zugeführt} und für 15 Tage bei 310 l/kg oTR_{zu}. Durch die Senkung des Schlammalters konnte also eine deutliche Steigerung des Gasertrags aus dem ÜSS erreicht werden. In zwei weiteren Versuchsreihen wurde der Gasertrag bei gemeinsamer Faulung des Primär- und Überschussschlammes ermittelt. Hier wurde der Gasertrag aus Primärschlamm zu 599 l/kg oTR_{zu} errechnet, indem die Annahme getroffen wurde, dass sich die spezifischen Gaserträge aus ÜSS wie in den vorangegangenen Versuchsreihen verhalten. Für die Referenzstraße konnte der spezifische Gasertrag des ÜSS zu 290 – 330 l/kg oTR_{zu} bestimmt werden. Dieser lag im Bereich der Literaturwerte für aerob stabilisierende Anlagen ohne Vorklärung (MURL, 1999). Der, im Vergleich zu den Werten für ÜSS aus der

Versuchsstraße bei 25 Tagen Schlammalter, hohe Wert kann durch die nicht erfolgte Abtrennung des energiereichen Primärschlammes in einer Vorklärung erklärt werden.

Nachfolgend wird ein Blick auf die mittlere Gas- und Schlammproduktion innerhalb der Versuchsreihen geworfen. Um Schwankungen im Zulaufvolumenstrom zwischen den Versuchsreihen auszugleichen, sind in Bild 2 die Ergebnisse der Gas- (links) und Schlammproduktion (rechts) je m³ behandeltem Abwasser angegeben.

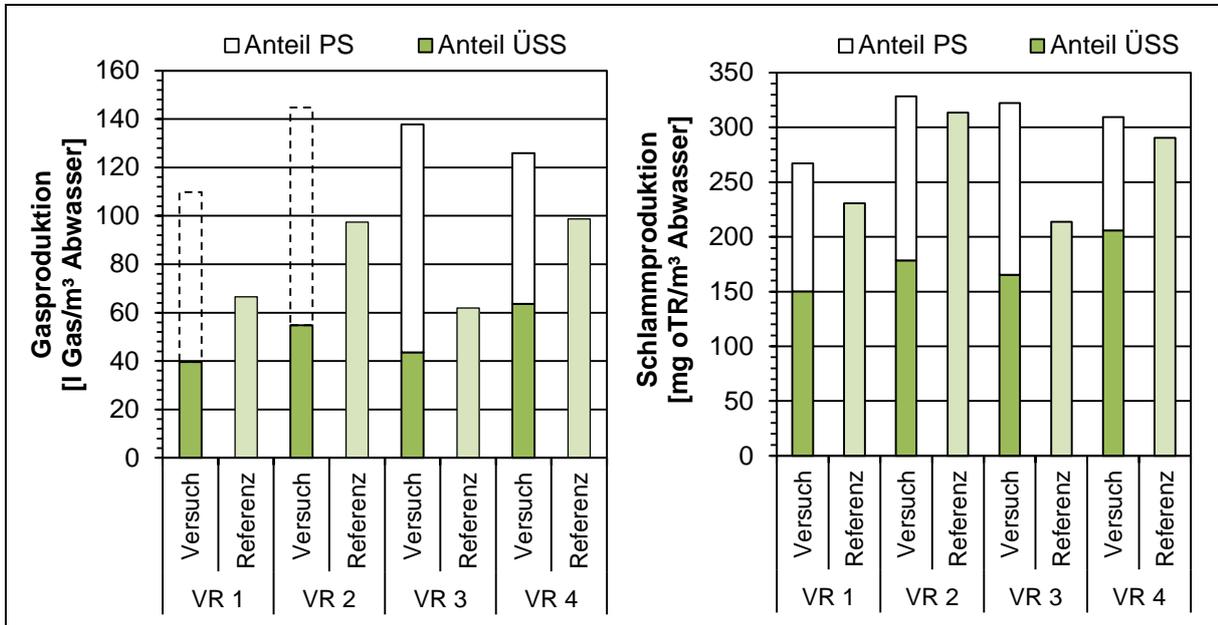


Bild 2: Mittelwerte für Gas- und Schlammproduktion je Versuchsreihe für PS und ÜSS pro kg CSB im Zulauf beider Straßen

Die Ergebnisse für die Überschussschlammproduktion der Referenzstraße wiesen innerhalb der Versuchsreihen eine Schwankungsbreite von 210-310 mg oTR/m³ behandeltem Abwasser auf. Für die Versuchsreihen 2 und 4, welche jeweils größtenteils im Winter lagen, konnte eine erhöhte Überschussschlammproduktion in der Referenzstraße beobachtet werden, welche bei niedrigen Temperaturen zu erwarten war. In der Versuchsstraße lag dieser Trend für den ÜSS nicht in diesem Ausmaß vor, war aber dennoch erkennbar. Gleichzeitig spielt hier auch die Absenkung des Schlammalters eine Rolle. Die Werte lagen hier zwischen 150-205 mg oTR/m³ behandeltem Abwasser. Die mittlere Primärschlammproduktion schwankte in den Versuchsreihen 1 bis 3 zwischen 120-160 mg oTR/m³ Abwasser. Aufgrund eines erhöhten Zulaufvolumenstroms in Versuchsreihe 4 lag hier eine schlechtere Abtrennung in der Vorklärung vor. Nähere Informationen hierzu können dem ausführlichen Bericht zum Forschungsvorhaben entnommen werden (PINNEKAMP ET AL., 2015).

Die Temperaturabhängigkeit der ÜSS-Produktion in der Referenzstraße zeigte sich ebenfalls eindeutig in der Gasproduktion. Hier lagen die Mittelwerte je nach Versuchsreihe zwischen 60 bis 100 l Gas/m³ Abwasser. Für die Gasproduktion der Versuchsstraße wurden die Ergebnisse für ÜSS und PS getrennt angegeben. In Versuchsreihe 1 und 2 wurde kein PS mitgefäult (vgl. Tabelle 3). Dieser wurde somit in der Grafik nur rechnerisch berücksichtigt (gestrichelt dargestellt). Der Unterschied in der Gasproduktion des ÜSS

ergab sich hier neben dem leicht erhöhten Schlammstrom vor allem aufgrund des unterschiedlichen Stabilisierungsgrades in den einzelnen Versuchsreihen und der damit veränderten spezifischen Gasproduktion.

5 Reinigungsleistung

In Tabelle 4 sind die Ablaufwerte aus den einzelnen Versuchsreihen gegenübergestellt.

Tabelle 4: Zusammenstellung der Ablaufwerte (Mediane + 85-Perzentile) und erreichten mittleren Reduktionen in allen Versuchsreihen für Referenz- und Versuchsstraße

Versuchsreihe	Parameter	Referenzstraße			Versuchsstraße		
		Ablauf		mittlere Reduktion	Ablauf		mittlere Reduktion
		Median	85-Perz.		Median	85-Perz.	
		mg/l	mg/l	%	mg/l	mg/l	%
1	CSB	36,20	53,90	94,5	34,70	58,90	95,1
	BSB ₅	4,00	14,60	98,1	4,00	16,80	98,6
	NH ₄ -N	0,08	1,30	99,9	0,09	0,18	99,8
	NO ₃ -N	9,45	12,15		10,30	13,20	
	NO ₂ -N	0,11	0,27		0,12	0,31	
2	CSB	30,40	36,14	96,2	28,85	37,19	96,4
	BSB ₅	3,00	3,00	99,1	3,00	3,00	99,1
	NH ₄ -N	0,05	8,17	99,9	0,03	0,15	99,9
	NO ₃ -N	11,70	15,57		10,90	13,41	
	NO ₂ -N	0,09	0,26		0,09	0,72	
3	CSB	36,90	43,32	94,5	35,70	40,98	94,4
	BSB ₅	3,00	5,00	98,8	3,00	4,00	99,0
	NH ₄ -N	0,03	0,13	99,9	0,04	0,24	99,9
	NO ₃ -N	10,25	12,06		12,50	14,16	
	NO ₂ -N	0,03	0,07		0,05	0,08	
4	CSB	30,45	35,44	95,8	32,60	36,62	95,9
	BSB ₅	3,00	3,00	98,9	3,00	3,00	98,9
	NH ₄ -N	0,48	2,10	98,8	0,05	1,21	99,8
	NO ₃ -N	4,20	11,40		11,44	13,53	
	NO ₂ -N	0,37	0,75		0,20	0,48	

Wie aus der Tabelle entnommen werden kann, lag keine Verschlechterung der Reinigungsleistung im Betrieb mit 15 d Schlammalter vor. Die Versuchsstraße konnte durchgängig gleichwertige oder leicht bessere Ablaufwerte im Vergleich zur Referenzstraße erreichen. Dies wird vor allem in Versuchsreihe 4 für die Ablaufwerte von Ammoniumstickstoff (NH₄-N) und Nitritstickstoff (NO₂-N) deutlich. Der hier niedrige Ablaufwert für NO₃-N in der Referenzstraße im Vergleich zur Versuchsstraße ist z. T. auf eine nicht ausreichende Nitrifikation zurückzuführen.

Die Vergleichmäßigung der Ablaufkonzentrationen von NH₄-N in der Versuchsstraße konnte auch in den Versuchsreihen 1 und 2 beobachtet werden. Eine mögliche Erklärung könnte die positive Auswirkung der Frachtreduktion an organischem Kohlenstoff im Zulauf

des MBR durch die Vorklärung und damit auch im Zulauf der Nitrifikation sein. Aufgrund der reduzierten Belastung besteht ein geringerer Sauerstoffbedarf zur Veratmung des organischen Kohlenstoffgehalts. Durch den gesenkten TR im Belebungsbecken der Versuchsstraße steigt zusätzlich der Sauerstoffeintrag durch die Belüftung (vgl. Zusammenhang TR und Grenzflächenfaktor α , z. B. in MOLDT, 2001). Beide Faktoren können sich positiv auf die Elimination der täglichen Spitzenfrachten an $\text{NH}_4\text{-N}$ auswirken. Eine getrennte Bilanzierung des Denitrifikations- und des Nitrifikationsbeckens hinsichtlich der Frachten an organischen Kohlenstoffverbindungen, N_{ges} , $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ könnte hier genaueren Aufschluss geben.

Es bleibt somit abschließend festzustellen, dass der Betrieb mit Vorklärung und gesenktem Schlammalter, und dabei auch gesenktem TR im Belebungsbecken, keine negativen Auswirkungen auf die Ablaufkonzentrationen der untersuchten Standardparameter hatte, sondern sich in gewissem Maße sogar positive Effekte einstellten.

6 Schlammfiltrierbarkeit und Membranfouling

Es konnte im Projekt gezeigt werden, dass das Vorschalten einer Vorklärung vor den MBR bei unverändertem Schlammalter keine signifikante Veränderung der Filtrationsleistung mit sich bringt. In Versuchsreihe 1 wurde für den Transmembrandruck (TMP) in der Referenzstraße ohne Vorklärung und den TMP in der Versuchsstraße ein ähnlicher Anstieg über die Zeit beobachtet. In Versuchsreihe 3 (Bild 3 oben) lag die Versuchsstraße über den gesamten Zeitraum ohne Zwischenreinigung bei einem niedrigeren TMP als die Referenzstraße, welche gereinigt werden musste. Der Betrieb eines MBR mit Vorklärung und einem Schlammalter von 25 Tagen ist also aus den Versuchsergebnissen als sicher einzustufen.

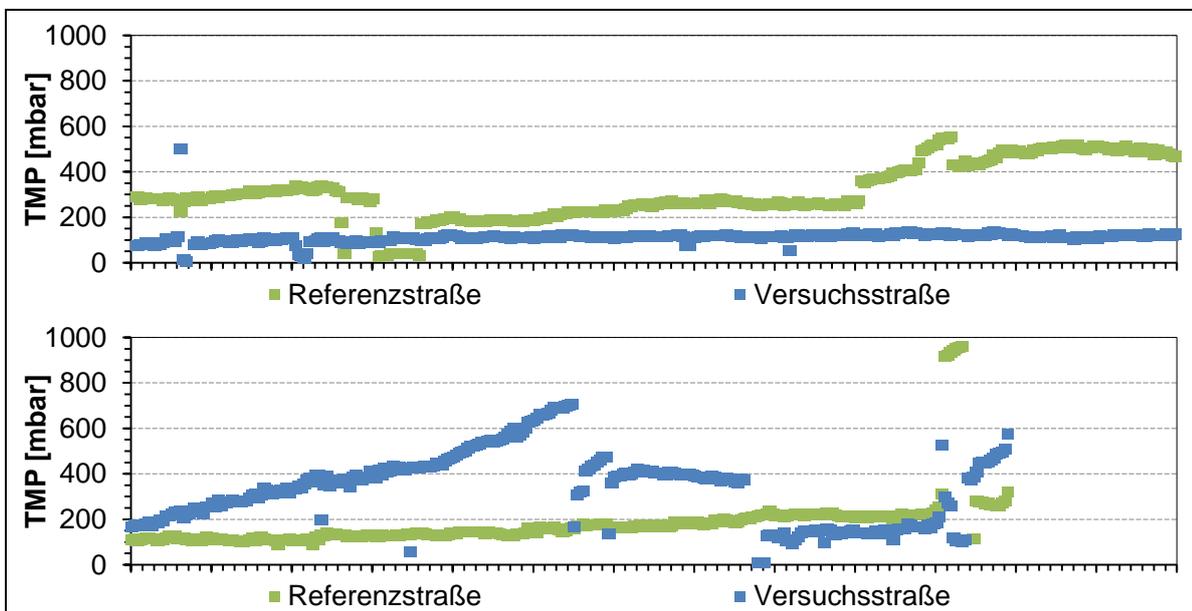


Bild 3: Transmembrandruck der Referenz und Versuchsstraße in Versuchsreihe 3 und 4

Beim Betrieb des MBR mit gesenktem Schlammalter von 15 Tagen in den Versuchsreihen 2 und 4 (Bild 3 unten) trat in der Versuchsstraße verstärkt Membranfouling auf. In Versuchsreihe 4 wurde dieses Fouling näher analysiert und konnte mit einem erhöhten

Gehalt an extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) in der Versuchsstraße in Verbindung gebracht werden, wie Bild 4 zeigt.

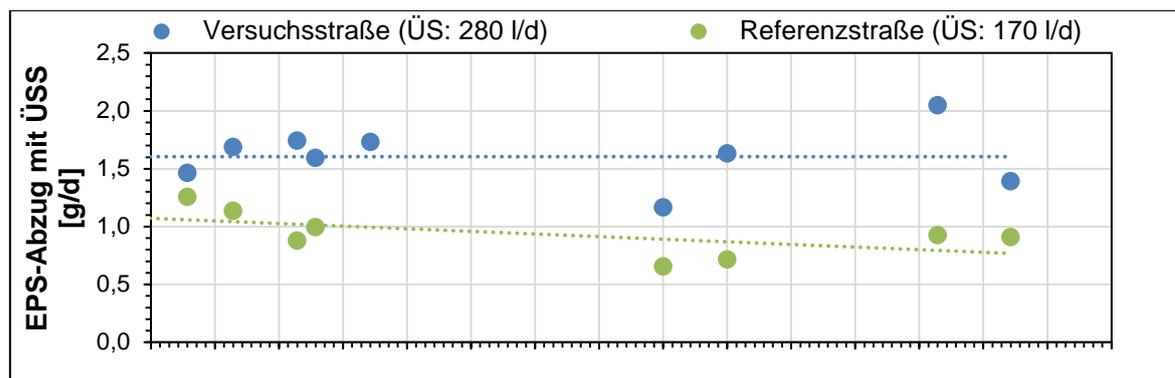


Bild 4: EPS im Überschussschlammabzug in Versuchsreihe 4 für beide Straßen

Der EPS-Massenstrom im Überschussschlammabzug lag für die Versuchsstraße deutlich oberhalb dem der Referenzstraße. Im Mittel wurden in der Versuchsstraße 72,1 % mehr EPS im Überschussschlamm abgezogen. Es ist anzunehmen, dass eine ähnliche EPS-Bildung in Versuchsreihe 2 auftrat. Der Umstand, dass beide Versuchsreihen im Winter lagen (Versuchsreihe 2 von 2013 auf 2014 und Versuchsreihe 4 von 2014 auf 2015) spielt für die insgesamt hohen EPS-Konzentrationen eine erhebliche Rolle, da der EPS-Gehalt bei sinkender Temperatur zunimmt (WANG ET AL., 2010). Der beobachtete zusätzliche Anstieg des EPS-Gehaltes in der Versuchsstraße ist dadurch jedoch nicht ausreichend zu erklären, da die Temperatur keinen vergleichbar starken Einfluss auf die EPS-Gehalte in der Referenzstraße ausübte. Aus der geänderten Biozönose im Belebungsbecken bei abgesenktem Schlammalter und niedrigen Temperaturen scheint eine erhöhte EPS-Bildung zu resultieren (vgl. auch MELIN ET AL., 2007).

Wie die Kapitel 5, 10 und 12 aufzeigen, ist bei der Installation einer Vorklärung die untersuchte Verfahrensvariante mit einem Schlammalter von 15 Tage – unter Vorbehalt einer verbesserten Foulingkontrolle – im Vergleich zur Variante mit 25 Tagen Schlammalter aufgrund des gesteigerten Gasertrags aus ÜSS energetisch sinnvoller. Deshalb müssen im Betrieb mit abgesenktem Schlammalter gezielt zusätzliche Maßnahmen zur Foulingbekämpfung getroffen werden.

Dabei bieten sich unter anderem folgende Maßnahmen an:

- Die Anpassung des Schlammalters und/oder des Permeatflusses im Belebungsbecken an jahreszeitliche Temperaturschwankungen kann höheren EPS-Gehalten im Winter entgegen wirken (WANG ET AL., 2010).
- Die Nutzung von Fällmitteln zur Phosphat-Fällung hat einen positiven Effekt auf die Foulingreduktion (z. B. AHN ET AL., 2006).
- Eine Dosierung von Pulveraktivkohle kann zu Verbesserungen der Schlammeigenschaften (ROTT ET AL., 2009; ZWICKENPFLUG ET AL., 2010) und zur Reduktion der gelösten EPS im Belebungsbecken (NG ET AL., 2010) führen. Zudem kann der Gasertrag und der Abbaugrad gesteigert werden (WERNING, 1994).

Diese Maßnahmen konnten aufgrund der Ausrichtung dieses Forschungsprojekts auf die Gewinnung verlässlicher Daten zum Gasertrag und der dazu benötigten, nahezu konstanten Bedingungen innerhalb der Versuchsreihen nicht umgesetzt und somit nicht überprüft und bewertet werden.

7 Entwässerungseigenschaften des Schlammes

Die Ergebnisse der Entwässerungsversuche mittels des Tests der kapillaren Fließzeit (CST) zeigten für die halbtechnischen Versuche ein entgegen der Laborversuche aus EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) konträres Bild. Es wurde durchgängig eine Verschlechterung der Entwässerbarkeit des gefaulten Schlammes festgestellt, welche eventuell auf eine nicht vollständige Stabilisierung innerhalb des halbtechnischen Faulbehälters bei 21 Tagen mittlere Aufenthaltszeit hindeutet. Im Laborversuch in Phase 1 wurden die Schlämme ebenfalls 21 Tage gefault. Allerdings wurde dort nicht werktäglich frischer Rohschlamm zugegeben, sondern eine Einzelprobe wurde vollständig ausgefault. Innerhalb großtechnischer Faulbehälter wird aufgrund der Bemessung auf das 85-Perzentil des Schlammanfalls im Mittel eine höhere mittlere Aufenthaltszeit erreicht, sodass dort durch den besseren Stabilisierungsgrad vermutlich eine Verbesserung der Entwässerbarkeit des ausgefaulten Schlammes zu erwarten ist. Diese Aussage sollte jedoch anhand weiterer Untersuchungen für MBR-Schlämme geprüft werden.

8 Energiebilanz

Im Abschlussbericht EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) wurde anhand von zwei aus Literaturwerten errechneten Modellanlagen unterschiedlicher Größe eine Energie- und Kostenbetrachtung für die Auslegung von Vorklärung und Faulung bei Membranbelebungsanlagen durchgeführt. In Phase 2 des Forschungsvorhabens erfolgt die Anpassung der Modellanlagen anhand der Erkenntnisse aus den beschriebenen halbtechnischen Versuchen auf der HtK Neuss des LANUV NRW.

Aufgrund der Einflüsse aus den angepassten Parametern der Versuchsanlage wurden die Modellanlagen neu berechnet. Aufbauend auf den neu berechneten Modellanlagen konnten nun weitergehende Bewertungskriterien (Energiekosten, CO₂) ermittelt werden.

Die gewonnenen Ergebnisse der Energiebilanz sind in nachfolgender Tabelle 5 dargestellt:

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Energiebilanz

			14.000 E		100.000 E	
			ÜS	ÜS+PS	ÜS	ÜS+PS
Versuchsreihe 1 ÜS, 25d	Energiebedarf	Wh/m ³	461,8		447,0	
	Gasproduktion	m ³ /d	80,6		645,8	
	Energieerzeugung	Wh/m ³	45,1		53,1	
	Anteil	%	10%		12%	
	Fremdbezug	Wh/m ³	416,7		393,8	
Versuchsreihe 2 ÜS, 15d	Energiebedarf	Wh/m ³	455,5		437,8	
	Gasproduktion	m ³ /d	94,4		755,6	
	Energieerzeugung	Wh/m ³	52,8		62,2	
	Anteil	%	12%		14%	
	Fremdbezug	Wh/m ³	402,7		375,7	
Versuchsreihe 3 ÜS+PS, 25d	Energiebedarf	Wh/m ³		467,5		453,0
	Gasproduktion	m ³ /d		283,1		2092,0
	Energieerzeugung	Wh/m ³		158,3		172,1
	Anteil	%		34%		38%
	Fremdbezug	Wh/m ³		309,2		280,82
Versuchsreihe 4 ÜS+PS, 15d	Energiebedarf	Wh/m ³		461,7		444,4
	Gasproduktion	m ³ /d		315,2		2346,5
	Energieerzeugung	Wh/m ³		176,3		193,1
	Anteil	%		38%		43%
	Fremdbezug	Wh/m ³		285,5		251,3

Als Ergebnis der Energiebilanz lässt sich festhalten, dass erwartungsgemäß durch die gemeinsame Faulung von Überschuss- und Primärschlamm bei einem Schlammalter von 15 Tagen die größte Menge an Energie erzeugt werden kann. Versuchsreihe 4 wird als energetisch günstigste Variante beurteilt. Insgesamt können unter den Versuchsbedingungen der vier Versuchsreihen in den Modellanlagen zwischen maximal 38 % (14.000 E) und 43 % (100.000 E) des Energiebedarfs durchs Eigenerzeugung gedeckt werden.

Analog zu der aufgestellten Arbeitsthese zeigt sich, dass auch die Faulung des reinen Überschussschlammes zur Deckung des Eigenenergiebedarfs beiträgt. Bilanziert man den Energiebedarf, der für die Faulung benötigt wird, bleibt dennoch ein Delta mit positiver Bilanz. Fault man zusätzlich den Primärschlamm, so erhöht sich das Delta aufgrund des hohen Anteils an leicht abbaubaren Substanzen im Primärschlamm.

Der Anteil des Eigenversorgungsgrades durch die verschiedenen Schlammalter unterscheidet sich bei beiden Anlagengrößen nur geringfügig. Die Differenz für beide Modellanlagen liegt bei 1-2 % (VR1 und VR2). Vergleicht man jedoch bei gleichem Schlammalter den geänderten Eigenversorgungsgrad bei unterschiedlichen Schlammzusammensetzungen, so ergibt sich eine deutlich höhere Differenz für beide Anlagengrößen zu Gunsten der Primärschlammfäulung. Diese liegt zwischen 24 % bei Modellanlage 1 (VR1 und VR3) und 29 % bei Modellanlage 2 (VR2 und VR4).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Unterschiede aufgrund der Variation des Schlammalters in den einzelnen Versuchsreihen (VR1 zu VR2 und VR3 zu VR4) wesentlich geringer ausfallen, als der Einfluss der Schlammzusammensetzung (VR1 zu VR3 und VR2 zu VR4). Der Unterschied basiert auf dem großen energetischen Einfluss des Primärschlammes, der den Gasertrag der Faulung im Vergleich zum reinen Überschussschlamm (VR1 und VR2) sichtbar steigert.

9 Kostenberechnungen und -vergleichsbetrachtungen

Für die Kostenberechnung und eine Vergleichsbetrachtung werden die Investitionskosten und Betriebskosten der Modellanlagen ermittelt und an die entsprechenden Versuchsergebnisse angepasst.

Durch die versuchsbedingte Erhöhung des Gasertrags und die daraus folgende Steigerung der eigenen Energieproduktion verringern sich die Kosten für den Zukauf der Fremdenergie. Es wird von einem konstanten Energiepreis von 0,15 EUR/kWh ausgegangen. Innerhalb der Betriebskosten wurden ebenfalls die Abweichungen aufgrund des unterschiedlichen Schlammalters berücksichtigt. Dieses wirkt sich beispielsweise auf die benötigte Belüftungsenergie innerhalb der Belebung aus. Die zusammengefassten Kosten aller Versuchsreihen für beide Modellanlagen sind in nachfolgender Tabelle 6 dargestellt:

Tabelle 6: Kostenzusammenstellung alle Versuchsreihen beider Modellanlagen

			14.000 E		100.000 E	
			ÜS	ÜS+PS	ÜS	ÜS+PS
	Jahreswassermenge	m ³ /a	1.315.825		8.942.500	
Versuchsreihe 1 ÜS, 25d	Investitionskosten als Jahreskosten	EUR/a	946.563		3.086.743	
	Betriebskosten OHNE Energiekosten	EUR/a	462.000		1.616.000	
	Kosten Energie Phase 2	EUR/a	82.246		528.287	
	Gesamt Betriebskosten	EUR/a	544.246		2.144.287	
	bez. auf Abwassermenge	Ct/m ³	41,36		23,98	
	Gesamtjahreskosten	EUR/a	1.490.809		5.231.030	
	spezifische Jahreskosten	EUR/m ³	1,13		0,58	
	Versuchsreihe 2 ÜS, 15d	Investitionskosten als Jahreskosten	EUR/a	928.073		3.023.253
Betriebskosten OHNE Energiekosten		EUR/a	460.000		1.610.000	
Kosten Energie Phase 2		EUR/a	79.477		503.898	
Gesamt Betriebskosten		EUR/a	539.477		2.113.898	
bez. auf Abwassermenge		Ct/m ³	41,00		23,64	
Gesamtjahreskosten		EUR/a	1.467.550		5.137.151	
spezifische Jahreskosten		EUR/m ³	1,12		0,57	
Versuchsreihe 3 ÜS+PS, 25d		Investitionskosten als Jahreskosten	EUR/a		946.563	
	Betriebskosten OHNE Energiekosten	EUR/a		462.000		1.616.000
	Kosten Energie Phase 2	EUR/a		61.030		376.687
	Gesamt Betriebskosten	EUR/a		523.030		1.992.687
	bez. auf Abwassermenge	Ct/m ³		39,75		22,28
	Gesamtjahreskosten	EUR/a		1.469.593		5.079.430
	spezifische Jahreskosten	EUR/m ³		1,12		0,57
	Versuchsreihe 4 ÜS+PS, 15d	Investitionskosten als Jahreskosten	EUR/a		928.073	
Betriebskosten OHNE Energiekosten		EUR/a		460.000		1.610.000
Kosten Energie Phase 2		EUR/a		56.341		337.061
Gesamt Betriebskosten		EUR/a		516.341		1.947.061
bez. auf Abwassermenge		Ct/m ³		39,24		21,77
Gesamtjahreskosten		EUR/a		1.444.413		4.970.314
spezifische Jahreskosten		EUR/m ³		1,10		0,56

Durch die gemeinsame anaerobe Stabilisierung des Primärschlammes und des Überschussschlammes (Versuchsreihen 3 und 4) kann eine deutlich höhere Gaserzeugung

erreicht werden. Dieses führt zu einer größeren Eigenproduktion an Energie und geringem Fremdbezug, was sich in den Kosten des Energiebezugs deutlich macht. Bereits bei der Energiebilanzierung konnte ermittelt werden, dass der Gewinn an Energie den zusätzlichen Verbrauch übersteigt.

Vergleicht man nun die spezifischen Jahreskosten beider Modellanlagen und aller Versuchsreihen, so lässt sich feststellen, dass für die Modellanlage 14.000 E die spezifischen Jahreskosten für die anaerobe Stabilisierung von Überschussschlamm etwa 1,13 EUR/m³ (VR1) betragen, für die Modellanlage (100.000 E) jedoch nur 0,58 EUR/m³ (VR1).

Für die Versuchsreihen mit anaerober Stabilisierung von Überschussschlamm und zusätzlichem Primärschlamm (VR 3 und VR4) können die spezifischen Jahreskosten für Modellanlage 1 (14.000 E) auf 1,12 EUR/m³ (VR3) bzw. 1,10 EUR/m³ (VR4) leicht verringert werden. Bei Modellanlage 2 (100.000 E) sind Jahreskosten von 0,57 EUR/m³ (VR3) bzw. 0,56 EUR/m³ (VR4) erreichbar.

Als Fazit der Energie- und Kostenbetrachtung lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die Versuchsreihe 4, in der sowohl der aus der Vorklärung abgezogene Primärschlamm, als auch der Überschussschlamm aus den Membranbioreaktoren bei einem Schlammalter von 15 Tagen die höchste Energieerzeugung und die geringsten Gesamtjahreskosten aufweist. Dies trifft für beide Modellanlagen gleichermaßen zu, lediglich die Höhe des positiven Einflusses unterscheidet sich proportional.

Einfluss des Strompreises auf die Wirtschaftlichkeit der Modellanlage

Ein ausschlaggebender Faktor, der die Wirtschaftlichkeit der Modellanlagen maßgeblich beeinflusst, ist der zu Grunde gelegte Strompreis. Bisher wurde für alle Berechnungen ein Strompreis von 0,15 EUR/kWh konstant angenommen. Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft die Kosten für Strom voraussichtlich weiterhin steigen werden. Um eine Aussage darüber treffen zu können, ab welcher Höhe des Strompreises die Modellanlage 14.000 E mit Vorklärung und Faulung wirtschaftlich wird, erfolgt nachfolgend eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Versuchsreihen 3 und 4 anhand variierender Strompreise.

Der Vergleich der Wirtschaftlichkeit des Strompreises bezieht sich im Folgenden auf die Modellanlage ohne VK/Faulung aus EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) und auf die Versuchsreihen der Modellanlage mit anaerober Stabilisierung von Überschussschlamm und Primärschlamm VR3 und VR4. Der Unterschied beider Versuchsreihen liegt im gewählten Schlammalter.

Bild 5 zeigt, dass bei einem spezifischen Strompreis von etwa 0,25 EUR/kWh der Punkt der Wirtschaftlichkeit für die Modellanlage 14.000 E (mit Vorklärung und Faulung und einem Schlammalter von 25 Tagen) gegenüber der Modellanlage ohne Vorklärung und Faulung erreicht wird. Bei dem zuvor genannten Energiepreis wird die Differenz aus den Gesamtjahreskosten der Modellanlagen negativ. Sollte der spezifische Strompreis theoretisch auf diesen Wert ansteigen, so wäre auch in der Modellbetrachtung eine kleine Anlage von 14.000 E mit Vorklärung und Faulung (VR3) wirtschaftlich. Bei einem

Schlammalter von 15 Tagen (VR4) ist die Wirtschaftlichkeit bereits bei einem aktuell vorhandenen Strompreis von 0,15 EUR/kWh erreicht.

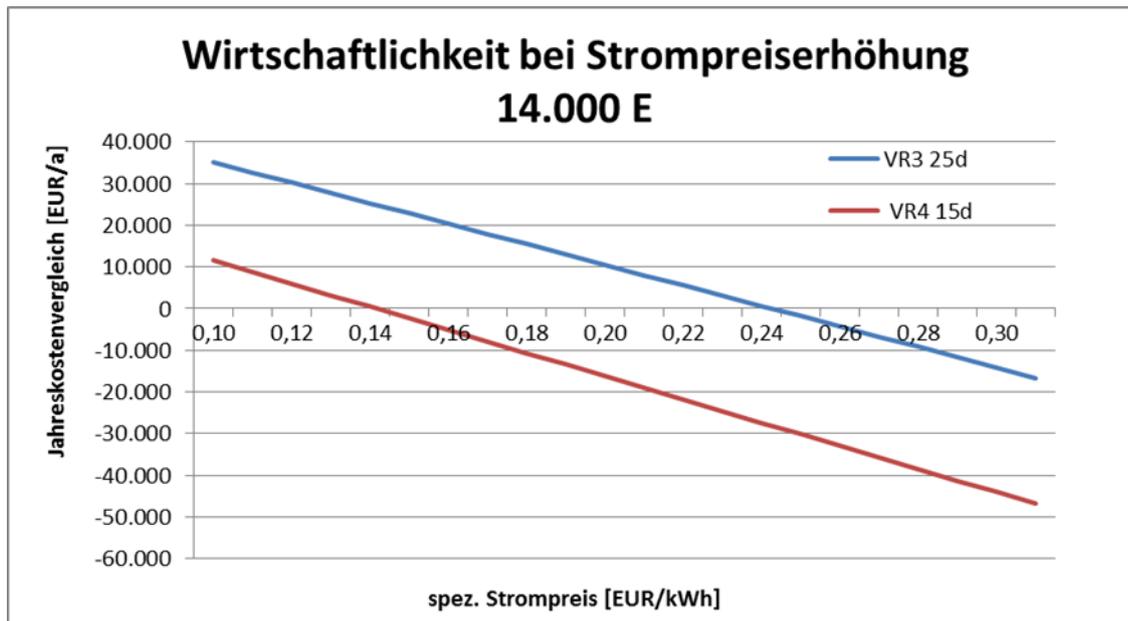


Bild 5: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über spez. Strompreis, 14.000 E

Es ist an dieser Stelle zu betonen, dass es sich bei der Betrachtung der Modellanlagen um theoretische Berechnungen handelt. Das hier dargestellte Modell ist nicht auf jede Kläranlage ähnlicher Baugröße 1:1 übertragbar. Es existieren viele unterschiedliche Einflussfaktoren, wie z.B. Abwasserzusammensetzung oder Förderhöhen, die die ermittelten Werte stark beeinflussen können. Die verwendeten Ergebnisse aus den halbtechnischen Versuchen mit unterschiedlichem Schlammalter haben wesentlichen Einfluss auf die erhaltenen Modellergebnisse. Um eine verlässliche Einschätzung für Anlagenbetreiber erstellen zu können, muss jede Anlage individuell bilanziert und überprüft werden.

10 CO₂-Bilanz

Der aus dem Strombedarf auf der Kläranlage resultierende CO₂-Ausstoß kann mittels des CO₂-Ausstoßes des in Deutschland verwendeten Strommixes berechnet werden. In EnReMem Phase 1 wurden hierfür 0,575 kg CO₂/kWh (UMWELTBUNDESAMT, 2010) angesetzt. Neuere Zahlen ergeben für den reinen Strominlandsverbrauch anhand von Hochrechnungen für 2012 einen Wert von 0,601 kg CO₂/kWh (UMWELTBUNDESAMT, 2013). Dieser Wert ist dem steigenden Anteil an fossilen Energieträgern in der deutschen Stromversorgung geschuldet. Für die Anpassung der Tabellen aus EnReMem Phase 1 wurde nachfolgend aufgrund der aktuellen Situation mit dem Wert von 0,601 kg CO₂/kWh gerechnet. Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der CO₂-Emissionen wurde im Bericht zu Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) erläutert, sodass an dieser Stelle darauf verwiesen wird. Der direkte Vergleich der beiden Betriebsweisen mit Vorklärung zur konventionell betriebenen aerob stabilisierenden Anlage zeigt ein deutliches CO₂-Einsparpotential für beide betrachteten Schlammalter (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: CO₂-Einsparung bei anaerober im Vergleich zur aeroben Stabilisierung

		14.000 E		100.000 E	
Ohne Vorklärung, mit aeroben Stabilisierung					
Schlammalter		t _{TS} ≥ 25 Tage		t _{TS} ≥ 25 Tage	
CO ₂ -Ausstoß durch Energiebedarf	t CO ₂ /a	391,6		2.602,4	
Mit Vorklärung und anaerober Stabilisierung					
Schlammalter		25 Tage	15 Tage	25 Tage	15 Tage
CO ₂ -Ausstoß durch Energiebedarf	t CO ₂ /a	369,7	365,1	2.431,8	2.383,6
CO ₂ -Äquival. durch Methanemissionen	t CO ₂ /a	23		164	
CO ₂ -Einsparung durch Energiegewinn	t CO ₂ /a	-125,2	-139,4	-915,8	-994,3
Summe (anaerobe Stabilisierung)	t CO ₂ /a	267,6	248,7	1.680,3	1.553,6
Vergleich					
CO ₂ -Einsparung absolut	t CO ₂ /a	-124,0	-142,9	-922,1	-1.048,8
CO ₂ -Einsparung prozentual	%	31,7	36,5	35,4	40,3

In der 14.000 E Modellanlage können somit je nach Schlammalter zwischen 31,7 und 36,5 % CO₂ eingespart werden. Für die 100.000 E Anlage liegt die mögliche Einsparung sogar zwischen 35,4 bis 40,3 %. Aus Sicht des Klimaschutzes ist eine Umrüstung auf den Betrieb mit Vorklärung und anaerober Stabilisierung somit als lohnend anzusehen.

11 Entscheidungsmatrix als Planungshilfe

In Tabelle 8 ist die überarbeitete Entscheidungsmatrix zur Gegenüberstellung möglicher Energiebedarfsdaten, Energieerträge und CO₂-Emissionen aus MBR bei verschiedenen Verfahrenskonfigurationen dargestellt.

Für die Membranstufe sind das Membrangebläse, die externe Rezirkulationspumpe sowie die Permeatpumpe berücksichtigt. Hier ändert sich durch die Einführung von Vorklärung und anaerober Schlammstabilisierung nichts. Die spezifischen Kosten sind auch für beide Anlagengrößen gleich. Für die Belebung sind die Belüftung im Belebungsbecken, Rührwerke sowie die interne Rezirkulation (vom Nitrifikationsbereich in den Denitrifikationsbereich) berücksichtigt. Dieser Wert wird mit der Einführung einer Vorklärung kleiner, da weniger zu oxidierende Fracht ins Belebungsbecken geleitet wird und somit die Position Belüftung geringer ausfällt. Des Weiteren ist das Belebungsbecken kleiner, was sich auf den Energiebedarf der Rührwerke auswirkt. Durch das Absenken des Schlammalters wird zusätzlich Belüftungsenergie eingespart. Bei der Schlammbehandlung ist ohne anaerobe Stabilisierung eine Zentrifuge berücksichtigt, mit anaerober Stabilisierung ein Eindicker, der Faulbehälter sowie eine Zentrifuge. Bei allen Anlagen sind zusätzlich der Energiebedarf für die mechanische Reinigung sowie die Infrastruktur zu berücksichtigen. Die CO₂-Bilanz berücksichtigt den Energiebedarf, gegebenenfalls den Energiegewinn sowie die CH₄-Emissionen aus der anaeroben Schlammstabilisierung.

Tabelle 8: Entscheidungsmatrix der Variantenuntersuchung am Beispiel der Modellanlage

Anlagengröße		14.000 E			100.000 E		
		ohne VK/ Faulung	mit VK/ Faulung 25 d	mit VK/ Faulung 15 d	ohne VK/ Faulung	mit VK/ Faulung 25 d	mit VK/ Faulung 15 d
Gesamtenergiebedarf	Wh/m ³	495	468	462	484	452	444
Gesamtenergiebedarf	kWh/(E·a)	47	44	43	43	40	40
davon aus Membranstufe	Wh/m ³	260	260	260	260	260	260
davon aus Belebung	Wh/m ³	189	137	130	179	121	113
davon aus Schlammbehandlung	Wh/m ³	8	27	28	8	29	29
Energieertrag aus Faulung	Wh/m ³	0	158	176	0	170	185
Fremdenergiebezug	Wh/m ³	495	309	285	484	282	259
CO ₂ -Emissionen	t CO ₂ /a	392	268	249	2.490	1.680	1.554
Prognose: Wirtschaftlichkeit bei Strompreis (min 0,15 €/kWh)	€/kWh	-	0,25	0,15	-	0,15	0,15

Nach Bewertung der Ergebnisse aus dem Versuchsbetrieb und den Modellrechnungen kann der Fremdenergiebezug der Kläranlagen durch Umstellung auf einen Betrieb mit Vorklärung und anaerober Stabilisierung signifikant gemindert werden. Zudem ergeben sich deutliche Reduktionen der CO₂-Emissionen. Die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur konventionellen Bauweise mit aerober Stabilisierung war für die Modellanlagen 14.000 E und einem Schlammalter von 15 Tagen, sowie für beide Varianten der 100.000 E Anlage bereits ab dem niedrigsten betrachteten Strompreis von 0,15 €/kWh erreicht. Für die Variante 14.000 E und 25 Tage Schlammalter wäre ein Strompreis von 0,25 €/kWh notwendig.

Innerhalb des Versuchsbetriebes wurde keine Verschlechterung der Reinigungsleistung beim Betrieb mit Vorklärung sowohl für 25 Tage als auch für 15 Tage Schlammalter festgestellt, so dass diese innerhalb der Entscheidungsmatrix nicht als Kriterium aufgeführt wurde. Die Frage des beobachteten Membranfoulings in den Versuchen mit Vorklärung und 15 Tagen Schlammalter macht eine mögliche großtechnische Umsetzung von weiteren Untersuchungen abhängig. Eine Berücksichtigung der erhöhten Kosten durch eine eventuell notwendige Dosierung zusätzlicher Betriebsmittel zur Membranreinigung oder Konditionierung des belebten Schlammes, sowie durch den steigenden Energiebedarf der Permeatpumpen erfolgte an dieser Stelle nicht.

12 Ausblick

Der Betrieb mit Vorklärung und 25 Tagen Schlammalter ist anhand der durchgeführten Versuche sowohl nach der Reinigungsleistung als auch nach der Betriebssicherheit dem konventionellen Betrieb ohne Vorklärung und mit aerober Stabilisierung gleichwertig. Aufgrund der festgestellten geringeren Anzahl an $\text{NH}_4\text{-N}$ Spitzen im Ablauf der halbtechnischen Versuchsanlage kann dieser eventuell sogar zusätzliche Betriebssicherheit bieten. Für die 15 Tage Schlammalter konnte eine vergleichbare Reinigungsleistung festgestellt werden. Aufgrund des auftretenden Membranfoulings sind hier aber zusätzliche Maßnahmen zur Foulingbekämpfung zu ergreifen, deren Wirksamkeit im Einzelfall zu prüfen ist.

Bei einer den Größenverhältnissen der Kläranlage angepassten Bauweise des Faulungsreaktors kann eine Wirtschaftlichkeit der betrachteten Modellanlagen unterhalb der allgemein genannten Wirtschaftlichkeitsgrenze von 20.000 bis 25.000 E für das konventionelle Belebungsverfahren erreicht werden. Eine Anpassung der Modellanlagen mit Vorklärung und Faulung auf 15 Tage Schlammalter in der Belebungsstufe ermöglicht gegenüber 25 Tagen Schlammalter Kosteneinsparungen von 0,02 €/m³ behandeltem Abwasser bei 14.000 E bzw. 0,01 €/m³ für 100.000 E. Dies ist im großen Anteil des Primärschlammes an der Faulgasproduktion begründet.

Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen zum energieeffizienten Betrieb großtechnischer MBR und den in diesem Bericht gewonnenen Erkenntnissen zur Möglichkeit der Eigenenergieerzeugung aus Faulgas, ergibt sich weiterer Forschungsbedarf in den nachfolgend genannten Bereichen.

Die Ermittlung des maximal möglichen Primärschlammabzuges in der Vorklärung, bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der für MBR typischen sehr guten Reinigungsleistung ist ein Schwerpunkt möglicher weiterer Untersuchungen. Innerhalb der Versuche konnte gezeigt werden, dass der Primärschlamm auch bei Membranbioreaktoren den Hauptteil der Gasproduktion liefert.

Von größerer Bedeutung ist die Optimierung des Betriebs der Membranstufe eines Membranbioreaktors mit Vorklärung und Faulung bei 15 Tagen Schlammalter hinsichtlich der Verringerung von Fouling. Aufgrund der Projektergebnisse zeigte sich eine Wirtschaftlichkeit der Schlammfäulung bereits für kommunale MBR mit Ausbaugrößen von 14.000 E bei gleichzeitig energieoptimierter Auslegung. Zur Erreichung eines stabilen und wirtschaftlichen Betriebs kann die Dosierung von Pulveraktivkohle in das Belebungsbecken – zusätzlich zu der dadurch erreichbaren Spurenstoffelimination – Vorteile bieten. Dabei sind vor allem die langfristige Betriebssicherheit des Prozesses, die optimale PAK-Dosierkonzentration zum möglichst wirtschaftlichen Erreichen beider Ziele (Spurenstoffelimination und Foulingreduktion) und mögliche positive Veränderungen im Faulprozess (Steigerung des Umsatzes der Organik, Faulgasertrag) wichtige Forschungsfelder.

Literaturverzeichnis

- AHN, K.-H.; SONG, K.-G.; KIM, Y. (2008): EFFECT OF COAGULANT ADDITION ON MEMBRANE FOULING AND NUTRIENT REMOVAL IN A SUBMERGED MEMBRANE BIOREACTOR. DESALINATION 221, S. 467-474
- ATV-DVWK-A 131 (2000): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Arbeitsblatt des ATV-DVWK Regelwerkes, ISBN 3-933707-41-2
- DWA-A 216 (2013): Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Entwurf (April 2013), ISBN 978-3-942964-87-6
- Haberkern, B.; MAIER, W.; SCHNEIDER, U. (2008): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Text 11/08, Umweltbundesamt (Hrsg.), ISSN 1862-4804
- KREBBER, K. (2013): Optimierung der Energiebilanz von Membranbioreaktoren. GWA Band 235, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Dissertation Aachen 2013, ISBN 978-3-938996-41-6
- MALMS, S.; KREBBER, S.; PALMOWSKI, L.; HERR, J.; PINNEKAMP, J. (2014): Entwicklungspotenzial der Membranverfahren. GWA Band 234, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, ISSN 0342-6068
- MELIN, T.; LYKO, S.; BATSCH, A.; BAUER, T.; WINTGENS, T.; AL-HALBOUNI, D.; HOLLENDER, J.; GRINWIS, S.; SCHÜRMAN, B.; TACKE, D.; DRENSLA, K.; JANOT, A. (2007): Strategien zur Foulingkontrolle bei Membranbelebungsanlagen in der kommunalen Abwasserbehandlung. Abschlussbericht für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
- MOLDT, C. (2001): Bestimmung des Grenzflächenfaktors α bei Belebtschlämmen unterschiedlichen Trockensubstanzgehaltes in einer Versuchsanlage. Diplomarbeit an der FH Braunschweig/Wolfenbüttel, <http://www.ibfo.de/Diplomarbeiten/Cornelius/Diplomarbeit.pdf> (Aufruf: 15.5.2015)
- MURL (1999): Energie in Kläranlagen- Handbuch, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen
- NG, C. A.; SUN, D.; ZHANG, J.; WU, B.; FANE, A. G. (2010): Mechanisms of Fouling Control in Membrane Bioreactors by the Addition of Powdered Activated Carbon, Separation Science and Technology, 45:7, 873-889, DOI: 10.1080/01496391003667138
- PINNEKAMP, J.; BASTIAN, D.; SIMSHEUSER, C.; PALMOWSKI, L.; KRÜGER, M.; GREDIGK-HOFFMANN, S. (2015): Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen – Phase 2. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

- PINNEKAMP, J.; VELTMANN, K.; PALMOWSKI, L. (2011A): Prozessoptimierung von Membranbelebungsanlagen (ProM). Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (bisher unveröffentlicht)
- PINNEKAMP, J.; VELTMANN, K.; PALMOWSKI, L.; MAUER, C.; SIMSHEUSER, C.; SCHMITZ, U.; ECKERS, S.; RIßE, H.; GREDIGK-HOFFMANN, S. (2011B): Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen - Phase 1, Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
- ROTT, U.; MENZEL, U.; SCHÖLPPLE, S. (2009): Kostengünstige und flexible Behandlung von problematischen Abwässern am Beispiel von Deponiesickerwasser. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Bildung und Forschung, http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/02WA0702_-_Abschlussbericht.pdf (Zugriff: Mai 2015)
- UMWELTBUNDESAMT (2010): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2008 und erste Schätzung 2009. Berlin
- UMWELTBUNDESAMT (2013): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012
- WANG, Z.; WU, Z.; TANG, S. (2010): Impact of Temperature Seasonal Change on Sludge Characteristics and Membrane Fouling in a Submerged Membrane Bioreactor, *Separation Science and Technology*, 45:7, 920-927, DOI: 10.1080/01496391003656974
- WERNING, J. (1994): Einstufige und zweistufige anaerobe Verfahrenstechnik zur biologischen Klärschlammstabilisierung mit Biomasseanreicherung. HRSG.: PROF. DR.-ING. M. DOHMANN, INSTITUT FÜR SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT DER RWTH AACHEN, DISSERTATION AACHEN 1994, ISSN 0342-6068
- ZWICKENPFLUG, B.; BÖHLER, M.; STERKELE, B.; JOSS, A.; SIEGRIST, H.; TRABER, J.; GUJER, W.; BEHL, M.; DORUSCH, F.; HOLLENDER, J.; TERNES, T. UND FINK, G. (2010): Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Abschlussbericht im Internet unter: http://www.eawag.ch/forschung/eng/projects/Projects_Wastewater/strategie_micropol/pak_eawag/Abschlussbericht_MicroPoll_PAK.pdf. (Zugriff: 23.03.2014).