

**EnviaTec**

*Entwicklungsgesellschaft für Umweltinformations-  
und -managementsysteme mbH  
Kanalstr. 6  
12589 Berlin*

**Programm**

**des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zur  
Förderung von Investitionen mit Demonstrationscharakter zur  
Verminderung von Umweltbelastungen - Pilotprojekte Inland**

**Abschlussbericht über die Errichtung einer Anlage zur  
anaeroben Behandlung hypersaliner Abwässer im  
Gemeinschaftsklärwerk Bitterfeld-Wolfen**

**Geschäftsführer:  
Regina Egert  
Dr. Stefan Basse**

Im Auftrag des Umweltbundesamtes und der KfW-Bankengruppe

verfasst von

Dr.-Ing. Olaf Sterger, EnviaTec GmbH Berlin

unter Mitwirkung von

Prof. Dr. Karl-Erich Köppke, Bad Oeynhausen

Berlin, den 31. März 2013

<b>1. Berichtsnummer</b> 20144	<b>2.</b>	<b>3.</b>
<b>4. Titel des Berichts</b> Abschlussbericht über die Errichtung einer Anlage zur anaeroben Behandlung hypersaliner Abwässer im Gemeinschaftsklärwerk Bitterfeld-Wolfen		
<b>5. Autor(en), Name(n), Vorname(n)</b> Dr.-Ing. Olaf Sterger, EnviaTec GmbH Prof. Dr. rer. nat. Karl-Erich Köppke, Ing.-Büro Prof. Dr. Köppke		<b>8. Abschlussdatum</b> März 2013
		<b>9. Veröffentlichungsdatum</b>
<b>6. Durchführende Institution (Name, Anschrift)</b> Entwicklungsgesellschaft für Umweltinformations- und -managementsysteme mbH Kanalstr. 6 12589 Berlin		<b>10. UFOPLAN – Nr.</b>
		<b>11. Seitenzahl</b> 96
		<b>12. Literaturangaben</b> 36
<b>7. Fördernde Institution (Name, Anschrift)</b> Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau		<b>13. Tabellen u. Diagramme</b> 17
		<b>14. Abbildungen</b> 40
<b>15. Zusätzliche Angaben</b>		
<b>16. Kurzfassung</b> <p>Die Anlage zur anaeroben Vorbehandlung von Methylcelluloseabwasser wurde 2010/2011 im GWK Bitterfeld-Wolfen errichtet und befindet sich seit 1.11.2011 im kontinuierlichen Dauerbetrieb. Den Anaerobreaktoren wird Abwasser mit einem Salzgehalt von etwa 20 g/l NaCl zugeleitet. Die meisten Kennwerte, die der Bemessung zugrunde gelegt wurden, konnten erreicht oder sogar überboten werden (z. B. CSB-Abbaugrad, Biogasproduktion je kg abgebaute CSB-Fracht, Heizwert des Biogases). Einige Bemessungsgrößen wurden allerdings im bisherigen Betrieb noch nicht erreicht (z. B. Zulaufkraft und Abbauleistung in t CSB/d, Raumbelastung, Biogasgewinn in Nm<sup>3</sup>/d). Hauptursache hierfür ist, dass die aktive Biomasse im Reaktor (organische Trockensubstanz) noch nicht die der ursprünglichen Bemessung zugrundeliegende Menge erreicht hat.</p> <p>Hauptzweck des Demonstrationsvorhabens war es nachzuweisen, dass auch extrem salzhaltige Substrate anaerob behandelt werden können. Dieser Nachweis ist erbracht.</p> <p>Mit dem Demonstrationsvorhaben zur anaeroben Behandlung hypersaliner Abwässer im GWK Bitterfeld-Wolfen konnte also - trotz einiger Probleme - der bis dato gültige Anwendungsbereich für den Einsatz anaerober Verfahren gemessen an der elektrischen Leitfähigkeit um 100% ausgedehnt werden.</p>		
<b>17. Schlagwörter</b> Anaerobe Abwasserbehandlung, Biogasgewinnung, salzhaltiges Abwasser, Blockheizkraftwerk (BHKW), Gasspeicher, Biogasaufbereitung		
<b>18. Preis</b>	<b>19.</b>	<b>20.</b>

<b>1. Report No.</b> 20144	<b>2.</b>	<b>3.</b>
<b>4. Report Title</b> Final report on the construction of a plant for the anaerobic treatment of saline wastewater in the WWTP at Bitterfeld-Wolfen		
<b>5. Author(s), Family Name(s), First Name</b> Dr.-Ing. Olaf Sterger, EnviaTec GmbH Prof. Dr.rer.nat. Karl-Erich Köppke, Ing.-Büro Prof. Dr. Köppke		<b>8. Report Date</b> March 2013
<b>6. Performing Organisation (Name, Address)</b> Entwicklungsgesellschaft für Umweltinformations- und -managementsysteme mbH Kanalstr. 6 12589 Berlin		<b>9. Publication Date</b>
<b>7. Sponsoring Agency (Name, Address)</b> Federal Environment Agency Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau		<b>10. UFOPLAN – Ref. No.</b>
<b>15. Supplementary Notes</b>		<b>11. No. of Pages</b> 96
<b>16. Abstract</b> <p>The plant for anaerobic treatment of wastewater from production of methylcellulosis was built in 2010/2011 at the WWTP Bitterfeld-Wolfen. It is under continuous operation since 11/01/2011. The waste water is fed to anaerobic reactors with a salt content of about 20 g/l sodium chloride. Most of the design parameters could be reached or even surpassed (e. g. COD removal efficiency, biogas production per kg degraded COD load, calorific value of the biogas). However, some design parameters could not yet been reached so far (e. g. incoming COD load, COD elimination in t COD/d, loading rate, biogas yield in m<sup>3</sup>/d). The main reason for this is that the active biomass in the reactor (organic dry matter) has not yet reached the value which has been planned.</p> <p>The main purpose of the demonstration project was to demonstrate that even extremely salty substrates can be treated anaerobically. The proof has been produced. Despite some problems - the limit of electrical conductivity for the application of anaerobic processes could be enhanced by 100%.</p>		<b>12. No. of References</b> 36
<b>17. Keywords</b> Anaerobic wastewater treatment, biogas production, saline wastewater, combined heat and power plant (CHP), gas storage, biogas upgrading		<b>13. No. of Tables, Diagr.</b> 17
<b>18. Price</b>	<b>19.</b>	<b>20.</b>

## Inhalt

<b>1. Veranlassung</b> .....	<b>11</b>
<b>2. Vor-und Nachteile von Anaerobanlagen</b> .....	<b>13</b>
2.1. Vorteile.....	13
2.1.1. Zu a) Belüftung entfällt.....	13
2.1.2. Zu b) Gewinnung Biogas .....	13
2.1.3. Zu c) Reduzierung Schlammfall .....	13
2.1.4. Zu d) Platzbedarf gering .....	13
2.2. Nachteile.....	14
2.2.1. Zu a) Geringere Prozessstabilität.....	14
2.2.2. Zu b) Schlechtere Ablaufwerte.....	15
<b>3. Beschreibung der Anaerobanlage des GWK</b> .....	<b>17</b>
<b>4. Vergleich von Betriebsdaten mit Auslegungswerten</b> .....	<b>34</b>
4.1. CSB-Zulaufkraft .....	37
4.2. Raumbelastung.....	38
4.3. Schlammbelastung .....	39
4.4. CSB-Abbauleistung und CSB-Abbaugrad.....	40
4.5. Leitfähigkeit.....	42
4.6. Temperatur .....	44
4.7. Biogasproduktion und Heizwert .....	45
4.8. Elektrischer und thermischer Wirkungsgrad der BHKW's .....	47
4.9. Biomasse im Reaktor.....	47
4.10. Verweilzeit und hydraulische Flächenbeschickung.....	51
4.11. Aufströmgeschwindigkeit .....	52
4.12. Sonstiges .....	53
4.13. Zusammenfassende Bewertung .....	54
<b>5. Stoff- und Energiebilanzen</b> .....	<b>57</b>
5.1. Chemisches Energiepotenzial .....	57
5.1.1. Energiegehalt normal verschmutzten häuslichen Abwassers .....	57
5.1.2. Energiegehalt von Abwasser aus der Herstellung von Methylcellulose	58

5.2.	Kohlenstoffbilanz .....	59
5.3.	Stickstoffbilanz .....	60
5.4.	Phosphorbilanz .....	61
5.5.	Sankey-Diagramm der Energieströme .....	62
<b>6.</b>	<b>Kennzahlen zur Energieeffizienz .....</b>	<b>64</b>
6.1.	Elektroenergie- und Wärmebilanz ohne und mit Anaerobanlage .....	64
6.2.	Vergleich mit Kennzahlen des UBA .....	65
<b>7.</b>	<b>Emissionen .....</b>	<b>69</b>
7.1.	Verminderung der klimarelevanten CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	69
7.2.	Vermiedene CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	69
7.3.	Emissionen Abluft .....	70
7.3.1.	Abluft aus den Ausgleichbehältern 1 und 2 .....	70
7.3.2.	Abluft aus dem Standrohr und den Anaerobreaktoren .....	73
7.3.3.	Verbrennungsabluft aus den BHKW's .....	74
7.4.	Schallemissionen .....	75
7.5.	Emissionen Abwasser am Gesamtablauf des GWK in die Mulde .....	76
7.5.1.	Chemischer Sauerstoffbedarf .....	77
7.5.2.	Gesamt-Phosphor .....	78
7.5.3.	Gesamter gebundener Stickstoff (TNb) .....	79
7.5.4.	Adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX) .....	80
<b>8.</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....</b>	<b>82</b>
8.1.	Gegenüberstellung der Behandlungsentgelte .....	82
8.2.	Betriebsmittelverbrauch .....	83
<b>9.</b>	<b>Prozesssteuerung mittels Neuronaler Netze .....</b>	<b>86</b>
<b>10.</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>87</b>
10.1.	Zusammenfassende Darstellung der Emissionen .....	88
10.2.	Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Abwasserarten .....	90
10.3.	Empfehlungen an andere Betreiber von Anaerobanlagen .....	91
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>92</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Rohrbrücken auf dem Gelände des GWK und des Industrieparks Bayer Bitterfeld mit Druckleitungen für Methylcelluloseabwasser, Hintergrund Bildmitte: Dow Wolff Cellulosics (Foto Sterger am 28.02.2011)	17
Abb. 2:	Übersicht der verschiedenen Verfahrenseinheiten innerhalb der Anaerobanlage sowie deren Einordnung in die Gesamtanlage des GWK	18
Abb. 3:	Ausgleichsbehälter für Methylcelluloseabwasser (im Vordergrund) (Foto Sterger am 08.11.2011)	19
Abb. 4:	Pumpstation 3 am Fuße der Ausgleichsbehälter (Foto Sterger am 28.02.2011)	20
Abb. 6:	BOLL-Filter zur Feststoffabtrennung aus dem Kommunalabwasser, Spaltweite 500 µm. (Foto Sterger am 08.11.2011)	22
Abb. 7:	Wärmetauscher 4 zur Vorwärmung des Kommunalabwassers (Foto Sterger am 08.11.2011)	23
Abb. 8:	Wahrzeichen der neuen Vorbehandlungsanlage im GWK Bitterfeld-Wolfen: Anaerobreaktoren Aquatyx, Typ R2S (Bildquelle: GWK)	24
Abb. 9:	Blick in das Innere eines R2S-Reaktors (Quelle: Fa. Aquatyx Wassertechnik GmbH)	26
Abb. 10:	Schlamm pellets des Impfschlammes zur Inbetriebnahme der Reaktoren 1 und 2; Raster 1 mm x 1 mm (Bildquelle: GWK)	27
Abb. 11:	Schlamm pellets der Anaerobreaktoren am 19.06.2012, links: AR 1, Probenahmestelle 1 in 2,7 m Höhe / rechts: AR 2, Probenahmestelle 2 in 6,0 m Höhe; Raster: 1 mm x 1 mm. (Bildquelle: GWK)	27
Abb. 12:	Schlamm pellets der Anaerobreaktoren am 30.07.2012, links: AR 1, Probenahmestelle 1 in 2,7 m Höhe / rechts: AR 2, Probenahmestelle 1 in 2,7 m Höhe; Raster: 1 mm x 1 mm. (Bildquelle: GWK)	28

Abb. 13:	Schlamm pellets des Anaerobreaktors AR 2 am 30.07.2012, beide Aufnahmen Probenahmestelle 2 in 6,0 m Höhe; Raster: 1 mm x 1 mm. (Bildquelle: GWK)	28
Abb. 14:	Turmkolonne für die Biogasentschwefelung (rechts) und Gebäude für BHKW (Erdgeschoß) und Gasspeicher (Obergeschoß) (Foto Sterger am 28.02.2011)	29
Abb. 15:	Aktivkohlefilter zur Biogasreinigung (Hintergrund: BIOHOCH <sup>®</sup> -Reaktor 1) (Foto Sterger am 08.11.2011)	30
Abb. 16:	Biogastrocknung und -druckerhöhung (Foto Sterger am 08.11.2011)	31
Abb. 17:	Fackel und Kontrollstation (im Hintergrund Anaerob-Reaktoren) (Bildquelle: GWK)	31
Abb. 18:	BHKW's (Foto Sterger am 28.02.2011)	32
Abb. 19:	Skizze zur Anordnung der maßgeblichen Messstellen für den Betrieb der Anaerobanlage (bereitgestellt von AquaTune GmbH, aktualisiert nach Auskunft des GWK)	33
Abb. 20:	CSB-Zulauffrachten in kg/d der Reaktoren 1 und 2 im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012	37
Abb. 21:	CSB-Raubelastung der Reaktoren 1 und 2 im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.09.2012	38
Abb. 22:	CSB-Schlammelastung der Reaktoren 1 und 2 im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.09.2012	40
Abb. 23:	CSB-Abbauleistung der anaeroben Vorbehandlungsanlage im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012	41
Abb. 24:	CSB-Abbauleistung und organ. Säuren im Ablauf der anaeroben Vorbehandlungsanlage im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012	42
Abb. 25:	Chloridkonzentration und elektrische Leitfähigkeit im Zulauf des Methylcelluloseabwassers im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012	43
Abb. 26:	Elektrische Leitfähigkeit im Abwasserzulauf zur Anaerobanlage im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012	43
Abb. 27:	Temperatur und Biogasproduktion (in Nm <sup>3</sup> /d) in den Reaktoren 1 und 2 im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012	44

Abb. 28:	Spezifischer Biogasertrag im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012	46
Abb. 29:	Biomasse (gemessen als t oTS) in den Reaktoren 1 und 2 sowie Kalkdosierung im Zeitraum 18.08.2011 bis 30.09.2012	49
Abb. 30:	Verhältnis TS : oTS auf Basis der Feststoff-Messungen im Reaktorablauf und Kalkzugabe im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012	50
Abb. 31:	Verweilzeit und hydraulische Flächenbeschickung im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012	52
Abb. 32:	Kohlenstoffbilanz (Mittelwerte) im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012	59
Abb. 33:	Stickstoffbilanz (Mittelwerte) im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012	61
Abb. 34:	Phosphorbilanz (Mittelwerte) im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012	62
Abb. 35:	CSB-Frachten, Biogas- und Methangasproduktion sowie Energieströme der Anaerobanlage im GWK Bitterfeld-Wolfen für den Zeitraum November 2011 bis September 2012 als Sankey-Diagramm	63
Abb. 36:	Treibhausgas-Vermeidungsfaktoren der erneuerbaren Strom- und Wärmeerzeugung 2011 (BMU, 2012)	70
Abb. 37:	CSB-Zu- und Abfrachten sowie Eliminierungsgrad für die Jahre 2010, 2011 und 2012	77
Abb. 38:	Zu- und Abfrachten an Gesamt-Phosphor sowie Eliminierungsgrad für die Jahre 2010, 2011 und 2012	78
Abb. 39:	Zu- und Abfrachten an TNb sowie Eliminierungsgrad für die Jahre 2010, 2011 und 2012	79
Abb. 40:	Zu- und Abfrachten an AOX sowie Eliminierungsgrad für die Jahre 2010, 2011 und 2012	80

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Betriebsdaten der Anaerobanlage im Zeitraum 1. November 2011 bis 30. September 2012 – Teil A	35
Tab. 2:	Betriebsdaten der Anaerobanlage im Zeitraum 1. November 2011 bis 30. September 2012 – Teil B	36
Tab. 3:	Zusammenfassende Gegenüberstellung von Bemessungswerten und tatsächlichen Betriebsdaten der Anaerobanlage	55
Tab. 4:	Elektroenergie- und Wärmebilanz des GWK Bitterfeld-Wolfen für die Jahre 2010 und 2012	64
Tab. 5:	Vergleich der Energieeffizienz des GWK Bitterfeld-Wolfen vor und nach Inbetriebnahme der Anaerobanlage mit den UBA-Kennziffern (HABERKERN et al., 2008)	67
Tab. 6:	Fremdbezug von Elektroenergie und CO <sub>2</sub> -Äquivalente des GWK Bitterfeld-Wolfen vor und nach Inbetriebnahme der Anaerobanlage	69
Tab. 7:	Gasmessungen im Luftraum der Ausgleichsbehälter im Zeitraum 8.6. bis 8.9.2011	71
Tab. 8:	C-gesamt-Fracht aus der Behälteratmung der AGB 1 und 2 im realen Betrieb	73
Tab. 9:	Messergebnisse in den Gasräumen oberhalb der Wasserspiegel in den Anaerobreaktoren sowie des Standrohres	73
Tab. 10:	Messwerte und einzuhaltende Massenkonzentrationen für BHKW 1	74
Tab. 11:	Messwerte und einzuhaltende Massenkonzentrationen für BHKW 2	74
Tab. 12:	Messwerte und einzuhaltende Massenkonzentrationen für BHKW 3	75
Tab. 13:	Messwerte und einzuhaltende Massenkonzentrationen für BHKW 4	75
Tab. 14:	Max. zulässige Schallemissionen	75

Tab. 15:	Gegenüberstellung der resultierenden Behandlungsentgelte für das Jahr 2012 in den beiden Varianten Anaerobe Vorbehandlung mit aerober Nachbehandlung und ausschließlich aerobe Behandlung	83
Tab. 16:	Verbrauch an Nährstoffen, Neutralisationsmitteln und sonstigen Betriebsmitteln in der Anaerobanlage im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012	84
Tab. 17:	Zusammenfassende Darstellung der Emissionen	89

## 1. Veranlassung

Das Gemeinschaftsklärwerk Bitterfeld-Wolfen (GWK) ging 1994 als eines der modernsten und größten Klärwerke der neuen Bundesländer mit vier BIOHOCH®-Reaktoren und einer Behandlungskapazität von 422.000 EW<sub>BSB5</sub><sup>1</sup> in Betrieb. Viele Jahre reichte diese Kapazität aus. Angeschlossen an das GWK sind die Gemeinden des Abwasserzweckverbandes Westliche Mulde einschließlich des Mitteldeutschen Technologieparks Thalheim mit insgesamt etwa 78.000 EW, der P-D ChemiePark Bitterfeld Wolfen (P-D CPG) und der Industriepark der Bayer Bitterfeld GmbH.

P-D CPG, hervorgegangen aus den Anfang der 90'er Jahre kollabierten Überresten des ehemaligen DDR-Chemiekombinats Bitterfeld und des Fotochemischen Kombinat Wolfen („ORWO“), ist heute eine der bedeutendsten Chemieansiedlungen in Deutschland. Auf einer Gesamtfläche von 1.200 Hektar sind etwa 300 Firmen aus dem Dienstleistungssektor und über 60 namhafte produzierende Unternehmen tätig. Dabei handelt es sich vor allem um Unternehmen aus der Chemieindustrie wie z.B. Akzo Nobel, Evonik, Clariant und Miltitz Aromatics. Im unmittelbar angrenzenden Industriepark Bayer Bitterfeld sind neben Bayer selbst mit der Aspirin-Produktion so namhafte Unternehmen wie die Lanxess AG und die Dow Wolff Cellulosics GmbH vertreten. Angeschlossen sind auch Solarfirmen im Mitteldeutschen Technologiepark Thalheim, deren Abwasser in den kommunalen Behandlungsteil des GWK geführt wird.

Im Jahre 2007 - also zwei Jahre vor der Finanzkrise - teilte die im Industriepark Bayer Bitterfeld ansässige Firma Dow Wolff Cellulosics GmbH dem GWK mit, dass die bis dahin vorhandene Kapazität zur Herstellung von Methylcellulose (17.000 t/a) durch die Errichtung einer dritten Produktionslinie ab 2009 deutlich vergrößert werden sollte, eine darüber hinaus gehende nochmalige Erweiterung nicht ausgeschlossen. Für die Behandlung der zusätzlich anfallenden Abwasserfracht war eine Erweiterung der Behandlungskapazität des GWK um bis zu 24 t CSB/d bzw. 200.000 EW<sub>CSB</sub> unumgänglich<sup>2</sup>.

Abwassertechnisch und vom verfügbaren Platzangebot im GWK standen dafür im Wesentlichen zwei Varianten zur Auswahl:

- Errichten eines zusätzlichen BIOHOCH®-Reaktors
- Neubau einer anaeroben Teilstrombehandlung als Vorbehandlung

Das Abwasser aus der Herstellung von Methylcellulose weist verfahrensbedingt einen extrem hohen Salzgehalt von etwa 80 bis 90 g NaCl/l auf. Als empirischer

---

<sup>1</sup> 1 Einwohnerwert = 60 g BSB5 / (EW \* d)

<sup>2</sup> 1 Einwohnerwert = 120 g CSB / (EW \* d)

Grenzwert für den Einsatz anaerober Verfahren galt bis dahin ein Salzgehalt von 10 g/l bzw. eine Leitfähigkeit von ca. 20 mS/cm<sup>3</sup>.

Im Rahmen längerer Versuchsreihen im Labor- und halbtechnischen Maßstab war 2007/2008 im GWK eine Lösung gefunden worden, die eine anaerobe Behandlung von Abwasser bis zu einem NaCl-Gehalt von 20 bis 25 g/l<sup>4</sup> versprach. Im Vergleich zur bisherigen größtechnischen Anwendung anaerober Verfahren bedeutete dies eine Verdoppelung des Salzgehalts. Ein Risiko, das Gesellschafter und Geschäftsführung des GWK bereit waren zu tragen. Damit nahm die Anaerobanlage ihren Anfang.

Mit dem hier vorgelegten Bericht wird dokumentiert, ob und inwieweit die nunmehr im kontinuierlichen Dauerbetrieb gefahrene Anaerobanlage die bei der Planung zugrunde gelegten Leistungsparameter erfüllt.

---

<sup>3</sup> unter Anwendung der Näherungsformel

**Total Dissolved Solids** (in ppm) = 0,5 \* **Electrical Conductivity** (in µS/cm)

<sup>4</sup> Gemessen wurde und wird sowohl im Pilot- als auch im großtechnischen Betrieb lediglich die Chloridkonzentration im Zulauf und im Ablauf der Anaerobanlage. Diese liegt in einem Bereich von 12 bis 15 g/l Chlorid, was nach stöchiometrischer Umrechnung 19,8 bis 24,7 g/l NaCl entspricht.

## 2. Vor- und Nachteile von Anaerobanlagen

Bevor im Detail auf die Technik und die damit erreichten Effekte der Anaerobanlage im GWK eingegangen wird, sollen kurz noch einmal die grundsätzlichen Vor- und Nachteile der anaeroben im Vergleich zur aeroben Behandlung umrissen werden.

### 2.1. Vorteile

Gegenüber aeroben Abwasserreinigungsverfahren liegen die Vorteile der Anaerobtechnik vor allem in folgenden vier Punkten:

- a) kein energieintensiver Sauerstoffeintrag,
- b) Gewinnung des energetisch nutzbaren Biogases,
- c) deutliche Reduzierung des Schlammanfalls
- d) geringerer Platzbedarf

#### 2.1.1. **Zu a) Belüftung entfällt**

Anaerobe Prozesse erfolgen unter Sauerstoffabschluss, somit entfällt die bei aeroben Verfahren erforderliche teure Belüftung. Der Energiebedarf anaerober Verfahren resultiert nur aus Beschickungspumpen und Umwälzung und ist vergleichsweise gering.

#### 2.1.2. **Zu b) Gewinnung Biogas**

Nach [DWA-M 363, 2010](#) hat Biogas aus der anaeroben Behandlung von organisch hoch belastetem Abwasser einen Methangehalt zwischen 50 bis 85 Vol.-% und einen Heizwert von ca. 5,0 bis 8,5 kWh/m<sup>3</sup>, so dass es in Blockheizkraftwerken zur Strom- und Wärme Gewinnung eingesetzt werden kann (siehe hierzu auch Abschnitt 4.).

#### 2.1.3. **Zu c) Reduzierung Schlammanfall**

Im Handbuch der Anaerobtechnik ([BÖHNKE et al., 1993](#)) wird die Überschussschlammproduktion bei der anaeroben Behandlung von organisch hochbelasteten Industrieabwasser mit 0,02 bis 0,23 kg oTS/kg CSB<sub>eliminiert</sub> angegeben. Sie liegt damit um das 5- bis 10fache niedriger als bei den aeroben Verfahren ([DWA-M 753, 2005](#)). [ZUMBRÄGEL, 1993](#) ging sogar davon aus, dass sich der Schlammanfall um den Faktor 20 verringert.

#### 2.1.4. **Zu d) Platzbedarf gering**

Anaerobe Reaktoren werden mit einer hohen CSB-Raubelastung ( $B_{R, CSB}$ ) betrieben und benötigen daher geringere Behältervolumina. Nach [DWA-AG IG-5.1, 2009](#) lag der Mittelwert für  $B_{R, CSB}$  für 12 ausgewertete Industrieanlagen (ohne Zuckerindustrie) bei 3,2 kg CSB/(m<sup>3</sup> \* d), das Minimum bei 1,5 kg CSB/(m<sup>3</sup> \* d) und der Maximalwert bei 6,4 kg CSB/(m<sup>3</sup> \* d). EGSB-Reaktoren können sogar auf CSB-Raubelastungen von 15 bis 25 kg CSB/(m<sup>3</sup> \* d) ausgelegt werden.

Der geringe Platzbedarf ergibt sich auch daraus, dass anaerobe Reaktoren in der Regel mit großer Höhe gebaut werden (Reaktorhöhe von EGSB-Reaktoren bis zu 24 m - [DWA-AG IG-5.1, 2009](#)).

Trotz der vielen o. g. Vorteile der Anaerobtechnik waren im Jahr 2008 nach [DWA-AG IG-5.1, 2009](#) nur 6 Anaerobreaktoren zur (Vor-)Behandlung von Abwasser aus der chemischen Industrie in Deutschland im Einsatz. Den Verfassern namentlich bekannt sind die Ende 2006 in Betrieb genommene Anlage im Chemiepark Kalle-Albert bei Infraserwiesbaden, wo u.a. ebenfalls Methylcelluloseabwasser behandelt wird, und die Anlage bei Höchst in Frankfurt/Main, die Pharma-Abwasser aus der Produktion von Insulin reinigt<sup>5</sup>. Es ist jedoch keine Anlage bekannt, die Abwasser mit einem so hohen Salzgehalt wie im GWK behandelt. In Wiesbaden wird bei Leitfähigkeiten von 8 bis 18 mS/cm gearbeitet ([KÖPPKE, 2009](#)). [GERARD & KRÜGER, 2009](#) erwähnen eine Anlage mit 22 bis 27 mS/cm, ohne diese konkret zu benennen. Das unterstreicht die Bedeutung und die Pilotfunktion der Anlage im GWK.

## **2.2. Nachteile**

Den o. g. Vorteilen stehen vor allem folgende Nachteile entgegen:

- a) geringere Prozessstabilität / höhere Empfindlichkeit gegenüber Störfaktoren
- b) schlechtere Ablaufwerte

### **2.2.1. Zu a) Geringere Prozessstabilität**

Die Unterschiede der Metabolismen zwischen aeroben und anaeroben Prozessen werden in der Fachliteratur wie folgt umrissen:

*„Bei der aeroben Abwasserreinigung werden die organischen Stoffe von den aeroben Bakterien in einem Stoffwechselschritt bis zu anorganischen Endprodukten (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) ‚veratmet‘. Wenn die Organismen jedoch unter anaeroben Bedingungen leben, können sie hochmolekulare organische Substanzen nicht veratmen (oxidieren), sondern nur vergären (reduzieren). Organische Substanzen, wie z.B. Zellulose, Eiweiße oder Fette, werden durch sie dann nur bis zu organischen Zwischenprodukten wie Säuren oder Alkohole abgebaut. Diese ‚Endprodukte‘ sind, verglichen mit denen der aeroben Oxidation, sehr energiereich, d.h. nicht weitgehend abgebaut.“* ([KUNST & MUDRACK, 1993](#))

*„Bei der aeroben Behandlung wird der CSB entweder in den Überschussschlamm eingebunden oder unter Sauerstoffzuführung oxidiert. Das Verhältnis hängt vom Schlammalter ab und ergibt bei einem Schlammalter von 14 Tagen einen zu oxidierenden Anteil von ca. 55 %.“* ([HARTWIG & ROSENWINKEL, 2011](#))

*„Beim anaeroben Prozess steht Sauerstoff nicht als Wasserstoff-Akzeptor zur Verfügung. Die Bakterien müssen bei ihrem Stoffwechsel auf andere Akzeptoren ausweichen unter energetisch wesentlich ungünstigeren Bedingungen. Außerdem erfolgt der Molekülabbau wegen des anaerob wesentlich komplexeren Anabolismus/Katabolismus nur in Teilschritten entsprechend des für die unterschiedlichen beteiligten Bakterienspezies verfügbaren Enzymhaushaltes.“ ...*

*So werden je Teilreaktionsschritt jeweils nur ein bis zwei Mol ADP als ATP aktiviert je Mol umgesetzter organischer Verbindung... Dabei bleibt bis zu 90 Prozent des theoretischen*

<sup>5</sup> <http://www.industriepark-hoechst.com/index/industriepark/investitionsprojekte/weiterentwicklung-infrastruktur/ava.htm> (12.03.2013; 16:15 Uhr)

Energiepotenzials in den gebildeten Stoffwechselzwischenprodukten bei nur unerheblicher Wärmefreisetzung. Der Substratumsatz von anaeroben Stoffwechsel betreibenden Mikroorganismen beträgt entsprechend ein Vielfaches des bei Aerobiern bekannten. Entsprechend eingeschränkt ist auch die Synthese neuer Zellbiomasse. ...

Letztlich bleiben als gasförmige Stoffwechselendprodukte noch Kohlendioxid und Methan. In der Brutto-Summenreaktion werden aus einem Mol Glucose 3 Mol CH<sub>4</sub> und 3 Mol CO<sub>2</sub> gebildet. Der kalorische Gehalt des Methans beträgt für 3 Mol -2467 kJ [ca. 3822 kJ/Mol], so dass aus einem Mol Glucose nur etwa -400 kJ/Mol stoffwechselverfügbare Energie gewonnen wird...“ ([LANGHANS, 2000](#))

Der Energiegewinn, den die anaeroben Organismen beim Abbau eines organischen Substrates erzielen können, ist also deutlich geringer als beim aeroben Abbau. Darin besteht der wichtigste Unterschied zwischen aerober und anaerober Metabolisierung ([KUNST & MUDRACK, 1993](#) / [LANGHANS, 2000](#)).

„Der anaerobe Abbau ermöglicht den Organismen nur einen geringen Energiegewinn. Es müssen daher gegenüber dem aeroben Abbau große Substratmengen umgesetzt werden, bzw. ist bei gleichem Substrateinsatz nur ein geringeres Wachstum möglich. Daraus resultiert zwar eine geringe Überschussschlammproduktion, aber auch eine lange Einarbeitungs- bzw. Adaptionsphase bei anaeroben Verfahren.“ ([KUNST & MUDRACK, 1993](#))

Ein weiterer Grund für die geringere Verfahrenssicherheit der Anaerobtechnik liegt darin, dass anaerobe Mikroorganismen eine deutlich längere Generationszeit als ihre aeroben Pendanten aufweisen.

[SARSOUR, 2004](#) hat die Generationszyklen der wichtigsten Mikroorganismengruppen für den aeroben und den anaeroben Abbau gegenübergestellt:

<b>Aerobe Mikroorganismen</b>	<b>Generationszeit</b>
Aerober Belebtschlamm	20 min
Nitrosomonase, Nitrobacter Bodenbakterien	5 – 10 h ca. 2 h
<b>Anaerobe Mikroorganismen</b>	
Versäuernde Bakterien	12 – 24 h
Acetogene Bakterien	12 – 60 h je nach Substrat
Methanogene Bakterien	18 – 72 h je nach Substrat

Für ein acetogenes Bakterium, das Buttersäure abbaut und in Cokultur mit Methanobacterium hungatii lebt, wurde nach [KUNST & MUDRACK, 1993](#) sogar eine Generationszeit von 84 h ermittelt.

### **2.2.2. Zu b) Schlechtere Ablaufwerte**

Für das organische Substrat (CSB!) wurden die Ursachen für die schlechteren Ablaufwerte von Anaerobanlagen oben bereits benannt. Eine Konsequenz des geringeren Energiegewinns bei der Vergärung ist, dass deren Stoffwechselprodukte - im Gegensatz zur aeroben Behandlung - nicht vollständig mineralisiert werden.

*„Die ‚Endprodukte‘ (des anaeroben Abbaus) sind noch energiereich und können anderen Organismen wiederum als ‚Nährstoff‘ dienen.“ (KUNST & MUDRACK, 1993)*

"Endprodukt" des anaeroben Abbaus von Glucose z. B. ist Ethanol. Unabhängig davon können mit anaeroben Behandlungsverfahren durchaus CSB-Abbauraten von mehr als 90% erreicht werden. Aber auch bei hohen Eliminierungsraten verbleibt wegen der i. a. R. hohen Eingangskonzentration im Ablauf einer Anaerobanlage eine Restkonzentration an CSB, die eine Nachbehandlung erforderlich macht.

Neben den kohlenstoffhaltigen Verbindungen sind im Hinblick auf die Einleitung von Abwasser aber auch die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor von Belang.

*„Für den anaerob belebten Schlamm ist ein Mindestnährstoffverhältnis von CSB : N : P von ca. **800 : 5 : 1** erforderlich, für den aerob belebten Schlamm etwa BSB5 : N : P von **100 : 5 : 0,5 bis 1**... Das Verhältnis der Nährstoffe Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor verdeutlicht, dass beim anaeroben Kohlenstoffabbau nur geringe Mengen Stickstoff und Phosphor eliminiert werden. Dementsprechend hoch sind auch die Abflusswerte für Stickstoff und Phosphor bei Anaerobanlagen...“ (DAUBER, 1993)*

Abläufe aus Anaerobanlagen bedürfen deshalb i. a. R. auch zur Eliminierung von Stickstoff und Phosphor einer Nachbehandlung, z. B. in einer aeroben Stufe.

### 3. Beschreibung der Anaerobanlage des GWK

Seitens GWK wurde die Fa. STULZ-PLANAQUA GmbH aus Bremen als Generalunternehmer mit der Ausführungsplanung und für die Errichtung der Anaerobanlage beauftragt. Baubeginn der Anlage war im Januar 2010, bis Juli 2011 konnte die Errichtung der Hauptkomponenten der Anlage und deren Inbetriebnahme abgeschlossen werden ([STULZ-PLANAQUA, 2012a](#)). Danach ging die Anlage in Probebetrieb und wurde nach Abschluss aller Arbeiten am 09.11.2012 an das GWK übergeben, wobei die bereits in 2011 fertiggestellten Anaerobreaktoren 1 und 2 (AR 1, AR 2) schon seit November 2011 im kontinuierlichen Betrieb sind.



Abb. 1: Rohrbrücken auf dem Gelände des GWK und des Industrieparks Bayer Bitterfeld mit Druckleitungen für Methylcelluloseabwasser, Hintergrund Bildmitte: Dow Wolff Cellulosics (Foto Sterger am 28.02.2011)

Kernstück der Anlage sind die Anaerobreaktoren. Diesen sind Ausgleichsbehälter, Wärmetauscher und die Chemikaliendosierung vorgeschaltet, nachgeschaltet sind Biogasaufbereitung und –speicherung sowie die Blockheizkraftwerke.

Eine zusammenfassende Übersicht der verschiedenen Verfahrenseinheiten innerhalb der Anaerobanlage sowie deren Einordnung in die Gesamtanlage des GWK bietet Abb. 2 auf der folgenden Seite.

Das zu behandelnde Methylcelluloseabwasser wird von Dow Wolff Cellulosics via Druckleitung auf Rohrbrücken zum GWK geführt (siehe Abb. 1).

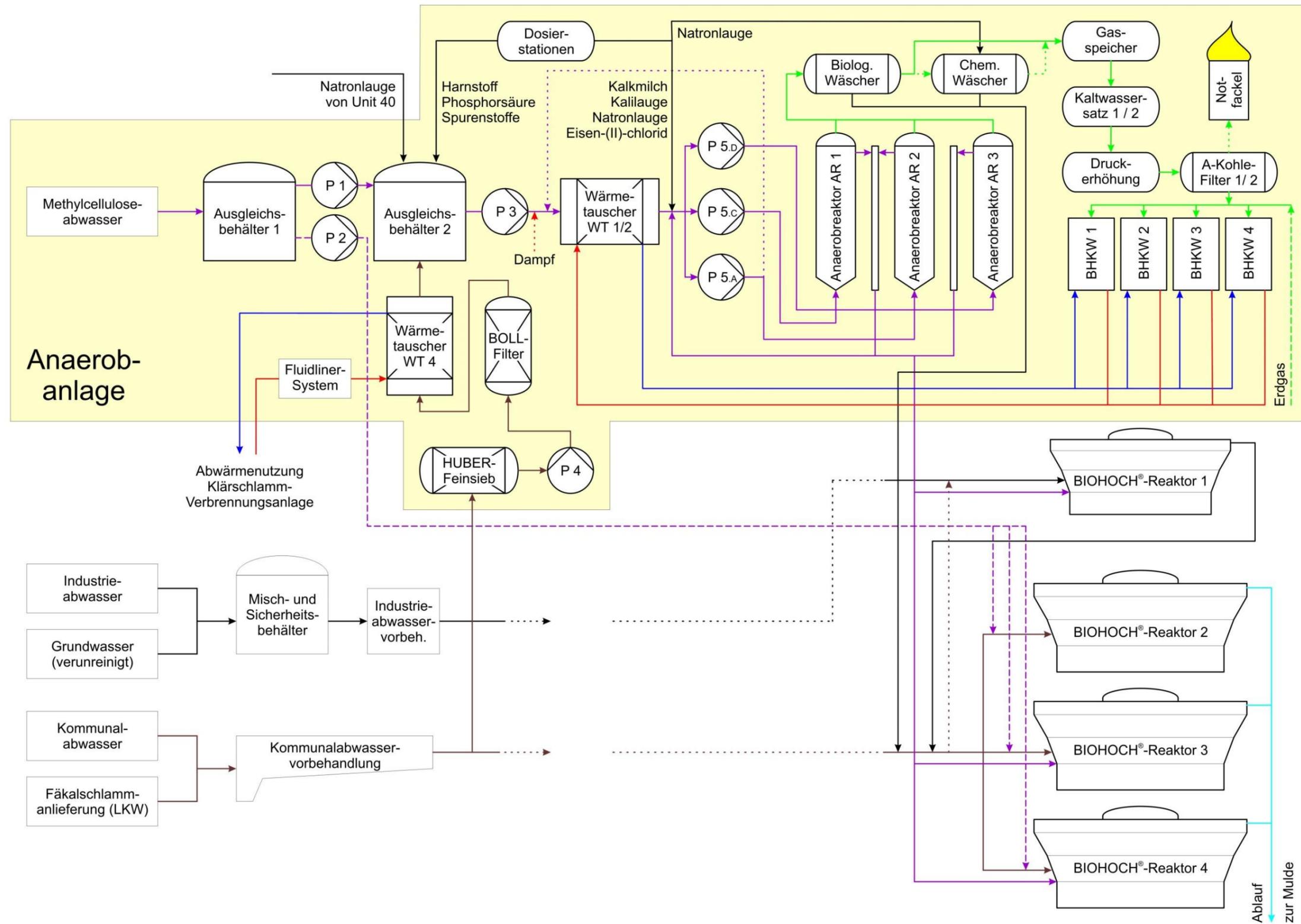


Abb. 2: Übersicht der verschiedenen Verfahrenseinheiten innerhalb der Anaerobanlage sowie deren Einordnung in die Gesamtanlage des GWK



Abb. 3: Ausgleichsbehälter für Methylcelluloseabwasser (im Vordergrund)  
(Foto Sterger am 08.11.2011)

Die eingangs erwähnte Erweiterung der Kapazität der Methylcelluloseanlage von Dow Wolff Cellulosics GmbH wurde 2008/2009 realisiert.

Unglücklicherweise fiel die Inbetriebnahme der neuen Methylcellulose-Produktionslinie mit dem Beginn der internationalen Finanzkrise zusammen. Zwischenzeitlich hat sich der Markt für Methylcellulose wieder erholt. Da Methylcellulose jedoch hauptsächlich als Rohstoff für Bauprodukte dient, wirken sich die saisonalen Bedarfsschwankungen der Baubranche dahingehend aus, dass in den Wintermonaten die Kapazitäten der insgesamt drei Teilanlagen zur MC-Produktion nur teilweise ausgeschöpft werden und dementsprechend weniger Produktionsabwasser anfällt. Da es sich um drei voneinander unabhängige Produktionslinien handelt, ist der Fall, dass alle drei Anlagen gleichzeitig im Stillstand sind, sehr unwahrscheinlich. Eine Mindestbeschickung der Anaerobanlage war bis auf ganz wenige Ausnahmen bislang stets gewährleistet. Trotz Schwankungen des Abwasseranfalls war bisher insgesamt so viel CSB-Fracht aus dem MC-Abwasser vorhanden, dass die für die Höhe der Frachtbeschickung der Anlage bestimmende Bemessungsschlammbelastung im Mittel eingehalten wurde (siehe Abschnitt 4.3.).

Im GWK gelangt das mit einer mittleren Temperatur von etwa 40°C ankommende Methylcelluloseabwasser (MC-Abwasser) zunächst in Ausgleichsbehälter 1, Volumen 765 m<sup>3</sup> (AGB 1). Dieser Ausgleichsbehälter dient der Vergleichmäßigung von Abwassermenge und -konzentration.



Abb. 4: Pumpstation 3 am Fuße der Ausgleichsbehälter  
(Foto Sterger am 28.02.2011)

Aus AGB 1 wird das MC-Abwasser zum überwiegenden Teil in den zweiten Ausgleichsbehälter (AGB 2, gleiches Volumen) gepumpt, der die Vorlage für den eigentlichen Zulauf zu den Anaerobreaktoren darstellt (s. u.). AGB 2 dient der Einstellung der Leitfähigkeit, der Zugabe von Nährstoffen und der Hydrolyse bzw. Vorversäuerung des Zulaufabwassers für die Anaerobanlage.

Ein variabler Teilstrom des MC-Abwassers kann aus dem AGB 1 jedoch auch direkt der aeroben Behandlung (BHR 2 bis 4) zugeführt werden. Das MC-Abwasser gelangt dort gemeinsam mit dem Hauptstrom des kommunalen Zulaufs in die anoxische Zone und dient als Kohlenstoffquelle für die Denitrifikation. So können auch die oben erwähnten produktionsbedingten Schwankungen des Anfalls an MC-Abwasser ausgeglichen werden.

Zur Anreicherung mit Nährstoffen und zur Regulierung der Leitfähigkeit wird dem Methylcelluloseabwasser Kommunalabwasser zugemischt. Steuerparameter ist dabei ausschließlich die Leitfähigkeit, die im AGB 2 auf 38 bis 40 mS/cm eingestellt wird. Das unvermischte MC-Abwasser besitzt eine Leitfähigkeit von 100 bis 120 mS/cm, das Kommunalabwasser hingegen nur eine Leitfähigkeit von ca. 2 mS/cm. Die aktuell erforderliche Menge an Kommunalabwasser wird im PLS aus der online gemessenen Leitfähigkeit des MC-Abwassers, dem online gemessenen Volumenstrom des MC-Abwassers und der als konstant angenommenen Leitfähigkeit des Kommunalabwassers ständig aktuell berechnet und direkt in die entsprechende Förderleistung der Kommunalabwasserpumpen umgesetzt. Das kommunale Abwasser wird im Einlauf-

gebäude nach der mechanischen Vorreinigung durch Rechen, Sandfang und Feinsiebe und nach einem Mengen- und Konzentrationsausgleich durch die beiden kommunalen Mischbehälter der bestehenden Anlage entnommen.

Bevor Kommunalabwasser in die Anaerobanlage übernommen werden kann, müssen störende Feststoffe noch weitergehender abgetrennt werden, als dies durch die mechanische Vorreinigung bereits erfolgt ist. Die nach dem Sandfang angeordnete vorhandene Feinsiebanlage hat eine Lochgröße von 3,5 mm. Um die Feststoffabtrennung für die Anaerobanlage zu verbessern, wurde eine weitere Feinsiebanlage der Fa. Huber mit einer Maschenweite von 1 mm nachgerüstet (Abb. 5).



Abb. 5: HUBER-Feinsiebanlage zur weitergehenden Feststoffabtrennung aus Kommunalabwasser, Maschenweite 1 mm.  
(Bildquelle: GWK)

Vor der Zugabe zum AGB2 passiert das Kommunalabwasser noch eine dritte Filterstufe mit einer Spaltweite von 500 µm. Dabei handelt es sich um zwei redundante BOLL-Filter (Abb. 6). Anschließend wird das Kommunalabwasser in einem Wärmetauscher mit Hilfe von Kühlwasser aus der Verbrennung auf ca. 25 °C vorgeheizt und im Normalbetrieb dann in AGB 2 eingespeist. Mit dem Kommunalabwasser werden dem Zulauf zur Anaerobanlage auch die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor zugeführt, die dem MC-Abwasser fast vollständig fehlen.

Soweit das gewünschte Nährstoffverhältnis von CSB : N : P von 800 : 5 : 1 nach Vermischung mit Kommunalabwasser noch nicht erreicht ist, werden die Nährstoffe N und P zusätzlich in Form von Harnstofflösung bzw. Phosphorsäure sowie Spuren-

elemente dosiert. Die Dosierung von Harnstoff und Phosphorsäure erfolgt aus 1.000-l-Gebinden, die auf WHG-Wannen im Pumpenhaus 5 untergebracht sind. Bedarfsweise kann in die AGB's auch Entschäumer dosiert werden. Außerdem erfolgt die Zugabe von Natronlauge, um den bei der Vorversäuerung absinkenden pH-Wert zu stabilisieren.



Abb. 6: BOLL-Filter zur Feststoffabtrennung aus dem Kommunalabwasser, Spaltweite 500  $\mu\text{m}$ .  
(Foto Sterger am 08.11.2011)

Die beiden AGB's sind so ausgerüstet, dass im Revisionsfalle jeder der beiden Tanks die Funktionen des jeweils anderen Behälters mit übernehmen kann.

Eine Pumpstation mit zwei redundanten Pumpen fördert das Abwasser im Regelfall aus dem AGB 2 über weitere Wärmetauscher zu den Anaerobreaktoren.

In den Wärmetauschern wird das Abwasser mit dem Kühlwasser der BHKW's auf die für den anaeroben Abbau optimale Temperatur gebracht (35°C bis 38°C). Reichen die Abwärme der BHKW's und die Vorwärmung des Kommunalabwassers nicht aus, kann Dampf aus der Klärschlammverbrennung über einen kurz hinter den AGB's angeordneten Injektor in den Zulauf zur Anaerobanlage eingebracht werden.



Abb. 7: Wärmetauscher 4 zur Vorwärmung des Kommunalabwassers  
(Foto Sterger am 08.11.2011)

Kurz vor Eintritt in die Anaerobanlage können dem Zulaufabwasser zur Einstellung optimaler Lebensbedingungen für die Anaeroborganismen nochmals bestimmte Chemikalien zugegeben werden:

- Kalkmilch zur Erhöhung der Ca-Konzentration für die Stabilität der Mikroorganismenpellets und zur pH-Wert-Stabilisierung,
- Gemisch aus KOH und NaOH zur pH-Wert-Stabilisierung und zur Erhöhung der Kalium-Konzentration <sup>6</sup>

und

- Eisen-II-Chlorid zur Stabilisierung der Granulastruktur und zur Bindung von Sulfid <sup>7</sup>.

Die Einmischung erfolgt über einen statischen Mischer direkt in der Rohrleitung.

Die zugehörigen Dosieranlagen und Vorratsbehälter für NaOH/KOH und FeCl<sub>2</sub> (1.000-l-Gebinde auf WHG-Wannen) sind im Wärmetauschergebäude untergebracht. Die Entnahme der Kalkmilch erfolgt im benachbarten Neutralisationsgebäude, wo die Kalkmilch als 5%ige Suspension ohnehin zur chemisch-physikalischen Vorbehandlung des industriellen Gesamtzulaufs zum GWK im Einsatz ist.

<sup>6</sup> Zur Unterstützung der Osmoregulation der Anaerobakterien wird nach Aussage des Verfahrensgebers eine Kalium-Konzentration von mindestens 120 mg/l benötigt.

<sup>7</sup> Nach Angabe des Verfahrensgebers sind 5 bis 10 mg/l Eisen erforderlich.

Ein variabler Teilstrom des Ablaufwassers der Anaerobanlage wird in den Zulauf vor der Zugabe zu den Reaktoren als Rezirkulation zurückgeführt, um eine konstante hydraulische Beschickung der Reaktoren zu erreichen. Mit Hilfe der Rezirkulation wird in den Reaktoren gemäß Empfehlung des Verfahrensgebers eine Aufströmgeschwindigkeit von 3 bis 3,5 m/h eingestellt.



Abb. 8: Wahrzeichen der neuen Vorbehandlungsanlage im GWK Bitterfeld-Wolfen: Anaerobreaktoren Aquatyx, Typ R2S  
(Bildquelle: GWK)

Wichtigster Bestandteil und Wahrzeichen der neuen Anlage für die anaerobe Abwasservorbehandlung sind drei sogenannte R2S-Reaktoren der Fa. Aquatyx (siehe Abb. 8). Die Reaktoren sind 24 m hoch, mit einem Durchmesser von 6,70 m und haben ein Nennvolumen von je 840 m<sup>3</sup>. Das für die Berechnung der Raumbelastung (vgl. 4.2.) maßgebliche Volumen beträgt 773 m<sup>3</sup> je Reaktor. Die R2S-Reaktoren sind für eine CSB-Zulaufkraft von je 10 t CSB/d ausgelegt. Obwohl für die Bemessungskraft von 20 t CSB/d die beiden in 2010/2011 errichteten Reaktoren ausreichen, wurde bis Ende Oktober 2012 noch ein dritter Reaktor aufgebaut. Damit soll weiterer Impfschlamm von anderen Anlagen an das salzreiche Abwasser adaptiert und ein Vorrat an aktiver Biomasse angelegt werden, um ggf. Pelletschlammverluste kurzfristig ausgleichen zu können. Außerdem steht damit bei Revisionen ein Reaktor als Reserve zur Verfügung.

Die Anaerobanlage ist insgesamt so angelegt, dass bei Bedarf eine spätere Erweiterung erfolgen kann.

*„Der R2S-Reaktor kann als eine Kombination von zwei übereinander aufgebauten UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)-Reaktoren betrachtet werden. Hierbei ist die untere Stufe sehr hoch belastet, die obere Stufe weist demgegenüber eine sehr niedrige Belastung auf. Eine Besonderheit dieses Reaktors ist es, dass das Biogas an zwei übereinander angeordneten Stufen innerhalb eines schlanken, hohen Reaktors abgeschieden wird. Das Gas der ersten Stufe erzeugt einen sogenannten Gaslift, der die interne Zirkulation ermöglicht.“* ([AQUATYX, 2011](#))

Funktionsweise des R2S-Reaktors:

*„Das mit dem rezirkulierten Ablaufwasser vermischte Zulaufabwasser ... gelangt durch insgesamt 40 gleichmäßig über den Trichterboden des Reaktors verteilte Einlauföffnungen (sog. Hutzen) in den Reaktor. Es vermischt sich mit dem Pelletschlamm. In der unteren Hochlastzone wird der größte Teil der CSB-Fracht abgebaut, denn in dieser Stufe liegen die Pellets in hoher Konzentration vor. Durch den Zulaufvolumenstrom wird im Reaktor eine Aufströmgeschwindigkeit von 3 - 5 m/h eingestellt. Dadurch werden die Pellets in Schwebelage gehalten und es kommt zu einer intensiven Durchmischung von Schlamm und Wasser. Wenn die Schmutzstoffe zu Biogas umgesetzt werden, steigt das Biogas auf. Dabei reißt es Schlamm- und Wasserpartikel mit sich. An der unteren Trenneinrichtung, die sich in ca. 18 m Höhe befindet, wird das Biogas vom Schlamm/Wasser-Gemisch getrennt, in Gashauben gesammelt und durch die Steigleitung zum Gasabscheider geleitet. Im oberen Bereich des Reaktors (Schwachlaststufe) erfolgt nur noch eine geringe CSB-Umsetzung. Es liegt eine niedrige Biomassekonzentration vor. Die obere Trenneinrichtung dient zum Rückhalt der verbliebenen Pellets und der Abscheidung des restlichen Biogases. Das gereinigte Abwasser verlässt den Reaktor über Ablaufrinnen. Durch die hohe Aufströmgeschwindigkeit des Biogases wird in der Steigleitung auch Schlamm und Wasser zum Gasabscheider gefördert (Gaslift-Prinzip). Im Gasabscheider wird das Gas von dem Schlamm/Wasser-Gemisch getrennt. Das Biogas wird abgeführt und das Schlamm/Wasser-Gemisch wird über die Falleitung zurück in den Einlaufbereich transportiert. Dadurch entsteht die gasgetriebene interne Zirkulation des Reaktors. Diese ist umso intensiver, je höher die Belastung des Reaktors und damit die Gasproduktion ist.“* ([OEPPERT, 2011](#))

Wichtigste Voraussetzung für eine wirtschaftliche Betriebsweise von UASB- oder EGSB-Reaktoren ist das Vorhandensein einer ausreichenden Menge von granuliertem körnigem Schlamm (Schlamm pellets). Dies erlaubt hohe Biomassekonzentrationen und ein hohes Schlammalter.

Schlamm pellets bilden sich aus, indem anaerobe Mikroorganismen auf einem Calciumcarbonatgerüst siedeln. Ihr Durchmesser liegt zwischen 0,5 und 3 mm. Die Pellets (oder Granules) konzentrieren sich jeweils im unteren Teil eines Schlammbettreaktors. Bei der Vergärung des von unten zugeführten Substrats wird Biogas freigesetzt, das zunächst an den Pellets haftet. Damit verringert sich ihr spezifisches Gewicht und sie steigen in den oberen Teil des Reaktors auf, wo sie auf die Trenneinrichtung treffen. Dort geben sie das Biogas ab und sinken wieder nach unten.

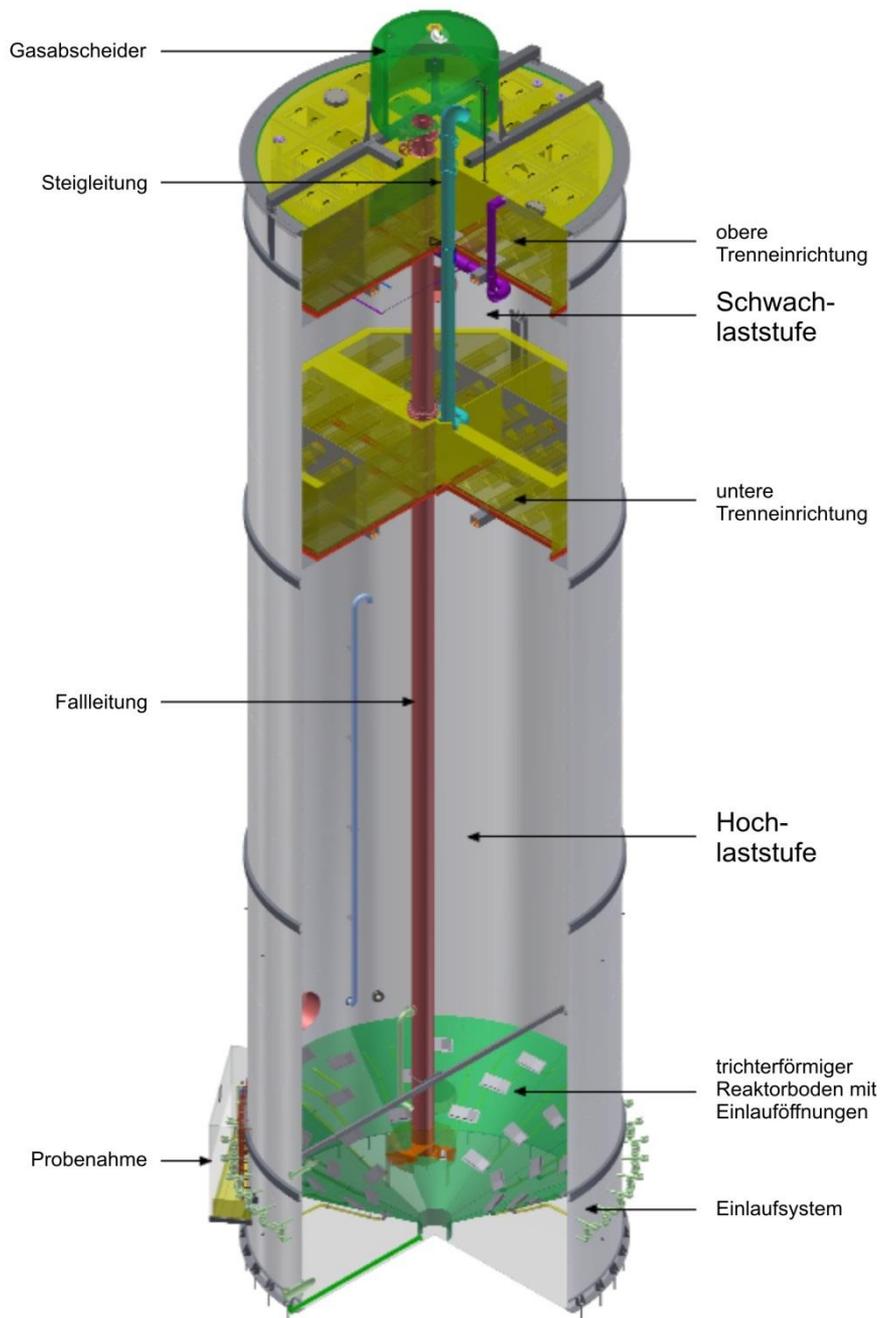


Abb. 9: Blick in das Innere eines R2S-Reaktors  
(Quelle: Fa. Aquatyx Wassertechnik GmbH)

Eine zügige Inbetriebnahme eines Schlammbettreaktors ist nur dann möglich, wenn die Reaktoren mit ausreichend granulierter Biomasse als Impfschlamm befüllt und nach und nach an das zu behandelnde Abwasser adaptiert werden. Aufgrund der geringen Wachstumsgeschwindigkeit der Anaeroborganismen (vgl. 2.2.) würde es viel zu lange dauern, die für den Abbauprozess benötigte Biomasse selbst anzuzüchten. Aus diesem Grund wurden die Reaktoren 1 und 2 im März/April 2011 im Rahmen der Inbetriebnahme mit insgesamt 34 LKW-Ladungen Pelletschlamm aus ande-

ren UASB-Reaktoren (hauptsächlich Papierindustrie) angeimpft und über einen Zeitraum von etwa drei Monaten an eine Leitfähigkeit von 40 mS/cm angepaßt.

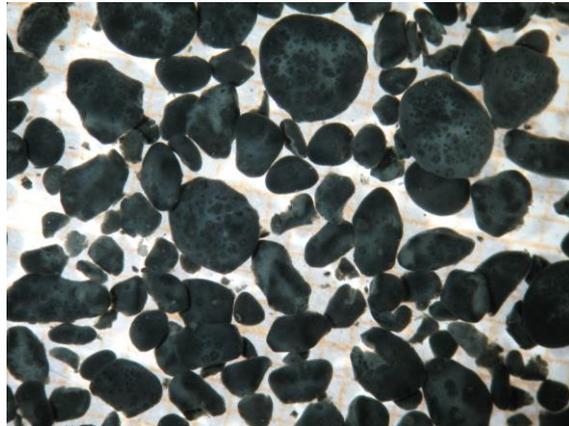


Abb. 10: Schlamm pellets des Impfschlammes zur Inbetriebnahme der Reaktoren 1 und 2; Raster 1 mm x 1 mm (Bildquelle: GWK)

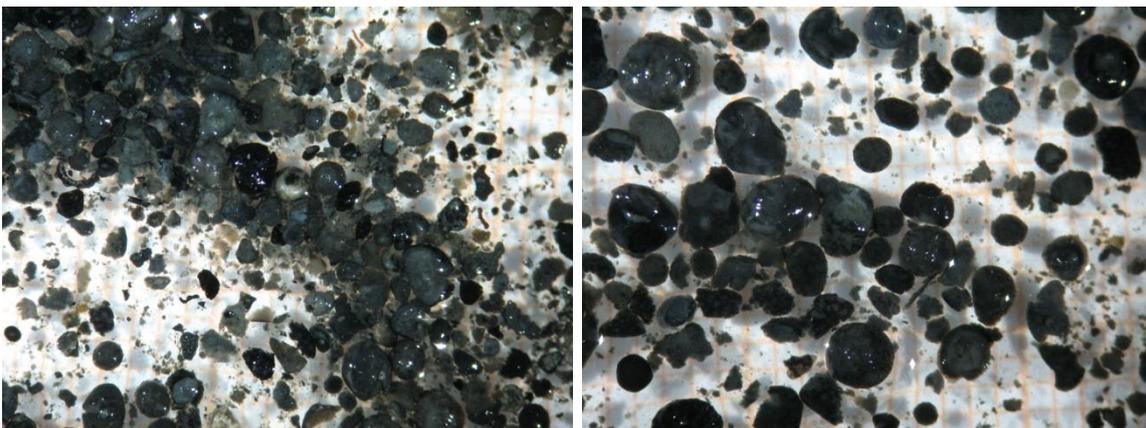


Abb. 11: Schlamm pellets der Anaerobreaktoren am 19.06.2012, links: AR 1, Probenahmestelle 1 in 2,7 m Höhe / rechts: AR 2, Probenahmestelle 2 in 6,0 m Höhe; Raster: 1 mm x 1 mm. (Bildquelle: GWK)

Nach der Intention des Verfahrensgebers soll aufgrund der hohen Aufströmgeschwindigkeit leichte, frei suspendierte Biomasse mit dem Ablauf aus dem Reaktor ausgeschwemmt werden, so dass eine „...Selektion der zur Pelletbildung befähigten Mikroorganismen...“ eintritt ([OEPPERT, 2011](#)) und sich nach und nach immer stabilere Pellets mit einer dichten Besiedlung anaerob aktiver Mikroorganismen herausbilden. Wie bei den Schlammspiegelmessungen und visueller Begutachtung entnommener Feststoffproben festgestellt werden musste, ist dieses Konzept leider nicht vollständig aufgegangen. Gegenüber der Beschaffenheit des Impfschlammes hat sich die Größe der Pellets nach mehr als einjährigem Betrieb der Anlage verringert (vgl. Abb. 10, Abb. 11, Abb. 12 und Abb. 13).

Während in AR 2 das Schlammbett gut expandiert ist und auch noch in 6,0 m Höhe eine hinreichende Dichte an Pellets angetroffen wird (siehe Abb. 13), reicht das

Schlammbed in AR 1 kaum bis in diese Höhe. Hinzu kommt, dass die Biomasse in AR 1 offenbar weniger gut agglomeriert (vgl. Abb. 11) und „...dass mit dem Impfschlamm auch viel anorganisches Material in den Reaktor (AR 1) gelangt ist“, welches anhand der zahlreichen kleinen hellen Partikel in den Proben zu erkennen ist ([SCHÖNBORN, 2012](#)).

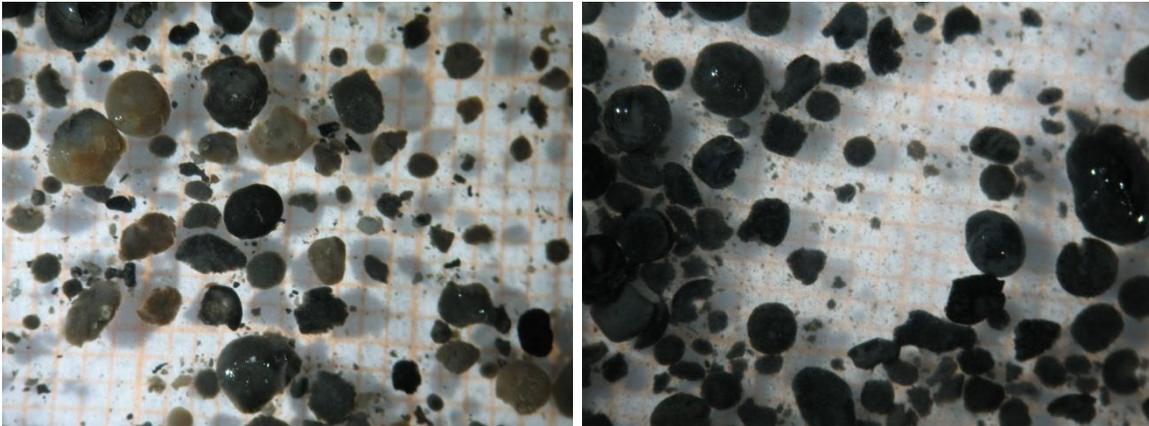


Abb. 12: Schlamm pellets der Anaerobreaktoren am 30.07.2012, links: AR 1, Probenahmestelle 1 in 2,7 m Höhe / rechts: AR 2, Probenahmestelle 1 in 2,7 m Höhe; Raster: 1 mm x 1 mm. (Bildquelle: GWK)

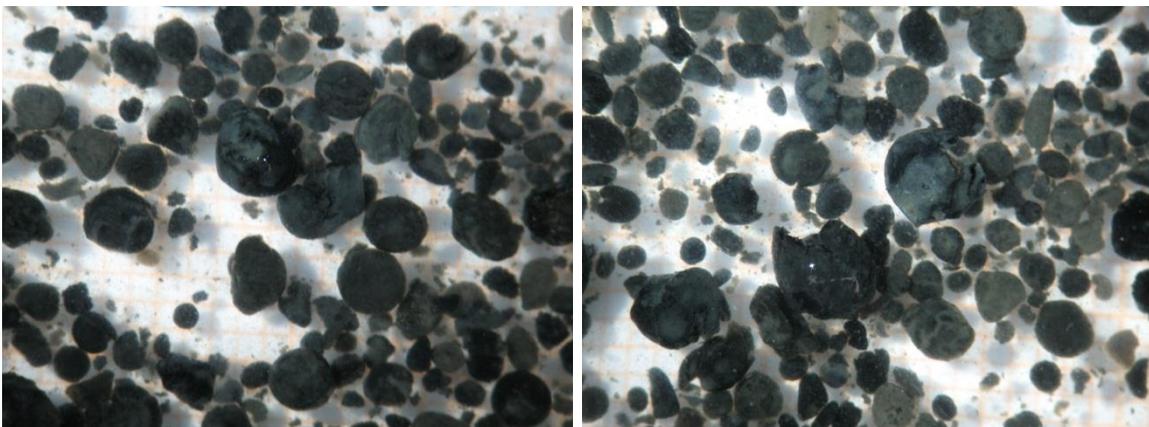


Abb. 13: Schlamm pellets des Anaerobreaktors AR 2 am 30.07.2012, beide Aufnahmen Probenahmestelle 2 in 6,0 m Höhe; Raster: 1 mm x 1 mm. (Bildquelle: GWK)

Die Hauptursache für den Größenverlust der Pellets und den mangelnden Zuwachs ist wahrscheinlich die hohe Salzkonzentration, bei der der Prozess betrieben wird.

„Hohe ... NaCl-Konzentrationen (> 13-15 g/l) hemmen die Granules-Bildung.“ [AUSTER-MANN-HAUN et al., 1993](#)

[JEISON et al., 2008](#) betrieben Laborreaktoren bei Natriumkonzentrationen zwischen 1,25 und 12 g Na<sup>+</sup>/l (entspricht 3,2...30 g NaCl/l) und stellten eine Abnahme der Festigkeit der Granula sowie eine Verringerung ihrer Größe im Langzeitbetrieb fest. Wei-

terhin berichten die Autoren von einem holländischen UASB-Reaktor, in dem bei einer Natriumkonzentration von 10 g/l (entspricht 25 g/l NaCl) die Granula lediglich eine mittlere Größe von nur 0,31 mm erreichten. Als Ursache für die geringe Stabilität und Größe der Granula wird die Verdrängung von Calcium durch Natrium angesehen.

*„High sodium concentrations may affect sludge strength by replacing calcium from the granules matrix.“ [JEISON et al., 2008](#)*

Der Ablauf der Anaerobreaktoren 1 und 2 gelangt zunächst in ein Standrohr, das sich als hohe, schmale Röhre (Volumen: 25 m<sup>3</sup>) zwischen den beiden Reaktoren befindet. Es dient einerseits als Vorlage für die Rezirkulation von Ablaufwasser in den Zulauf der Reaktoren (s.o.). Aus dem oberen Bereich des Standrohres läuft andererseits der Ablauf der Anaerobstufe im freien Gefälle entweder in den BHR 1 oder in die BHR 3 und 4.



Abb. 14: Turmkolonne für die Biogasentschwefelung (rechts) und Gebäude für BHKW (Erdgeschoß) und Gasspeicher (Obergeschoß)  
(Foto Sterger am 28.02.2011)

Das im Zulauf zur Anaerobanlage enthaltene Sulfat, das hauptsächlich aus dem kommunalen Abwasser stammt, wird in der Anaerobstufe zu Sulfid bzw. Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) reduziert. In Abhängigkeit vom pH-Wert verbleibt ein Teil des Schwefelwasserstoffs als gelöstes Sulfid im Reaktorablauf und wird in der nachgeschalteten aeroben Endreinigung oxidiert.

Das gewonnene Biogas enthält bis zu 7.000 ppm an H<sub>2</sub>S (im Mittel 3.000 bis 5.000 ppm). Deshalb wird das Gas einer biologischen Entschwefelungsanlage zugeführt (siehe Abb. 14). Diese arbeitet als kontinuierliche Tropfkörper-/Rieselbetтанlage mit

speziell für diesen Fall selektierten Mikroorganismen der Gattung Thiobacillus (thiooxidans/ferrooxidans) [DWA-M 361, 2010](#). Für den Fall, dass die biologische Entschwefelung nicht ausreicht, besteht die Möglichkeit einer zusätzlichen chemischen Biogasreinigung in einem chemischen Wäscher durch Zugabe von Natronlauge, wobei die Elimination von H<sub>2</sub>S durch Bildung von Natriumsulfid und Natriumhydrogensulfid erfolgt, die als wässrige Lösung ausgeschleust werden.

Die Speicherung des aufbereiteten Biogases erfolgt in zwei Gasspeicherkissen, die im Obergeschoß des BHKW-Gebäudes untergebracht sind (Abb. 14).

Weitere Aufbereitungsschritte für das in der anaeroben Abwasserreinigung gewonnene Biogas sind Trocknung und Druckerhöhung sowie Aktivkohlefiltration zur Feinreinigung bzw. Siloxan-Entfernung (siehe Abb. 15 und Abb. 16).



Abb. 15: Aktivkohlefilter zur Biogasreinigung (Hintergrund: BIOHOCH<sup>®</sup>-Reaktor 1)  
(Foto Sterger am 08.11.2011)

Bei der Verstromung sind die einschlägigen Qualitätsanforderungen an das Biogas zu beachten, z. B. in Bezug auf Schwefelwasserstoff, Halogene, Summe der organischen Siliziumverbindungen (Siloxane), Feuchtigkeitsgehalt, Methangehalt und Heizwert (Quelle: Herstellerangaben BHKW, [DWA-M 361, 2010](#)). Soweit das Biogas die Qualitätsanforderungen nicht erfüllt, muss es in der Fackel (siehe Abb. 17) verbrannt werden. Dies stellt aber den absoluten Ausnahmefall dar, der bisher lediglich beim Anfahren der Anaerobreaktoren oder in der Phase des „Nachgasens“ bei betriebsbedingter Unterbrechung der Abwasserbeschickung aufgetreten ist.



Abb. 16: Biogastrocknung und -druckerhöhung  
(Foto Sterger am 08.11.2011)



Abb. 17: Fackel und Kontrollstation (im Hintergrund Anaerob-Reaktoren)  
(Bildquelle: GWK)

Letzte Station der Anaerobanlage sind die Blockheizkraftwerke (BHKW's). Hauptzweck des Betriebs der BHKW's ist die Umwandlung des im Biogas enthaltenen Methans in elektrische Energie und nutzbare Wärme (Kraft-Wärme-Kopplung). Die gemeinsame Nutzung von elektrischer Energie und Wärme führt zu einem hohen Primärenergieausnutzungsgrad ([ATV-DVWK-M 363, 2002](#)). Bei Biogasmangel, z. B. bei der Erst- oder Wiederinbetriebnahme der Anlage, können die BHKW's zum Aufheizen der Reaktoren mit Erdgas betrieben werden.



Abb. 18: BHKW's  
(Foto Sterger am 28.02.2011)

Im Betrieb der Anaerobanlage wird eine höhere Biogausbeute erreicht, als bei der Planung der Anlage zugrunde gelegt wurde (Näheres hierzu siehe Abschnitt 5.7.). Infolgedessen wurde im April 2012 ein viertes BHKW nachgerüstet (Leistung der 4 BHKW's: je 280 kW-el). Ursprünglich waren insgesamt drei BHKW's mit einer elektrischen Leistung von je 360 kW geplant.

Abb. 18 auf der folgenden Seite zeigt die Anordnung der maßgeblichen Messstellen für den Betrieb der Anaerobanlage.

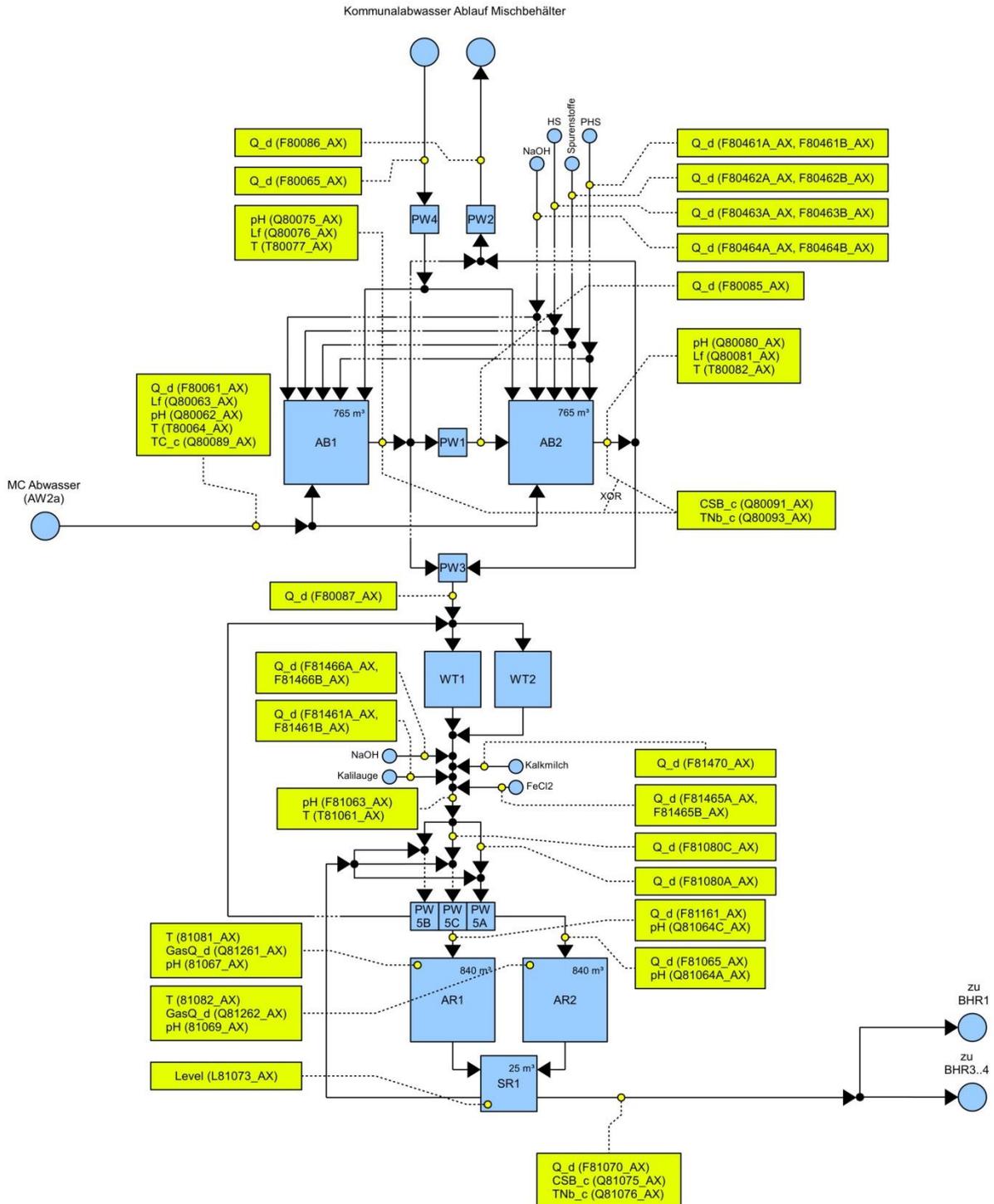


Abb. 19: Skizze zur Anordnung der maßgeblichen Messstellen für den Betrieb der Anaerobanlage (bereitgestellt von AquaTune GmbH, aktualisiert nach Auskunft des GWK)

## **4. Vergleich von Betriebsdaten mit Auslegungswerten**

Im folgenden Abschnitt werden die bei der Vorbereitung bzw. Bauplanung der Anlage zugrunde gelegten Auslegungswerte den Werten gegenübergestellt, die beim bisherigen Betrieb der Anlage erreicht wurden. Als Auslegungswerte werden jene herangezogen, die im Rahmen der Funktionalausschreibung von Stulz-Planqua verbindlich benannt wurden. Diese beruhen auf Berechnungen des mit der Planung und Ausschreibung beauftragten Ingenieurbüros.

Zum Vergleich wird im Wesentlichen der Zeitraum vom 1. November 2011 bis 30. September 2012 herangezogen, in dem die Anaerobanlage - mit Ausnahme der Zeit vom 26. Februar bis 2. März 2012 - kontinuierlich betrieben wurde.

Wegen einer Rohrleitungshavarie auf dem Industriepark-Areal musste die Beschickung der Anaerobanlage am 26. Februar 2012 abends eingestellt werden. Erst nachdem der Rohrschaden am 2. März provisorisch beseitigt war, stand wieder Methylcelluloseabwasser zur Verfügung. Soweit die Messungen während der Störung nicht ohnehin ausgesetzt waren, wurden die Messwerte bei den nachfolgenden Vergleichen ausgeblendet (vgl. z. B. Abb. 20). Auch unmittelbar danach waren noch gewisse Beeinflussungen einiger Messwerte zu verzeichnen, die jedoch durch Handkorrekturen ausgeräumt werden konnten.

Sämtliche Berechnungen und Grafiken dieses Kapitels basieren auf Excel-Tabellen mit Daten und Messwerten zum Betrieb der Anaerobanlage, die den Verfassern vom GWK zur Verfügung gestellt wurden (siehe Tab. 1 auf S. 35 und Tab. 2 auf S. 36).

**Tab. 1: Betriebsdaten der Anaerobanlage im Zeitraum 1. November 2011 bis 30. September 2012 – Teil A**

	CSB-Zulauffracht zur Anaerobanlage	CSB-Ablaufracht Anaerobanlage (Mittelwert ca. 31 %)	Abgebaute CSB-Fracht Anaerobanlage (Mittelwert ca. 69 %)	Biogas zu BHKW/Fackel (Summenmessung vor BHKW und Fackel)	Biogasverluste (z. B. Fackel)	Biogasverbrauch der BHKWs	Erdgasverbrauch der BHKW'S
<b>Summe bzw. Mittelwert</b>	3.583.799 kg CSB	1.117.711 kg CSB	2.466.088 kg CSB	1.356.444 Nm <sup>3</sup> Biogas	73.352 Nm <sup>3</sup> Biogas	1.283.092 Nm <sup>3</sup> Biogas	144.086 Nm <sup>3</sup> Erdgas
<b>Mittelwert je Tag - CSB</b>	10.698 kg CSB/d	3.336 kg CSB/d	7.361 kg CSB/d				
<b>Mittelwert je Tag - Biogas bzw. Erdgas</b>			4.049 Nm <sup>3</sup> Biogas/d	4.049 Nm <sup>3</sup> Biogas/d	219 Nm <sup>3</sup> Biogas/d	3.830 Nm <sup>3</sup> Biogas/d	430 Nm <sup>3</sup> Erdgas/d
<b>Mittelwert je Tag - Methan</b>			2.751 Nm <sup>3</sup> Methan/d	2.751 Nm <sup>3</sup> Methan/d	149 Nm <sup>3</sup> Methan/d	2.602 Nm <sup>3</sup> Methan/d	
<b>Mittelwert je Tag - Energie</b>				27.425 kWh/d	1.483 kWh/d	25.942 kWh/d	
<b>Nov 11</b>	396.028 kg CSB	152.002 kg CSB	244.026 kg CSB	122.831 Nm <sup>3</sup>	331 Nm <sup>3</sup>	122.500 Nm <sup>3</sup>	0 Nm <sup>3</sup>
<b>Dez 11</b>	273.129 kg CSB	110.368 kg CSB	162.761 kg CSB	86.107 Nm <sup>3</sup>	-416 Nm <sup>3</sup>	86.523 Nm <sup>3</sup>	29.533 Nm <sup>3</sup>
<b>Jan 12</b>	370.709 kg CSB	137.997 kg CSB	232.712 kg CSB	119.562 Nm <sup>3</sup>	689 Nm <sup>3</sup>	118.873 Nm <sup>3</sup>	17.783 Nm <sup>3</sup>
<b>Feb 12</b>	228.065 kg CSB	63.601 kg CSB	164.465 kg CSB	87.536 Nm <sup>3</sup>	813 Nm <sup>3</sup>	86.723 Nm <sup>3</sup>	36.291 Nm <sup>3</sup>
<b>Mrz 12</b>	328.124 kg CSB	104.973 kg CSB	223.151 kg CSB	121.345 Nm <sup>3</sup>	5.241 Nm <sup>3</sup>	116.104 Nm <sup>3</sup>	7.300 Nm <sup>3</sup>
<b>Apr 12</b>	319.747 kg CSB	92.085 kg CSB	227.662 kg CSB	126.127 Nm <sup>3</sup>	10.836 Nm <sup>3</sup>	115.291 Nm <sup>3</sup>	44.162 Nm <sup>3</sup>
<b>Mai 12</b>	370.251 kg CSB	101.305 kg CSB	268.946 kg CSB	148.201 Nm <sup>3</sup>	17.120 Nm <sup>3</sup>	131.081 Nm <sup>3</sup>	8.941 Nm <sup>3</sup>
<b>Jun 12</b>	346.752 kg CSB	98.718 kg CSB	248.034 kg CSB	139.725 Nm <sup>3</sup>	9.884 Nm <sup>3</sup>	129.841 Nm <sup>3</sup>	0 Nm <sup>3</sup>
<b>Jul 12</b>	294.419 kg CSB	76.686 kg CSB	217.733 kg CSB	126.032 Nm <sup>3</sup>	9.342 Nm <sup>3</sup>	116.690 Nm <sup>3</sup>	76 Nm <sup>3</sup>
<b>Aug 12</b>	325.474 kg CSB	91.779 kg CSB	233.694 kg CSB	141.370 Nm <sup>3</sup>	10.073 Nm <sup>3</sup>	131.297 Nm <sup>3</sup>	0 Nm <sup>3</sup>
<b>Sep 12</b>	331.101 kg CSB	88.198 kg CSB	242.904 kg CSB	137.607 Nm <sup>3</sup>	9.437 Nm <sup>3</sup>	128.170 Nm <sup>3</sup>	0 Nm <sup>3</sup>

**Tab. 2: Betriebsdaten der Anaerobanlage im Zeitraum 1. November 2011 bis 30. September 2012 – Teil B**

	Elektr. Arbeit BHKWs im Biogasbetrieb	Thermische Leistung BHKWs im Biogasbetrieb (= 45%)	Verluste BHKWs	Eigenverbrauch Elektroenergie Anaerobanlage	Nettogewinn Elektroenergie im Biogasbetrieb	Elektr. Arbeit BHKWs im Erdgasbetrieb	Anteil Erdgas an Elektroenergie- erzeugung der BHKWs	Thermische Leistung BHKWs im Erdgasbetrieb
<b>Summe bzw. Mittelwert</b>	3.098.533 kWh	3.910.690 kWh	1.681.199 kWh	899.192 kWh	2.199.340 kWh	437.384 kWh	12,4%	552.098 kWh
<b>Mittelwert je Tag - CSB</b>								
<b>Mittelwert je Tag - Biogas bzw. Erdgas</b>								
<b>Mittelwert je Tag - Methan</b>								
<b>Mittelwert je Tag - Energie</b>	9.249 kWh/d	11.674 kWh/d	5.019 kWh/d	2.684 kWh/d	6.565 kWh/d	1.306 kWh/d		1.648 kWh/d
<b>Nov 11</b>	303.841 kWh	373.363 kWh	152.492 kWh	84.498 kWh	219.343 kWh	0 kWh	0,0%	0 kWh
<b>Dez 11</b>	203.429 kWh	263.710 kWh	118.883 kWh	84.606 kWh	118.823 kWh	64.972 kWh	24,2%	82.012 kWh
<b>Jan 12</b>	289.356 kWh	362.308 kWh	153.464 kWh	92.680 kWh	196.677 kWh	129.475 kWh	30,9%	163.433 kWh
<b>Feb 12</b>	205.268 kWh	264.318 kWh	117.788 kWh	86.812 kWh	118.456 kWh	110.402 kWh	35,0%	139.358 kWh
<b>Mrz 12</b>	280.716 kWh	353.869 kWh	151.790 kWh	84.314 kWh	196.402 kWh	18.389 kWh	6,1%	23.211 kWh
<b>Apr 12</b>	283.562 kWh	351.390 kWh	145.915 kWh	80.974 kWh	202.588 kWh	95.469 kWh	25,2%	120.507 kWh
<b>Mai 12</b>	329.408 kWh	399.516 kWh	158.890 kWh	79.774 kWh	249.634 kWh	18.297 kWh	5,3%	23.096 kWh
<b>Jun 12</b>	312.824 kWh	395.738 kWh	170.855 kWh	76.086 kWh	236.738 kWh	2 kWh	0,0%	2 kWh
<b>Jul 12</b>	269.948 kWh	355.656 kWh	164.742 kWh	75.795 kWh	194.153 kWh	379 kWh	0,1%	478 kWh
<b>Aug 12</b>	310.504 kWh	400.176 kWh	178.601 kWh	78.413 kWh	232.090 kWh	0 kWh	0,0%	0 kWh
<b>Sep 12</b>	309.677 kWh	390.644 kWh	167.778 kWh	75.241 kWh	234.436 kWh	0 kWh	0,0%	0 kWh

#### **4.1. CSB-Zulaufrecht**

Bei der Planung der Anlage wurde davon ausgegangen, dass eine Zulaufrecht von 10 t CSB/d je Anaerobreaktor, mithin insgesamt 20 t CSB/d, im späteren Endausbauzustand sogar 40 t CSB/d, behandelt werden können.

Aufgrund der sich im laufenden Betrieb eingestellten verringerten Menge an Biomasse in den Reaktoren (vgl. Abschnitt 4.9.) konnte diese Zulaufrecht im betrachteten Zeitraum nicht realisiert werden. Tatsächlich summierte sich die Zulaufrecht im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012 auf insgesamt 3.583.799 kg CSB (vgl. Tab. 1). Daraus errechnet sich

$$\varnothing \text{ CSB-Zulaufrecht} = \frac{3.583.799 \text{ kg CSB}}{335 \text{ d}} \cong \underline{\underline{10.698 \text{ kg CSB/d}}}$$

Die im Dauerbetrieb zugeführte CSB-Zulaufrecht liegt somit bei rund 11 t/d, wobei etwa 5 t/d auf Reaktor 1 und 6 t/d auf Reaktor 2 entfallen (siehe Abb. 19).

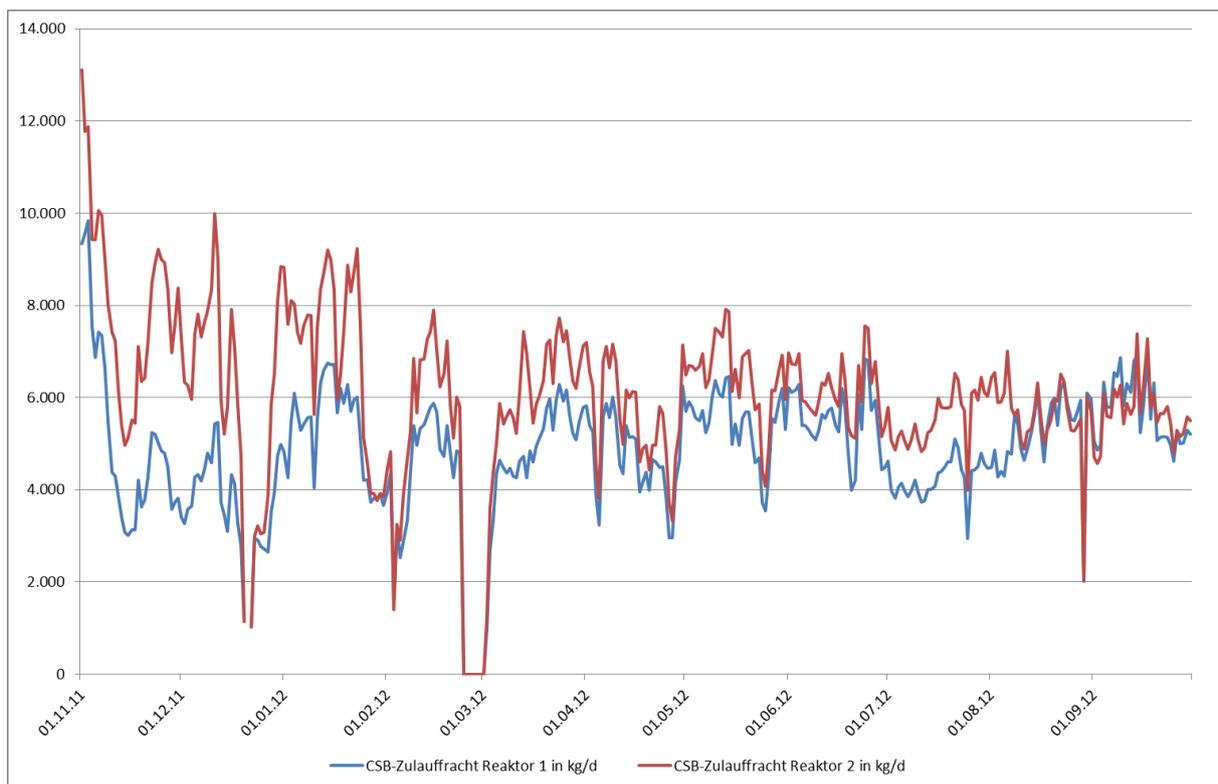


Abb. 20: CSB-Zulaufrechten in kg/d der Reaktoren 1 und 2 im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012

Der Bemessungswert von 20 t CSB/d wurde also nur zu etwa 54% erreicht.

## 4.2. Raumbelastung

Um die Leistungsfähigkeit der anaeroben Biozönose in den Anaerobreaktoren zu erhalten, dürfen Mengen- oder Belastungsschwankungen ein bestimmtes Maß nicht überschreiten. Als wichtige Steuergröße hierfür gilt die maximale Raumbelastung, die mit der Mindestverweilzeit (vgl. Abschnitt 4.10.) korrespondiert. Die Raumbelastung einer Anlage ist der Quotient aus aufgeleiteter Fracht und dem jeweiligen Reaktorvolumen.

$$\text{Raumbelastung (in kg/m}^3 \cdot \text{d)} = \frac{\text{Zulauf fracht [kg/d]}}{\text{Reaktorvolumen [m}^3\text{]}}$$

Der Auslegungswert der CSB-Raumbelastung der Anaerobanlage des GWK beträgt 12,9 kg CSB/(m<sup>3</sup> \* d).

Die mittlere Raumbelastung der Anlage den Zeitraum 1.11.2011 bis 30.09.2012 betrug

$$\varnothing \text{ Raumbelastung}_{\text{CSB}} = \frac{10.698 \text{ kg CSB/d}}{2 * 773 \text{ m}^3} \sim \underline{\underline{6,9 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 * \text{d})}}$$

Die realisierte Raumbelastung erreicht demnach etwas mehr als die Hälfte des Auslegungswertes.

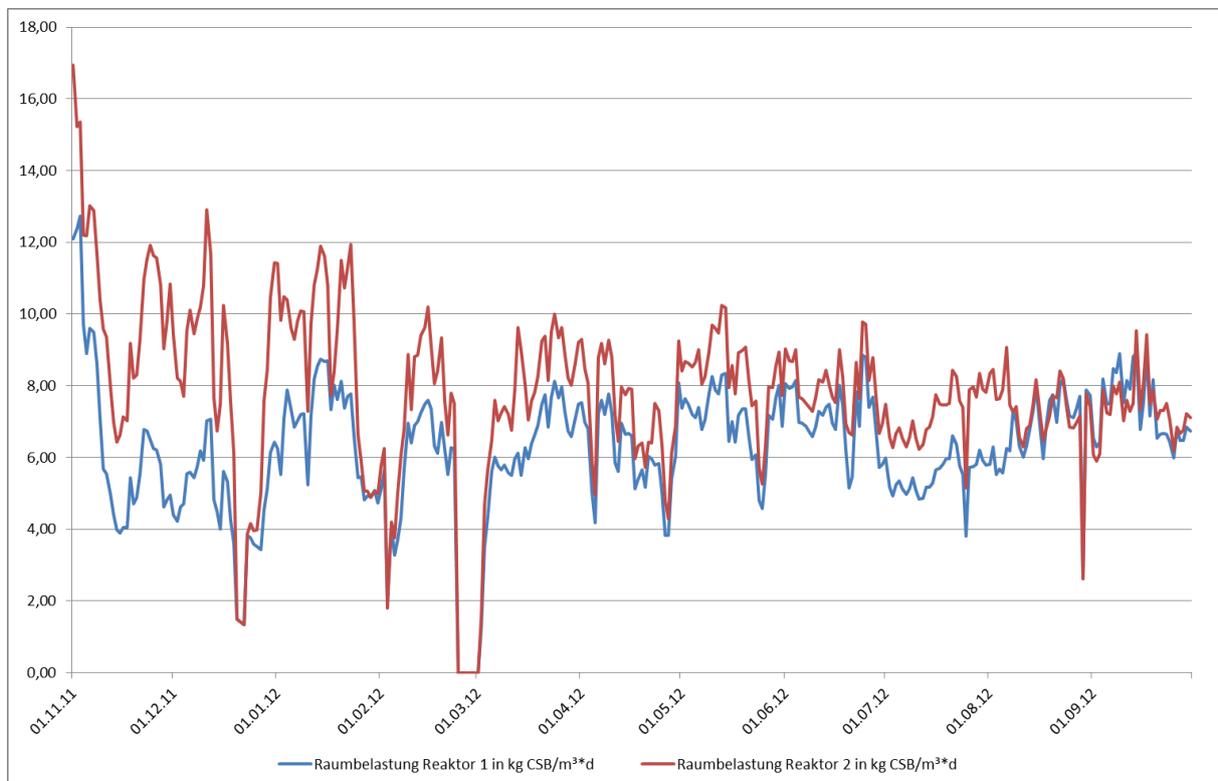


Abb. 21: CSB-Raumbelastung der Reaktoren 1 und 2 im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.09.2012

Während des Probetriebs der Anaerobanlage vom 20.10.2011 bis 03.11.2011 wurde die Anlage mit einer Raumbelastung von 12,9 kg CSB/(m<sup>3</sup> \* d) betrieben, in den letzten Tagen des Probetriebs sogar mit einer Raumbelastung von 15 kg CSB/(m<sup>3</sup> \* d). Unter diesen Bedingungen kam es jedoch zu einem erhöhten Feststoffabtrieb, messbar an einer erhöhten Konzentration an absetzbaren und abfiltrierbaren Stoffen im Ablauf.

Festzuhalten ist außerdem, dass sich die Raumbelastung zwischen den beiden Reaktoren deutlich unterscheidet. Die mittlere CSB-Raumbelastung in Reaktor 1 beträgt nur etwa  $\frac{3}{4}$  von Reaktor 2. Dies zeigt sich auch in der grafischen Auswertung der Daten aus dem Betriebstagebuch des GWK (Abb. 21).

Ursache hierfür ist eine schlechtere Impfschlammqualität im Reaktor 1. Dadurch kam es bei Reaktor 1 in der Einfahrphase zu höheren Biomasseverlusten, so dass der AR 1 fast über den gesamten betrachteten Betriebszeitraum hinweg eine geringere Menge an organischer Trockensubstanz (oTS) enthielt.

### **4.3. Schlammbelastung**

Die Schlammbelastung einer Anlage ist der Quotient aus zugeführter Fracht und der Biomasse im Reaktor, ausgedrückt als Masse an oTS. Alternativ kann die Schlammbelastung ermittelt werden, indem die Raumbelastung durch die Biomasse je Volumeneinheit (ausgedrückt z. B. als kg oTS/m<sup>3</sup>) dividiert wird.

Schlammbelastung (in kg/kg oTS * d)	$= \frac{\text{Zulauf fracht [kg/d]}}{\text{Biomasse im Reaktor [kg oTS]}}$
	$= \frac{\text{Raumbelastung [kg/m}^3 \text{ * d]}}{\text{Biomasse je Volumeneinheit [kg oTS/m}^3 \text{]}}$

Der Auslegungswert der Schlammbelastung der Anaerobreaktoren im GWK ist 0,5 kg CSB/(kg oTS \* d).

Die tatsächliche Schlammbelastung der Anaerobanlage bezogen auf CSB ergibt sich als gewichtetes Mittel aus der Schlammbelastung für Reaktor 1 + Reaktor 2. Für den Zeitraum 1.11.2011 bis 30.09.2012 gilt

$$\begin{aligned}
 \varnothing \text{ Schlammbelastung}_{\text{CSB}} &= \frac{\frac{6,23 \text{ kg CSB/m}^3 \cdot \text{d}}{10.008 \text{ kg oTS/773 m}^3} + \frac{7,82 \text{ kg CSB /m}^3 \cdot \text{d}}{12.737 \text{ kg oTS/773 m}^3}}{2} \\
 &= \frac{\frac{4.844 \text{ kg CSB/d}}{10.008 \text{ kg oTS}} + \frac{6.059 \text{ kg CSB/d}}{12.737 \text{ kg oTS}}}{2} \sim \frac{0,48 + 0,48}{2} \\
 &\sim \underline{\underline{\mathbf{0,48 \text{ kg CSB/(kg oTS * d)}}}}
 \end{aligned}$$

Die im Betrieb erreichte Schlammbelastung weicht demzufolge nur unwesentlich vom Bemessungswert ab. Durch die differenzierte Einstellung der Zulaufmengen zu den beiden Reaktoren (d.h. der unterschiedlichen Einstellung der Raumbelastung für Re-

aktor 1 und 2) wurde angestrebt, die Abweichungen vom Bemessungswert der Schlammbelastung in den einzelnen Reaktoren gering zu halten (vgl. Abb. 22).

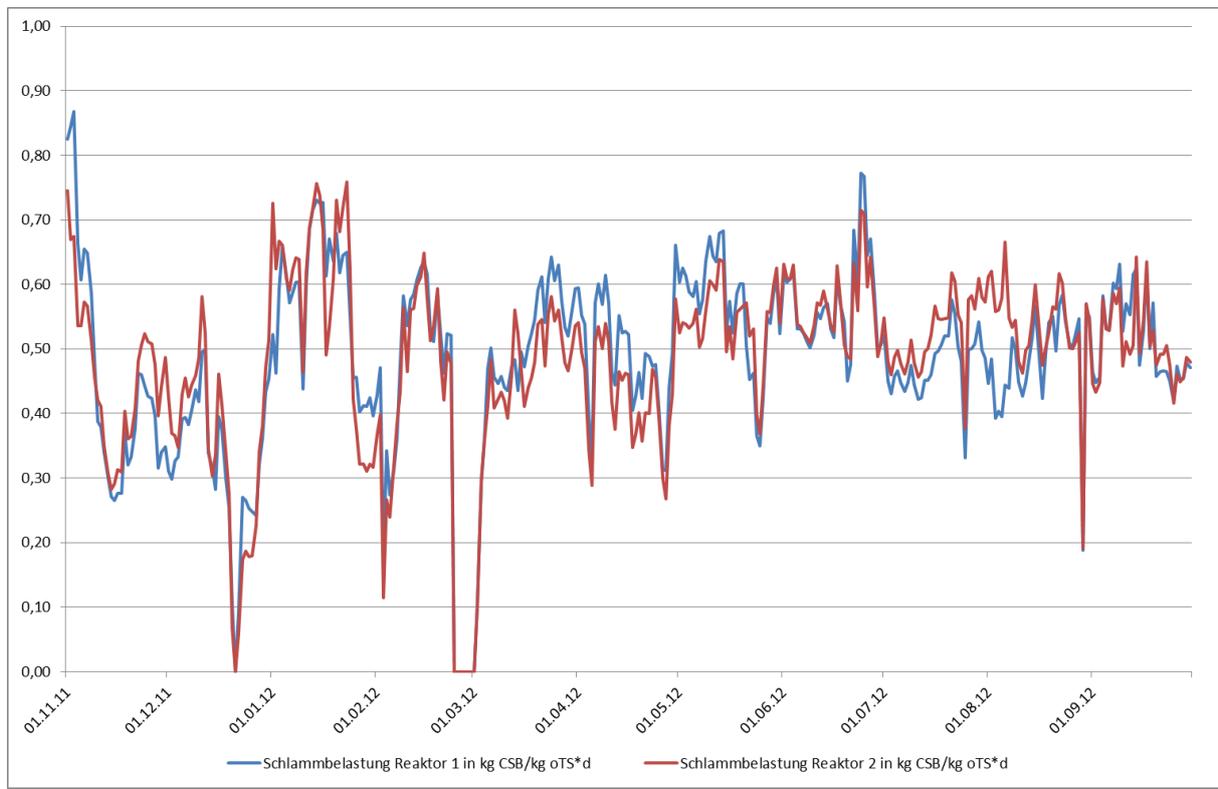


Abb. 22: CSB-Schlammbelastung der Reaktoren 1 und 2 im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.09.2012

#### **4.4. CSB-Abbauleistung und CSB-Abbaugrad**

Die aufgrund der Anlagenauslegung erwartete CSB-Abbauleistung beträgt 12 t CSB/d, was bei einer Zulaufkraft von 20 t/d einem Abbaugrad von 60% entspricht.

Aus den Angaben in Tab. 1 ergibt sich im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012 als Mittelwert der abgebauten CSB-Fracht

$$\frac{2.466.088 \text{ kg CSB}}{335 \text{ d}} \cong \underline{\underline{7.361 \text{ kg CSB/d}}}$$

Der CSB-Eliminierungsgrad lag im betrachteten Zeitraum bei

$$\frac{2.466.088 \text{ kg CSB}}{3.583.799 \text{ kg CSB}} \cong \underline{\underline{68,8\%}}$$

Obwohl der CSB-Eliminierungsgrad deutlich über dem Bemessungswert liegt, konnte die geplante CSB-Abbaufracht aufgrund der im Betrachtungszeitraum vorhandenen Biomassemenge nicht erreicht werden.

Die erreichten CSB-Abbauleistungen im Verlauf des betrachteten Zeitraums sind der folgenden Abb. 23 zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass die prozentuale Elimina-

tionsleistung zu Beginn des betrachteten Zeitraums niedriger war, während seit April 2012 fast ständig ein Abbau von über 70% gemessen werden konnte.

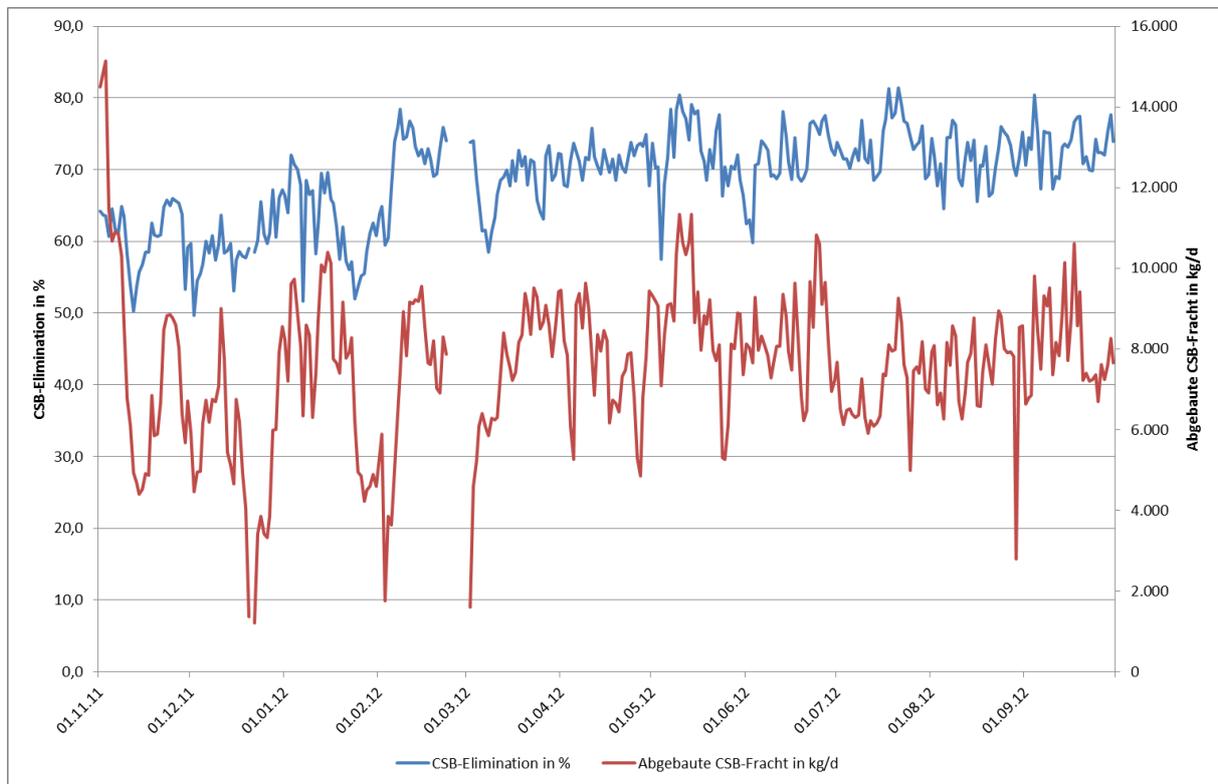


Abb. 23: CSB-Abbauleistung der anaeroben Vorbehandlungsanlage im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012

Die folgende Abbildung verdeutlicht den engen Zusammenhang zwischen Abbaustörungen und Anstieg der Konzentration von organischen Säuren im Ablauf der Anaerobreaktoren.

*„Innerhalb kurzer Zeit nach einer Prozessstörung steigt die Konzentration an flüchtigen Fettsäuren im Ablauf an, da die Umsetzung zu Methan gestört ist. Weiterhin kommt es zu einer Verminderung der CSB-Umsetzung, zu einem Absinken des pH-Wertes (abhängig von der Pufferkapazität des Schlammes) und einer steigenden Kohlendioxidkonzentration im Biogas.*

*Die Zunahme flüchtiger Fettsäuren sowie die Abnahme des pH-Wertes führen zu einer Hemmung der Methanaktivität und somit zu einer weiteren Verstärkung der negativen Effekte.“ [AQUATYX, 2011](#)*

Bei stabilem Betrieb der Anaerobanlage lag die Konzentration der organischen Säuren im Ablauf zwischen 100 und 200 mg/l. Bis Anfang Februar 2012 stiegen die organischen Säuren im Abstand von einigen Tagen bis Wochen jedoch wiederholt auf Werte von weit über 300 mg/l an. Die rot hervorgehobenen Peaks in Abb. 24 fallen zusammen mit einem signifikanten Abfall der CSB-Abbauleistung.

Gemeinsam mit der Dow Wolff Cellulosics GmbH wurde herausgearbeitet, dass der anaerobe Abbau immer dann beeinträchtigt war, wenn Methylcellulose einer bestimmten Spezifikation hergestellt wurde. Die Produktion dieser MC-Spezies erfolgt

nur zeitweise in einer der drei Teilanlagen des MC-Betriebes. Seit Anfang Februar 2012 wird das dabei anfallende Abwasser separiert und direkt dem aeroben Behandlungsteil des GWK zugeführt. Die Abb. 24 dokumentiert, dass der anaerobe Abbau seit diesem Zeitpunkt sehr stabil ist: Die Konzentration der organischen Säuren erreicht maximal 200 mg/l und die CSB-Elimination ist mit zunehmender Betriebsdauer der Anaerobanlage kontinuierlich angestiegen.

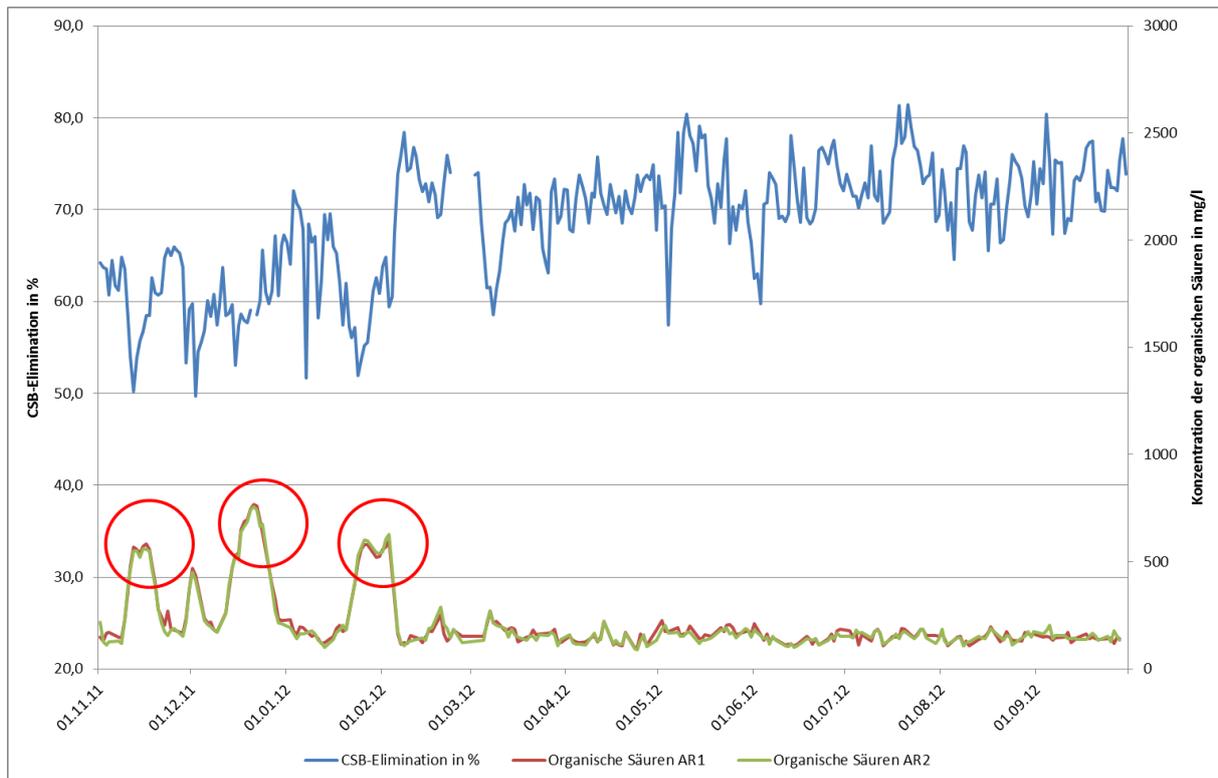


Abb. 24: CSB-Abbauleistung und organ. Säuren im Ablauf der anaeroben Vorbehandlungsanlage im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012

#### 4.5. Leitfähigkeit

Die gegenüber anderen Anaerobanlagen deutlich erhöhte elektrische Leitfähigkeit in dem zu behandelnden Abwasser - als Messgröße für die Salzlast - stellt den Kernpunkt der Intention des Demonstrationsvorhabens dar. Der Auslegungswert für die minimale elektrische Leitfähigkeit betrug **35 mS/cm**, der Auslegungswert für die maximale elektrische Leitfähigkeit betrug **45 mS/cm**.

Die im GWK ankommende Beschaffenheit des Methylcelluloseabwassers hinsichtlich der Salzbelastung und der Leitfähigkeit geht aus Abb. 25 hervor.

Im Mittel betrug die Chloridkonzentration im Zulauf aus der Methylcelluloseherstellung der Dow Wolff Cellulosics GmbH ca. 53.000 mg/l, die elektrische Leitfähigkeit 116 mS/cm (Messungen an 24-h-Mischproben im Betriebslabor GWK Bitterfeld-Wolfen).

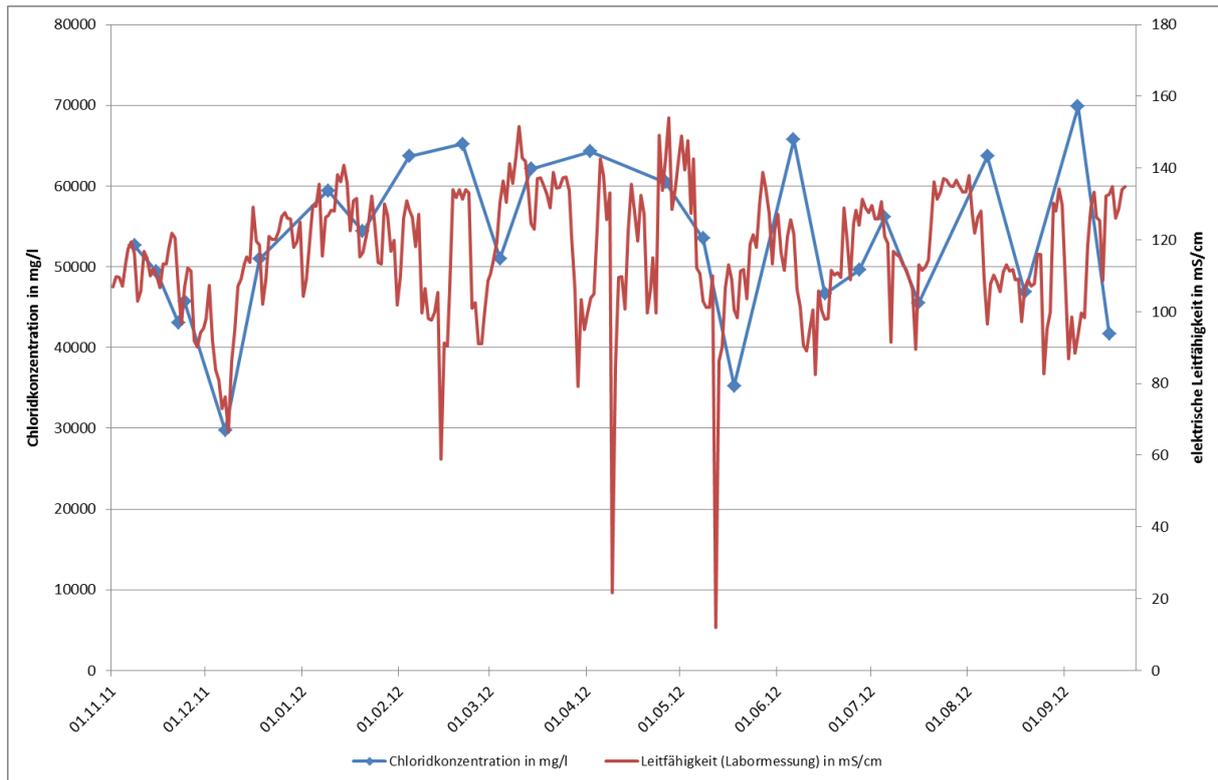


Abb. 25: Chloridkonzentration und elektrische Leitfähigkeit im Zulauf des Methylcelluloseabwassers im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012

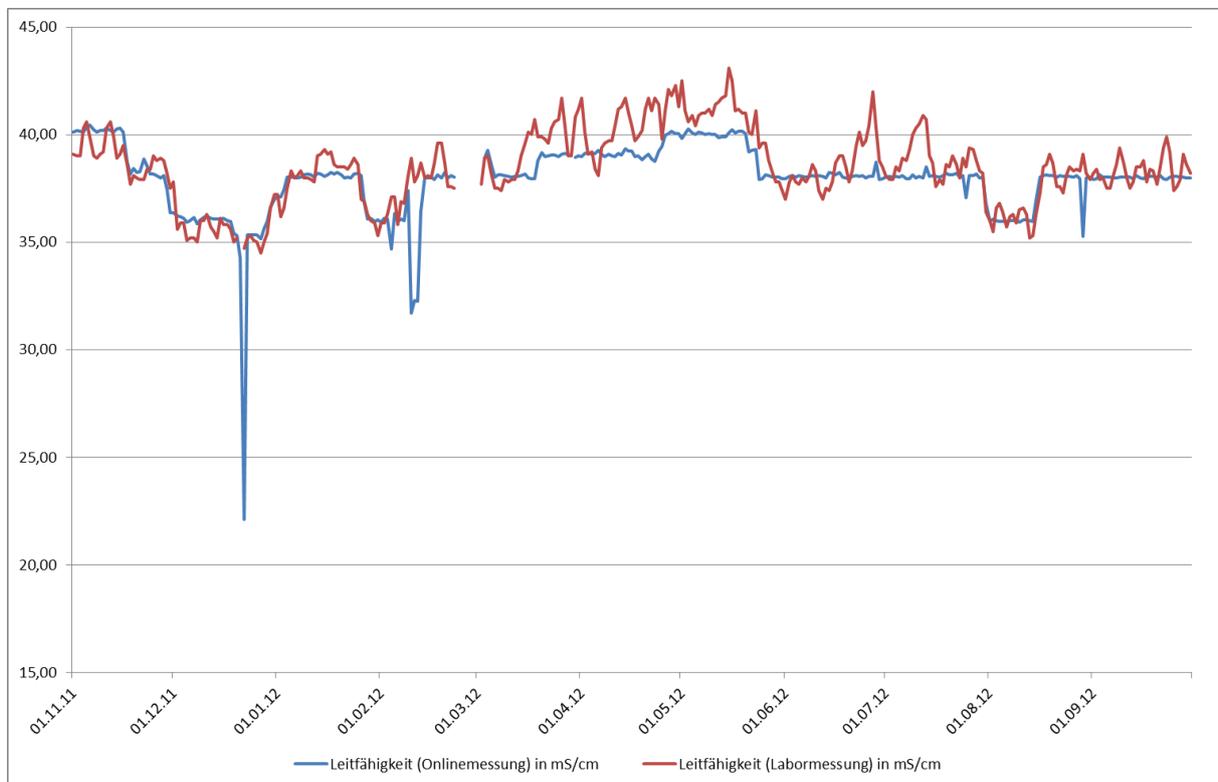


Abb. 26: Elektrische Leitfähigkeit im Abwasserzulauf zur Anaerobanlage im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012

Wie in Kapitel 3. beschrieben, wird der Abwasserzulauf zu den Anaerobreaktoren im AGB 2 auf den Sollwert eingestellt, indem die hohe Salzkonzentration im Methylcelluloseabwasser mit salzarmem Kommunalabwasser vermischt wird. Wie genau dies gelang, ist Abb. 26 zu entnehmen.

Der Mittelwert der elektrischen Leitfähigkeit im o. g. Zeitraum liegt bei **38,5 mS/cm**. Das entspricht einer Natriumchloridkonzentration von etwa 23 g/l ([SCHÖNBORN, 2013](#)). Von störungsbedingten Ausnahmen abgesehen wurde die Anlage immer über dem Bemessungswert der Mindestsalzbelastung gefahren.

#### **4.6. Temperatur**

Die am anaeroben Abbau beteiligten mesophilen Mikroorganismen finden optimale Temperaturbedingungen bei 36...38°C. Der Auslegungswert für die minimale Temperatur betrug 31°C, der Auslegungswert für die maximale Temperatur 37°C.

*„Wenn die Temperatur des Reaktors unter 35°C sinkt, nimmt die mikrobielle Aktivität des Schlammes stark ab.“* [AQUATYX, 2011](#)

Erforderlichenfalls sollte dann die Zulauffracht gedrosselt werden.

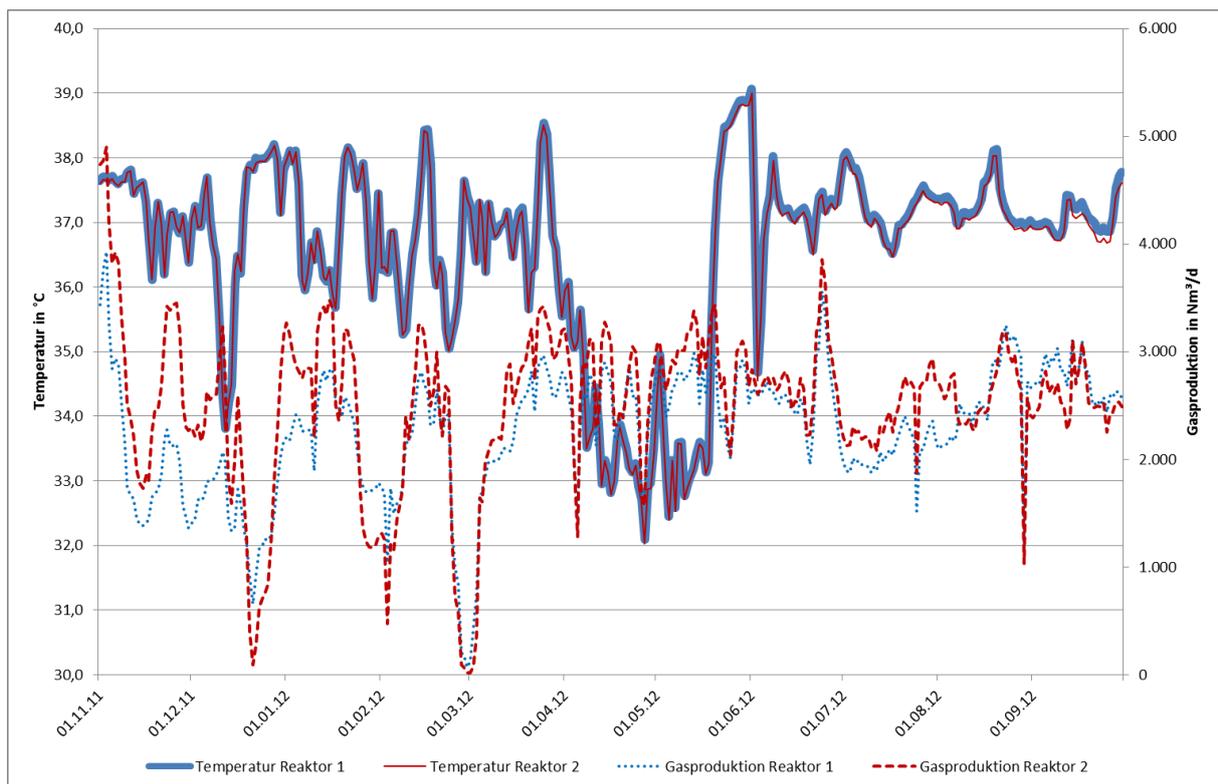


Abb. 27: Temperatur und Biogasproduktion (in Nm<sup>3</sup>/d) in den Reaktoren 1 und 2 im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012

Bei der Einstellung der Leitfähigkeit durch Verschnitt des Methylcelluloseabwassers mit Kommunalabwasser wird zwangsläufig auch die Temperatur beeinflusst. Das Methylcelluloseabwasser kommt mit einer mittleren Temperatur von etwa 40°C im GWK an, während das Kommunalabwasser in Abhängigkeit von der Jahreszeit bis auf 9°C

auskühlen kann. Das Kommunalabwasser wird vor der Zugabe zu AGB 2 unter Nutzung von Abwärme aus der Klärschlammverbrennung auf ca. 25°C vorgewärmt (mittels Wärmetauscher 4). Dennoch wird nach der Vermischung von Methylcelluloseabwasser und Kommunalabwasser die o. g. Solltemperatur i.d.R. unterschritten. Deshalb durchläuft das Abwasser, bevor es den Anaerobreaktoren zugeführt wird, zur Aufnahme der Abwärme aus den BHKW einen weiteren Wärmetauscherkomplex (Wärmetauscher 1 und 2, vgl. Kapitel 3.).

Wie aus Abb. 27 zu erkennen, ist der Temperaturverlauf in beiden Reaktoren nahezu identisch. Mitte Dezember 2011 und im April bis Anfang Mai 2012 fiel die Reaktortemperatur unter die o. g. 35°C. Der Temperaturabfall von April/Mai 2012 ist mit der Jahresrevision der Verbrennung zu erklären, die in diesem Zeitraum stattfand. Deshalb stand keine Abwärme zur Vorwärmung des Kommunalabwassers zur Verfügung. Die Gasproduktion als ein Maßstab der mikrobiellen Aktivität scheint davon jedoch kaum betroffen. Ganz offenkundig haben andere Faktoren einen wesentlich stärkeren Einfluss.

Die im Betrieb gemessene mittlere Reaktortemperatur liegt in beiden Reaktoren bei **36,6°C**. Somit ergibt sich hier als zusammenfassende Einschätzung, dass der für die anaeroben Mikroorganismen optimale Bereich von 36...38°C im Wesentlichen eingehalten wurde. Kurzzeitige Abweichungen davon hatten – gemessen an der Biogasgewinnung – praktisch keine Auswirkungen.

#### **4.7. Biogasproduktion und Heizwert**

Ausgehend von den Ergebnissen der labor- und halbtechnischen Untersuchungen zur anaeroben Behandlung des Abwassers der Methylcellulose-Herstellung am Standort Bitterfeld-Wolfen ([KÖPPKE, 2008](#); [KÖPPKE, 2009](#)) wurde der Anlagenbemessung ein Biogasanfall von 0,3 Nm<sup>3</sup> Biogas/kg CSB<sub>abgebaut</sub> zugrunde gelegt. Dieser Wert war sehr konservativ angesetzt und wurde von Stulz-Planaqua als Bemessungswert übernommen. In den Ausschreibungsunterlagen ist ferner ein Biogasanfall von 250 Nm<sup>3</sup> Biogas/h als Auslegungswert genannt.

Als Heizwert des Biogases wurden 6 kWh/Nm<sup>3</sup> angesetzt. Dieser Heizwert ist nur zu erreichen, wenn der Methangehalt des Biogases mindestens 60% beträgt <sup>8</sup>.

Nach den Aufzeichnungen im Betriebstagebuch der Anaerobanlage (vgl. Tab. 1 auf S. 35) wurden im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012 folgende Ergebnisse erzielt:

Summe abgebaute CSB-Fracht =	2.466.088 kg CSB	≅ 7.361 kg CSB/d
Summe Biogasertrag =	1.356.444 Nm <sup>3</sup>	≅ 4.049 Nm <sup>3</sup> /d
∅ Methangehalt im Biogas =		67,95%

Mit diesen Angaben lässt sich die Erreichung der o. g. Auslegungswerte überprüfen.

---

<sup>8</sup> Energiegewinn aus Methan: 9,968 kWh/Nm<sup>3</sup> Methan

$$\varnothing \text{ Biogasanfall} = \frac{1.356.444 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas}}{2.466.088 \text{ kg CSB}_{\text{abgebaut/d}}} = \underline{\underline{0,55 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas/kg CSB}_{\text{abgebaut}}}}$$

$$\varnothing \text{ Biogasanfall} = \frac{1.356.444 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas}}{335 \text{ d} * 24 \text{ h/d}} = \underline{\underline{168,7 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas/h}}}$$

$$\varnothing \text{ Heizwert} = \frac{1 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas} * 67,95\% \text{ Methangehalt} * 9,968 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ Methan}}{100} \\ = \underline{\underline{6,77 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ Biogas}}}$$

Bei der spezifischen Biogasproduktion je kg abgebaute CSB-Fracht wird der Bemessungswert fast um das Doppelte übertroffen. Vom Auslegungswert des spezifischen Biogasertrags je Stunde werden dagegen nur 2/3 erreicht. Dieser scheinbare Widerspruch ist damit zu erklären, dass die CSB-Zulauffracht deutlich unter dem Bemessungswert liegt (vgl. Abschnitt 4.1.) und damit auch die je Zeiteinheit abgebaute CSB-Fracht - trotz höherer Ausbeute – nicht ausreicht, um 250 Nm<sup>3</sup> Biogas/h zu erzeugen. Beim Heizwert des Biogases wird der Auslegungswert wieder übertroffen.

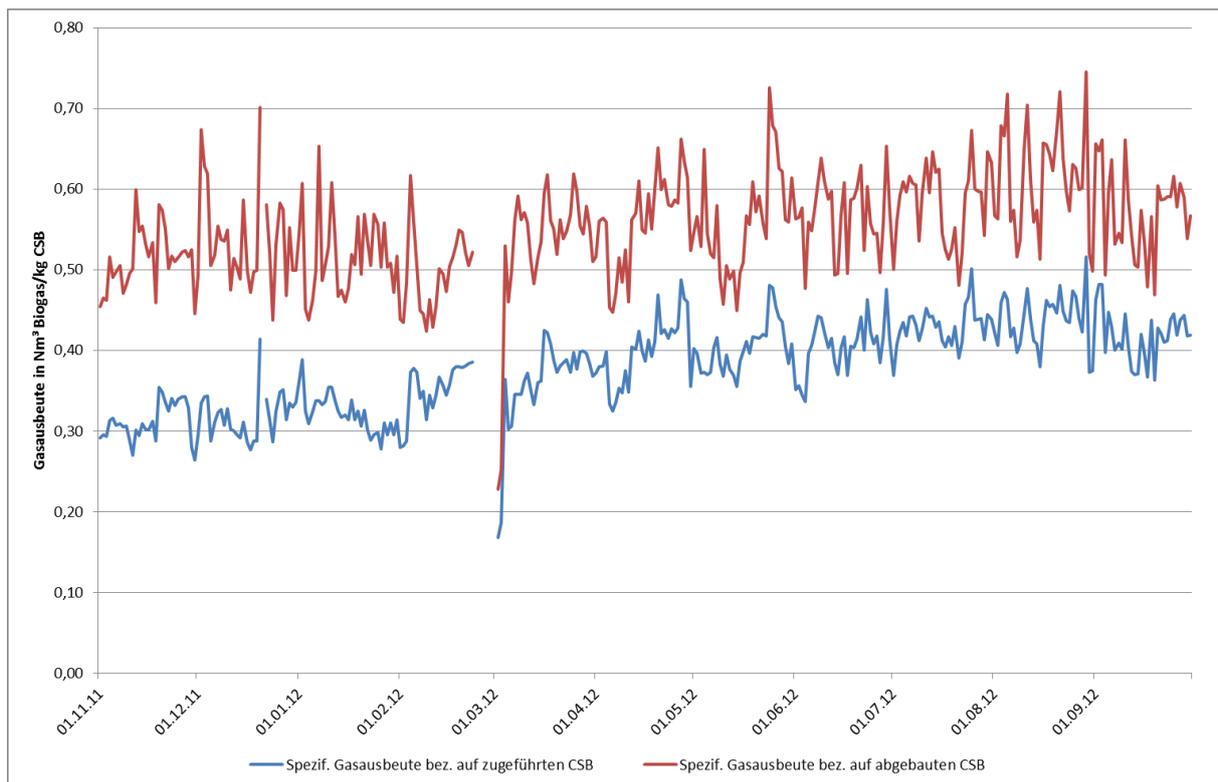


Abb. 28: Spezifischer Biogasertrag im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012

In Abb. 28 sind die spezifischen Biogaserträge in der Zeit vom 1.11.2011 bis 30.9.2012 bezogen auf den in der Anaerobanlage abgebauten und auf den der Anlage zugeführten CSB aufgetragen. Wie daraus ersichtlich, haben beide Kurven über den gesamten Zeitraum gesehen einen leicht ansteigenden Verlauf, so dass im Mittel der letzten fünf Monate - seit Mai 2012 - sogar 0,42 Nm<sup>3</sup> Biogas/kg CSB<sub>zugeführt</sub> bzw. 0,58 Nm<sup>3</sup> Biogas/kg CSB<sub>abgebaut</sub> gewonnen werden konnten.

Über die o. g. hinaus ergeben sich für den Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012 folgende Betriebswerte:

$$0,55 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas/kg CSB}_{\text{abgebaut}} * 0,6795 = \underline{0,376 \text{ Nm}^3 \text{ Methan/kg CSB}_{\text{abgebaut}}}$$

Bezogen auf den der Anlage zugeführten CSB gilt analog zu den obigen Berechnungen:

$$\frac{1.356.444 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas}}{3.583.799 \text{ kg CSB}_{\text{zugeführt}}} = \underline{0,378 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas/kg CSB}_{\text{zugeführt}}}$$

$$0,378 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas/kg CSB}_{\text{zugeführt}} * 0,6795 = \underline{0,257 \text{ Nm}^3 \text{ Methan/kg CSB}_{\text{zugeführt}}}$$

#### **4.8. Elektrischer und thermischer Wirkungsgrad der BHKW's**

Hier wurden vom Auftragnehmer folgende Garantiewerte („bei Einhaltung der Abgaswerte“) genannt:

Elektrischer Wirkungsgrad der BHKW's	<u>38,3%</u>
Thermischer Wirkungsgrad der BHKW's	<u>49,3%</u>

Die tatsächlich erreichte elektrische Wirkungsgrad wird nachfolgend unter Verwendung der Angaben in Tab. 1 und Tab. 2 errechnet.

Elektrische Arbeit BHKW's im Biogasbetrieb	3.098.533 kWh
Biogasverbrauch der BHKW's	1.283.092 Nm <sup>3</sup> Biogas
Methangehalt des Biogases	67,95%

$$\eta_{\text{elektr.}} = \frac{3.098.533 \text{ kWh}}{1.283.092 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas} * 0,6795 * 9,968 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ Methan}} = \underline{\underline{35,65\%}}$$

Der thermische Wirkungsgrad wurde anhand von Temperatur- und Volumenstrommessungen am Heizwasservor- und Rücklauf der BHKW's im Rahmen der Leistungsfahrt mit 45% bestimmt.

Demzufolge lagen die im Dauerbetrieb erzielten Wirkungsgrade der BHKW's im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012 geringfügig unterhalb der Garantiewerte, aber innerhalb des Toleranzbereiches, welcher unter Berücksichtigung der bestehenden Messunsicherheiten anzusetzen ist.

#### **4.9. Biomasse im Reaktor**

Reinigungsleistung und Biogasproduktion hängen unmittelbar von der verfügbaren aktiven Biomasse in den Anaerobreaktoren ab. Von daher ist die Biomassekonzentration in den Reaktoren ein essentieller Parameter.

Ausgehend von einer CSB-Zulaufkraft von 20 t/d und einer Schlammbelastung von 0,5 kg CSB/kg oTS \* d ergibt sich für die erforderliche Biomasse in den beiden Reaktoren zusammen ein Bemessungswert von 40 t oTS. Mit einem Reaktorvolumen von

$2 * 773 \text{ m}^3 = 1.546 \text{ m}^3$  folgt daraus für den spezifischen org. Trockensubstanzgehalt in den beiden Reaktoren

$$\frac{40.000 \text{ kg oTS}}{1.546 \text{ m}^3} \sim \underline{26 \text{ kg oTS/m}^3} \text{ bzw. } \underline{40 \text{ kg TS/m}^3} \text{ (bei einem oTS-Anteil von 65\%<sup>9</sup>).$$

Zur Messung der Biomassemenge sind, verteilt über die Gesamthöhe beider Reaktoren im Abstand von jeweils etwa 3 m, sieben Probenahmestellen angeordnet. Aus diesen werden aller vier bis sechs Wochen Proben zur Messung der Konzentration an organischer Trockensubstanz (oTS) entnommen. Zusätzlich wird die tatsächliche Höhe des Schlammbetts in den Reaktoren gemessen, die in der Regel zwischen zwei Probenahmehorizonten liegt. Aus den oTS-Konzentrationen an den Probenahmestellen und der Höhe des Schlammbetts wird über einen integrativen Berechnungsansatz die Gesamtmenge an oTS pro Reaktor ermittelt (Berechnung nach kombinierter Schlamm Spiegel-Gradientenmethode). Diese Art der Bestimmung ist mit einer Reihe von Fehlermöglichkeiten behaftet, die sich aus der Probenahme, der TS- und oTS-Messung im Labor und vor allem aus der Messung der Höhe des Schlammbettes ergeben.

Deshalb muss die Interpretation der oTS-Messwerte im bisherigen Betrieb der Anlage mit Vorbehalt erfolgen. Als gesichert kann aber gelten, dass die tatsächlich erreichte mittlere Menge an Biomasse deutlich geringer als der Auslegungswert ist, sie beträgt im Mittel etwa 10 t oTS für Reaktor 1 und etwa 13 t oTS für Reaktor 2, in Summe also nur **ca. 23 t oTS**.

Damit errechnet sich die nachfolgend aufgeführte Kennzahl für den spezifischen organischen Trockensubstanzgehalt.

$$\varnothing \text{ org. Trockensubstanzgehalt im Reaktor} = \frac{23.000 \text{ kg oTS}}{1.546 \text{ m}^3} \sim \underline{15 \text{ kg oTS/m}^3}$$

Mit einem oTS-Gehalt von 65% folgt daraus

$$\varnothing \text{ Trockensubstanzgehalt im Reaktor} = \frac{23.000 \text{ kg oTS}}{0,65 * 1.546 \text{ m}^3} \sim \underline{23 \text{ kg TS/m}^3}$$

Im Vergleich zu den oben genannten Auslegungswerten liegen alle Kennzahlen zur Charakterisierung der Biomasse in den Reaktoren deutlich zu niedrig.

Die Biomassekonzentration in den Reaktoren war bereits während der Adaption der als Impfschlamm eingefüllten Pelletbiomasse an die erhöhte Salzkonzentration von Ende März bis Mitte Juni 2011 zurückgegangen und nahm auch danach weiter ab. Zum Zeitpunkt der Übergabe der Anlage an den Betreiber befanden sich lediglich ca. 29 t oTS in den beiden Reaktoren.

<sup>9</sup> oTS-Anteil berechnet als gewichtetes Mittel aus den Ergebnissen der Reaktorbehebungen vom 01.11.2011 bis 30.09.2012 (SCHÖNBORN, 2012)

Ab Anfang 2012 verlangsamten sich die Verluste und es stellte sich eine gewisse Stabilisierung ein (vgl. Abb. 29). Anfang August 2012 wurde Reaktor 1 mit Pelletschlamm einer Papierfabrik nachbeimpft (zwei Tankzüge entsprechend etwa 2,6 t oTS), so dass in beiden Reaktoren in etwa die gleiche Biomasse präsent war.

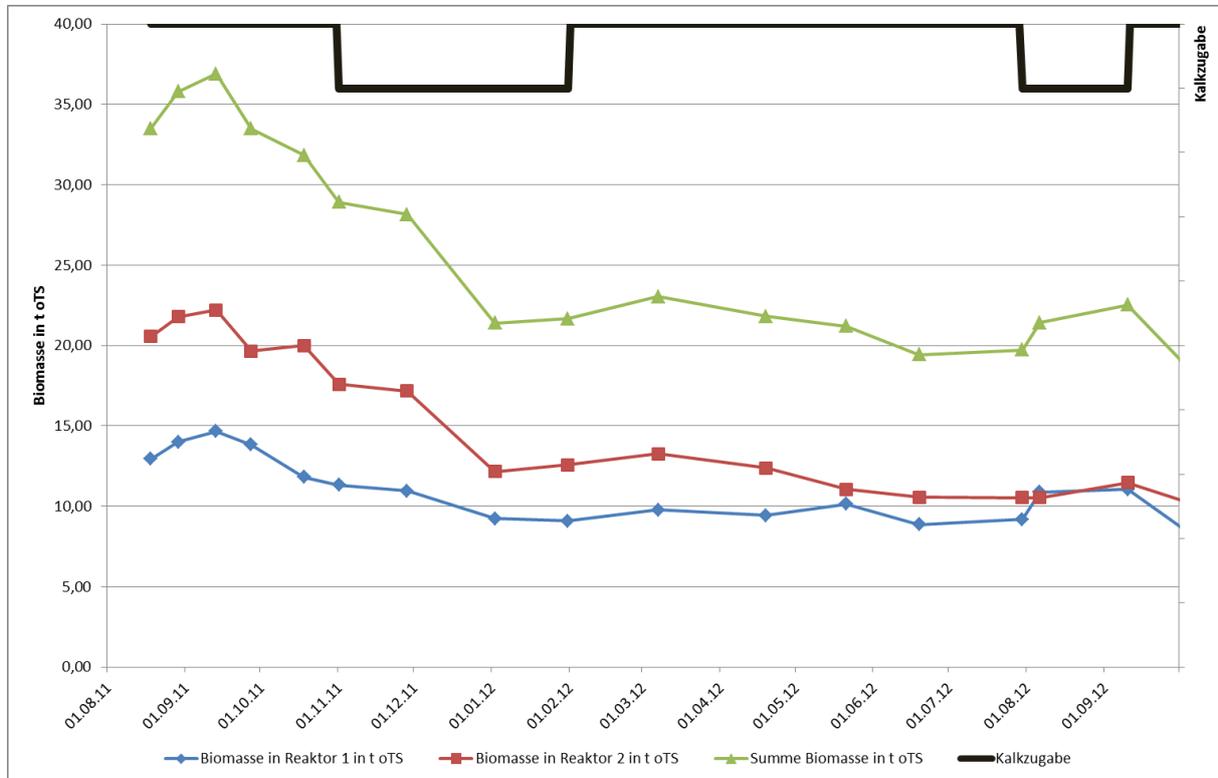


Abb. 29: Biomasse (gemessen als t oTS) in den Reaktoren 1 und 2 sowie Kalkdosierung im Zeitraum 18.08.2011 bis 30.09.2012

Vom Verfahrensgeber des Anaerobreaktors wird darauf hingewiesen, dass eine Zugabe von Calcium nicht nur der Versäuerung des Reaktors vorbeugt, sondern auch der granulierten Biomasse Stabilität verleiht. Deshalb wurde vom GWK zeitweise 5%ige Kalkmilch dosiert, und zwar so viel, dass die Ca-Konzentration im Zulauf zu den Reaktoren um rechnerisch etwa 100 mg Ca/l (von etwa 150 mg/l auf über 200 mg/l) aufgestockt wurde.

Nach [IBRAHIM, 2008](#) tragen Mikroorganismen bei normalen pH-Werten eine negative Ladung. Das führt dazu, dass sie sich gegenseitig abstoßen. Eine Kalkzugabe ( $\text{Ca}^{2+}$ ) kann die negative Ladung neutralisieren und damit die Granulierung der Biomasse verbessern. Bereits aus früheren Veröffentlichungen ist bekannt, dass die von Belebtschlamm gebildeten extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) eine hohe Affinität zu Calcium-Ionen aufweisen.  $\text{Ca}^{2+}$  kann somit auch als Brückenbildner zwischen den EPS wirken, welche wiederum die Aggregation von Mikroorganismen zu kompakten Flocken begünstigen. Ein anderer Erklärungsversuch baut auf der dehydrierenden Wirkung von Kalk gegenüber den äußeren Zellwänden der Mikroorganismen auf ([IBRAHIM, 2008](#)).

Wird jedoch zu viel Kalk dosiert, kehrt sich die positive Wirkung in ihr Gegenteil um. Dann nehmen die Mikroorganismen eine positive Ladung an und der bei gleicher Ladung abstoßende Effekt tritt erneut zutage ([IBRAHIM, 2008](#)). Abgesehen davon können zu „...hohe Calciumkonzentrationen ... zu Ablagerungen im Reaktor führen und diesen verstopfen“ ([AQUATYX, 2011](#)). Im GWK kam es vor allem im Bereich der IDM's, die die Zuläufe zu den beiden Anaerobreaktoren messen, zur Bildung von Belägen, die zu Fehlmessungen führten, so dass bei in Betrieb befindlicher Kalkdosierung die IDM's alle 4 bis 5 Tage ausgebaut und gereinigt werden mussten, was mit einem hohen Zeitaufwand verbunden war.

Die Schlammprofilmessung vom 10.09.2012 nach einer vorausgegangenen zweimonatigen kontinuierlichen Kalkzugabe (vom 09.07.2012 bis 10.09.2012) ergab eine leichte Biomassezunahme. Danach wurde aufgrund des oben beschriebenen erhöhten betrieblichen Aufwandes die Kalkdosierung wieder ausgesetzt ([SCHÖNBORN, 2012](#)). Wie sich in Abb. 29 ganz deutlich zeigt, führte das Aussetzen der Kalkdosierung wieder zu steigendem Biomasseverlust. Der Zusammenhang zwischen Biomassezuwachs und Kalkdosierung hat sich somit auch anhand der Schlammprofilmessungen im GWK bestätigt.

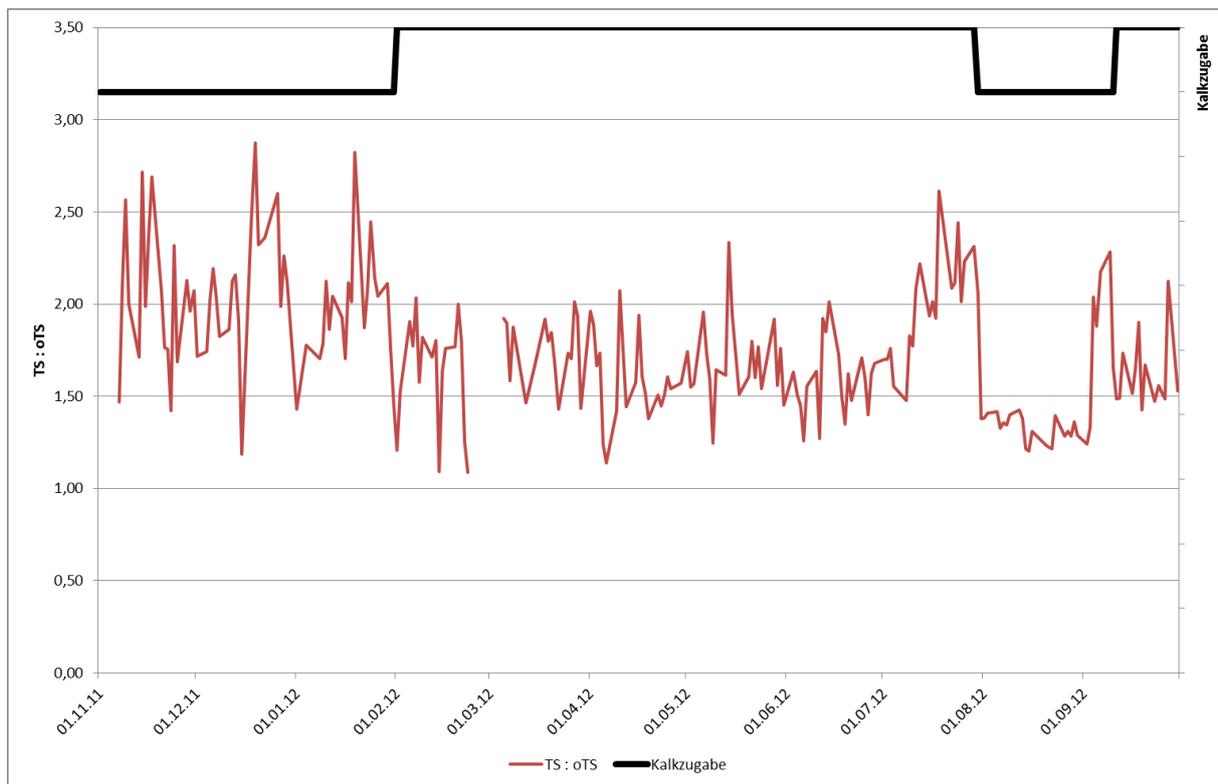


Abb. 30: Verhältnis TS : oTS auf Basis der Feststoff-Messungen im Reaktorablauf und Kalkzugabe im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012

Trotz des oben dargestellten Rückgangs der Biomasse in den Reaktoren findet ein Zuwachs an Biomasse statt. Dieser wird jedoch durch den ständigen Feststoffaustrag aus den Reaktoren kompensiert. Es ist anzunehmen, dass sich Zuwachs und Verlust

durch Ausspülung von suspendierter Biomasse in etwa ausgleichen ([SCHÖNBORN, 2012](#)).

*„Das TS/oTS-Verhältnis des Schlammes sollte konstant bleiben. Eine Zunahme ist eventuell ein Zeichen für die Anlagerung von Kalk in den Pellets.“ [AQUATYX, 2011](#)*

Das werktäglich gemessene Verhältnis TS zu oTS der abfiltrierbaren Stoffe im Reaktorablauf wird in Abb. 30 wiedergegeben. Diese Überprüfung zeigt im Wesentlichen ausgeglichene Verhältnisse.

In der letzten Phase der Kalkdosierung geht das Verhältnis TS : oTS signifikant zurück. Erst gegen Ende der Dosierung steigt es wieder an. Das ist ein Zeichen dafür, dass infolge der Kalkzugabe die aktive Biomasse einen Zugewinn erfahren hat. Ansonsten scheint jedoch die Dosierung von Kalk entgegen den Erwartungen keine erkennbaren Auswirkungen auf das Verhältnis TS : oTS zu haben.

Bei dieser Interpretation der Befunde wurde davon ausgegangen, dass die im Reaktorablauf gemessenen Feststoffe repräsentativ für die Beschaffenheit der gesamten Biomasse im Reaktor sind. Es ist zu beachten, dass die Bestimmung des organischen Anteils der Feststoffe im Ablauf eine hohe Anfälligkeit gegen Messfehler aufweist, was auch an der starken Schwankungsbreite der Werte zu erkennen ist <sup>10</sup>.

Auch bei den – allerdings nur im Abstand von vier bis sechs Wochen durchgeführten - Schlammprofilmessungen wurde in den Phasen mit Kalkzugabe keine Erhöhung des anorganischen Anteils in der Trockensubstanz festgestellt. Diese Resultate zeigen an, dass während des gesamten Betrachtungszeitraumes keine Überdosierung von Kalk vorlag.

#### **4.10. Verweilzeit und hydraulische Flächenbeschickung**

Die Verweil- oder Kontaktzeit des Abwassers in den Reaktoren ergibt sich als Quotient aus dem Reaktorvolumen und dem Abwasserzulauf. Der Auslegungswert der Verweilzeit beträgt 10,5 h.

$$\text{Verweilzeit (in d oder h)} = \frac{\text{Reaktorvolumen}}{\text{Abwasservolumenstrom}}$$

Das Volumen je Reaktor beträgt 773 m<sup>3</sup>, in der Zeit vom 1.11.2011 bis 30.9.2012 waren 2 Reaktoren in Betrieb, so dass sich ein Reaktorvolumen von insgesamt 1.546 m<sup>3</sup> ergibt.

$$\varnothing \text{ Verweilzeit} = \frac{1.546 \text{ m}^3}{1.352,6 \text{ m}^3/\text{d}} * \frac{24 \text{ h}}{\text{d}} = \underline{\underline{27,4 \text{ h}}}$$

<sup>10</sup> Bei der Messung der Feststoffe im Ablauf bewegt sich die Auswaage auf dem Filterpapier nur im mg-Bereich. Der Filter mit dem wenigen Feststoff wird im Muffelofen verbrannt und anschließend durch Auswiegen des verbliebenen Materials der Glührückstand gemessen. Aufgrund der geringen Ausgangsmenge ist der Fehler sehr groß ([SCHÖNBORN, 2012](#)).

Wie aus Abb. 31 hervorgeht, wurde die geplante Verweilzeit nie unterschritten. Der rechnerische Mittelwert der Verweilzeit des Abwassers in der Anaerobanlage im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012 liegt mit 27,4 h deutlich über dem Auslegungswert. Die z. T. aus der Darstellung laufenden Peaks in Abb. 31 sind auf besonders geringe Abwasserzuläufe bei kurzzeitigem betriebsbedingtem Aussetzen der Abwasserbeschickung zurückzuführen.

Die Verweilzeit verhält sich umgekehrt proportional zur hydraulischen Flächenbeschickung (je geringer die Verweilzeit desto höher die Flächenbeschickung).

Abb. 31 verdeutlicht, dass die Flächenbeschickung während der letzten Tage des Probetriebes Anfang November 2011 sehr hoch, die Abwasserverweilzeit hingegen gering war. Auch das ist eine denkbare Erklärung für die in Abschnitt 4.9. erwähnten Probleme mit dem Verlust von Biomasse zu diesem Zeitpunkt.

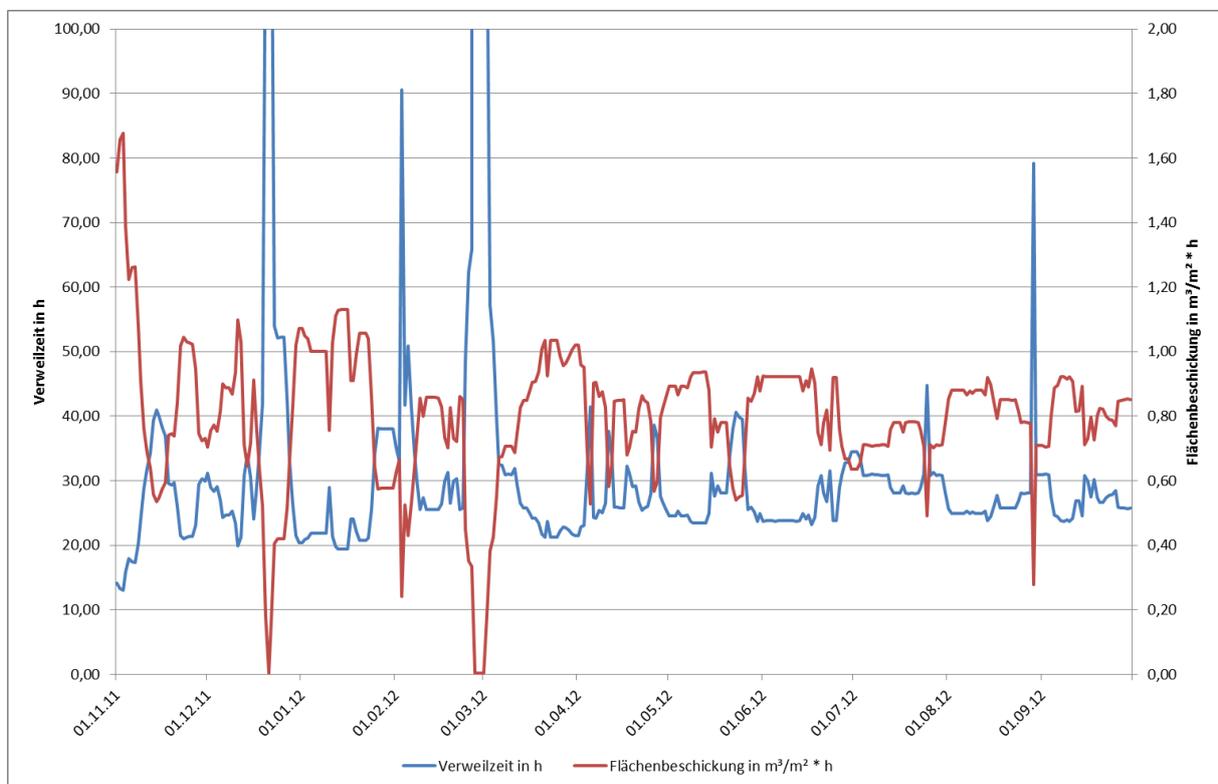


Abb. 31: Verweilzeit und hydraulische Flächenbeschickung im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012

#### **4.11. Aufströmgeschwindigkeit**

Die im vorhergehenden Abschnitt genannte hydraulische Flächenbeschickung ist zu unterscheiden von der in Kapitel 3. mehrfach erwähnten Aufströmgeschwindigkeit in den Reaktoren. Diese ist deutlich höher, weil hier beim Abwasservolumenstrom zusätzlich zum Abwasserzulauf der Rezirkulationsstrom des Ablaufwassers zu berücksichtigen ist.

Vom Errichter der Anlage wurden als Auslegungswerte die minimale Aufströmgeschwindigkeit mit 2 m/h und die maximale Aufströmgeschwindigkeit mit 5,1 m/h genannt.

Nach Mitteilung des GWK wurde die Aufströmgeschwindigkeit im Betrachtungszeitraum im Bereich von 3,0 bis 3,5 m/h variiert, sie lag also innerhalb der genannten Grenzen.

#### **4.12. Sonstiges**

In den Planungsunterlagen wurden weitere Zielwerte für die Beschaffenheit des Ablaufs aus den Anaerobreaktoren genannt.

o-PO <sub>4</sub> -P-Konzentration im Reaktorablauf	<8 mg/l
N <sub>ges-anorgan.</sub> -Konzentration im Reaktorablauf	<20 mg/l
Sulfidkonzentration im Reaktorablauf	<65 mg/l

Die Anforderungen für P und N wurden fallengelassen, weil

- die Dosierung von Phosphorsäure (für den Nährstoff P) und/oder Harnstoff (für den Nährstoff N) für einen stabilen Betrieb der Anaerobreaktoren unverzichtbar ist,
- die Nährstoffe überstöchiometrisch dosiert werden müssen und von daher deutlich höhere als die ursprünglich errechneten P- und N-Konzentrationen im Ablauf auftraten

und

- die P- und N-Frachten im Ablauf der Anaerobreaktoren in der nachfolgenden aeroben Behandlung (BIOHOCH<sup>®</sup>-Reaktoren) mühelos eliminiert werden können.

Der Wert für die Sulfidkonzentration ergab sich aus der Annahme, dass die Sulfatfracht im Zulauf zur Anaerobanlage vollständig in Sulfid umgesetzt wird und aus der Berechnung des druck-, temperatur- und pH-abhängigen Gleichgewichts zwischen gelöstem Sulfid in der Wasserphase und gasförmigem Schwefelwasserstoff im Biogas.

Wegen der Oxidation des Sulfids nach Einleiten des Ablaufs der Anaerobanlage in die aeroben BHR macht eine ständige Messung im Ablauf der Anaerobreaktoren keinen Sinn. Deshalb wurde die Sulfidkonzentration bisher nur im Rahmen der Messkampagne während der Leistungsfahrt bestimmt. Die Messwerte lagen im Bereich von 18 bis 25 mg/l <sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> Prüfbericht der Wolfener Analytik GmbH vom 04.11.2011

#### **4.13. Zusammenfassende Bewertung**

In Tab. 3 auf der folgenden Seite werden alle maßgeblichen Auslegungswerte den tatsächlich erreichten Mittelwerten im Zeitraum von 1.11.2011 bis 30.9.2012 gegenübergestellt. Die letzte Spalte enthält die Abweichungen des jeweiligen Mittelwerts vom Auslegungswert in Prozent.

Unter operationalen Gesichtspunkten lässt sich daraus zusammenfassend folgender Schluss ziehen:

- 4 von 15 Bemessungswerten wurden übertroffen  
(hellgrün hinterlegte Felder in Tab. 3, rechte Spalte)
- 6 von 15 Bemessungswerten wurden erreicht bzw. eingehalten  
(Felder ohne besondere Kennzeichnung)

und

- 5 von 15 Bemessungswerten wurden nicht erreicht bzw. nicht eingehalten  
(hellrot hinterlegte Felder in Tab. 3, rechte Spalte).

Der Anlagenbemessung wurde zugrunde gelegt, dass jeder Reaktor Biomasse im Umfang von 20 t oTS enthält. Anstelle von 40 t oTS enthielten die beiden Reaktoren im Betrachtungszeitraum jedoch zusammen nur ca. 23 t oTS. Dies spiegelt sich auch in den Kennziffern zum Trockensubstanzgehalt wider und ist die Ursache dafür, dass die vorgesehene CSB-Raumbelastung und damit die CSB-Gesamtabbauleistung sowie der Gesamtbiogasanfall nicht erreicht werden konnten. Im praktischen Betrieb der Anlage durfte die maximale Schlammbelastung von 0,5 kg CSB/(kg oTS\*d) nicht überschritten werden, um Schädigung und/oder Verlust der Biomasse zu vermeiden.

Leider blieb auch die Neubildung von Biomasse hinter den Erwartungen zurück. Dadurch konnten die Probleme mit der Biomasse, die während und nach der Erstfüllung der Reaktoren aufgetreten waren, im Betrachtungszeitraum nicht im erforderlichen Umfang durch Eigenproduktion vitaler Pelletbiomasse kompensiert werden.

Die ermittelte prozentuale CSB-Abbauleistung sowie der spezifische Biogasanfall lagen jedoch oberhalb der ursprünglich erwarteten Werte.

Die Übererfüllung der Bemessungswerte bezüglich CSB-Abbaugrad, spezifischer Biogasproduktion und Heizwert des Biogases wird bei Einstellung einer entsprechenden Biomassemenge in den Reaktoren zu den vorgesehenen Effekten führen. Zur Adaptation und Bevorratung der entsprechenden Biomasse wird künftig der im Jahr 2012 fertiggestellte dritte Anaerobreaktor genutzt werden können.

Tab. 3: Zusammenfassende Gegenüberstellung von Bemessungswerten und tatsächlichen Betriebsdaten der Anaerobanlage

Parameter	Maßeinheit	Auslegungswert	Mittelwert im Dauerbetrieb	Erfüllung Auslegungswert
<b>CSB-Zulauf</b>	kg CSB/d	20.000	10.698	53,5%
<b>Raumbelastung</b>	kg CSB/(m <sup>3</sup> * d)	12,9	6,9	53,5%
<b>Schlammbelastung</b>	kg CSB <sub>zugeführt</sub> /(kg oTS * d)	0,5	0,48	96,0%
<b>CSB-Abbauleistung</b>	kg CSB/d	12.000	7.361	61,3%
<b>CSB-Abbaugrad</b>	%	60	68,7	114%
<b>minimale und maximale Leitfähigkeit</b>	mS/cm	35 ... 45	38,5	100%
<b>Temperatur im Anaerobreaktor</b>	°C	31 ... 37	36,5	100%
<b>spezifische Biogasproduktion je kg abgebaute CSB-Fracht</b>	Nm <sup>3</sup> Biogas/kg CSB <sub>abgebaut</sub>	0,3	0,550	183%
<b>Biogasanfall je Stunde</b>	Nm <sup>3</sup> Biogas/h	250	169	67,6%
<b>Heizwert des Biogases</b>	kWh/Nm <sup>3</sup>	6	6,8	113%
<b>elektrischer Wirkungsgrad BHKW</b>	%	38,3	35,7	93,2%
<b>thermischer Wirkungsgrad BHKW</b>	%	49,3	45,0	91,3%
<b>Biomasse im Reaktor (Menge Impfschlamm)</b>	t oTS	40	23	57,5%
<b>Verweilzeit des Abwassers im Reaktor</b>	h	10,5	27,4	261%
<b>Aufströmgeschwindigkeit</b>	m/h	2 ... 5,1	3,25	100%

**Hauptzweck des Demonstrationsvorhabens war es nachzuweisen, dass auch extrem salzhaltige Substrate anaerob behandelt werden können. Dieser Nachweis ist erbracht.** Im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012 betrug die elektrische Leitfähigkeit im Zulauf der Anaerobanlage 38,5 mS/cm (Mittelwert). Dies entspricht einem Salzgehalt (als Natriumchlorid) von etwa 23 g/l. Dabei erreichte der Biogasertrag mit 0,55 Nm<sup>3</sup> Biogas/kg CSB<sub>abgebaut</sub> einen Wert, der nach den Ergebnissen der labor- und halbtechnischen Untersuchungen nicht für möglich gehalten wurde. Mit dem Demonstrationsvorhaben zur anaeroben Behandlung hypersaliner Abwässer im GWK Bitterfeld-Wolfen konnte also - trotz verschiedener Probleme - der bis dato gültige Anwendungsbereich für den Einsatz anaerober Verfahren gemessen an der elektrischen Leitfähigkeit um 100% ausgedehnt werden.

## 5. Stoff- und Energiebilanzen

### 5.1. Chemisches Energiepotenzial

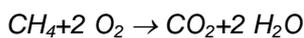
#### 5.1.1. **Energiegehalt normal verschmutzten häuslichen Abwassers**

Organisch belastetes Abwasser trägt ein chemisch gebundenes energetisches Potenzial, das mit dem Parameter CSB gemessen werden kann. In der einschlägigen Fachliteratur wird dazu folgendes ausgeführt:

*„Der CSB kann als Energieparameter gedeutet werden, so dass der Energieerhaltungssatz angewendet werden kann. Über längere Zeiträume, in denen sich der Ablauf-CSB nur wenig geändert hat (keine Änderung des CSB im Anaerobreaktor) muss gelten:*

$$\text{CSB-Abbau} = \text{CSB-Gas} + \text{CSB-ÜS}$$

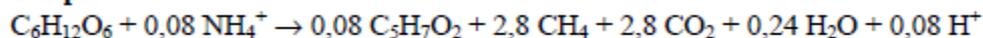
*Der CSB im Biogas ist bei der Methanisierung ( $\text{H}_2$ -Gehalt sehr gering) ausschließlich im Methan enthalten;  $\text{CO}_2$  hat keinen CSB. Der CSB des Methans kann auf Grund der Oxidationsreaktion berechnet werden;*



*d. h. je Mol  $\text{CH}_4$  (= 22,4 NI) sind 2 Mol Sauerstoff (= 64 g  $\text{O}_2$ ) erforderlich. 1 g CSB entspricht daher  $22,4 : 64 = 0,35$  NI  $\text{CH}_4$ . Unter der Annahme, dass ca. 10 % des abgebauten CSB in Biomasse umgewandelt werden, entstehen aus 1 kg abgebautem CSB ca. 320 NI Methan.“ [ATV-Fachausschuss 7.5, 1993](#)*

[NEIS, 2001](#) rechnet vor, dass aus 1 mol Glucose 2,8 mol Methan entstehen. Dies entspricht 348 ml Methan je g CSB:

**Beispiel:**



1 mol Glucose  $\rightarrow$  2,8 mol Methan

$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ : 180 Molgewicht

$\text{CH}_4$ : 18 Molgewicht  $\rightarrow$  mit Volumen: 22,4 Liter/Mol

$2,8 \cdot 22,4 = 62,7$  Liter  $\text{CH}_4$

$$\rightarrow \text{spez. Ausbeute: } p_{\text{CH}_4} = \frac{62,7 \text{ Liter CH}_4}{180 \text{ g org. Subst.}} = 348 \frac{\text{ml}}{\text{g o.S.}}$$

*„Pro kg abgebautem CSB fällt bei der anaeroben Behandlung eine Methangasmenge von ca.  $0,32 \text{ m}^3$  mit einem Brennwert von ca.  $10 \text{ kWh/m}^3$  Methan an.“ [ROSENWINKEL et al., 2011](#)*

*„Auf der Basis einer CSB-Bilanzierung mit der Annahme eines spezifischen Energiegehalts von  $320 \text{ l CH}_4$  pro kg CSB und einem spezifischen Energiegehalt von  $10 \text{ kWh}$  pro  $\text{m}^3 \text{ CH}_4$  ergibt sich für einen Einwohnerwert und eine spezifische Schmutzfracht von  $120 \text{ g CSB pro Tag}$  ein Energiegehalt im Abwasser von  $384 \text{ Wh pro Einwohnerwert und Tag}$ , entsprechend  $140 \text{ kWh}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ .“ [HARTWIG & ROSENWINKEL, 2011](#)*

### 5.1.2. Energiegehalt von Abwasser aus der Herstellung von Methylcellulose

Von der Dow Wolff Cellulosics liegen vertrauliche Einzelstoffangaben zur chemischen Zusammensetzung des Methylcelluloseabwassers vor. Auf Basis dieser Informationen wurde durch das GWK ein theoretischer CSB in Höhe von rund 24.200 mg CSB/l errechnet. Die tatsächlich gemessene CSB-Konzentration des Methylcelluloseabwassers beträgt etwa 32.000 mg/l (Mittelwert 2012).

Geht man davon aus, dass die überwiegend biologisch gut abbaubaren Inhaltsstoffe, die in die Berechnung des theoretischen CSB eingegangen sind, nahezu vollständig anaerob abgebaut werden, verbleibt zur gemessenen CSB-Konzentration des MC-Abwassers eine Differenz von 7.800 mg/l. Wenn man davon ausgeht, dass diese Differenz den nicht anaerob abbaubaren Rest-CSB darstellt, ergibt sich eine CSB-Elimination von 76%. Tatsächlich beträgt der gemessene mittlere CSB-Abbaugrad 68,7% (01.11.2011 bis 30.09.2012).

Für die weiteren Berechnungen wurde auf dieser Basis von einem vollständigen anaeroben Abbau der betrachteten Komponenten des MC-Abwassers ausgegangen. Die atomare Zusammensetzung der MC-Abwasser-Einzelkomponenten aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) wurde aufgeschlüsselt und aufsummiert, um so die molare Gesamtkonzentration an C, H und O im MC-Abwasser zu erhalten. Es ergaben sich:

0,588 Mol C/l

1,685 Mol H/l

0,493 Mol O/l

Nimmt man an, dass der vorhandene Wasserstoff beim anaeroben Abbau vollständig zu Methan umgesetzt wird, folgt daraus für die Zusammensetzung des gebildeten Biogases <sup>12</sup>:

$$\text{CH}_4 = \frac{1,685}{4} = 0,415 \text{ mol/l} \cong \frac{0,415}{0,173 + 0,415} * 100 = 70,5 \text{ Mol-\%}$$

$$\text{CO}_2 = 0,588 - 0,415 = 0,173 \text{ mol/l} \cong 100 - 70,5 = 29,5 \text{ Mol-\%}$$

Mit 22,4 l/mol (Molares Volumen) ergibt sich daraus:

CO<sub>2</sub>: 3,88 l CO<sub>2</sub>/l Abwasser  $\cong$  29,5 Vol.-%

CH<sub>4</sub>: 9,29 l CH<sub>4</sub>/l Abwasser  $\cong$  70,5 Vol.-%

Der errechnete Methananteil stimmt recht gut mit den gemessenen Werten überein (Mittelwert im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012: 67,9 Vol.-% CH<sub>4</sub> im Gas nach Gaswäsche, d.h. mit Zusatz von Luft).

<sup>12</sup> Alle Berechnungen in diesem Kapitel stammen aus der Feder von Frau Dr. C. Schönborn, Laborleiterin des GWK Bitterfeld-Wolfen.

Die substratspezifische CH<sub>4</sub>-Ausbeute, bezogen auf den theoretischen CSB errechnet sich wie folgt (ohne Berücksichtigung des CSB-Bedarfs für Biomasseaufbau):

$$\text{CH}_4/\text{CSB} = \frac{9,29 \text{ l CH}_4/\text{l Abwasser}}{24,2 \text{ g CSB/l Abwasser}} = 0,38 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg CSB}_{\text{abgebaut}}$$

Dieser Wert ist fast identisch mit der im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012 gemessenen spezifischen CH<sub>4</sub>-Ausbeute von 0,376 Nm<sup>3</sup> Methan/kg CSB<sub>abgebaut</sub> (vgl. Abschnitt 5.7.).

Nach [DWA-M 363, 2010](#) liegt die spezifische Biogasausbeute bei anaerober Behandlung organisch hochkonzentrierter Industrieabwässer im Mittel bei 0,19 bis 0,33 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg CSB<sub>abgebaut</sub>. Im Vergleich dazu kann festgestellt werden, dass sowohl die theoretisch erreichbare als auch die im Praxisbetrieb gemessene spezifische Methanausbeute im GWK überdurchschnittlich hoch sind.

## 5.2. Kohlenstoffbilanz

Auf Basis des Parameters CSB wird nachfolgend versucht, den Kohlenstoff-Input und -Output an den maßgeblichen Schnittstellen der Anaerobanlage zu bilanzieren. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Bilanz sind in Abb. 32 zusammengefasst.

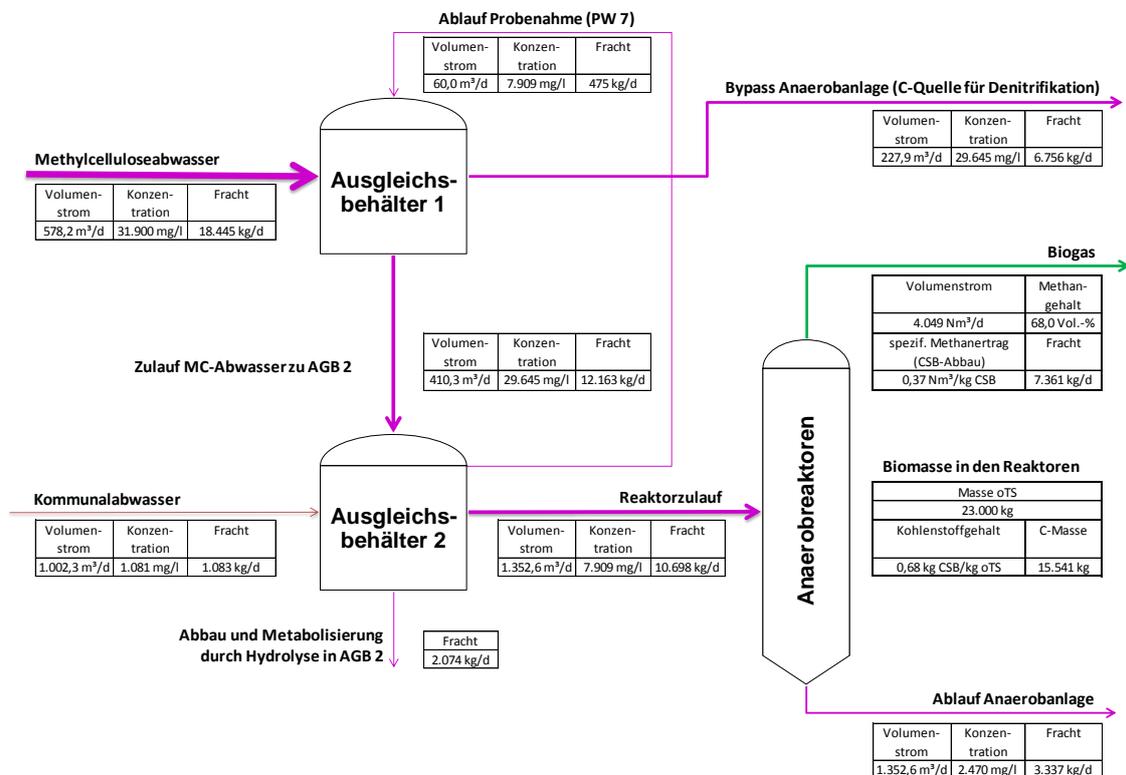


Abb. 32: Kohlenstoffbilanz (Mittelwerte) im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012

Wie in Abschnitt 4.4. ausgeführt, lag der CSB-Abbau in den Anaerobreaktoren im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012 bei 68,7%. Dieser Teil des zugeführten Kohlenstoffs wird im Wesentlichen in Methan umgewandelt und verlässt den Reaktor auf der

Biogasstrecke. Nur ca. ein Drittel der zugeführten CSB-Fracht verbleibt im Abwasser und wird zur weiteren Behandlung den BIOHOCH<sup>®</sup>-Reaktoren zugeführt. Ein sehr kleiner Teil des zugeführten CSB geht in den Aufbau neuer Biomasse.

Wie in Abschnitt 4.9. ausgeführt, ist davon auszugehen, dass sich Biomassezuwachs und Austrag von Feststoffen aus den beiden Anaerobreaktoren die Waage halten, was sich durch eine grobe Überschlagsrechnung bestätigt hat.

### **5.3. Stickstoffbilanz**

Zur Messung der bioverfügbaren Stickstofffraktionen Ammonium und organisch gebundener Stickstoff wurden im Zu- und im Ablauf der Anaerobreaktoren Onlinemessgeräte für den Parameter TNb (Total Nitrogen bounded) installiert<sup>13</sup>. Leider musste die im Ablauf installierte Messung Anfang Dezember 2011 aus technischen Gründen außer Betrieb genommen werden, so dass eine Bilanz auf Basis dieser Online-TNb-Werte nicht möglich ist. Anstelle dessen stellt die Stickstoffbilanz ab auf die Laborwerte für TNb<sup>14</sup>, die in 24-h-Mischproben vom Zulauf und Ablauf der Anaerobanlage gemessen wurden. Die Ergebnisse sind in Abb. 33 zusammengefasst.

Im Zulauf von Anaerobanlagen sollte ein Mindestnährstoffverhältnis von CSB : N : P von 800 : 5 : 1 nicht unterschritten werden. Methylcelluloseabwasser enthält praktisch so gut wie keinen Stickstoff (TNb < 10 mg/l). Stickstoff im Zulauf zur Anaerobanlage kommt nur aus Kommunalabwasser und aus der Zugabe von Harnstoff.

Normal verschmutztes häusliches Abwasser enthält etwa 35...40 mg/l NH<sub>4</sub>-N und ca. 10...20 mg/l org. N. Das Kommunalabwasser im GWK Bitterfeld weist einen höheren Gehalt auf. Trotzdem muss Harnstoff (in AGB 2) dosiert werden, um das o. g. Mindestnährstoffverhältnis zu erreichen. Nach [KOPPE & STOZEK, 1999](#) sind 31% des Harnstoffs im kommunalen Abwasser bereits nach 2 h gespalten, nach 20 h sind 91% abgebaut. Die Aufenthaltszeit in AGB 2 beträgt ca. 6-8 h, die Verweilzeit in den Reaktoren 27 h. Ein großer Teil des im Ablauf der Anaerobreaktoren gemessenen Stickstoffs liegt folglich in Form von Ammoniumstickstoff vor. Der relativ hohe Anteil an organischem Stickstoff im Ablauf der Anaerobanlage resultiert wahrscheinlich aus Schwebstoffen, da die TNb-Analysen immer von homogenisierten Proben durchgeführt wurden ([SCHÖNBORN, 2012](#)).

---

<sup>13</sup> Außer NH<sub>4</sub>-N und org. N werden im Parameter TNb auch NO<sub>x</sub>-N erfasst. Da Nitrit und Nitrat aber weder im Methylcellulose- noch im Kommunalabwasser in nennenswerten Konzentrationen anzu-treffen sind und unter anaeroben Bedingungen auch nicht gebildet werden können, repräsentiert TNb hier die Summe der bioverfügbaren Stickstofffraktionen und entspricht demzufolge dem Total Kjeldahl-Nitrogen (TKN).

<sup>14</sup> Das zugehörige Messverfahren wird im internen Gebrauch des GWK als „N ges. (Küvette)“ bezeichnet. Basis: Küvettentest „LATON“ der Fa. Hach-Lange; beruht auf oxidativem Aufschluss der N-Verbindungen in der Probe mit Kaliumperoxodisulfat und anschließender photometrischer Messung als NO<sub>3</sub>-N.

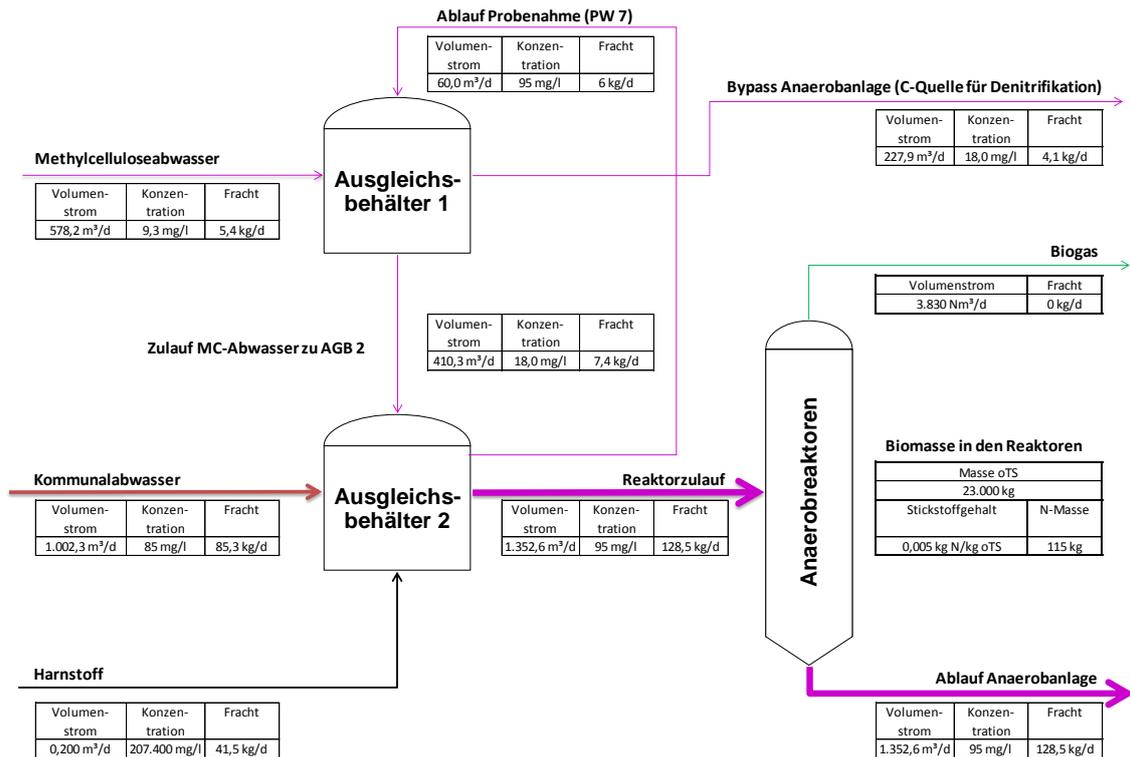


Abb. 33: Stickstoffbilanz (Mittelwerte) im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012

Der Pfad für Stickstoff verläuft ausschließlich entlang der Abwasserstrecke. Biogas enthält Stickstoff allenfalls in Spuren, die Stickstofffracht ist demzufolge Null. Der Stickstoffumsatz in den Anaerobreaktoren ist so gering, dass keine Abnahme gemessen werden kann.

#### 5.4. Phosphorbilanz

Die Phosphorbilanz in Abb. 34 beruht auf dem Parameter  $P_{\text{Gesamt}}$ .

Normal verschmutztes häusliches Abwasser enthält etwa 10...12 mg/l P. In dieser Größenordnung liegt auch die Konzentration im Kommunalabwasser im GWK Bitterfeld. Methylcelluloseabwasser enthält nur sehr wenig Phosphor. Im Zulauf zu den Anaerobreaktoren wird das o. g. Mindestnährstoffverhältnis eingestellt, indem zusätzlich zum Phosphoranteil aus dem Kommunalabwasser Phosphorsäure dosiert wird.

Genau wie beim Stickstoff verläuft der Pfad für Phosphor ausschließlich entlang der Abwasserstrecke. Biogas trägt keine Phosphorfracht. Der Phosphorumsatz in den Anaerobreaktoren ist ebenfalls verschwindend gering, eine Abnahme kann nicht gemessen werden.

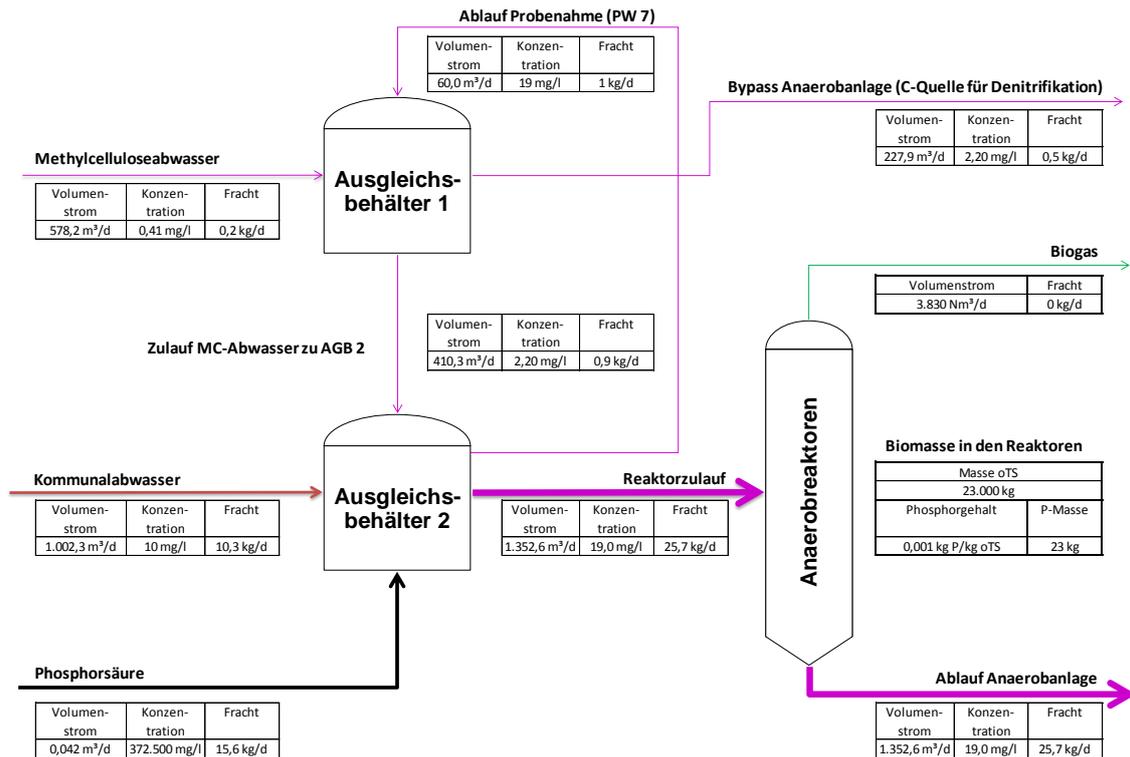


Abb. 34: Phosphorbilanz (Mittelwerte) im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012

## 5.5. Sankey-Diagramm der Energieströme

Im Mittel wurde den Anaerobreaktoren im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012 eine CSB-Fracht in Höhe von ca. 10.698 kg CSB/d zugeführt. Davon wurden ca. 7.361 kg CSB/d abgebaut, d. h. rund zwei Drittel der Zulauffracht. Das verbleibende Drittel hat die Anaerobreaktoren via Ablauf verlassen und wurde den Biohochreaktoren zugeführt. Bei dem anaeroben Abbau wurden täglich ca. 4.049 Nm<sup>3</sup> Biogas mit einem mittleren Methangehalt von ca. 67,9% erzeugt (vgl. Tab. 1 und Abb. 32).

$$4.049 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas/d} * 0,679 \sim 2.751 \text{ Nm}^3 \text{ Methan/d}$$

Der Heizwert von Methan beträgt 35.883 MJ/Nm<sup>3</sup> bzw. 9,968 kWh/Nm<sup>3</sup><sup>15 16</sup>. Somit ergibt sich aus der vorgenannten Methanherzeugung eine Energieerzeugung von

$$2.751 \text{ Nm}^3 \text{ Methan/d} * 9,968 \text{ kWh/Nm}^3 \sim 27.425 \text{ kWh/d.}$$

Die Biogasmessung in den vier BHKW's ergab einen geringeren Verbrauch in Höhe von 3.830 Nm<sup>3</sup> Biogas/d. Dies entspricht 2.602 Nm<sup>3</sup> Methan/d bzw. einer Energie von 25.942 kWh/d (vgl. Tab. 1). Die Differenz zu den o. g. Bruttowerten ist als Verlust zu interpretieren (z. B. Fackelverluste) bzw. auf Differenzen zwischen den einzelnen Messgeräten zurückzuführen.

<sup>15</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Heizwert>

<sup>16</sup> <http://thermodynamik.hs-zigr.de/lf/pdfs/stoffwerte.pdf>

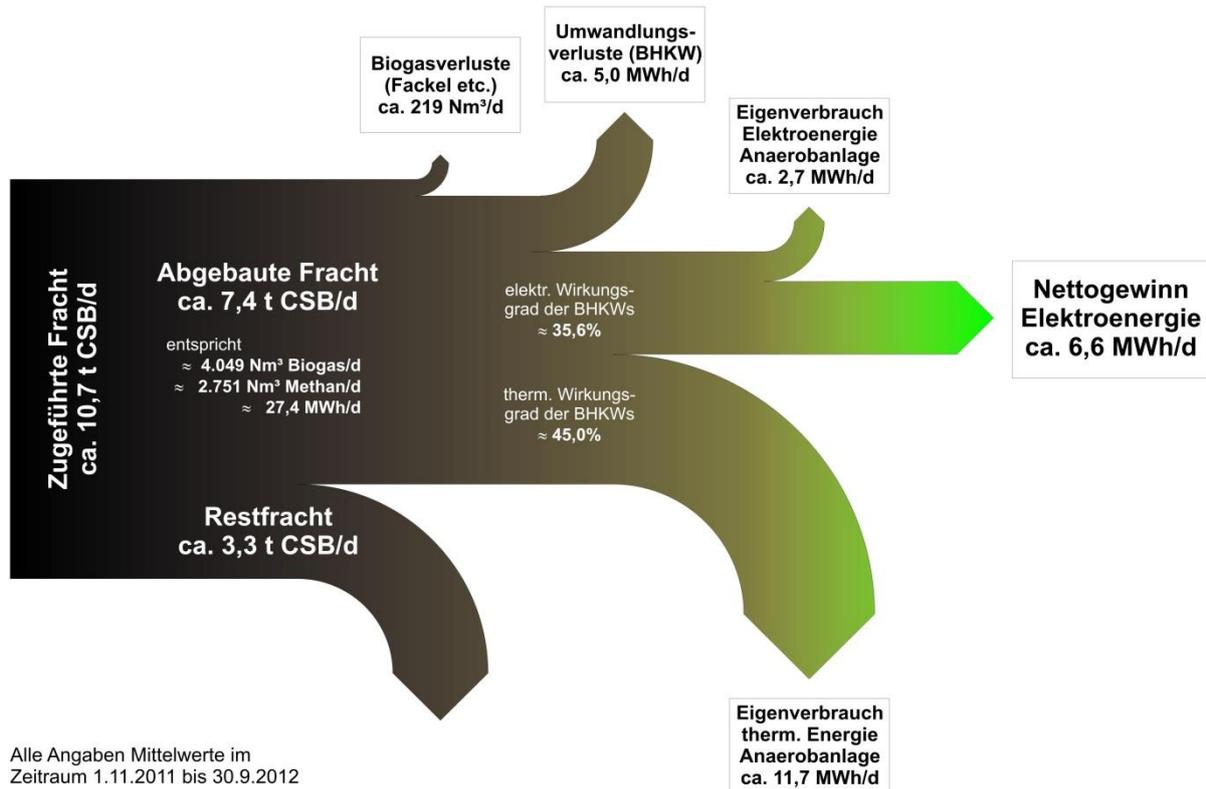


Abb. 35: CSB-Frachten, Biogas- und Methangasproduktion sowie Energieströme der Anaerobanlage im GWK Bitterfeld-Wolfen für den Zeitraum November 2011 bis September 2012 als Sankey-Diagramm

Nach den Messungen des GWK wurde von den BHKW's im o. g. Zeitraum als Mittelwert eine elektrische Arbeit von 9.249 kWh/d geleistet (vgl. Tab. 2). Bezogen auf den Energiegehalt des Biogases, das den BHKW's zugeführt wurde, entspricht dies einem elektrischen Wirkungsgrad von

$$\eta_{\text{elektr.}} = \frac{9.249 \text{ kWh/d}}{25.942 \text{ kWh/d}} \sim 35,6\%$$

Der Eigenverbrauch der Anaerobanlage an Elektroenergie betrug 2.684 kWh/d. Der nach Abzug dieses Eigenverbrauchs verbleibende Nettogewinn an Elektroenergie belief sich auf 6.565 kWh/d (vgl. Tab. 2).

Der thermische Wirkungsgrad der BHKW's wurde in der Leistungsfahrt mit rund 45% ermittelt. Damit ergibt sich die tägliche thermische Arbeit zu

$$25.942 \text{ kWh/d} \cdot 0,45 = 11.674 \text{ kWh/d.}$$

Diese bilanziellen Zusammenhänge sind in Abb. 35 in Form eines Sankey-Diagramms dargestellt.

## 6. Kennzahlen zur Energieeffizienz

### 6.1. Elektroenergie- und Wärmebilanz ohne und mit Anaerobanlage

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht der wichtigsten Kennziffern zur Elektroenergie- und Wärmebilanz des GWK Bitterfeld-Wolfen ohne und mit Anaerobanlage für den Zeitraum eines Kalenderjahres.

Im Unterschied zu den Auswertungen in den Kapiteln 4. und 5. dieses Berichts diente das vollständige Kalenderjahr 2012 (01.01.2012 bis 31.12.2012) als Vergleichszeitraum, weil 2012, abgesehen von den o.g. Unterbrechungen, das erste komplette Betriebsjahr der Anaerobanlage war und damit nicht auf Hochrechnungen zurückgegriffen werden musste. Als Ausgangszustand wurde die Situation des GWK im Jahr 2010 zugrunde gelegt, d. h. das letzte Betriebsjahr vor Inbetriebnahme der Anaerobanlage.

Alle Angaben zum GWK gesamt in der folgenden Tab. 4 verstehen sich einschließlich der Klärschlammbehandlungsanlage des GWK.

Tab. 4: Elektroenergie- und Wärmebilanz des GWK Bitterfeld-Wolfen für die Jahre 2010 und 2012

Bilanzzeitraum:		1.1.2010 - 31.12.2010	1.1.2012 - 31.12.2012		
Vergleichsbasis:		Ausgangszustand	Zustand nach Inbetriebnahme der Anaerobanlage		
Anlagenabgrenzung:		Gesamtes GWK vor Inbetriebnahme Anaerobanlage	Gesamtes GWK ohne Anaerobanlage	Anaerobanlage	Gesamtes GWK einschließlich Anaerobanlage
Elektroenergie	-Verbrauch gesamt	19.005 MWh	18.065 MWh	967 MWh	19.032 MWh
	-Eigenprod. genutzt	0 MWh	0 MWh	3.403 MWh	3.403 MWh
	-Einkauf bzw. Nettogewinn	<b>19.005 MWh</b>	18.065 MWh	-2.436 MWh	<b>15.629 MWh</b>
Wärmeenergie	-Verbrauch gesamt	29.088 MWh	29.471 MWh	4.302 MWh	33.773 MWh
	-Eigenprod. genutzt	24.378 MWh	25.645 MWh	3.531 MWh	29.176 MWh
	-Einkauf bzw. Nettogewinn	4.710 MWh	3.826 MWh	771 MWh	<b>4.597 MWh</b>

Aus der Bilanz in Tab. 4 ist zu entnehmen, dass die in den BHKW's erzeugte Elektroenergie nur zu etwa 30% in der Anaerobanlage selbst verbraucht wird, die verbleibenden 70% ersetzen den bisherigen Fremdbezug von Elektroenergie für den Betrieb der übrigen Reinigungsstufen. Damit ergibt sich aufgrund der Elektroenergieerzeugung durch die Anaerobanlage eine Nettoeinsparung von 2,4 GWh/a.

Die in den BHKW's gewonnene Wärmeenergie wird zu 100% in der Anaerobanlage verbraucht. Der Fremdbezug von Wärmeenergie hat in 2012 gegenüber 2010 leicht abgenommen. Das ist aber unabhängig vom Betrieb der Anaerobanlage darauf zu-

rückzuführen, dass die Eigenproduktion von Wärme aus dem verbrannten Klärschlamm in 2012 höher war als 2010.

Zu dem Zeitpunkt, als der Antrag auf Fördermittel aus dem Umweltinnovationsprogramm des Bundes gestellt wurde, war vorgesehen, dass nach Inbetriebnahme der Anaerobanlage beim Fremdbezug von Elektroenergie insgesamt 6,6 GWh jährlich (=18 MWh/d) eingespart werden können. Dieser Annahme lagen eine Zulaufkraft von 40 t CSB/d und ein 60%iger CSB-Abbaugrad zugrunde, woraus sich ein täglicher CSB-Abbau von 24 t ergibt. Bezieht man den der Einsparung entsprechenden Nettoenergiegewinn von 18 MWh/d auf die abgebaute CSB-Fracht von 24 t/d, so resultiert ein spezifischer Wert von 0,75 MWh/t CSB<sub>abgebaut</sub>.

Aus der Energiebilanz in Abschnitt 5.5. und Abb. 35 sind für die Anaerobanlage folgende Daten zu entnehmen: Der tägliche Nettogewinn an Elektroenergie beläuft sich auf ca. 6,6 MWh/d. Diesem Nettoenergiegewinn liegt ein CSB-Abbau von ca. 7,4 t/d zugrunde. Es ergibt sich also ein spezifischer Faktor von 0,89 MWh/t CSB<sub>abgebaut</sub>, d.h. ein um ca. 20% höherer spezifischer Energieertrag als ursprünglich angesetzt.

Aufgrund der in Abschnitt 4. erläuterten Ursachen erfolgt eine geringere CSB-Beschickung und damit eine geringere Energieerzeugung, als im Fördermittelantrag angesetzt wurde. Die höhere spezifische Energieausbeute pro kg abgebautem CSB gegenüber dem Antrag unterstreicht jedoch die Leistungsfähigkeit des Verfahrens, die nach Aufstockung der Biomassekonzentration in den Reaktoren auch zu einer entsprechend höheren absoluten Energieeinsparung führen wird.

## **6.2. Vergleich mit Kennzahlen des UBA**

Für kommunale Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 wird von [HABERKERN et al., 2008](#) als **Zielwert** für den Stromverbrauch der gesamten Anlage

$$18,0 \text{ kWh}/(\text{EW} * \text{a})$$

und als **Toleranzwert**

$$30,0 \text{ kWh}/(\text{EW} * \text{a})$$

vorgeschlagen <sup>17</sup>.

Obwohl das GWK einen höheren Industrieabwasseranteil am Gesamtzulauf hat und insoweit nicht 100%ig mit anderen Kommunalkläranlagen vergleichbar ist, sollen die o.g. Werte als Anhaltspunkt zur Beurteilung der erreichten Energieeffizienz herangezogen werden.

Energetisch relevante Verfahrensstufen, die nicht bei allen Kläranlagen anzutreffen sind, werden durch Zuschläge zum Zielwert bzw. zum Toleranzwert berücksichtigt.

<sup>17</sup> Vereinfacht ausgedrückt bilden Zielwerte die technisch erreichbare Energieeffizienz ab, die jedoch in der Praxis kaum erzielt werden kann. Toleranzwerte beschreiben den Stand der Energieeffizienz, der bei mindestens der Hälfte der untersuchten Kläranlagen mit vertretbarem Aufwand erreicht werden kann.

Dies trifft im GWK für die chemisch-physikalische Industrieabwasservorbehandlung (Fällungs- und Flockungsstufe), die Klärschlamm-trocknung und die Abluftbehandlung zu. Die Fällungsbehandlung des Industrieabwassers wird mit den energetischen Zuschlägen für eine Flockungsfiltration angesetzt.

Der Berechnung in Tab. 5 liegen folgende Werte zugrunde:

Ausgangszustand 2010 (vor Inbetriebnahme der Anaerobanlage):

Bruttoenergieverbrauch:	19.005.000 kWh/a
<b>Fremdbezug an Elektroenergie (=Nettoverbrauch)</b>	<b>19.005.000 kWh/a</b>
Anlagenkapazität (Einwohnerwerte) auf Basis CSB:	485.833 EW <sub>CSB</sub>
Kapazitätsauslastung	88,6% entspr. 430.567 EW
Zuschläge zum Zielwert:	
für Flockungsfiltration	2 kWh/(E * a)
für Klärschlamm-trocknung	2 kWh/(E * a)
für Abluftbehandlung (130.000 m <sup>3</sup> Abluft/h)	2,6 kWh/(E * a)
Zuschläge zum Toleranzwert:	
für Flockungsfiltration	4 kWh/(E * a)
für Klärschlamm-trocknung	4 kWh/(E * a)
für Abluftbehandlung (130.000 m <sup>3</sup> Abluft/h)	5,3 kWh/(E * a)

Zustand 2012 (gesamtes GWK unter Berücksichtigung der Anaerobanlage):

Bruttoenergieverbrauch:	19.032.000 kWh/a
<b>Fremdbezug an Elektroenergie (=Nettoverbrauch)</b>	<b>15.629.000 kWh/a</b>
Anlagenkapazität (Einwohnerwerte) auf Basis CSB:	585.833 EW <sub>CSB</sub>
Kapazitätsauslastung	77,2% entspr. 452.251 EW
Zuschläge zum Zielwert:	
für Flockungsfiltration	2 kWh/(E * a)
für Klärschlamm-trocknung	2 kWh/(E * a)
für Abluftbehandlung (150.000 m <sup>3</sup> Abluft/h)	2,9 kWh/(E * a)
Zuschläge zum Toleranzwert:	
für Flockungsfiltration	4 kWh/(E * a)
für Klärschlamm-trocknung	4 kWh/(E * a)
für Abluftbehandlung (150.000 m <sup>3</sup> Abluft/h)	5,8 kWh/(E * a)

Tab. 5: Vergleich der Energieeffizienz des GW Bitterfeld-Wolfen vor und nach Inbetriebnahme der Anaerobanlage mit den UBA-Kennziffern ([HABERKERN et al., 2008](#))

	Energieeffizienz GW insgesamt auf Basis Bruttostromverbrauch	Energieeffizienz GW insgesamt auf Basis Nettostromverbrauch (Fremdbezug)	Zielwert GK 5 18 kWh/(E * a) mit Zuschlägen für besondere Verfahrensstufen	Abweichung vom Zielwert in Prozent	Toleranzwert GK 5 30 kWh/(E * a) mit Zuschlägen für besondere Verfahrensstufen	Abweichung vom Toleranzwert in Prozent	Steigerung der Energieeffizienz 2012 : 2010
<b>Ausgangszustand 2010 (vor Inbetriebnahme der Anaerobanlage)</b>	44,2 kWh/(E * a)	44,2 kWh/(E * a)	24,6 kWh/(E * a)	79%	43,3 kWh/(E * a)	2%	22%
<b>Zustand 2012 (gesamtes GW unter Berücksichtigung der Anaerobanlage)</b>	42,0 kWh/(E * a)	34,6 kWh/(E * a)	24,9 kWh/(E * a)	39%	43,8 kWh/(E * a)	-21%	

Während in 2010 der Stromverbrauch der Anlage mit 44,2 kWh/(E\*a) sogar über dem Toleranzwert lag, wurde 2012 nach Inbetriebnahme der Anaerobanlage der Zielwert zwar noch nicht erreicht, der Toleranzwert jedoch um 21 % unterschritten. Die Energieeffizienz der Anlage hat sich durch die Anaerobanlage gegenüber 2010 um 22 % verbessert.

Stellt man die auf die tatsächlich angeschlossenen Einwohnerwerte normierten Bruttoenergieverbräuche von 2010 und 2012 gegenüber (2. Spalte in Tab. 5), so zeigt sich, dass sich auch der spezifische Bruttoenergieverbrauch mit dem Betrieb der Anaerobanlage um 2,2 kWh/(E\*a) verbessert hat. Zusammen mit dieser über die Eigenherzeugung der Anaerobanlage hinausgehenden Einsparung beläuft sich die Gesamt-reduzierung des Elektroenergieverbrauchs in 2012 gegenüber 2010 damit sogar auf 3,37 GWh/a (vgl. Tab. 6 auf S. 69).

Diese zusätzliche Einsparung wird auf folgende Effekte zurückgeführt:

- In 2012 hatte sich gegenüber 2010 die dem GWK aus der MC-Produktion zugeleitete CSB-Fracht um 36% vergrößert. Aufgrund der Behandlung eines erheblichen Teils des MC-Abwassers in der Anaerobstufe wurden der aeroben Behandlungsstufe des GWK jedoch in 2012 13% weniger CSB-Fracht aus der MC-Produktion zugeführt. Dementsprechend niedriger war der erforderliche Bedarf an Belüftungsenergie.
- Durch die Anaerobanlage ergeben sich positive Synergieeffekte für den Gesamtbetrieb des GWK, z.B. durch die nunmehr wesentlich bessere Pufferung von CSB-Frachtspitzen aus dem Methylcelluloseabwasser.

Weitere diesbezügliche Optimierungspotenziale werden mit der Implementierung des Prozessführungsmoduls erschlossen.

## 7. Emissionen

### 7.1. Verminderung der klimarelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen

Durch die Senkung des Fremdbezugs an Elektroenergie werden die mit der Energiegewinnung verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftwerke reduziert.

In Tab. 6 sind der Fremdbezug von Elektroenergie und die CO<sub>2</sub>-Äquivalente für die Betriebsjahre 2010 (Ausgangszustand ohne Anaerobanlage) und 2012 (mit Anaerobanlage) aufgeführt. Die in den Berechnungen verwendeten CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren zum Inlandsstromverbrauch beruhen auf Angaben des Umweltbundesamts zur Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2010 sowie der Abschätzung für 2011 ([UBA, 2012](#)).

Im Vergleich zur Planung fällt die Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen geringer aus, sie beträgt aber immer noch ca. 1.900 t jährlich.

Tab. 6: Fremdbezug von Elektroenergie und CO<sub>2</sub>-Äquivalente des GWK Bitterfeld-Wolfen vor und nach Inbetriebnahme der Anaerobanlage

	<b>Ausgangszustand 2010 (vor Inbetriebnahme der Anaerobanlage)</b>	<b>Zustand 2012 (gesamtes GWK unter Berücksichtigung der Anaerobanlage)</b>	<b>Einsparung 2012 im Vergleich zu 2010</b>
<b>Fremdbezug Elektroenergie</b>	19,00 GWh/a	15,63 GWh/a	3,37 GWh/a
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor Inlandsstromverbrauch</b>	0,566 kg CO <sub>2</sub> /kWh		
<b>Äquivalent der CO<sub>2</sub>- Emissionen</b>	10.754 t CO <sub>2</sub> /a	8.846 t CO <sub>2</sub> /a	1.908 t CO <sub>2</sub> /a

### 7.2. Vermiedene CO<sub>2</sub>-Emissionen

Der zusätzlich entstandene Energiebedarf der Anaerobanlage wird vollständig aus dem anfallenden Biogas und damit aus erneuerbaren Quellen gedeckt.

Der Eigenverbrauch der Anaerobanlage an Elektroenergie betrug in 2012 ca. 967.000 kWh (vgl. Tab. 4 auf S. 64). Unter Verwendung der vom BMU publizierten Treibhausgas-Vermeidungsfaktoren der erneuerbaren Stromerzeugung 2011<sup>18</sup> für Klärgas<sup>19</sup> entspricht dies einer vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emission von etwa 708 t CO<sub>2</sub>/a.

<sup>18</sup> Der Vermeidungsfaktor ist der Quotient aus vermiedenen Emissionen und der Strom- bzw. Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energiequellen. Er entspricht der durchschnittlichen Vermeidung von Treibhausgasen und Luftschadstoffen, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. ([BMU, 2012](#))

<sup>19</sup> Nach

<http://de.wikipedia.org/wiki/Biogas>

wird die Bezeichnung Biogas zusammenfassend für energiereiche Gase verwendet, die unter anoxischen Bedingungen aus organischen Stoffen entstehen. Dazu zählen:

Klärgas: das bei der Reinigung von Abwasser entstehende Gas

Strom	Vermeidungsfaktor	Wärme	Vermeidungsfaktor
	[g CO <sub>2</sub> -Äq./kWh]		[g CO <sub>2</sub> -Äq./kWh]
Wasserkraft	779	biogene Festbrennstoffe (Haushalte)	299
Windenergie	721	biogene Festbrennstoffe (Industrie)	318
Photovoltaik	664	biogene Festbrennstoffe (HW/HKW)	291
biogene Festbrennstoffe	765	biogene flüssige Brennstoffe	278
biogene flüssige Brennstoffe	586	Biogas	171
Biogas	549	Klärgas	280
Klärgas	732	Deponiegas	280
Deponiegas	732	biogener Anteil des Abfalls	296
biogener Anteil des Abfalls	760	Solarthermie	221
Geothermie	472	tiefe Geothermie	68
		oberflächennahe Geothermie, Umweltwärme <sup>1)</sup>	81

Abb. 36: Treibhausgas-Vermeidungsfaktoren der erneuerbaren Strom- und Wärmeerzeugung 2011 ([BMU, 2012](#))

In 2012 lag die thermische Leistung der BHKWs im Biogasbetrieb bei ca. 3.531.000 kWh (vgl. Tab. 4 auf S. 64). Dies entspricht gleichzeitig dem Eigenverbrauch der Anaerobanlage an Wärmeenergie aus erneuerbaren Quellen. Unter Verwendung der o. g. Vermeidungsfaktoren für Klärgas entspricht dies einer vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emission von etwa 989 t CO<sub>2</sub>/a.

### **7.3. Emissionen Abluft**

Obwohl alle wesentlichen Anlagenteile der Anaerobanlage als geschlossene Behälter ausgeführt sind, gibt es folgende 3 Abluftquellen:

- Abluft durch schwankenden Füllstand in den Ausgleichbehältern 1 und 2
- Gasraum oberhalb des Wasserspiegels im Standrohr sowie in den Anaerobreaktoren
- Verbrennungsluft der BHKW's

Die Emissionen aus diesen drei Abluftquellen werden nachfolgend beschrieben.

#### **7.3.1. Abluft aus den Ausgleichbehältern 1 und 2**

Wie im Kapitel 3. beschrieben, dient der AGB 1 dem Ausgleich der Abwassermengen aus der Methylcelluloseherstellung sowie dem Konzentrationsausgleich. Leicht flüchtige Verbindungen, die in der Produktion eingesetzt werden oder als Nebenprodukte entstehen, können aufgrund der Turbulenzen vorzugsweise in AGB 1 gestrippt werden. Hierzu zählen Stoffe, wie z.B. Methanol oder Dimethylether, die brennbar bzw. in bestimmten Konzentrationsbereichen sogar explosiv sein können. Deshalb wurden die AGB's in Ex-Zone 0 eingestuft. Eine Abluftbehandlung über den vorhandenen Kreuzstromwäscher (wie ursprünglich geplant) ist nicht möglich, weil damit die Ex-

---

Faulgas: das erst in der Klärschlammfäulung produzierte Gas  
Deponiegas: aus einer Mülldeponie austretendes Gas

Deshalb wird der Vermeidungsfaktor von **Klärgas** angewendet.

Zone um den Kreuzstromwäscher erweitert worden wäre. Der Kreuzstromwäscher gehört zum vorhandenen Altbestand der Anlage und reinigt mit einer dreistufigen Wäsche (sauer, alkalisch, oxidativ) die Abluft aus der kommunalen Vorbehandlung und der Klärschlammbehandlungsanlage. Er ist nicht auf Ex-Schutzbedingungen ausgelegt und hätte deshalb komplett umgerüstet werden müssen. Das wäre nicht verhältnismäßig gewesen.

Die Behälter atmen deshalb unbehandelt gegen die Atmosphäre. Wie die Betriebsergebnisse jedoch gezeigt haben, ist die Schwankungsbreite der Füllstände beider Behälter sehr gering, so dass nur geringe Abluftmengen entstehen. Als Auslegungswerte für die Abluftströme wurden für AGB 1 max. 50 m<sup>3</sup>/h und für AGB 2 max. 140 m<sup>3</sup>/h angenommen. Diese Werte werden jedoch nur dann erreicht, wenn die Behälter leer sind und neu befüllt werden, was nur nach Außerbetriebnahmen im Rahmen von Revisionen, aber nicht im laufenden Betrieb eintritt. Im realen Betrieb schwanken die Behälterfüllstände täglich nur um wenige Prozent.

In AGB 2 wird dem MC-Abwasser kommunales Abwasser zugemischt. Darüber hinaus erfolgt in diesem Behälter die Nährstoffzugabe, so dass durch mikrobiologische Umsetzungen eine Hydrolyse der organischen Abwasserinhaltsstoffe stattfindet. Durch die Vermischung beider Abwasserteilströme wird zudem eine Temperatur eingestellt, die die Hydrolyse beschleunigt. Dieser Prozess ist gewünscht, da er eine Voraussetzung für eine optimale Biogasproduktion darstellt. Ein Hydrolyseprodukt ist Wasserstoff, das als Gas die Wasserphase verlässt. In geringem Maß kann auch Methangas entstehen und freigesetzt werden. Beide Hydrolyseprodukte sind brennbar und unter bestimmten Bedingungen explosionsfähig. Deshalb ist aufgrund dieser Stoffe ebenfalls die Einstufung in Ex-Zone 0 erforderlich. Die ex-schutztechnische Absicherung erfolgt über Flammendurchschlagssicherungen der Klasse IIC.

In der folgenden Tab. 7 sind diejenigen Stoffe zusammengefasst, die aufgrund mikrobiologischer Umsetzungsprozesse entstehen.

Tab. 7: Gasmessungen im Luftraum der Ausgleichsbehälter im Zeitraum 8.6. bis 8.9.2011

Datum	Wasserstoff (Vol.-%)		Methan (Vol.-%)		CO <sub>2</sub> (Vol.-%)		Schwefelwasserstoff (ppm)	
	UEG (Vol%) 4,0 OEG (Vol%) 77		UEG (Vol%) 4,4 OEG (Vol%) 16,5				UEG (Vol%) 4,3 OEG (Vol%) 45,5	
	AGB1	AGB2	AGB1	AGB2	AGB1	AGB2	AGB1	AGB2
08./09.06.11	7,14	0,28	0,37	0,04	1,09	0,17	<0,5	
28.06.2011	1,1	1,24	0,29	0,51	0,93	0,94		
31.08.2011	16,6	25,4	0,27	0,26	1,0	1,36	738	1.475
07.09.2011	24,9	33,8	0,22	0,26	0,58	0,86		
08.09.2011	3,62	0,06	<0,01	<0,01	0,26	0,05		

Neben Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) sind dies vor allem Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S). Während die Methankonzentration immer unterhalb

der unteren Explosionsgrenze liegt, wird sie für Wasserstoff zeitweise deutlich überschritten. Weil dies schon in der Planungsphase der Anlage erwartet wurde, wurden technische und organisatorische Maßnahmen ergriffen, um die Risiken einer Explosion zu vermindern. Wasserstoff kann nur in Verbindung mit Luftsauerstoff sowie einer Zündquelle zur Explosion gebracht werden. Daher wurden alle Behälterzu- und -ableitungen mit zugelassenen Sicherungssystemen ausgestattet. Zu den technischen Maßnahmen zählen im Einzelnen ([STULZ-PLANAQUA, 2012b](#)):

- Alle Zuleitungen von Flüssigkeiten (Abwasser, Nährsalze) sind mit Syphons ausgestattet, die ständig mit Flüssigkeit gefüllt sind.
- Die Behälter sind jeweils mit einer Füllstandsmessung, einer Überlauf- und Unterfüllsicherung ausgestattet. Die Überfüllsicherungen sind für den Einbau in der Ex-Zone 0 zugelassen.
- Rührwerke können nur im eingetauchten Zustand betrieben werden.
- Unterfüllsicherungen sind als Notabschaltung der Wasserentnahmesysteme und der Rührwerke installiert.
- Auf den Ausgleichbehältern befindet sich jeweils eine Flammendurchschlagssicherung der Klasse IIC.
- Die Flammendurchschlagssicherung ist zusätzlich mit einem Temperatursensor ausgestattet. Bei Temperaturüberschreitung in der Flammendurchschlagssicherung schließt die Klappe im Zuführstutzen zur Flammendurchschlagssicherung, wodurch eine Zufuhr von leicht entzündlichen Stoffen unterbunden wird. Laut Ex-Schutzgutachten kann ein Dauerbrand auf diese Weise wirksam ausgeschlossen werden.

Darüber hinaus findet man in der Abluft beider AGB's leichtflüchtige organische Verbindungen, die aus dem Methylcelluloseabwasser stammen. Da AGB 1 das konzentrierte MC-Abwasser aufnimmt, sind hier die Schadstoffkonzentrationen höher als in AGB 2. Die Auflistung der Einzelstoffe würde Rückschlüsse auf den Produktionsprozess im MC-Betrieb erlauben und ist deshalb vertraulich. Es wurden jedoch aus den nachgewiesenen Einzelverbindungen die C-gesamt-Konzentrationen berechnet. In AGB 1 betrug die C-gesamt-Konzentration 38,2 g C/m<sup>3</sup> (Mittelwert aus zwei Einzelmessungen im Zeitraum vom 28.06.2011 bis 31.08.2011); im AGB 2 waren es 8,1 g C/m<sup>3</sup> (Messung vom 28.06.2011). In Tab. 8 wurde auf Basis der tatsächlichen Füllstandsschwankungen in den AGB 1 und 2 und unter zusätzlicher Berücksichtigung der maximalen gemessenen Methankonzentrationen in der Behälterabluft (siehe Tab. 7) die C-gesamt-Fracht aus der Behälteratmung der AGB 1 und 2 berechnet. Daraus ergibt sich, dass im realen Betrieb der Frachtgrenzwert für C-gesamt gemäß TA Luft von 0,50 kg C/h weit unterschritten ist.

Tab. 8: C-gesamt-Fracht aus der Behälteratmung der AGB 1 und 2 im realen Betrieb

	Reale Abluft- volumenströme	C-Gesamtfracht aus organischen Einzelverbindungen des MC- Abwassers	C-Gesamtfracht aus maximaler Methankonzentration in den AGB's	Maximale C-Gesamtfracht aus AGB's im realen Betrieb
	in m <sup>3</sup> /h	in kg C/h	in kg C/h	in kg C/h
AGB 1	3,23	0,12	0,006	0,126
AGB 2	2,15	0,02	0,006	0,026
<b>Summen:</b>		0,14	0,012	<b>0,152</b>

### 7.3.2. Abluft aus dem Standrohr und den Anaerobreaktoren

In den Gasräumen oberhalb der Wasserspiegel der Anaerobreaktoren sowie des Standrohres reichern sich bestimmte leicht flüchtige Komponenten an, wie Tab. 9 zeigt.

Tab. 9: Messergebnisse in den Gasräumen oberhalb der Wasserspiegel in den Anaerobreaktoren sowie des Standrohres

	Wasserstoff (Vol-%)	Methan (Vol.-%)	CO <sub>2</sub> (Vol.-%)	Schwefelwasserstoff (ppm)
UEG (Vol%)	4,0	4,4		
OEG (Vol%)	77,0	16,5		
Reaktor 1	<0,01	0,20	0,87	800
Reaktor 2	<0,01	0,58	2,04	2100
Standrohr	<0,01	14,3	18,4	3200

Die in Tab. 9 zusammengefassten Messergebnisse sind ohne eine gezielte Abluftabsaugung ermittelt worden. Mit der Installation einer Zwangsbelüftung (10- bis 40-facher Luftwechsel) wird die abgesaugte Abluft der vorhandenen Abluft-Anlage zugeleitet. Die Abluft-Anlage ist eine zweistufige chemische Gaswäsche (1. Stufe sauer mit verdünnter H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 2. Stufe alkalisch mit NaOH + oxidativ mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), in der auch die Abluft aus dem gesamten industriellen Behandlungsteil des GWK gereinigt wird. Um die Abluft-Anlage vor explosionsfähiger Atmosphäre zu schützen, wird die aus der Anaerobanlage abgeleitete Abluft mit einem Warngerät zur Messung der Methankonzentration überwacht. Bei Erreichen von 20% der UEG von Methan gibt es eine Warnmeldung an die Leitwarte. Bei Erreichen von 40% der UEG von Methan wird die Abluftzufuhr aus der Anaerobanlage zur Abluft-Anlage gestoppt und die Abluft über eine automatisch betriebene Klappe kurzzeitig in die freie Atmosphäre abgeblasen. Durch die Schichtmitarbeiter ist in einem solchen Falle zu prüfen, ob das Abluftgebläse, das die Zwangsbelüftung realisiert, ordnungsgemäß arbeitet. Ggf. ist die Gebläseleistung zu erhöhen, um einen höheren Luftwechsel zu erreichen ([SCHÖNBORN, 2012](#)).

### 7.3.3. Verbrennungsabluft aus den BHKW's

Durch den TÜV Nord wurden am 21.6.2011 an den BHKW's 1 – 3 Abluftmessungen vorgenommen. Weitere Messungen wurden am 5.7.2012 am nachgerüsteten BHKW 4 vom TÜV Nord durchgeführt. Es musste nachgewiesen werden, dass die in der letzten Spalte der folgenden Tabellen aufgeführten Massenkonzentrationen (bezogen auf das trockene Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K; 101,3 kPa) sowie auf einen Volumengehalt von 5% Sauerstoff im Abgas) entsprechend den Vorgaben nach Kapitel V. Nebenbestimmungen / Punkt 4.3 des Planfeststellungsbeschlusses eingehalten werden (siehe Tab. 10, Tab. 11, Tab. 12 und Tab. 13).

Tab. 10: Messwerte und einzuhaltende Massenkonzentrationen für BHKW 1

Messparameter	Einheit	Messwertbereich	Grenzwert
Kohlenmonoxid (CO) - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	378,8 – 379,6 468,9 – 469,8	1.000
Stickoxide, als NO <sub>2</sub> - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	279,2 – 280,3 345,6 – 347,0	500
Formaldehyd - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	37,6 – 38,4 46,5 – 47,5	60
Schwefeldioxid - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	5,54 – 5,87 6,87 – 7,28	310

Tab. 11: Messwerte und einzuhaltende Massenkonzentrationen für BHKW 2

Messparameter	Einheit	Messwertbereich	Grenzwert
Kohlenmonoxid (CO) - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	419,6 – 420,4 518,3 – 521,8	1.000
Stickoxide, als NO <sub>2</sub> - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	119,3 – 121,4 148,0 – 150,2	500
Formaldehyd - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	39,2 – 39,7 48,7 – 49,0	60
Schwefeldioxid - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	keine Messung	310

Tab. 12: Messwerte und einzuhaltende Massenkonzentrationen für BHKW 3

Messparameter	Einheit	Messwertbereich	Grenzwert
Kohlenmonoxid (CO) - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	392,2 – 393,3 487,1 – 490,7	1.000
Stickoxide, als NO <sub>2</sub> - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	197,0 – 211,5 246,2 – 262,7	500
Formaldehyd - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	25,0 – 32,7 31,1 – 40,7	60
Schwefeldioxid - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	keine Messung	310

Tab. 13: Messwerte und einzuhaltende Massenkonzentrationen für BHKW 4

Messparameter	Einheit	Messwertbereich	Grenzwert
Kohlenmonoxid (CO) - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	412 – 421 595 – 607	1.000
Stickoxide, als NO <sub>2</sub> - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	280 – 308 404 – 445	500
Formaldehyd - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	22 – 23,5 31,8 – 33,8	60
Schwefeldioxid - Normzustand, trocken - 5 Vol% O <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	30 – 50 40 - 70	310

Die in Tab. 10, Tab. 11, Tab. 12 und Tab. 13 genannten Anforderungen sind zugleich auch die Garantiewerte des Anlagenlieferanten. Wie die Tabellen zeigen, unterschreiten alle Messwerte der Massenkonzentrationen die festgelegten Parameter im Abgas der vier BHKW's.

#### **7.4. Schallemissionen**

Die Schallemissionen gemäß Schallgutachten beinhalten die Vorbelastung aus der bestehenden Anlage und die Schallemissionen aus der anaeroben Vorbehandlungsanlage.

Tab. 14: Max. zulässige Schallemissionen

	Einheit	Qualitätsanforderung
Mischgebiet	dB(A)	Tag ≤ 60 Nacht ≤ 45
Kleingartenanlage	dB(A)	≤ 55

Die max. zulässigen Schallemissionen, die auch zugleich die vertraglich zugesicherten Garantiewerte darstellen, werden durch verschiedene Schallschutzmaßnahmen, wie z.B. die vollständige Umhausung der BHKW's unterschritten.

### **7.5. Emissionen Abwasser am Gesamtablauf des GWK in die Mulde**

Im Folgenden sind für die Jahre 2010 bis 2012 die Zulauf- und Abauffrachten für die Hauptverschmutzungsparameter:

- CSB
- P-gesamt
- TNb
- AOX

sowie die Eliminationsleistungen dargestellt. Dabei repräsentiert das Jahr 2010 den Vergleichszeitraum ohne Anaerobanlage. In 2011 erfolgten die Inbetriebnahme und der Probetrieb, während 2012 das erste komplette Betriebsjahr der anaeroben Vorbehandlungsanlage war.

Die verwendeten Zahlenwerte und der größte Teil der Texte in diesem Abschnitt wurden von Frau Dr. Schönborn, Laborleiterin des GWK, beigesteuert.

Von den betrachteten Parametern hat die Reinigungsleistung der Anaerobanlage lediglich auf den CSB einen direkten Einfluss. Hinsichtlich der Parameter Stickstoff und Phosphor ist die zusätzliche Dosierung von Harnstoff und Phosphorsäure im Zusammenhang mit dem Betrieb der Anaerobanlage in Betracht zu ziehen. Eine gezielte N- bzw. P-Elimination erfolgt durch die Anaerobanlage jedoch nicht (vgl. Kapitel 5.).

In den folgenden vier Unterabschnitten werden für jeden der o. g. Parameter zunächst die Zu- und Abauffrachten sowie der Eliminierungsgrad grafisch gegenübergestellt. Alle Eingangswerte sind in einer Tabelle unterhalb der Grafiken angegeben.

### 7.5.1. Chemischer Sauerstoffbedarf

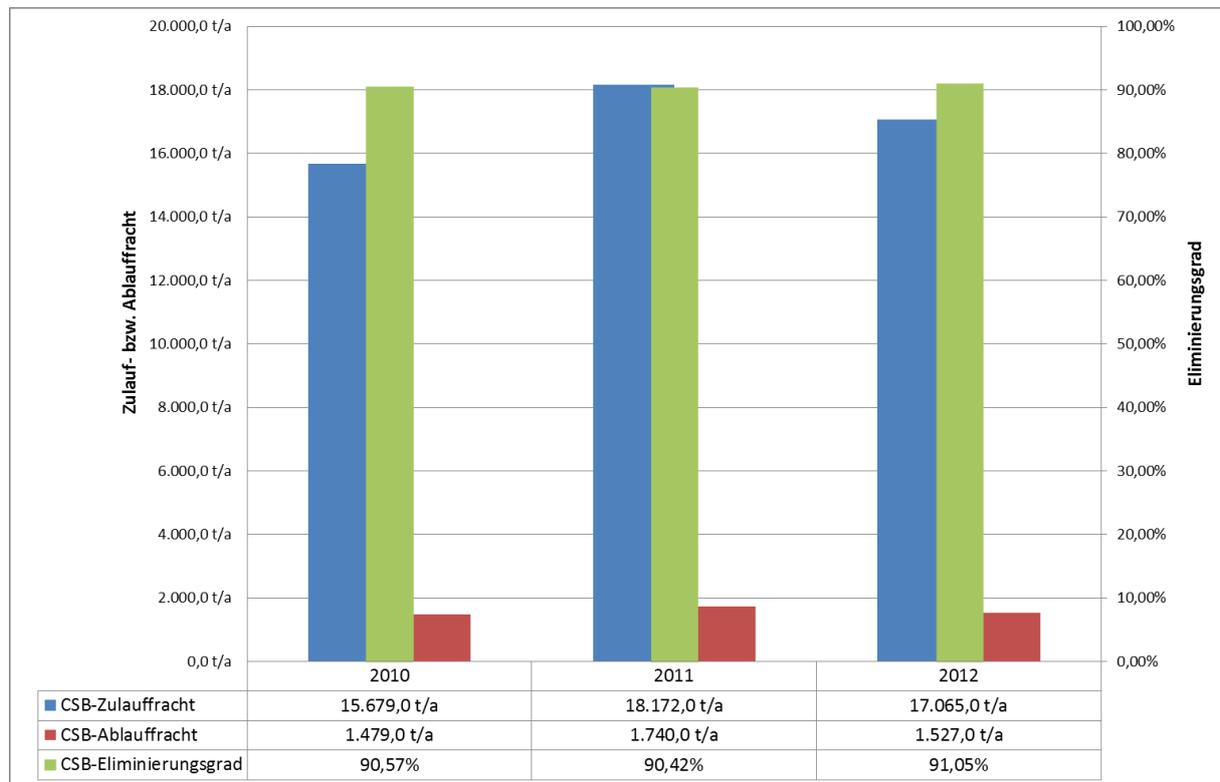


Abb. 37: CSB-Zu- und Abauffrachten sowie Eliminierungsgrad für die Jahre 2010, 2011 und 2012

Aus Abb. 37 geht eine deutliche Zunahme der CSB-Zulauf in 2011 und 2012 gegenüber 2010 hervor, was auf die erhöhte CSB-Fracht aus der Methylcelluloseproduktion zurückzuführen ist.

Die CSB-Elimination erreicht durchweg den in Anhang 22 der Abwasserverordnung genannten Zielwert von 90% und zeigt in 2012 bei durchgängigem Betrieb der Anaerobanlage sogar leicht steigende Tendenz. In 2012 ist die mit dem Ablauf des GWK ins Gewässer abgegebene CSB-Fracht trotz deutlich gestiegener Zulauf nur unwesentlich höher als in 2010. Dies ist mit der zusätzlich zur Verfügung stehenden Abbauleistung der anaeroben Vorbehandlungsanlage zu begründen. Dadurch wird dokumentiert, dass das mit dem Bau der Anaerobanlage verfolgte Hauptziel – nämlich die Verbesserung der CSB-Abbaukapazität der Gesamtanlage des GWK – erreicht wurde.

### 7.5.2. Gesamt-Phosphor

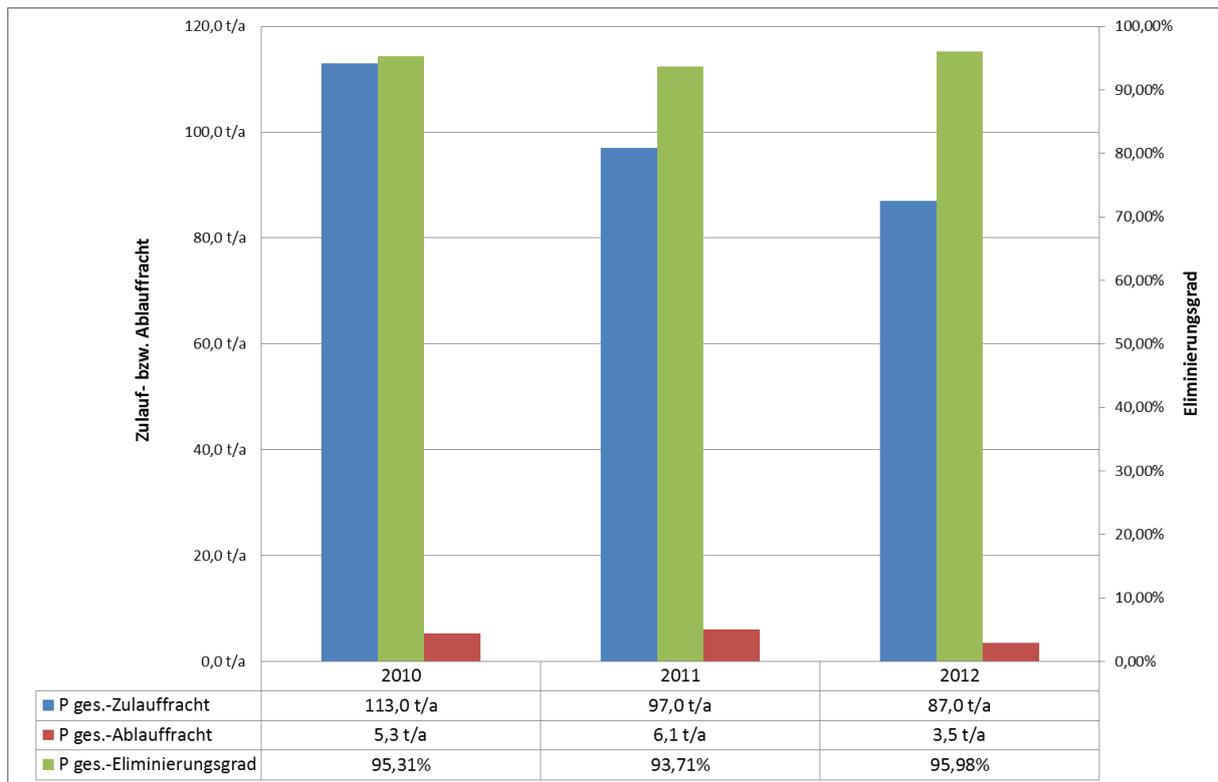


Abb. 38: Zu- und Ablaufrachten an Gesamt-Phosphor sowie Eliminierungsgrad für die Jahre 2010, 2011 und 2012

Im Unterschied zum CSB hat die Gesamt-P-Fracht im Zulauf von 2010 bis 2012 abgenommen. Das hängt hauptsächlich mit den Einleitungen aus dem P-D ChemiePark zusammen und hat mit dem Betrieb der Anaerobanlage nichts zu tun.

In 2012 wurden insgesamt 13.692 l 75%ige Phosphorsäure zur Anaerobanlage dosiert. Das entspricht einer P-Fracht von 5,1 t, mithin etwa ebenso viel, wie die mittlere Ablaufracht an Gesamt-Phosphor in 2010 bis 2012. Diese Fracht ist natürlich in der in Abb. 38 dargestellten P-Zulauf für 2012 nicht mit berücksichtigt.

Obwohl durch die Anaerobanlage keine P-Elimination erfolgt, hat sich die P-Fracht im Ablauf des GWK mit dem Betrieb der Anaerobanlage nicht erhöht, sondern in 2012 sogar deutlich verringert. Das bedeutet, dass die durch die Phosphorsäuredosierung für die Anaerobanlage zusätzlich eingetragene P-Fracht im aeroben Behandlungsteil des GWK problemlos eliminiert wird.

### 7.5.3. Gesamter gebundener Stickstoff (TNb)

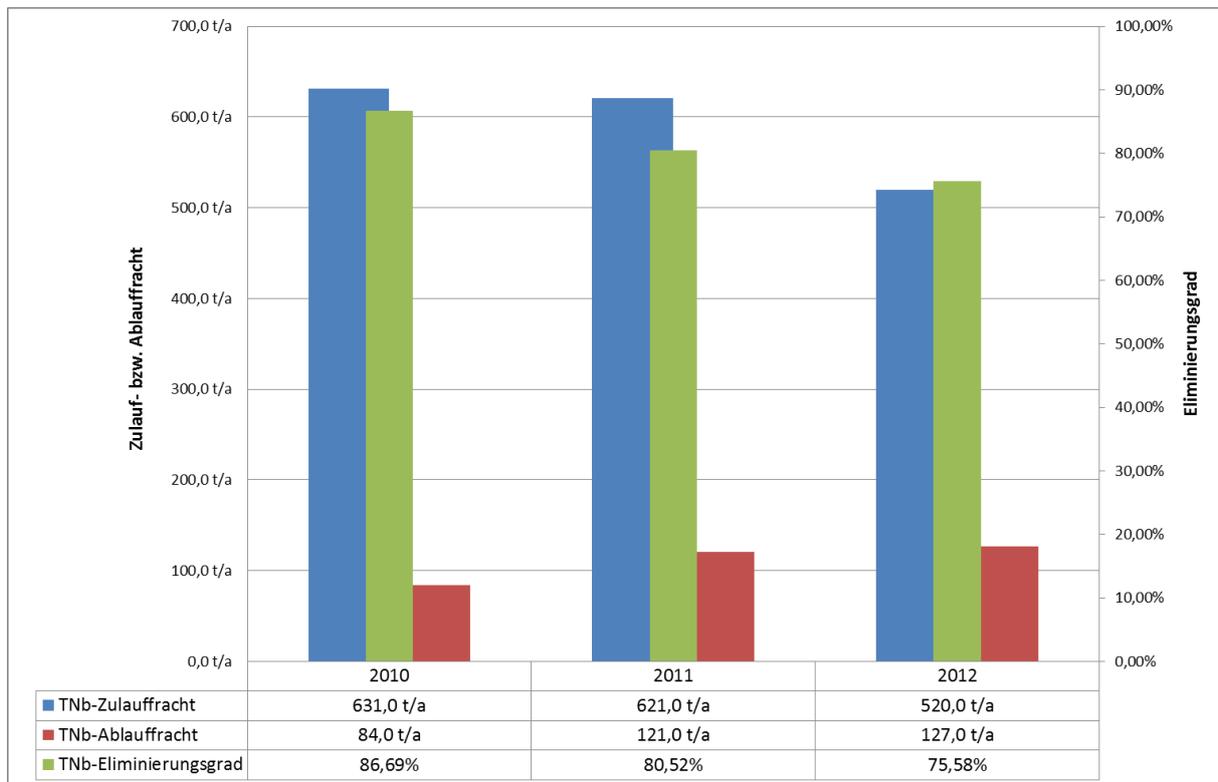


Abb. 39: Zu- und Abauffrachten an TNb sowie Eliminierungsgrad für die Jahre 2010, 2011 und 2012

Ebenso wie die Gesamt-P-Fracht hatte die TNb-Fracht im Zulauf des GWK von 2010 bis 2012 rückläufige Tendenz. Obwohl die prozentuale N-Elimination ebenfalls abgenommen hat, wurde der behördliche Überwachungswert für Gesamt-N (als Summe aus  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$  und  $\text{NO}_3\text{-N}$ ) am Ablauf des GWK jederzeit eingehalten. Sowohl die Zielvorgabe des Anhangs 1 von mindestens 70% N-Elimination als auch des Anhangs 22 von mindestens 75% N-Elimination wurden im gesamten Auswertungszeitraum übertroffen.

In 2012 wurden der Anaerobanlage zur Einstellung des Nährstoffverhältnisses insgesamt etwa  $64 \text{ m}^3$  40%ige Harnstofflösung zugeführt, was einer zusätzlichen N-Fracht von  $13,3 \text{ t/a}$  entspricht (in Abb. 39 nicht mit berücksichtigt). Bezogen auf die Jahres-Zulauf in 2012 sind das lediglich 2,6%. Im Gegensatz zur Phosphorsäuredosierung ist die Aufstockung der N-Zulauf durch die Harnstoffdosierung für die Anaerobanlage als unerheblich einzuschätzen.

Der Rückgang der N-Elimination und der leichte Anstieg der TNb-Fracht im Ablauf in 2011 und 2012 gegenüber 2010 werden hingegen auf die folgenden Punkte zurückgeführt:

- Sowohl im Juni 2011 als auch ab Mitte Dezember 2011 kam es aufgrund von Industrieabwassereinleitungen, die mit dem Methylcelluloseabwasser und dem

Betrieb der Anaerobanlage nichts zu tun hatten, zu einer Beeinträchtigung der Nitrifikation in der 2. biologischen Behandlungsstufe des GWK. Aufgrund der niedrigen Temperaturen während der Winterperiode und der geringen Wachstumsgeschwindigkeit der Nitrifikanten wurde nach der Störung vom Dezember 2011 erst ab Ende April 2012/Anfang Mai 2012 wieder die volle Nitrifikationsleistung erreicht.

- In 2010 wurde die gesamte CSB-Fracht aus dem MC-Abwasser gemeinsam mit dem kommunalen Abwasser in die Denitrifikationszone der BHR 2 bis 4 (2. biologische Reinigungsstufe des GWK) eingeleitet, so dass ein Überschuss an leicht abbaubarem Substrat für die Denitrifikation vorhanden war. Dadurch wurde in 2010 insgesamt eine sehr gute N-Elimination erreicht und der behördliche N-Überwachungswert bei weitem nicht ausgeschöpft. Mit Inbetriebnahme der anaeroben Vorbehandlung, die einen erheblichen Teil des MC-Abwassers aufnimmt, stehen zwangsläufig weniger leicht abbaubare C-Verbindungen für die Denitrifikation zur Verfügung, so dass (selbstverständlich bei Einhaltung des behördlich vorgeschriebenen Gesamt-N-Überwachungswertes) von einem Anstieg der Nitratkonzentration im Ablauf auszugehen ist.

#### 7.5.4. Adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX)

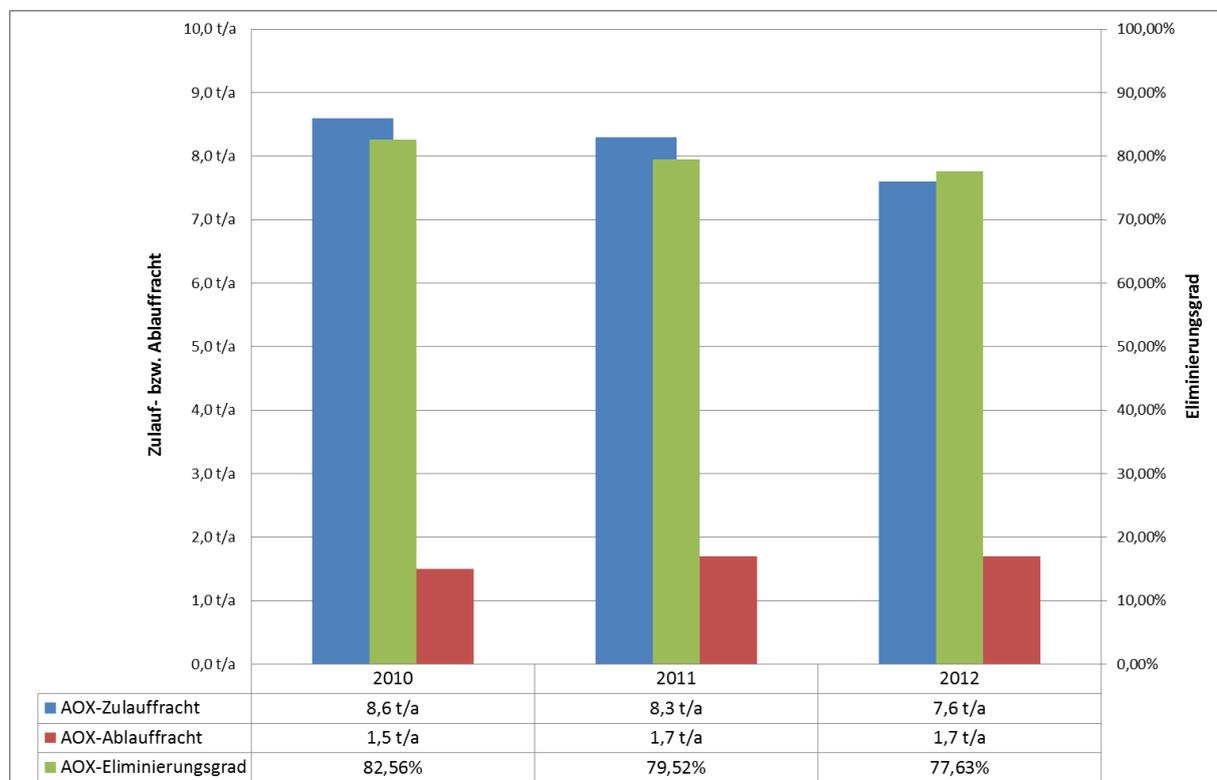


Abb. 40: Zu- und Abauffrachten an AOX sowie Eliminierungsgrad für die Jahre 2010, 2011 und 2012

Die Veränderung der AOX-Zulaufmengen und der AOX-Elimination von 2010 bis 2012 liegt im normalen Schwankungsbereich, der durch die wechselnden Qualitäten des zugeleiteten Industrieabwassers bedingt ist. Die mit dem Ablauf des GWK in die Mulde abgegebene AOX-Menge ist über den Betrachtungszeitraum nahezu konstant.

Da das MC-Abwasser kaum AOX enthält, ist kein Zusammenhang mit dem Betrieb der Anaerobanlage gegeben.

## **8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

### **8.1. Gegenüberstellung der Behandlungsentgelte**

In Tab. 15 auf S. 83 werden die resultierenden Entgelte für das Jahr 2012 in den beiden Behandlungsvarianten

- Anaerobe Vorbehandlung + aerobe Nachbehandlung
- Aerobe Behandlung

gegenübergestellt.

Unter Summe Behandlungsentgelt ist jener Betrag zu verstehen, der 2012 tatsächlich als Entgelt auf die Einleiter des GWK Bitterfeld-Wolfen umgelegt werden muss. Beim Kapazitätsentgelt wurde der Einfluss der Fördermittel herausgerechnet. Das variable Nutzungsentgelt schließt auch die Abwasserabgabe mit ein.

Beim spezifischen Behandlungsentgelt wurde das Nettoentgelt beider Varianten zu Vergleichszwecken ausschließlich auf den Abwasservolumenstrom bzw. die CSB-Fracht im Zulauf der Anaerobanlage bezogen.

Die Daten beruhen auf den aus der Buchhaltung abgeleiteten ungekürzten, d. h. ohne Förderung betrachteten Anschaffungskosten gültig für 2012. Der Vorteil des kombinierten Anaerob-/Aerobverfahrens im Vergleich zur ausschließlich aeroben Behandlung beläuft sich im Ergebnis auf knapp 200 T€/a. Dieser Vorteil wird im Rahmen des verursachergerechten Entgeltkalkulationsmodells des GWK an die Einleiter weitergegeben. Im Vergleich zur Vorabschätzung fällt der Kostenvorteil für die Anaerobtechnik etwas niedriger aus. Das liegt darin begründet, dass die Anlagen für die Aerobbehandlung (z. B. BIOHOCH®-Reaktoren) schon zu großen Teilen abgeschrieben sind und somit die für den Kostenvergleich erforderliche Hinzurechnung des Fördervorteils in 2012 niedriger ausfällt. Das Berechnungsergebnis ist in sich logisch, da eine (teil)abgeschriebene Anlage im Vergleich zu einer Neuinvestition natürlich Kostenvorteile bringt, sofern die vorhandenen Behandlungskapazitäten auch tatsächlich genutzt werden können ([BASSE, 2013](#)).

Tab. 15: Gegenüberstellung der resultierenden Behandlungsentgelte für das Jahr 2012 in den beiden Varianten Anaerobe Vorbehandlung mit aerober Nachbehandlung und ausschließlich aerobe Behandlung

	Vergleich Behandlungsentgelt	
	Anaerobe Vorbehandlung mit aerober Nachbehandlung	Ausschließlich aerobe Behandlung
<b>a) fixes Kapazitätsgentgelt</b>		
Q	17.446,02 €	32.143,29 €
CSB	1.356.428,73 €	766.263,46 €
N	906,15 €	792,21 €
<b>Summe</b>	<b>1.374.780,90 €</b>	<b>799.198,95 €</b>
<b>b) fixes Nutzungsgentgelt</b>		
Q	6.111,78 €	34.829,25 €
CSB	717.898,44 €	780.776,02 €
N	242,58 €	372,18 €
<b>Summe</b>	<b>724.252,81 €</b>	<b>815.977,45 €</b>
<b>c) variables Nutzungsgentgelt</b>		
Q	26.985,74 €	60.859,36 €
CSB	572.698,58 €	1.218.110,76 €
N	1.264,17 €	1.239,33 €
<b>Summe</b>	<b>600.948,49 €</b>	<b>1.280.209,45 €</b>
<b>d) Behandlungsentgelt = Summe der Positionen a) bis c)</b>		
Q	50.543,54 €	127.831,90 €
CSB	2.647.025,75 €	2.765.150,24 €
N	2.412,90 €	2.403,72 €
<b>Summe</b>	<b>2.699.982,19 €</b>	<b>2.895.385,85 €</b>
Wirtschaftlichkeit (Vorteil Anaerob)	<b>195.403,66 €</b>	
<b>Durchschnittliches spezifisches Behandlungsentgelt</b>		
bezogen auf Abwasservolumenstrom im Zulauf der Anlage	<b>13,98 €/m<sup>3</sup></b>	<b>14,99 €/m<sup>3</sup></b>
bezogen auf CSB-Fracht im Zulauf der Anlage	<b>0,43 €/kg CSB</b>	<b>0,46 €/kg CSB</b>

Zusammengefasst kann sich das Ergebnis durchaus sehen lassen, zumal künftig von steigenden Betriebskosten für die aerobe Behandlung auszugehen ist und damit der Kostenvorteil für die anaerobe Behandlung weiter zunimmt. Nicht zuletzt profitieren auch die Einleiter des GWK von der Lösung, denn es wurde bedarfsgerecht investiert, so dass keine „Leerkapazitäten“ über das Entgelt finanziert werden müssen ([BASSE, 2013](#)).

## **8.2. Betriebsmittelverbrauch**

In Tab. 16 auf der folgenden Seite wird die Dosierung der Nährstoffe N (in Form von 40%iger Harnstofflösung) und P (in Form von 75%iger Phosphorsäure), Neutralisationsmittel und sonstiger Hilfsmittel wiedergegeben. Es handelt sich dabei um eine Auswertung der Protokolle des Prozessleitsystems im GWK.

Tab. 16: Verbrauch an Nährstoffen, Neutralisationsmitteln und sonstigen Betriebsmitteln in der Anaerobanlage im Zeitraum  
1.11.2011 bis 30.9.2012

	Dosiermenge Harnstoff Pumpe A + B	Dosiermenge Phosphorsäure Pumpe A + B	Dosiermenge Natronlauge Pumpe A + B	Dosiermenge Kalkmilch (ohne Spülwasser) Pumpe A + B	Dosiermenge Mischung NaOH 50%ig + KOH 45%ig Pumpe A + B	Dosiermenge FeCl <sub>2</sub> -20%ige Lösung Pumpe A + B	Dosiermenge Entschäumer Pumpe A + B	Dosiermenge Spurenstoff- mischung "Nutromex TEA 310"
<b>Summe</b>	<b>71.672 l</b>	<b>14.490 l</b>	<b>267.661 l</b>	<b>910,4 m<sup>3</sup></b>	<b>147.135 l</b>	<b>14.031 l</b>	<b>605,0 l</b>	<b>765,8 l</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>214 l/d</b>	<b>43 l/d</b>	<b>799 l/d</b>	<b>2,7 m<sup>3</sup>/d</b>	<b>439 l/d</b>	<b>42 l/d</b>	<b>6,6 l/d</b>	<b>3,2 l/d</b>
<b>Nov 11</b>	9.362 l	1.440 l	28.468 l	134,2 m <sup>3</sup>	9.501 l	1.118 l	262 l	
<b>Dez 11</b>	7.769 l	1.250 l	20.959 l	146,3 m <sup>3</sup>	10.360 l	1.424 l	201 l	
<b>Jan 12</b>	7.373 l	1.783 l	25.030 l	145,0 m <sup>3</sup>	18.215 l	1.999 l	142 l	36 l
<b>Feb 12</b>	5.308 l	922 l	15.171 l	134,7 m <sup>3</sup>	8.710 l	1.029 l		75 l
<b>Mrz 12</b>	5.997 l	1.203 l	27.662 l	0,0 m <sup>3</sup>	13.166 l	1.156 l		94 l
<b>Apr 12</b>	5.204 l	1.409 l	20.642 l	0,0 m <sup>3</sup>	14.287 l	1.218 l		103 l
<b>Mai 12</b>	5.788 l	1.450 l	28.460 l	0,0 m <sup>3</sup>	13.792 l	1.260 l		114 l
<b>Jun 12</b>	5.866 l	1.430 l	26.337 l	0,0 m <sup>3</sup>	14.177 l	1.218 l		48 l
<b>Jul 12</b>	6.216 l	1.197 l	24.388 l	142,8 m <sup>3</sup>	11.552 l	1.186 l		100 l
<b>Aug 12</b>	6.158 l	1.111 l	25.714 l	139,1 m <sup>3</sup>	14.914 l	1.232 l		74 l
<b>Sep 12</b>	6.631 l	1.294 l	24.830 l	68,3 m <sup>3</sup>	18.461 l	1.190 l		122 l

Aufgrund der Erfahrungen des Betriebspersonals wurde ab Ende Januar 2012 auf die Dosierung von Entschäumer verzichtet. Anstelle dessen wird seit 20. Januar 2012 die Spurenstoffmischung "Nutromex TEA 310" dosiert. Die Dosierpumpen, die für Entschäumer installiert wurden, konnten dementsprechend umgerüstet werden. Die Zugabe der Spurenstoffe erfolgt mit dem Ziel, optimale Wachstumsbedingungen für die anaeroben Mikroorganismen zu schaffen.

Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass Aktivkohle zur Entfernung von Siloxanen aus dem Biogas benötigt wird. Analysen im Juni 2011 und im März 2012 haben aber belegt, dass der Siloxangehalt im Biogas vernachlässigbar gering und damit der A-Kohlefilter verzichtbar ist. Seit Februar 2012 wird der Aktivkohlefilter umfahren, so dass kein Verbrauch an Aktivkohle zu verzeichnen ist.

## **9. Prozesssteuerung mittels Neuronaler Netze**

An dieser Stelle war geplant, über die Effekte zu berichten, die mit der Prozesssteuerung auf Basis Künstlicher Neuronaler Netze erzielt werden. Im Mittelpunkt sollten stehen:

- Prozessstabilität (unter besonderer Berücksichtigung der Salzkonzentration, der Temperatur und der Zulaufmengen)
- aktive Biomasse
- CSB-Frachtabbau
- Biogasertrag

Diese Prozesssteuerung wird von der Fa. aquatune - Dr. Gebhardt & Co. GmbH installiert, befindet sich aber derzeit noch in der Phase der Datensammlung, des Probebetriebs und der Kalibrierung der Modelle. Von daher kann über Effekte noch nicht berichtet werden.

## 10. Zusammenfassung

Die Anlage zur anaeroben Vorbehandlung hypersalinen Abwassers aus der Methylcelluloseproduktion der Dow Wolff Cellulosics GmbH ist seit November 2011 im kontinuierlichen Betrieb. Die bisher erzielten Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die Anlage läuft stabil und hat in wesentlichen Bemessungsparametern das gestellte Ziel erreicht:
  - Schlammbelastung
  - Leitfähigkeit (als Maßstab der Salzbelastung)
  - Temperatur im Anaerobreaktor
  - elektrischer Wirkungsgrad BHKW
  - thermischer Wirkungsgrad BHKW
  - Aufströmgeschwindigkeit

bzw. sogar überboten

  - CSB-Abbaugrad
  - spezifische Biogasproduktion je kg abgebaute CSB-Fracht
  - Heizwert des Biogases
2. Folgende Bemessungswerte wurden - noch - nicht erreicht:
  - CSB-Zulaufkraft in t/d
  - Raumbelastung
  - CSB-Abbauleistung in t/d
  - Biogasanfall je Stunde

Dass diese Bemessungswerte - noch - nicht erreicht wurden, ist ausschließlich darauf zurückzuführen, dass die aktive Biomasse im Reaktor (organische Trockensubstanz) allen Bemühungen zum Trotz noch nicht die der ursprünglichen Bemessung zugrundeliegende Menge von 40 t oTS erreicht hat.

Es besteht aber die begründete Aussicht, dass die fehlende Biomasse mit Hilfe des neuen dritten Anaerobreaktors nach und nach aufgefüllt werden kann und damit auch die vorgenannten Bemessungsparameter zu erreichen sind.

Möglicherweise kann hier auch die bevorstehende Inbetriebnahme der Prozesssteuerung mittels neuronaler Netze einen Beitrag leisten.

3. Die Emissionen der Anlage liegen unterhalb der genehmigten Werte.
4. Obwohl einige Bemessungsparameter noch nicht erreicht wurden, arbeitet die Anlage wirtschaftlich und hat in Bezug auf die abwassertechnischen Behandlungseffekte die Erwartungen in vollem Maße erfüllt.

5. Durch Inbetriebnahme der Anaerobanlage konnte die Energieeffizienz des Klärwerks im Vergleich zum Ausgangszustand um 22% von 44,2 kWh/(E \* a) auf 34,6 kWh/(E \* a) verbessert werden.
6. Der Nettogewinn an Elektroenergie durch die Anaerobanlage beträgt ca. 6,6 MWh/d.
7. Weil nach Inbetriebnahme der Anaerobanlage die zu belüftende CSB-Fracht sank und auftretende Frachtspitzen besser abgepuffert werden können, geht die Einsparung an Elektroenergie für das GWK Bitterfeld-Wolfen als Ganzes sogar noch darüber hinaus. Sie betrug 2012 im Vergleich zu 2010 3,37 GWh/a und lag damit ca. 40% höher als der Energiegewinn der Anaerobanlage. Diese Gesamteinsparung an Elektroenergie entspricht einer Verminderung der klimarelevanten Kohlendioxid-Emissionen aus deutschen Kraftwerken um ca. 1.900 t CO<sub>2</sub>/a.

**Hauptzweck des Demonstrationsvorhabens war es nachzuweisen, dass auch extrem salzhaltige Substrate anaerob behandelt werden können. Dieser Nachweis ist erbracht.** Im Zeitraum 1.11.2011 bis 30.9.2012 betrug die elektrische Leitfähigkeit im Zulauf der Anaerobanlage 38,5 mS/cm (Mittelwert). Dies entspricht einem Salzgehalt (als Natriumchlorid) von etwa 23 g/l. Dabei erreichte der Biogasertrag mit 0,55 Nm<sup>3</sup> Biogas/kg CSB<sub>abgebaut</sub> einen Wert, der nach den Ergebnissen der labor- und halbtechnischen Untersuchungen nicht für möglich gehalten wurde. **Mit dem Demonstrationsvorhaben zur anaeroben Behandlung hypersaliner Abwässer im GWK Bitterfeld-Wolfen konnte also - trotz einiger Probleme - der bis dato gültige Anwendungsbereich für den großtechnischen Einsatz anaerober Verfahren gemessen an der elektrischen Leitfähigkeit um 100% ausgedehnt werden.**

### **10.1. Zusammenfassende Darstellung der Emissionen**

Seitens des Umweltbundesamtes werden die Ergebnisse einer neuen Anlage bevorzugt anhand einer Gegenüberstellung der Emissionen von Alt- und Neuanlage bewertet. Die Anaerobanlage im GWK Bitterfeld-Wolfen hat keinen Vorgänger, ein Vergleich zu einer „Altanlage“ im vorgenannten Sinne kann deshalb nicht gezogen werden. Stellvertretend kann für die „Altanlage“ auf die Gesamtanlage des GWK im Jahr 2010, für die „Neuanlage“ auf das GWK-gesamt im Jahre 2012 abgestellt werden. Dies erfolgt in Tab. 17.

Tab. 17: Zusammenfassende Darstellung der Emissionen

Vergleichsgröße		Ausgangszustand 2010 (vor Inbetriebnahme der Anaerobanlage)	Zustand 2012 (gesamtes GWK unter Berücksichtigung der Anaerobanlage)		Prozentuale Veränderung	
<b>Abwasser (Gesamtablauf des GWK in die Mulde)</b>	CSB-Zulauffracht	15.679 t/a	17.065 t/a		8,8%	
	CSB-Ablauffracht	1.479 t/a	1.527 t/a		3,2%	
	CSB-Eliminierungsgrad	90,6%	91,1%		0,5%	
	TNb-Zulauffracht	631,0 t/a	520,0 t/a		-17,6%	
	TNb-Ablauffracht	84,0 t/a	127,0 t/a		51,2%	
	TNb-Eliminierungsgrad	86,7%	75,6%		-11,1%	
	P ges.-Zulauffracht	113,0 t/a	87,0 t/a		-23,0%	
	P ges.-Ablauffracht	5,3 t/a	3,5 t/a		-34,0%	
	P ges.-Eliminierungsgrad	95,3%	96,0%		0,7%	
	AOX-Zulauffracht	8,6 t/a	7,6 t/a		-11,6%	
	AOX-Ablauffracht	1,5 t/a	1,7 t/a		13,3%	
AOX-Eliminierungsgrad	82,6%	77,6%		-5,0%		
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>	Äquivalent der CO <sub>2</sub> -Emissionen für Fremdbezug Elektroenergie	10.754 t CO <sub>2</sub> /a	8.846 t CO <sub>2</sub> /a		-17,7%	
<b>Abluft</b>			<b>Messwert min.</b>	<b>Messwert max.</b>	<b>Grenzwert</b>	
Ausgleichsbehälter	C-gesamt-Fracht aus der Behälteratmung der AGB 1 und 2 im realen Betrieb			0,152 kg C/h	0,50 kg C/h	
<b>BHKWs</b>	Kohlenmonoxid (CO)	Normzustand, trocken		378,8 mg/m <sup>3</sup>	421,0 mg/m <sup>3</sup>	1.000 mg/m <sup>3</sup>
		5 Vol% O <sub>2</sub>		468,9 mg/m <sup>3</sup>	607,0 mg/m <sup>3</sup>	
	Stickoxide, als NO <sub>2</sub>	Normzustand, trocken		119,3 mg/m <sup>3</sup>	308,0 mg/m <sup>3</sup>	500 mg/m <sup>3</sup>
		5 Vol% O <sub>2</sub>		148,0 mg/m <sup>3</sup>	445,0 mg/m <sup>3</sup>	
	Formaldehyd	Normzustand, trocken		22,0 mg/m <sup>3</sup>	39,7 mg/m <sup>3</sup>	60 mg/m <sup>3</sup>
		5 Vol% O <sub>2</sub>		31,1 mg/m <sup>3</sup>	49,0 mg/m <sup>3</sup>	
	Schwefeldioxid	Normzustand, trocken		5,5 mg/m <sup>3</sup>	50,0 mg/m <sup>3</sup>	310 mg/m <sup>3</sup>
		5 Vol% O <sub>2</sub>		6,9 mg/m <sup>3</sup>	70,0 mg/m <sup>3</sup>	

Das in der neuen Anlage anaerob vorbehandelte MC-Abwasser ist lediglich in Bezug auf den CSB relevant. TNb, P ges. und AOX sind im MC-Abwasser praktisch nur in Spuren vorhanden. Prozentuale Veränderungen in diesen Parametern (vgl. Tab. 17, Spalte G) lassen somit keine Rückschlüsse auf Erfolg oder Misserfolg der Anaerobanlage zu. Die CSB-Werte lassen auf eine geringfügige Verbesserung schließen. Das entspricht voll und ganz den Erwartungen, denn in Bezug auf das Abwasser bestand das mit der Anaerobanlage verbundene Ziel darin, keine Verschlechterung eintreten zu lassen.

Die Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen als Äquivalent des verminderten Fremdbezugs von Elektroenergie um fast 22% zeigt, dass das Ziel der Verbesserung der Energieeffizienz erfüllt wurde.

Im unteren Teil von Tab. 17 sind die Abluftemissionen aus den BHKW's zusammengefasst. Weil der Vergleich mit einer „Altanlage“ nicht möglich ist, wurden in Spalte G die jeweils zutreffenden Grenzwerte aufgeführt. Diese wurden in allen Parametern deutlich unterschritten.

## **10.2. Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Abwasserarten**

Das im GWK Bitterfeld-Wolfen erfolgreiche Anaerobverfahren kann unter Berücksichtigung der hier dargestellten Erfahrungen bei allen übrigen Herstellern von Celluloseethern in Deutschland, die noch mit Aerobverfahren arbeiten, eingesetzt werden. Zur Einstellung einer Leitfähigkeit in der in Bitterfeld realisierten Größenordnung stehen – soweit bekannt – auch an diesen Standorten ausreichend geeignete Abwasserströme zur Verfügung.

Selbstverständlich kommt das im GWK realisierte Anaerobverfahren auch für Raffinerieabwasser oder sonstige hypersaline Problemabwässer der Chemieindustrie in Betracht, z.B. Mutterlaugen, salzhaltige Waschwässer oder Abwässer aus der Produktisolierung mittels Kristallisation/Aussalzen.

Eine energetisch sinnvolle Alternative ist das GWK-Verfahren aber auch für hypersaline Abwässer der Herkunftsbereiche

- Textilveredlung, Färberei,
- Lederindustrie (Gerbereien),
- Deponiesickerwässer, Abwässer aus Kompostierungsanlagen,
- fischverarbeitende Industrie.

Darüber hinaus ist festzuhalten, dass über alle Industriebranchen hinweg die Bestrebungen zunehmen, anfallende Abwassermengen durch Kreislaufschließung und Einengung zu verringern. Damit entstehen zwangsläufig - auch in oben nicht genannten Branchen - immer mehr organisch hochkonzentrierte und stark salzhaltige Abwässer. Sofern keine den anaeroben Abbau hemmenden Stoffe enthalten sind, stellt das im

GWK eingesetzte Verfahren auch für alle diese Abwässer eine lohnende Alternative dar.

### **10.3. Empfehlungen an andere Betreiber von Anaerobanlagen**

Aus dem bisherigen Betrieb der Anaerobanlage des GWK lassen sich die folgenden praktischen Empfehlungen ableiten, die auch anderen Anlagenbetreibern bei der Einführung der Anaerobtechnologie zur Behandlung salzreicher Abwässer helfen können. Diese Erfahrungen beziehen sich aufgrund der Spezifik der Anlage des GWK jedoch ausschließlich auf den Betrieb von anaeroben Hochleistungsreaktoren nach dem UASB-Verfahren (Upflow Anaerobic Sludge Blanket):

- Da der mit dem hohen Salzgehalt auf die Mikroorganismen wirkende hohe osmotische Druck besondere Anpassungen des Stoffwechsels erfordert, ist die als Impfmateriale eingesetzte Pelletbiomasse allmählich an die Salzkonzentration zu adaptieren. Bei der Inbetriebnahme der Anaerobanlage des GWK hat sich dabei eine Erhöhung der Leitfähigkeit um nicht mehr als 2 bis 2,5 mS/cm pro Woche bewährt.
- Die Leitfähigkeit ist im laufenden Betrieb in einem Bereich von  $\pm 2$  mS/cm konstant zu halten, d.h. das zu behandelnde Abwasser muss entweder von sich aus einen konstanten Salzgehalt besitzen oder es müssen wie im Falle des GWK andere Abwasserteilströme zur Regulierung der Leitfähigkeit vorhanden sein. Bei Einsatz von Kommunalabwasser ist vor der Zuführung zur Anaerobanlage eine leistungsfähige Feststoffabtrennung erforderlich.
- Es ist im GWK Bitterfeld-Wolfen bislang nicht gelungen, einen kontinuierlichen Zuwachs an Pelletbiomasse zu realisieren. Ein zumindest gleichbleibendes bis leicht steigendes Niveau der oTS-Menge konnte jedoch (neben optimaler Einstellung von Nähr- und Spurenstoffversorgung, pH-Wert und Temperatur) bei Einhaltung der folgenden Bedingungen erreicht werden:
  - Erhöhung der Ca-Konzentration im Zulauf zur Anaerobanlage auf > 200 mg/l
  - Keine Überschreitung der Bemessungsschlammbelastung der Anlage (im Falle des GWK 0,5 kg CSB/kg oTS\*d)
  - Vermeidung von Frachtschwankungen auch im Rahmen der Einhaltung der Bemessungsschlammbelastung
  - Aufrechterhaltung einer Mindestfrachtbeschickung bei mehrtägigen Betriebsstillständen des Abwassererzeugers. Im GWK waren etwa 2 t CSB/d ausreichend. Eine komplette Einstellung der Beschickung für 10 Tage führte hingegen zu einem starken Pelletzerfall.

## Literaturverzeichnis

- AQUATYX, 2011   Betriebshandbuch für den R2S-Reaktor  
Aquatyx Wassertechnik GmbH, Ravensburg, 2011
- ATV-DVWK-M 363, 2002  
ATV-DVWK-M 363  
Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen  
Abwassertechnische Vereinigung e. V. / Deutsche Vereinigung für  
Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., Hennef, August 2002
- ATV-DVWK-M 372, 2003  
ATV-DVWK-M 372  
Technische Rahmenbedingungen für die Vergärung biogener Ab-  
fälle  
Abwassertechnische Vereinigung e. V. / Deutsche Vereinigung für  
Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., Hennef, Mai 2003
- ATV-Fachausschuss 7.5, 1993  
Technologische Beurteilungskriterien zur anaeroben Abwasserbe-  
handlung, Bericht des ATV-Fachausschusses 7.5 "Anaerobe Ver-  
fahren zur Behandlung von Industrieabwässern"  
Korrespondenz Abwasser 40. Jahrgang, Nr. 2/1993 S. 217 ff.
- AUSTERMANN-HAUN et al., 1993  
Austermann-Haun, U.; Kunst, S.; Saake, M.; Seyfried, C.F.  
Behandlung von Abwässern  
in Böhnke, B.; Bischofsberger, W.; Seyfried, C.F. (Hrsg.)  
Anaerobtechnik - Handbuch der anaeroben Behandlung von Ab-  
wasser und Schlamm, S. 467 - 728  
Springer Verlag, Berlin, 1993
- BASSE, 2013     Basse, S. (GWK Bitterfeld-Wolfen):  
E-Mail 8.1.2013  
unveröffentlicht
- BISCHOFBERGER et al. 2005  
Bischofsberger, W.; Dichtl, N.; Rosenwinkel, K.-H.; Seyfried, C. F.;  
Böhnke, B. (Hrsg.)  
Anaerobtechnik,  
2. vollst. überarb. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 2005
- BMU, 2012     Anonymus  
Erneuerbare Energien in Zahlen  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
(BMU), Juli 2012  
[http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/ee-  
im-  
port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere\\_ee\\_zahlen\\_bf.  
pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/ee-im-port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_ee_zahlen_bf.pdf)

BOARDMAN et al., 1995

Boardman, G.D.; Tisinger, J.L.; Gallagher, D.L.  
Treatment of clam processing wastewaters by means of Upflow  
Anaerobic Sludge Blanket technology  
Water Research Vol. 29 No. 6 (1995), pp. 1483-1490

BÖHNKE et al., 1993

Böhnke, B.; Bischofsberger, W.; Seyfried, C.F. (Hrsg.)  
Anaerobtechnik - Handbuch der anaeroben Behandlung von Ab-  
wasser und Schlamm  
Springer Verlag, Berlin, 1993

DAUBER, 1993

Dauber, S.  
Einflussfaktoren auf die anaeroben biologischen Abbauvorgänge  
in Böhnke, B.; Bischofsberger, W.; Seyfried, C.F. (Hrsg.)  
Anaerobtechnik - Handbuch der anaeroben Behandlung von Ab-  
wasser und Schlamm, S. 62 - 95  
Springer Verlag, Berlin, 1993

DWA-AG IG-5.1, 2009

Anaerobe Reaktoren und ihre Einsatzbereiche  
7. Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe IG-5.1 „Anaerobe Ver-  
fahren zur Behandlung von Industrieabwässern“  
Korrespondenz Abwasser 57. Jahrgang, Heft 11/2009 S. 1132-  
1137

DWA-M 361, 2010

Merkblatt DWA-M 361 - Entwurf  
Aufbereitung von Biogas  
Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall  
e. V. Hennef, November 2010

DWA-M 363, 2010

Merkblatt DWA-M 363  
Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen  
Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall  
e. V. Hennef, Januar 2011 (Korrigierte Fassung)

DWA-M 753, 2005

Merkblatt DWA-M 753  
Abwasser aus der Kartoffelverarbeitung  
Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall  
e. V. Hennef, Oktober 2005

FIELD & SIERRA, 2005

Field, J. A.; Sierra, R. L.  
High Rate Anaerobic Wastewater Treatment  
<http://www.uasb.org>

GERARD & KRÜGER, 2009

Gerard, I.; Krüger, J.  
Energiegewinnung aus Prozessabwasser mittels Anaerob-  
Technik; ein Erfahrungsbericht über drei verschiedene Anlagen.  
DWA-Tagungsband Industrietage Wassertechnik, 30.11.-  
01.12.2009, Fulda, S. 328-344.

HABERKERN et al., 2008

Haberkern, B.; Maier, W.; Schneider, U.  
Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen  
Umweltbundesamt Texte Nr. 11/08, Dessau-Roßlau, März 2008  
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3347.pdf>

HARTWIG & ROSENWINKEL, 2011

Hartwig, P.; Rosenwinkel, K.-H.  
Möglichkeiten zur Verbesserung der Energiebilanz einer Kläranla-  
ge am Beispiel der Kläranlage Rheda-Wiedenbrück  
Korrespondenz Abwasser 58. Jahrgang, Heft 6/2011, S. 558-565

IBRAHIM, 2008

Ibrahim, S. N. H.  
Structure, Function and Formation of Anaerobic Granular Sludge  
Veröffentlichung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der  
Technischen Universität Braunschweig, Heft 75, 2008

JEISON et al., 2008

Jeison, D.; Del Rio, A.; Van Lier, J.B.  
Impact of high saline wastewaters on anaerobic granular sludge  
functionalities. Water Science & Technology-WST, 57.6, 2008, pp.  
815-819

KOPPE & STOZEK, 1999

Koppe, P.; Stozek, A.  
Kommunales Abwasser  
Vulkan-Verlag Essen, 4. Auflage, 1999

KÖPPKE, 2008

Labor- und halbtechnische Untersuchungen zur anaeroben Be-  
handlung des Abwassers der Methylcellulose-Herstellung am  
Standort Bitterfeld  
Ing.-Büro Dr. Köppke GmbH, Bad Oeynhausen, Mai 2008 (unver-  
öffentlicht)

KÖPPKE, 2009

Untersuchungen zum anaeroben Abbau von salzreichem Abwas-  
ser aus der Methylcellulose-Produktion nach dem Schlammbett-  
verfahren  
Ing.-Büro Dr. Köppke GmbH, Bad Oeynhausen, Februar 2009  
(unveröffentlicht)

KUNST & MUDRACK, 1993

Kunst, S.; Mudrack, K.  
Mikrobiologische Grundlagen  
in Böhnke, B.; Bischofsberger, W.; Seyfried, C.F. (Hrsg.)  
Anaerobtechnik - Handbuch der anaeroben Behandlung von Ab-  
wasser und Schlamm, S. 1 - 61  
Springer Verlag, Berlin, 1993

LANGHANS, 2000

Langhans, G.  
Der Wärmehaushalt der Vergärung (Teil 1)  
EntsorgungsPraxis Heft 7-8/2000, S. 20-23  
Der Wärmehaushalt der Vergärung (Teil 2)  
EntsorgungsPraxis Heft 9/2000, S. 30-33

NEIS, 2001

Neis, U.  
Skript zur Vorlesung ANAEROBE BEHANDLUNGSVERFAHREN  
<http://goo.gl/T10ft>

OEPPERT, 2011

Oeppert, C.  
Begleitende Untersuchungen zur Inbetriebsetzung einer anaero-  
ben Vorbehandlungsanlage für Industrieabwässer  
Bachelorarbeit an der Hochschule Merseburg, Oktober 2011

ROSENWINKEL et al., 2011

Rosenwinkel, K.-H.; Hinken, L.; Borchmann, A.; Kipp, S.; Lorey, C.  
Die Zukunft der industriellen Abwasserreinigung - Verfahren, Kos-  
ten, Energie  
Korrespondenz Abwasser, Abfall 58. Jahrgang, Heft 10/2011 S.  
920-934

SARSOUR, 2004

Sarsour, J.  
Reduzierung der Belastung des Textilveredlungsabwassers durch  
eine kombinierte anaerobe/aerobe Behandlung hochkonzentrierter  
Abwasserteilströme  
Universität Stuttgart, Fakultät Maschinenbau, 2004

SCHÖNBORN, 2012

Schönborn, C. (GWK Bitterfeld-Wolfen):  
E-Mails im Zeitraum vom 13.08.2012 bis 21.12.2012  
unveröffentlicht

SCHÖNBORN, 2013

Schönborn, C. (GWK Bitterfeld-Wolfen):  
E-Mails im Zeitraum vom 3.1.2013 bis 6.3.2013  
unveröffentlicht

STULZ-PLANAQUA, 2012a

Internetseite der STULZ-PLANAQUA GmbH  
zur Anaerobanlage GWK Bitterfeld-Wolfen  
[http://www.stulz-planaqua.de/projekte/anaerobanlage\\_bitterfeld-wolfen/](http://www.stulz-planaqua.de/projekte/anaerobanlage_bitterfeld-wolfen/)

STULZ-PLANAQUA, 2012b

Explosionsschutzdokument nach § 6 der BetrSichV für eine anaerobe Abwasservorbehandlungsanlage  
STULZ-PLANAQUA GmbH, 20.09.2012

UBA, 2012

Anonymus

Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2010 und erste Schätzungen 2011  
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, April 2012

<https://www.google.com/url?q=http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strom-mix.pdf&sa=U&ei=cNfvUI2GGcfwsgat3ID4Bw&ved=0CAcQFjAA&client=internal-uds-cse&usq=AFQjCNFNUBPxrpwNiw5WFXFXWdKkoqzb9cdg>

ZUMBRÄGEL, 1993

Zumbrägel, M.

Anaerobe Vorbehandlung industrieller Abwässer  
WasserAbwasserPraxis Nr. 2/1993, S. 141 ff.