



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Energie BFE

**Schlussbericht 30.06.2014**

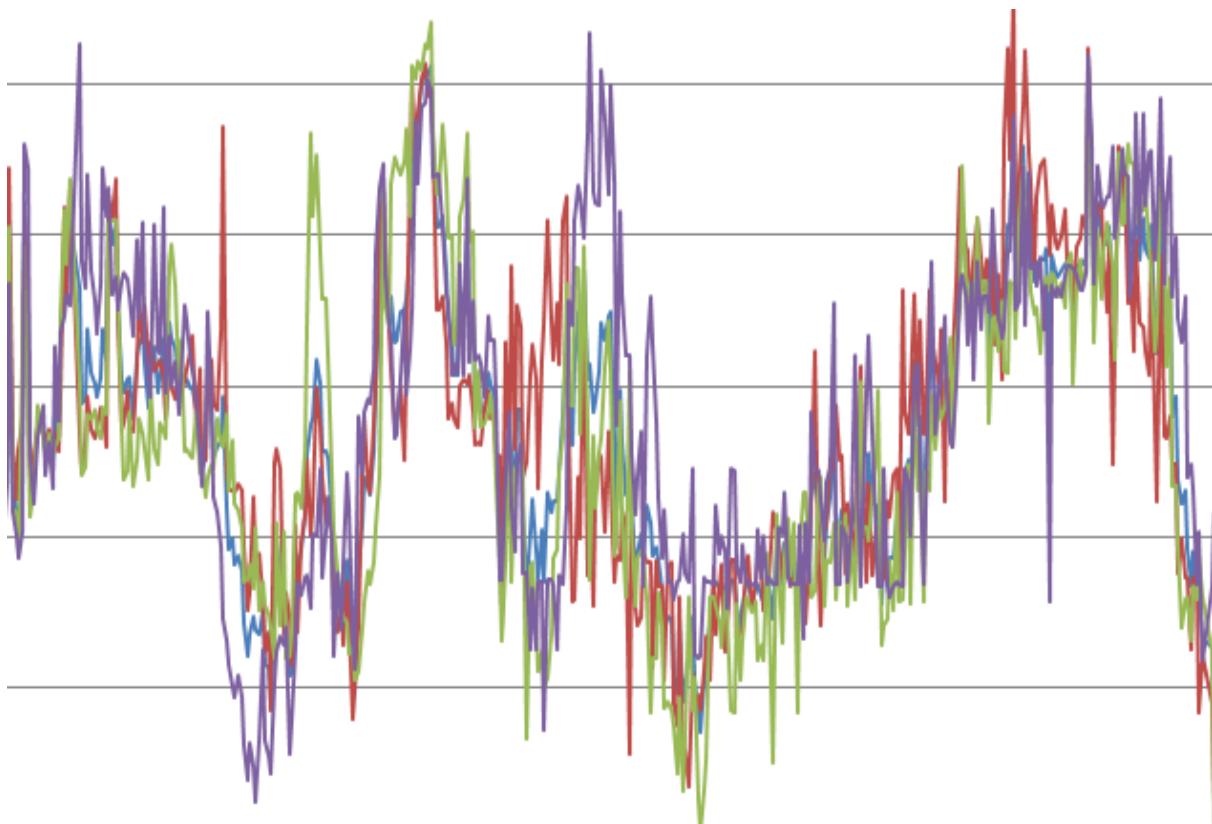
---

## Leistungssteigerung Monovergärung TNP

---

**Leistungssteigerung der Biogasproduktion bei der Monovergärung von tierischen Nebenprodukten**

Aufbereitung und Auswertung vorhandener Daten



**Schlagworte:**

Biogasproduktion, Monovergärung, tierische Nebenprodukte, TNP, Leistungssteigerung, Schaumbildung, Schaumbekämpfung, Schlammentwässerung, Dekanter, Ultrafiltration, Ammoniak-Stripper, Abwasserreinigung, Durchsatzleistung, Leistungsgrenze Fermentation, Störstoffe Biomethangas, Betriebsdaten, Verfahrenstechnik

**Zitievorschlag:**

Baier U., Hofer H., Juszko A., Rüsch F. (2014): Leistungssteigerung der Biogasproduktion bei der Monovergärung von tierischen Nebenprodukten - Aufbereitung und Auswertung vorhandener Daten, Schlussbericht, BFE, Bern

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Biomasse  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Kofinanzierung:**

Biorender AG  
Sigensee 41  
CH-9542 Münchwilen  
[www.biorender.ch](http://www.biorender.ch)

**Auftragnehmer:**

Biorender AG (Projektleitung)

André Juszko  
Sigensee 41  
CH-9542 Münchwilen  
[juszko@biorender.ch](mailto:juszko@biorender.ch)

HTH Umwelttechnik

Helmut Hofer  
Grabenwiese 91,  
CH-8484 Weisslingen  
[hth@bluewin.ch](mailto:hth@bluewin.ch)

ZHAW, Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften

Fachgruppe Umweltbiotechnologie,  
Urs Baier; Florian Rüsch  
Campus Reidbach  
CH-8820 Wädenswil  
[burs@zhaw.ch](mailto:burs@zhaw.ch), [ruec@zhaw.ch](mailto:ruec@zhaw.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Sandra Hermle

**BFE-Programmleiter:** Sandra Hermle

**BFE-Vertragsnummer:** SI/500947-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Zusammenfassung.....	6
Abstract.....	7
Glossar und Abkürzungsverzeichnis.....	8
1 Kurzbericht.....	9
1.1 Ausgangslage und Problemstellung.....	9
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	9
1.3 Vorgehen und Methodik .....	10
1.4 Ergebnisse und Erkenntnisse.....	11
1.4.1 Ergebnisse und Erkenntnisse Problem Durchsatzleistung UF .....	11
1.4.2 Ergebnisse und Erkenntnisse Problem Schaumbildung.....	11
1.4.3 Ergebnisse und Erkenntnisse Problem Störstoffe im Biogas .....	12
1.4.4 Ergebnisse und Erkenntnisse Leistungsgrenzen der Anlage .....	12
1.4.5 Weitere Verbesserungsansätze .....	12
1.5 Beurteilung .....	13
2 Einleitung .....	16
2.1 Motivation .....	16
2.1.1 Entsorgungssicherheit von TNP als Auslöser .....	16
2.1.2 Vergärung von TNP als Idee .....	16
2.1.3 Förderung von erneuerbaren Energieträgern mit TNP .....	16
2.2 Verfahrenstechnische Herausforderung.....	17
2.3 Das BfE-Projekt „Leistungssteigerung Monovergärung“ .....	17
2.4 Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	18
2.4.1 Literaturstudium.....	18
2.4.2 Begrenzte Leistung der Ultrafiltration .....	18
2.4.3 Schaumbildung in den Fermentern .....	19
2.4.4 Schwefelhaltige Störstoffe im Biogas .....	19
2.4.5 Leistungsgrenze der Fermentation.....	20
2.5 Vorgehen.....	20
3 Anlagentechnik und Betrieb .....	22
3.1 Anlagenbeschreibung.....	22
3.2 Ultrafiltration .....	24
3.2.1 Prinzip der Ultrafiltration .....	24
3.2.2 Entscheidende Prozessparameter für die Durchsatzleistung .....	25
3.3 Schaumbildung und Schaumzerstörung .....	26
3.3.1 Ansätze zur Schaumvermeidung.....	26

3.3.2	Massnahmen zur Schaumbekämpfung .....	27
3.4	Schwefelhaltige Störstoffe im Biogas .....	29
3.4.1	Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S) .....	29
3.4.2	Dimethylsulfid (DMS; C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S).....	29
3.4.3	Methylmercaptan (MM; CH <sub>4</sub> S).....	29
3.4.4	Ethylmercaptan (EM; C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S) .....	30
3.4.5	Bildung der organischen Schwefelverbindungen .....	30
3.4.6	Grenzwerte bei der Einspeisung ins Erdgasnetz.....	30
3.5	Leistungsgrenze der Anlage.....	31
3.5.1	Substratbedingte Leistungsgrenzen .....	31
3.5.2	Systembedingte Leistungsgrenzen .....	31
3.5.3	Biologische Leistungsgrenzen und Limitationen .....	32
3.5.4	Inhibition durch Störstoffe.....	33
4	Durchsatzleistung der Ultrafiltration .....	35
4.1	Zieldefinition .....	35
4.2	Datenlage .....	35
4.2.1	Zusammenfassung der Datenlage per Juni 2012.....	35
4.2.2	Untersuchungen zur Partikelgrössenverteilung.....	35
4.3	Arbeitshypothesen.....	36
4.4	Bewertung .....	37
4.4.1	Sekundärlayer und Porenverstopfung .....	39
4.4.2	Eisendosierung.....	39
4.4.3	Gasbildung in der Ultrafiltration .....	39
4.4.4	Verzicht auf die Ultrafiltration .....	40
4.4.5	Betriebseinstellungen .....	40
4.4.6	Wartung und Unterhalt .....	40
5	Schaumbildung und –bekämpfung .....	41
5.1	Zieldefinition .....	41
5.2	Datenlage .....	41
5.2.1	Online-Daten .....	41
5.2.2	Hand-Daten .....	42
5.2.3	Pilotversuche.....	44
5.2.4	Versuche auf der Anlage .....	44
5.3	Datenerhebung.....	48
5.3.1	Mikroskopie .....	48
5.3.2	Laborversuche an der zhaw .....	49
5.4	Arbeitshypothesen.....	51
5.5	Bewertung .....	52
5.6	Bewertung der Arbeitshypothesen .....	54

5.6.1	Inhaltstoffe Schaum.....	54
5.6.2	Beschicken/Röhren/Schlammtennwässerung .....	54
5.6.3	Ausgangssubstrate/Betriebsmittel.....	55
5.6.4	Überschusschlamm der aeroben Abwasserreinigung .....	55
5.6.5	Betriebseinstellungen und -kontrolle .....	55
5.6.6	Nährstoffmangel ausgleichen .....	56
5.6.7	Schaumbekämpfung verbessern.....	56
6	Störstoffe im Biogas.....	57
6.1	Zieldefinition .....	57
6.2	Arbeitshypothesen.....	57
6.2.1	Bildung der Schwefelverbindungen im Ausgangssubstrat .....	57
6.2.2	Bildung der Schwefelverbindungen in den Fermentern.....	57
6.2.3	Entnahme der Schwefelverbindungen aus dem Biomethan.....	57
6.3	Bewertung .....	58
7	Leistungsgrenze der Fermentation .....	59
7.1	Zieldefinition .....	59
7.2	Arbeitshypothesen.....	59
7.3	Bewertung .....	59
7.3.1	Substratbedingte Leistungsgrenzen .....	60
7.3.2	Systembedingte Leistungsgrenzen .....	60
7.3.3	Biologische Leistungsgrenzen und Limitationen .....	61
7.3.4	Inhibition durch Störstoffe.....	62
7.3.5	Leistungsgrenzen nach Bewertung .....	63
8	Quellenverzeichnis.....	64
9	Anhang .....	65

# Zusammenfassung

Die Biorender AG in Münchwilen, TG verarbeitet in ihren drei Fermentern fast ausschliesslich tierische Nebenprodukte (TNP), welche als Abfallprodukte aus der Fleischverwertung anfallen. Dieses spezielle Rohmaterial, im Wesentlichen bestehend aus Protein und Fett stellt zusätzlich zur Monovergärung sehr hohe Ansprüche an die Anlagen- und Verfahrenstechnik einer Biogasanlage und bedingt im grossen Massstab neuartige Verfahrenskombinationen. Die Anlage der Biorender AG in Münchwilen beweist eindrücklich, dass eine quasi Monovergärung von tierischen Nebenprodukten (TNP) auf einem hohen Level möglich ist. Allerdings stellt der Betrieb dieser komplexen Anlage hohe Anforderungen an die Betriebsführung.

Die Anlage erreicht die prognostizierte Leistung nicht. Die Ursachen dafür wurden in der starken Schaumbildung, die zu einem Absenken des Füllstandes in den Fermentern führt und der mangelhaften Durchsatzleistung der Ultrafiltration identifiziert.

Die Ursachen der Schaumbildung werden untersucht und verschiedene Verbesserungsvorschläge aufgestellt. Dabei steht die Vermeidung von Schaum im Mittelpunkt, aber auch die Bekämpfung des Schaums wird diskutiert.

Die Ultrafiltration erbringt nur knapp 10% der Leistung, für welche sie ausgelegt wurde. Als Ursache sind drei Gründe zu vermuten: ungenügende Hydraulik innerhalb der Filterbehälter, Feinststoffe im Gärslamm, die eine Sekundärmembranen bilden und eine Gasbildung ( $CO_2$ ) im Filterbehälter, welche die Hydraulik stört und Verstopfungserscheinungen verursacht. Massnahmen zur Behebung dieser Ursachen werden besprochen und für die Probleme Feinststoffe und Gasbildung aufgezeigt.

Die Problematik der Bildung von organischen Schwefelverbindungen innerhalb des Anlagensystems, die im Frühjahr 2013 zur Verwerfung von Biomethan führte, ist untersucht und erste Lösungen sind realisiert.

Der hohe Ammoniumgehalt in der Vergärung zeigt keinen Einfluss auf die Abbauleistung, möglicherweise aber auf die Schaumbildung. Kann der Ammoniumgehalt weiter gesteigert werden, ohne dass die Leistung massgebend reduziert wird, entspannt sich die Problematik der geringen Leistung der Ultrafiltration. Diese Fragestellung muss mit weiteren Versuchen überprüft werden.

Die technischen Hauptprobleme der Anlage und damit das Ziel einer höheren Anlagenleistung sind lösbar.

## Abstract

The biogas plant of the Biorender AG in Münchwilen, Switzerland is processing animal by-products (ABP) as a mono substrate. The feedstock for the three fermenters is almost exclusively by-products from the meat processing industry. This particular raw material, mainly consisting of protein and fat has high demands on the equipment and process technology of a biogas plant and requires novel process combinations for an industrial scale plant. The system of Biorender AG clearly proves that a quasi mono-digestion of animal by-products (ABP) is possible at a high level. However, the operation of this complex system places high demands on the operators.

The plant does not reach the forecasted performance. The reasons for this have been identified in the strong formation of foam, which leads to a lowering of the liquid level in the fermenter and the throughput of the ultrafiltration which is too low.

The reasons for the foam formation are investigated and several suggestions for improvement are being established. The prevention of foam has priority, but also the elimination of the foam shall be discussed.

The ultrafiltration provides only 10% of the performance for which it was designed. There are probably three reasons for this: insufficient hydraulic inside the filter container, fine material in the fermentation sludge, which form a secondary membrane and formation of gas ( $\text{CO}_2$ ) in the filter container, which disturbs the hydraulic and causes blockage symptoms such as scaling or fouling. Measures to avoid these problems are discussed and discussed for the problems of the fine material and gas formation.

The formation of organic sulphur compounds within the system led to the rejection of upgraded biomethane in spring 2013. This problem was investigated and initial solutions have been realised.

The high ammonia content in the fermentation has no influence on the degradation rate, but possibly on the formation of foam. A further increase of the ammonium concentration, without major reduction of the general plant performance, would defuse the problem of the low ultrafiltration throughput. This question shall be checked with further tests.

The main technical problems of the system and the goal of a higher plant performance are solvable.

# Glossar und Abkürzungsverzeichnis

ARA	Abwasserreinigungsanlage
BfE	Bundesamt für Energie
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
DMS	Dimethylsulfid
EM	Ethylmercaptan
FHM	Flockungshilfsmittel
FOS	flüchtige organische Säuren
HFR	Hunziker Food Recycling AG
MM	Methylmercaptan
TBW	Technische Betriebe Wil
TNP	tierische Nebenprodukte
TS	Trockensubstanzgehalt
UF	Ultrafiltration
ÜSS	Überschussschlamm

# 1 Kurzbericht

## 1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Die Biorender AG in Münchwilen, TG verarbeitet in ihren drei Fermentern fast ausschliesslich tierische Nebenprodukte (TNP), welche als Abfallprodukte aus der Fleischverwertung anfallen. Dieses spezielle Rohmaterial stellt zusätzlich zur Monovergärung sehr hohe Ansprüche an die Anlagen- und Verfahrenstechnik einer Biogasanlage und bedingt im grosstechnischen Massstab neuartige Verfahrenskombinationen.

Eine vergleichbare Anlage gibt es - nach unserem Kenntnisstand - weltweit nicht. Aus diesem Grund wurde bei verschiedenen Verfahrensstufen und insbesondere in der Kombination einzelner Verfahrensschritte Neuland betreten. Die Biogasanlage zur Einspeisung von Biomethan ins Erdgasnetz zeichnet sich vor allem aus durch eine Drucksterilisation der TNP-haltigen Rohwaren, durch eine Schlammentwässerung des Gärslamms mittels Dekantertechnologie, durch eine Gärslammaufbereitung mittels Kantenspalsieb und Ultrafiltration, eine Stickstoff-Stripping des Dekanter-Zentrals und UF-Permeats sowie durch eine betriebsinterne Membran-Abwasserreinigungsanlage und gezielte hydraulische Kreislaufströme.

Bereits kurz nach der Inbetriebnahme stellte sich heraus, dass die Ultrafiltration nicht erwartungsgemäss funktionierte und damit die Gesamtleistung der Anlage nicht erreicht werden konnte. Um diesem Problem zu begegnen, wurden verschiedene Umstellungen in der Verfahrensführung vorgenommen.

Die zeitweise massive Schaumbildung, welche ebenfalls schon sehr bald in allen drei Fermentern auftrat, konnte bis heute nicht eliminiert oder soweit kontrolliert werden, dass ein reibungsloser Anlagenbetrieb möglich ist.

Schwefelhaltige Verbindungen (z.B. Mercaptane) im gereinigten Biomethan verhindern zeitweilig eine Einspeisung ins Erdgasnetz.

Die erwähnten Hauptprobleme führen zu einer bisher unbefriedigenden Gesamtleistung der Anlage und verhindern einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb.

## 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Seit dem Beginn dieses Jahres liegt die Biomethangas-Produktion bei etwa 55% der ausgelegten Sollleistung, also bei durchschnittlich 60 MWh/d beziehungsweise 22 GWh/a. Die maximale Tagesproduktion von knapp 72 MWh/d entspricht dabei knapp 64% der Sollleistung. Im Vergleich dazu lag die durchschnittlich erzielte Leistung im Jahr 2013 bei ca. 42 MWh, etwas mehr als 37% bezogen auf die Sollleistung.

Das Erreichen der Vollleistung von etwa 41 GWh/a ist das Ziel und scheint nach wie vor erreichbar. Sie ist abhängig von einer Lösung der beiden Hauptprobleme (Durchsatz UF und Schaumbildung). Allerdings sind dazu weitere Abklärungen, Forschungsarbeiten sowie zusätzliche Investitionen notwendig, um vielversprechende Verbesserungsmassnahmen im Detail zu prüfen und umsetzen zu können. Sicher ist, dass Anpassungen an einzelnen Verfahrensschritten respektive deren Verknüpfungen zu realisieren sind. Gleichzeitig ist eine Optimierung des Anlagenbetriebs notwendig, was sowohl eine unabhängigeren und verfeinerte Betriebsführung, wie auch fachkundigeres Betriebspersonal erfordert.

Um allfällige Massnahmen auf sicheren Erkenntnissen abstützen zu können, sind weitere Untersuchungen, Tests und Änderungsmassnahmen durchzuführen. Diese Untersuchungen überschreiten die Möglichkeiten der Biorender AG sowohl in personeller, wie auch in finanzieller Hinsicht.

Aus diesem Grund hat die Biorender AG einen Antrag an das Bundesamt für Energie (BfE) gestellt und um Unterstützung gebeten.

Der Antrag an das BfE umfasst insgesamt 3 Stufen:

Phase 1: Forschung zur direkten Anlagenoptimierung,

Phase 2: Forschung zur Optimierung der Infrastruktur anlagen der Gesamtanlage,

Phase 3: Forschung zur weiteren energetischen und stofflichen Optimierung der Anlage.

Zu den jeweiligen Phasen wurden im Antrag die entsprechenden Fragestellungen und Arbeitshypothesen formuliert. Mit dem Vertrag vom 02. Oktober 2013 erhielt Biorender die Zusagen vom BfE für die Unterstützung des Projektes „Leistungssteigerung Monovergärung TNP“, Projektphase 1.

Ziel dieser Studie (Projektphase 1) ist es, eine umfassende Datenanalyse der Betriebsdaten der Mono-Vergärungsanlage für TNP zu erstellen, um daraus Arbeitshypothesen zur Optimierung des Betriebs und zur Weiterentwicklung der eingesetzten Verfahrenskette abzuleiten.

Der Fokus dieser Betriebsanalyse wird auf folgende vier Punkte gelegt:

1. die begrenzte Leistung der Ultrafiltration,
2. die Schaumbildung in den Fermentern,
3. schwefelhaltige Störstoffe im Biogas und
4. die Leistungsgrenze der Fermentation.

### 1.3 Vorgehen und Methodik

Es ist ein sehr umfangreiches Datenmaterial aus den ersten Betriebsjahren vorhanden, welches ausgewertet und bezüglich der festgestellten Hauptprobleme und der Leistungsgrenze interpretiert werden soll. Aus diesen Daten werden, falls möglich, direkt belegbare Schlüsse gezogen oder es werden Thesen formuliert, welche mit weiteren Versuchen abgesichert werden müssen.

Die zu untersuchenden Daten bestehen aus Online-Messwerten des Betriebsleitsystems, aus durch das Betriebspersonal erhobenen Analysedaten, aus externen Laboranalysen, sowie Daten von diversen Labor- und Pilotversuchen.

Zur Erreichung der in dieser ersten Phase des Projekts gesteckten Ziele wird folgendes Vorgehen definiert:

1. Sichtung, Aufbereitung und Auswertung des vorhandenen Datenmaterials,
2. zusätzliche Datenerhebung, falls notwendig und sinnvoll,
3. Literaturstudium zu den definierten Fragestellungen,
4. Interpretation des vorhandenen Datenmaterials,
5. Formulierung von Thesen zur Ursachenfindung der Hauptprobleme
6. Aufstellen eines Massnahmenkatalogs zur Ursachenfindung der Hauptprobleme,
7. Aufstellen von Arbeitshypothesen zur Ursachen- & Problembekämpfung,
8. Formulierung von möglichen Massnahmen zur Ursachen- & Problembekämpfung,
9. Aufstellen von Arbeitshypothesen bezüglich weiterer Verbesserungsansätze.

Sämtliche relevanten Daten werden für eine Datenanalyse aufbereitet. Ein erster Schritt beinhaltet dabei die vertiefte Betriebsdatenauswertung bezogen auf die Hauptfragestellungen, eine Liste relevanter Anlagenkennzahlen, Sensitivitätsanalysen sowie grafische Auswertungen. Die Resultate werden anschliessend mit Literaturangaben abgeglichen und in einem Fachgremium besprochen.

## 1.4 Ergebnisse und Erkenntnisse

### 1.4.1 Ergebnisse und Erkenntnisse Problem Durchsatzleistung UF

- **Feinstoffe**

Diese können zu Verstopfungen der Membranen, aber auch zur Bildung einer schlecht durchlässigen Sekundärmembranen führen. Diese mögliche Ursache wurde bereits 2012 diskutiert, unter anderem auch mit dem Hersteller des Membranmaterials.

Die Untersuchungen zur Partikelgrößenverteilung und der Vergleich dieser Verteilung mit einer Anlage, welche eine technisch vergleichbare Ultrafiltration mit kommunalem Klärschlamm betreibt, stützen diese Vermutung.

Die Herkunft der Feinstoffe dürfte über die Rohware, respektive bei der Sterilisation der Rohware zu finden sein (gemäß Partikelgrößenverteilung sind sie im Sterilisat bereits zu finden). Eine weitere Option sind Fällungsprodukte beispielsweise mit dem zudosierten Eisensalz.

**Fazit:** Die Anlage ist so betrieblich umzustellen, dass die Feinstoffe aus dem System ausgeschleust und nicht mehr akkumuliert werden. Eine externe Entsorgung des Überschusschlammes aus der aeroben Abwasserreinigung könnte zur Lösung des Problems führen.

- **Gasakkumulation in den Ultrafiltrationbehältern**

Der Zulauf zur Ultrafiltration ist mit CO<sub>2</sub> gesättigt. Die Löslichkeit des CO<sub>2</sub> ist stark druckabhängig. Bei 2 bar ist die Löslichkeit etwa 50% höher als bei 1 bar oder in Zahlen: Bei der Entspannung von 2 bar auf 1 bar werden etwa 500 Liter CO<sub>2</sub> freigesetzt. Schon beim Durchfliessen des Kantenspaltfilters wird ein Freisetzen von Gas beobachtet. Die Druckschwankungen in der Ultrafiltrationsanlage werden ebenfalls zu Gasfreisetzungen führen. Es ist zu vermuten, dass dieses Gas die Hydraulik in den Anlagen stört und Membranen verstopfen kann.

- **Fazit:** Der Zulauf zur Ultrafiltration ist zu entspannen und zu entgasen. Dies kann evtl. durch den Einsatz von Ultraschall optimiert werden.

- **Anlagenbetrieb**

Der Anlagenbetrieb ist unseres Erachtens so umzustellen, dass eine vorbeugende Wartung stattfindet und nicht wie heute üblich, eine Wartung im Havariefall. Auch die Membranreinigungen sollten gemacht werden, bevor die Leistung der Filter einbricht. Eine regelmässige Überprüfung und Einstellung des optimalen Betriebs-, bzw. Transmembrandrucks könnte die Filtrationsleistung ebenfalls steigern.

- **Fazit:** Die Gesamtleistung der UF kann gesteigert werden durch vorbeugende Wartung und optimierter Anlageneinstellung.

- **Verzicht auf die Ultrafiltration**

Es wurden Überlegungen angestellt, auf die Ultrafiltration ganz zu verzichten. Dies ist allerdings nur möglich, wenn deutlich höhere Stickstoffkonzentrationen als heute gefahren werden können. Ist eine Konzentration von 10 g/l Ammonium möglich, so könnte die Anlage mit etwa 65% der Nennleistung ohne UF betrieben werden.

- **Fazit:** Es sind ökonomische Berechnungen anzustellen, welche Betriebskosten eingespart werden können, wenn auf die Ultrafiltration verzichtet werden kann und die Anlage entsprechend nur auf 65% Leistung betrieben wird. Zeigen diese Berechnungen, dass ein solches Konzept interessant ist, sind Versuche mit höheren Ammoniumkonzentrationen im Schlamm durchzuführen.

### 1.4.2 Ergebnisse und Erkenntnisse Problem Schaumbildung

- **Ausgangssubstrate**

Das Substrat, soweit es die TNP betrifft, ist gegeben und kann nicht verändert werden. Dasselbe gilt für die vom Einzelhandel angelieferten verpackten Lebensmittelreste. Die Zugabe weiterer Substrate kann ebenso verändert werden, wie die Betriebsmittel. Mangel- und Überdosierungserscheinungen können die Biozönose beeinträchtigen und zur Schaumbildung führen.

- **Fazit:** Bei der Wahl der weiteren Substrate und Betriebsmittel ist deren Relevanz für die Schaumbildung zu testen und zu beachten. Für eine allfällige Elimination bzw. Verdünnung von hemmenden Stoffkonzentrationen und für eine Ergänzung von fehlenden essenziellen Elementen sind weitere Analysen und Versuche durchzuführen.
- **Art der Zudosierung**  
Das Einbringen der Substrate in den Fermenter und deren Einmischung ist von Bedeutung. Es ist ein Verbesserungspotential erkennbar im Bereich der Substrat- und Hilfsmittelzugabe. Lokale pH- und auch Temperaturschwankungen, wie auch Phasengrenzen können zur Schaumbildung führen.
  - **Fazit:** Die Art der Zugabe der TNP und insbesondere der stark fetthaltigen Substrate ist zu optimieren. Starke lokale Schwankungen und allfällige Schwimmschichten sind zu vermeiden.
- **Betriebseinstellungen**  
Die betrieblichen Einstellungen haben Relevanz für die Schaumbildung. Es ist ein Verbesserungspotential erkennbar im Bereich der Gärtemperatur und der Substratzugabe, allenfalls auch im Rührregime.
  - **Fazit:** Es ist zu versuchen, die Gärtemperatur schrittweise auf 43 bis max. 45 °C zu erhöhen. Die Substratzugabe und das Rührregime sind zu optimieren.
- **Schaumbekämpfung**  
Es wird immer wieder Zeiten geben, zu denen Schaum gebildet wird. Dieser muss automatisch detektiert und bekämpft werden können. Methoden dazu werden diskutiert.
  - **Fazit:** Schaumdetektionssysteme und effizienten Schaumbekämpfungseinrichtungen sind einzurichten.

#### 1.4.3 Ergebnisse und Erkenntnisse Problem Störstoffe im Biogas

- **Ausschleusen der organischen Schwefelverbindungen**  
Im Messbericht (Kappert, 2013) wurde festgestellt, wie der Stoffstrom der organischen Schwefelverbindungen im Gas verläuft. Das Regenerationsgas der Gastrocknung wird seither periodisch ausgeschleust.
  - **Fazit:** Das Regenerationsgas ist periodisch über die Gasfackel zu entsorgen oder es wird eine separate Gasreinigung für die organischen Schwefelverbindungen (Mercaptane) im Regenerationsgas realisiert. Die Möglichkeit eines frühzeitigen Ausschleusens von Dimethylsulfid ist abzuklären, falls dieses bereits vor dem Fermenter gebildet wird.

#### 1.4.4 Ergebnisse und Erkenntnisse Leistungsgrenzen der Anlage

Die Leistungsgrenzen der Vergärungsanlage werden durch die Schaumbildung (Füllhöhe der Fermenter) und die Leistung der Ultrafiltration (Permeat-Durchsatz) definiert. Die Abbauleistung bezogen auf den CSB liegt bei 84%. Dieser Wert ist gut, erreicht aber die Werte der Pilotierung nicht.

- **Steigerung der Abbauleistung**  
Die aktuellen Verhältnisse z.B. bezüglich der hydraulischen Verweilzeit und des Schlammalters sollten einen höheren CSB-Abbau ermöglichen.
  - **Fazit:** Gründe für den gehemmten Abbau sind mittels weiterer Untersuchungen zu eruieren. Der Einsatz von Vitaminen und / oder Enzymen ist zu testen.

#### 1.4.5 Weitere Verbesserungsansätze

- **Aufstockung des Betriebspersonals**

Der Betrieb der Biorender AG hat bezüglich Betriebsführung ein grosses Optimierungspotential. Durch Abgänge beim Personal und aufgrund der angespannten finanziellen Lage ist der Betrieb ohne fachmännische Führung, was das verfahrenstechnische Verständnis der Anlage als Ganzes, das mikrobiologische Verständnis der Fermentationsbiologie und den betrieblichen, vorbeugenden Unterhalt betrifft.

- **Fazit:** Die personelle Situation ist bald möglichst zu verbessern.
- **Optimierung des Anlagenbetriebs**

Der Einsatz von Betriebshilfsmitteln birgt ein weiteres grosses Optimierungspotenzial. Beispielsweise ist der Einsatz von Eisensalz zur Biogasentschwefelung massiv hoch und könnte mitunter ein Grund für die Hauptprobleme sein. Der Einsatz von pH-senkenden und –erhöhenden Betriebshilfsmitteln, sowie die Situation bezüglich der Substrattemperatur ist nicht ideal.

- **Fazit:** Der Einsatz von Eisensalzen ist auf eine notwendiges Minimum zu beschränken, die Biogasentschwefelung durch eine biologische in-situ Entschwefelung zu unterstützen. Die Situation bzw. Verbesserungspotenzial bezüglich des pH-Werts und der Substrattemperaturen ist im Detail zu prüfen und Verbesserungen sind zu realisieren.

#### • **Anpassung der Anlagentechnik**

Es sind verschiedene technische Anpassungen notwendig, um einen störungsfreien, robusten und effizienten Anlagenbetrieb zu ermöglichen:

- Die Kantenspaltfilter haben sich nicht bewährt (sehr hoher Reinigungsbedarf, schlechter Abtrenngrad, tiefer Durchsatz) und sind durch eine andere Anlagentechnik zu ersetzen.
- Durch die Inbetriebnahme der Entpackungsanlage gelangen immer mehr Plastikteile in die Anlage. Diese sind aus dem System zu entfernen (kann mit dem Ersatz der Kantenspaltfilter kombiniert werden).
- Der Zulauf zur Ultrafiltration ist zu entgasen, inerte Fest- bzw. Feinstoffe sind besser abzutrennen (auch dies kann mit dem Ersatz der Kantenspaltfilter kombiniert werden).
- Der Überschusschlamm aus der Abwasserreinigung ist separat zu entsorgen, um eine Akkumulation von Feinstoffen zu verhindern.
- Wird der Überschusschlamm aus der Abwasserreinigung extern entsorgt, kann auf die verbesserte Abtrennung der Feinstoffe im Zentrat der Schlammwäscher verzichtet werden, damit kann der Einsatz an Chemie (Betriebshilfsmittel) stark reduziert werden.
- Wird auf die verbesserte Reduzierung der Feinststoffe in der Schlammwäscher verzichtet, muss der Stripper öfters gereinigt werden. Diese Massnahme soll technisch vereinfacht und automatisiert werden.

- **Fazit:** Eine Hand voll technischer Anpassungen muss dringend realisiert werden.

## 1.5 Beurteilung

Die Anlage der Biorender AG in Münchwilen beweist eindrücklich, dass eine quasi Monovergärung von tierischen Nebenprodukten (TNP) auf einem hohen Level möglich ist. Die Biogasanlage der Biorender AG hat in den vergangenen fünf Monaten, seit Beginn des Jahres 2014 durchschnittlich ca. 36.5 Tonnen Rohware pro Tag verarbeitet (13'350 t/a) und dabei ständig mehr als 220 Nm<sup>3</sup> erneuerbares und CO<sub>2</sub>-neutrales Biomethan ins lokale Erdgasnetz eingespeist. Dies entspricht einer Energieproduktion von rund 60 MWh/d Erdgasesatz, mit welchem Ostschweizer Autofahrer bei einem Verbrauch von 15 kWh/100km täglich rund 4'000 km Weg hinter sich gebracht haben oder 2'000 durchschnittliche Einfamilienhäuser bei 10 MWh/a klimaneutral beheizt werden könnten.

Aufgrund der technologisch aufwändigen, neuartigen und daher sensiblen Verfahrenskette und wegen des sehr anspruchsvollen Ausgangssubstrats, haben die Fermenter in den ersten drei Betriebsjahren noch nicht ihr maximales Potenzial zur Biogasproduktion aufzeigen können. Im Vergleich zur geplanten Kapazität liegt der momentane Biomethanertrag bei rund 55%. Dennoch konnte mit 3.1 m<sup>3</sup> Biogas/(m<sup>3</sup>\*d) bereits eine verhältnismässig hohe Biogasproduktivität erreicht werden.

Im Vergleich zu konventionellen Biogasanlagen wurde dabei bei einer hohen CSB-Raumbelastung von durchschnittlich 9 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) und unter stark erhöhten Ammoniumkonzentrationen von 6.2 g/l gefahren.

Verbesserungspotenzial ist derweil auf verschiedenen Ebenen vorhanden. Auf der anlagentechnischen Seite liegen die offensichtlichen Hauptprobleme. Zum einen kann der maximale Durchsatz aus hydraulischen Gründen momentan nicht erreicht werden. Die Ultrafiltrationsmodule werden ihren Anforderungen, ein möglichst sauberes, flüssiges Permeat zu erzeugen und dabei eine akzeptable Durchsatzleistung zu erzielen, nicht gerecht. Daran hängt der gesamte, komplexe Flüssigkeitshaushalt der Verfahrenskette: Es kann in der betriebsinternen Kreislaufwasseraufbereitung (Entstickung) nicht genügend Wasser produziert werden, um einerseits die zugeführten Mengen wieder aus dem System abzuführen und andererseits die hohen Konzentrationen an biologisch hemmendem Ammonium im Gärslamm zu verdünnen. Im Vergleich zum Auslegungswert von 400 m<sup>3</sup>/d UF-Permeat wurde seit Inbetriebnahme durchschnittlich knapp 13.5%, d.h. 54 m<sup>3</sup>/d Permeat produziert. Im 2012 waren es noch 66.1 m<sup>3</sup>/d, im 2013 48.8 m<sup>3</sup>/d und seit Jahresbeginn 2014 nur noch 30.5 m<sup>3</sup>/d.

Als zweites Hauptproblem gibt es in den drei Fermentern, die je knapp 1'000 m<sup>3</sup> Nutzvolumen enthalten, eine andauernde, massive Schaumbildung. Durch die konsequente Absenkung des Füllstandes liegt der Fermenter-Füllstand aktuell bei ca. 11 Metern, also rund 3.8 Meter unter dem geplanten Sollwert von 14.8 Metern. Die bedeutet ein Verlust an Nutzvolumen von ungefähr 26%.

Die dritte Problematik, die schwefelhaltigen Biogasbestandteile, ist weit weniger einschneidend. Das zeitweise durch die Aktivkohlefilter durchgehende DMS wird im frisch regenerierten Trockner der Biogasaufbereitungsanlage adsorbiert. Füllt sich der Absorptionstrockner mit Wasser, wird das DMS verdrängt und es kommt zu einem schnellen Anstieg der Schwefelverbindungen im Biomethan. Das Gas muss über die Gasfackel geführt werden. Der Trockner wird nun regeneriert. Zu diesem Zweck wird erhitztes Gas über den Trockner geführt und anschliessend gekühlt. Das Wasser scheidet aus, wie auch einige der Schwefelverbindungen. Das Kondenswasser mit den Schwefelverbindungen wird in den Reaktor zurückgeführt und die nicht kondensierten Schwefelverbindungen, die im gekühlten Gas noch vorhanden sind, gelangen auf den zweiten Trockner und beladen diesen. Dadurch entsteht ein Kreislauf, der unterbrochen werden muss. Diese Unterbrechung wird aktuell dadurch gewährleistet, dass das Regenerationsgas bei jeder n'ten Regeneration verworfen wird (über die Gasfackel geführt).

Die Probleme der Anlagentechnik sind lösbar. Die finanziellen und wohl auch politischen Möglichkeiten sind aber zu sehr eingeschränkt, um Verbesserungsansätze überhaupt einem Praxistest zu unterziehen, geschweige denn umsetzen zu können. Die Auswirkung von getroffenen Änderungsmassnahmen können zudem wegen der begrenzten Kapazität und des teilweise nicht vorhandenen Fachwissens des Betriebspersonals kaum richtig verfolgt und interpretiert werden.

Ein wirtschaftlicher Betrieb kann bei der zurzeit begrenzten Leistung leider nicht erreicht werden. Sparmassnahmen betreffen dabei nicht nur die Möglichkeiten, grundlegende Änderungen an der Anlagentechnik vorzunehmen, sondern in hohem Masse auch die Anzahl und das Expertenwissen der Angestellten, sowie eine ungenügende Wartung und ein mangelhafter Unterhalt der einzelnen Anlagenteile. Durch die ständige Überbelastung des Betriebspersonals können auch kleinere Betriebsausfälle oder Betriebsfehler grosse Auswirkungen auf die Gesamtleistung der Anlage haben.

Ansätze zur Leistungssteigerung gibt es viele. Gründe und Ursachen für die Hauptprobleme müssen keineswegs nur auf der technischen Ebene liegen. Es ist durchaus vorstellbar, dass ein einzelner Stoff, zum Beispiel ein Eisenkomplex, für den begrenzten Durchfluss der Ultrafiltration verantwortlich ist, da es sich in den Poren der Membranstruktur festsetzt. Die Lösung der Hauptprobleme und ein Betrieb auf dem Sollwert könnten also unmittelbar auf der Hand liegen.

Genauso gut kann es aber auch sein, dass verschiedene und zahlreiche Ursachen für diese beiden Phänomene bestehen und es keinen direkten oder indirekten Zusammenhang zwischen der Schaumbildung und der Ultrafiltrationsleistung gibt. Weitere Testversuche und Änderungsmassnahmen auf der Anlage und im Labor sind daher unbedingt angezeigt.

Während der Analyse der Betriebsdaten und der gleichzeitigen Suche nach Ursachen der Hauptprobleme wurde festgestellt, dass bedingt durch die Rohware, Anlagentechnik und Betriebsführung unterschiedlichste Ursachen für die Hauptprobleme wahrscheinlich sind. Nur wenige mögliche Ursachen, die Fachexperten bisher für ähnliche Probleme eruiert haben, können im Vorhinein bzw. aufgrund der Datenlage ausgeschlossen werden. Dies legt die Vermutung nahe, dass es für die Lösung der Probleme ebenfalls eine Reihe von Massnahmen braucht.

Direkte kausale Zusammenhänge zwischen den gemessenen Betriebsparametern und den Problemstellungen konnten auch bei intensivem Studium der Anlagen- und Versuchsdaten nur sehr undeutlich oder stark zeitbegrenzt festgestellt werden. Labortests, Pilotierungen und vor Ort durchgeführte Versuche und Änderungsmassnahmen zeigten bisher zwar immer wieder Verbesserungspotenzial auf, führten jedoch nicht zur Problemlösung und wurden daher kaum umgesetzt. Die Ursachen für den begrenzen Durchsatz der Ultrafiltration und für die massive Schaumbildung sind bis heute nicht geklärt.

In dieser Arbeit werden Arbeitshypothesen aufgestellt und Strategien erarbeitet, die zur Problemfindung und -lösung beitragen. Erhärtet durch die Auswertung des bestehenden, sehr umfangreichen Datenmaterials des Anlagenbetriebs und durch verschiedene Testresultate, werden realistische Szenarien erarbeitet, wie eine wahrscheinliche Ursache detektiert werden kann. In einem nächsten Schritt werden mögliche Massnahmen aufgestellt, die direkt zur Behebung der beschränkten Leistungsfähigkeit beitragen können.

Die Hauptansatzpunkte der Verbesserungsvorschläge sind:

- auf der anlagentechnischen Seite:
  - Anpassung der Anlagentechnik, um eine flexiblere, unabhängige Betriebsweise zu ermöglichen.
  - Öffnung des sehr sensiblen Flüssigkeitskreislaufs, der die Flexibilität des Anlagenbetriebs stark einschränkt.
  - Öffnung des rezirkulierenden Stoffkreislaufs, um eine Akkumulation von Stoffen zu verhindern, die hemmende Wirkung auf die Biogasproduktion haben könnten.
  - Veränderung der Substratzufuhr-Technologie, um die Schaumbildung zu mindern und den biologischen Abbau zu verbessern.
  - Anpassung des up-steam-Prozesses zur Ultrafiltration, um bessere Betriebsbedingungen für die Stofftrennung zu schaffen.
  - Installation effizienterer und alternativer Schaumbekämpfungseinrichtungen.
- auf der betrieblichen Seite:
  - Verbesserung des Betriebsregimes hin zu einem konstanten und robusten Betrieb.
  - Optimierung der einzelnen Betriebsparameter in Richtung der idealsten Werte, die bisher einen maximalen Betrieb ermöglichten.
  - Suche nach alternativen Betriebshilfsmitteln und Verzicht auf Substrate und Betriebshilfsmittel, die allenfalls eine Problemursache darstellen.
  - Anpassung der Messtechnik und des Analyseintervalls, um den biologischen Hauptprozess besser kontrollieren zu können.

## 2 Einleitung

### 2.1 Motivation

#### 2.1.1 Entsorgungssicherheit von TNP als Auslöser

Anfang der 90er-Jahre suchte die damalige Hunziker Food Recycling AG nach Möglichkeiten, ihre „Fleischsuppe“ auf einem andern Weg, als die Fütterung zu verwerten. Dies vor allem für den Seuchenfall. Das BVET und das BUWAL erteilten der EAWAG 1991 den Auftrag, Versuche zur Vergärung von tierischen Nebenprodukten (TNP) auf kommunalen Kläranlagen im grossen Massstab im Sinne einer Machbarkeitsstudie durchzuführen. Sie führten zum Bericht „Notentsorgung von Tier schlamm von Seuchentieren in den Schlammbehandlungsanlagen von Kläranlagen“ von Siegrist und Wasmer (1992).

Seit der BSE-Krise im Jahr 2000 darf ein grosser Teil der tierischen Nebenprodukte nicht mehr in die Landwirtschaft beziehungsweise in die Nahrungsmittelindustrie zurückgeführt werden. Eine stoffliche Wiederverwertung des Materials ist nicht mehr gegeben. Standardverwertung ist die Herstellung von Tiermehl, das anschliessend verbrannt wird.

#### 2.1.2 Vergärung von TNP als Idee

Durch die Vergärung lassen sich rund 90% der organischen Stoffe abbauen und ein flexibel einsetzbarer Energieträger in Form von Biogas mit hohem Methangehalt produzieren. Die Hunziker Food Recycling AG (HFR) klärte mit verschiedenen grösseren Kläranlagen ab, ob sie interessiert seien, flüssige TNP anzunehmen und so ihren Gasertrag zu steigern. Alle Anfragen wurden abgelehnt – die Bedenken waren zu gross.

So entstand die Idee zur Monovergärung der flüssigen TNP. Allerdings war klar, dass vor allem der Gehalt an Stickstoff im Ausgangssubstrat von bis zu 16 g/l eine direkte Vergärung verunmöglicht. Es galt, eine praktikable Lösung für die Entfernung des Stickstoffs aus den TNP zu finden.

Eine direkte Entfernung aus den flüssigen TNP erwies sich als nicht machbar. Also wurde der Weg parallel zur Vergärung verfolgt. Dafür standen verschiedene etablierte Verfahren zur Verfügung: chemische, physikalische aber auch biologische. Die Anwendung direkt im Gär schlamm war kaum erprobt oder zu teuer, zudem war die Verwertung des entstehenden Stickstoff-Düngers in der Landwirtschaft nicht gesichert.

Der Anlagenplaner entschied sich für eine Fest-Flüssig-Trennung des Gär schlamms mittels Ultrafiltration und zwar so, dass die feste Fraktion wieder in den Vergärungsprozess zurückgeht. Der flüssige Anteil, das Permeat, muss eine Qualität aufweisen, welche es erlaubt, störungsfrei eine Stickstoffentfernung mittels Stripper durchzuführen. Durch Rückführung der flüssigen Fraktion kann so die Stickstoff- bzw. Ammoniumkonzentration im Fermenter reduziert werden.

#### 2.1.3 Förderung von erneuerbaren Energieträgern mit TNP

Eine Umsetzung des Projektes überstieg die Möglichkeiten der HFR. 2004 gründete sie die Biorender AG, ebenfalls in Münchwilen, TG. Gespräche mit der Stromwirtschaft schienen zuerst erfolgversprechend, scheiterten jedoch am Ende. Eine Zusammenarbeit mit der Entsorgungsindustrie kam nicht zu stande. Schliesslich fand sich in der Erdgas Ostschweiz AG (EGO) ein Partner, den die Idee der Erzeugung von erneuerbarer und über das Gasnetz flexibel einsetzbarer Energie überzeugte und der das Projekt bis zur Investitionsreife vorantrieb. Die EGO suchte und fand in den Reihen ihrer eigenen Aktionäre auch die künftigen Eigner der Biorender AG. 2009 beteiligten sich sieben Gasversorger der Ostschweiz mit insgesamt CHF 12.2 Mio. an der Biorender AG. Die EGO schied als Aktionärin aus.

Das Projekt erzeugte in vielen Ländern sowohl in Europa, wie auch in fernen Regionen wie Südafrika und Südkorea grosses Interesse, was an den grossen Besucherzahlen dokumentiert ist. Sobald in

diesen Ländern die einfache Deponie der Abfälle nicht mehr möglich sein wird, ist die Technologie von Biorender eine erfolgsversprechende Option.

## 2.2 Verfahrenstechnische Herausforderung

Die Biorender AG verarbeitet in ihrer Vergärungsanlage nahezu ausschliesslich tierische Nebenprodukte (TNP) aus Schlachthöfen und Metzgereien. Es handelt sich dabei um Abfallprodukte aus der Fleischverwertung, insbesondere Fleischabfälle der Kategorie 1.

Dieses spezielle Rohmaterial stellt hohe Ansprüche an die Vergärungstechnologie. Verschiedene, teilweise neuartige Verfahrenskombinationen sind notwendig, um einen effizienten und reibungslosen Anlagenbetrieb sicherzustellen. Die Biogasanlage zur Einspeisung von Biomethan ins Erdgasnetz zeichnet sich vor allem aus durch eine Drucksterilisation der TNP-haltigen Rohwaren, durch eine Schlammwäscherung des Gärslamms mittels Dekanertechnologie, durch eine Gärslammaufbereitung mittels Kantenspaltsieb und Ultrafiltration, einer Stickstoff-Strippung des Dekanter-Zentrals und UF-Permeats sowie durch eine betriebsinterne Membran-Abwasserreinigungsanlage und gezielte hydraulische Kreislaufströme. Eine vergleichbare Anlage gibt es – nach unserem Kenntnisstand – weltweit nicht. Aus diesem Grund wurde bei verschiedenen Verfahrensstufen und insbesondere in der Kombination einzelner Verfahrensschritte Neuland betreten.

Die bis anhin wohl einzigartige Technologie funktioniert in nahezu allen Verfahrensstufen gut. Die Verfahrensschritte der Vergärung (Schaumbildung), der Ultrafiltration (Durchsatz), der Rezirkulation von verschiedenen Stoffströmen (Aufkonzentrierung von Feinstoffen) führen jedoch zu einer bisher unbefriedigenden Gesamtleistung der Anlage.

Sowohl einzelne Anlagenteile, wie auch bestimmte Betriebsparameter führen zurzeit noch zu einer Begrenzung der Leistungsfähigkeit der Anlage. Nebst den typischen, limitierenden Prozessgrössen der Abbaubarkeit des Materials, der Raumbelastung, des maximalen Durchsatzes, des begrenzten Gärvolumens, der hydraulischen Verweilzeit sowie des Schlammalters spielen hier bisher wenig erforschte Faktoren wie die permanente Schaumbildung, die eigenartige Konsistenz des Gärslamms und die durch das Ausgangsmaterial gegebene hohe Ammonium- und Ammoniak- sowie Schwefelkonzentration eine entscheidende Rolle.

Abgesehen von momentan limitierenden Faktoren bezüglich der Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage sind auf verschiedenen Ebenen weitere Optimierungsansätze, wie zum Beispiel die Verminderung des Einsatzes von Betriebshilfsmitteln, denkbar.

Bereits kurz nach der Inbetriebnahme stellte sich heraus, dass die Ultrafiltration nicht erwartungsgemäss funktionierte und damit die Gesamtleistung der Anlage nicht erreicht werden konnte. Um diesem Problem zu begegnen, wurden in den ersten drei Betriebsjahren bereits verschiedene Umstellungen in der Verfahrensführung vorgenommen.

Seit dem Beginn dieses Jahres liegt die Biomethangas-Produktion bei etwa 55% der ausgelegten Sollleistung, also bei durchschnittlich 60'000 kWh/d beziehungsweise 22 GWh/a bei einer maximalen Tagessproduktion von knapp 72 MWh. Das Erreichen der Vollleistung von etwa 41 GWh/a ist das Ziel und scheint nach wie vor erreichbar. Allerdings sind dazu weitere Abklärungen, Forschungsarbeiten sowie zusätzliche Investitionen notwendig, um vielversprechende Verbesserungsmassnahmen im Detail zu prüfen und umsetzen zu können.

## 2.3 Das BfE-Projekt „Leistungssteigerung Monovergärung“

Wie bereits erwähnt, scheint das Ziel, die Vollleistung zu erreichen nach wie vor realistisch. Sicher ist jedoch, dass Anpassungen an einzelnen Verfahrensschritten respektive deren Verknüpfungen zu realisieren sind. Um diese Massnahmen auf sicheren Erkenntnissen abzustützen zu können, sind weitere umfangreiche Untersuchungen durchzuführen. Diese Untersuchungen überschreiten die Möglichkeiten von Biorender sowohl in personeller wie auch in finanzieller Hinsicht. Aus diesem Grund hat Biorender einen Antrag an das Bundesamt für Energie (BfE) gestellt und um Unterstützung gebeten.

Der Antrag an das BfE umfasst insgesamt 3 Stufen:

- Phase 1: Forschung zur direkten Anlagenoptimierung,
- Phase 2: Forschung zur Optimierung der Infrastrukturanlagen der Gesamtanlage,
- Phase 3: Forschung zur weiteren energetischen und stofflichen Optimierung der Anlage.

Zu den jeweiligen Phasen wurden im Antrag die entsprechenden Fragestellungen und Arbeitshypothesen formuliert. Mit dem Vertrag vom 02. Oktober 2013 erhielt Biorender die Zusagen vom BfE für die Unterstützung des Projektes „Leistungssteigerung Monovergärung TNP“, Projektphase 1.

## 2.4 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Ziel dieser Studie (Projektphase 1) ist es, eine umfassende Datenanalyse der Betriebsdaten der Mono-Vergärungsanlage für TNP zu erstellen, um daraus Arbeitshypothesen zur Optimierung des Betriebs und zu Weiterentwicklung der eingesetzten Verfahrenskette abzuleiten.

Der Fokus dieser Betriebsanalyse wird auf folgende vier Punkte gelegt:

1. die begrenzte Leistung der Ultrafiltration,
2. die Schaumbildung in den Fermentern,
3. schwefelhaltige Störstoffe im Biogas und
4. die Leistungsgrenze der Fermentation.

### 2.4.1 Literaturstudium

Eine Literaturrecherche zu folgenden spezifischen Fragestellungen wird durchgeführt:

- Abhängigkeiten der Durchsatzleistung von Ultrafiltrationen. Mögliche Massnahmen und Methoden zur Detektion und Elimination von leistungsmindernden Ursachen.
- Schaumbildung in Fermentern und deren Vermeidung sowie Bekämpfung.
- Beeinflussung des Gärprozesses durch Polyacrylamide.
- Entstehung von störenden, schwefelhaltigen Begleitstoffen im Biogas, wie Mercaptane, Dimethylsulfide und höhere Kohlenwasserstoffe. Mögliche Massnahmen zu deren Entfernung.
- Erfahrungen im Betrieb von Fermentern in einer leicht über dem „normalen“ mesophilen Bereich liegenden Temperatur, d.h. zwischen 40 und 45°C.
- Limitierung der Vergärungsgeschwindigkeit durch hohe Ammoniumgehalte in der Biomasse – auch bei gut adaptierten Schlämmen.
- Typische Konzentrationen von Antibiotika in Fleischabfällen und mögliche Auswirkungen auf den Prozess der Vergärung.

### 2.4.2 Begrenzte Leistung der Ultrafiltration

Die Ultrafiltrationsanlage ist zurzeit der eigentliche Flaschenhals der Gesamtanlage. Die begrenzte Permeat-Menge bei definierter Qualität hat entscheidenden Einfluss auf den Flüssigkeitshaushalt der Gesamtanlage und damit auch auf die Gesamtleistung der Fermentation. Die flüssigen Fraktionen der Ultrafiltration und der Schlammentwässerung mittels Dekanter werden auf den Ammonium-Stripper geleitet. Die stickstoffarme Flüssigkeit gelangt anschliessend auf die betriebsinterne Abwasserreinigungsanlage (ARA). Das gereinigte Abwasser der betriebsinternen ARA bildet, abgesehen vom entwässerten Gärslamm des Dekanters, den einzigen nicht gasförmigen Stoffstrom, der von der Anlage abgeleitet wird und definiert damit massgebend den hydraulischen Durchsatz der Anlage.

Die maximalen Stoffdurchsätze der flüssigen Fraktionen von Ultrafiltration und Schlammentwässerung begrenzen zusammen mit dem minimalen Schlammalter die Maximalleistung der Anlage.

Mit Hilfe dieser Studie sollen mögliche Ursachen der – im Vergleich zu den Pilotversuchen vor Inbetriebnahme – begrenzten Leistung der Ultrafiltration nach ihrer Wahrscheinlichkeit und Detektierbarkeit beurteilt werden, sowie ein Massnahmenkatalog zur Problembeseitigung aufgestellt werden.

### 2.4.3 Schaumbildung in den Fermentern

Die massive Schaumbildung in den Fermentern zur Vergärung von protein- und fetthaltigen Ausgangssubstraten führt zu einer deutlichen Verringerung des Fermentationsvolumens. Zur Gewährleistung eines einigermassen sicheren Anlagenbetriebs wurde die Fermentation seit Inbetriebnahme der Anlage im Dezember 2011 nicht auf der maximalen Fermenter-Füllhöhe von knapp 18 Metern betrieben. Bis im Mai 2013 wurde die Füllhöhe der einzelnen Fermenter individuell durch den Betreiber so eingestellt, dass das Schaumniveau möglichst knapp unterhalb der Fermenterdecke lag. Bei schwankenden Füllhöhen zwischen 10 und 17 Metern – kontinuierlich gemessen mittels hydrostatischem Drucksensor – war ein Ansprechen der Schaumfalle an der Tagesordnung. Die Beeinträchtigung des Anlagenbetriebs war massiv.

Seit Mai 2013 wird der Fermenter-Füllstand in allen drei Fermentern konstant auf einem Niveau von ca. 11.00 bis 11.75 m gehalten. Diese Massnahme führte auf der einen Seite zwar zu einem viel sichereren, konstanteren Anlagenbetrieb, schränkte auf der anderen Seite aber die Anlagenkapazität stark ein. Eine Füllhöhe von nur 11 anstatt 18 Metern bedeutet eine Herabsetzung des Fermenternutzvolumens von annähernd 40% im Vergleich zum maximalen Arbeitsvolumen der Fermenter.

Mögliche Ursachen für die Schaumbildung und –stabilisierung werden im Rahmen dieser Studie anhand der verfügbaren Daten und von Literaturhinweisen gesucht. Massnahmen zur Handhabung, Vermeidung und/oder Bekämpfung des Schaums werden geklärt.

### 2.4.4 Schwefelhaltige Störstoffe im Biogas

Das Rohbiogas der Biorender AG enthält nebst dem zu erwartenden Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) nachweislich auch höhere Schwefelverbindungen wie Dimethylsulfid (DMS), Methylmercaptan (MM) und Ethylmercaptan (EM).

Die Grenzwerte zur uneingeschränkten Einspeisung von Biomethan ins Erdgasnetz werden durch das SVGW (2008) festgelegt. Die Einspeiserichtlinie legt bezogen auf schwefelhaltige Bestandteile Maximalwerte für Schwefelwasserstoff sowie für Gesamtschwefel und Mercaptane im odorierten Gas vor.

Durch die Gasreinigung mittels Aminwäsche und nachgeschaltetem, zweistufigen Aktivkohlefilter können die Schwefelverbindungen des Biomethans, welche durch den  $H_2S$ -Sensor detektierbar sind, auf einen maximal einstelligen ppm-Bereich reduziert werden. Bei einem Durchbruch von DMS, für welches der  $H_2S$ -Sensor keine Querempfindlichkeiten zeigt, gelangt dieses nach der Aminwäsche und der Komprimierung in die Gastrocknung. Die schwefelhaltige Verbindung wird im Trockner zurückgehalten und verlässt den Trockner kurz bevor dieser mit Wasser gesättigt ist als EM. Dadurch entstehen Spaltenbelastungen im gereinigten Gas, welche eine Einspeisung nicht zulassen. Der Trockner geht in Regeneration.

Bei der Trocknerregeneration verlassen die Schwefelverbindungen mit dem Regeneriergas als EM den Trockner. Das Regeneriergas wird aber auf den neu in Betrieb gelangenden zweiten Trockner geführt und belädt diesen gleich wieder stark. Das EM wird somit dauernd im Kreis geführt.

Bei Überschreitung der Grenzwerte für die Einspeisung des Biomethans ins Erdgasnetz kann das aufbereitete Biogas nicht dem Erdgasnetz zugeführt werden und muss mittels Notfackel verbrannt werden.

Im Rahmen dieser Studie werden Möglichkeiten zur Vermeidung und Entfernung dieser störenden Biogasbestandteile erarbeitet.

## 2.4.5 Leistungsgrenze der Fermentation

Die maximale Leistungsgrenze der Fermentation wird anhand der verfügbaren Betriebsdaten ermittelt. Theoretische Grenzbelastungen werden unter den folgenden Bedingungen bezogen auf den bisherigen Anlagenbetrieb berechnet:

- maximal erreichte Ammoniumkonzentration ohne merkliche Hemmeffekte bezüglich der Biogasproduktion,
- maximale CSB-Raumbelastung ohne merkliche Hemmeffekte bezüglich der Biogasproduktion,
- maximale FOS-Belastung ohne merkliche Hemmeffekte bezüglich der Biogasproduktion,
- optimaler pH-Bereich im Gärslamm,
- optimaler, mesophiler Temperatur-Bereich im Gärslamm,
- optimaler Bereich der hydraulischen Retentionszeit und des Substratabbaus,
- optimaler Bereich des Schlammalters.

Diese typischen Anlagenkenngrößen werden entsprechenden Werten aus der Anlagenauslegung und der Literatur gegenübergestellt. Dies soll eine genauere Definition der Anforderungen an periphere Anlagenteile ermöglichen.

In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Anlagenkennzahlen und Sollwerte der Anlagenauslegung aufgelistet:

**Tabelle 1:** Die wichtigsten Kennzahlen für die Anlagenauslegung

Parameter	Auslegewert	Einheit
Gesamt-Nutzvolumen Vergärung	2'850	[m <sup>3</sup> ]
Füllhöhe Fermenter	14.80	[m]
Totalinput wässrige Lösungen	160	[m <sup>3</sup> /d]
Totalinput Rohware	68.5	[t/d]
Trockensubstanzgehalt Rohware*	40	[%]
Totalinput CSB in der Rohware	34	[t CSB/d]
CSB-Raumbelastung	12	[kg CSB/( m <sup>3</sup> *d)]
FOS	< 50	mVal
pH Gärslamm*	8.1	[ $\text{-}$ ]
Ammonium im Gärslamm	4'000	[g/m <sup>3</sup> ]
Gärtemperatur	37-39	[°C]
Schlammalter	35	[d]
Durchfluss Zentrat von Dekanter	81.5	[m <sup>3</sup> /d]
Durchfluss Permeat von UF	400	[m <sup>3</sup> /d]

\* Erwartungswert

## 2.5 Vorgehen

Es ist ein sehr umfangreiches Datenmaterial aus den ersten Betriebsjahren vorhanden, welches ausgewertet und bezüglich der festgestellten Hauptprobleme und der Leistungsgrenze interpretiert werden soll. Aus diesen Daten werden, falls möglich, direkt belegbare Schlüsse gezogen oder es werden Thesen formuliert, welche mit weiteren Versuchen abgesichert werden müssen.

Die zu untersuchenden Daten bestehen aus Online-Messwerten des Betriebsleitsystems, aus durch das Betriebspersonal erhobenen Analysedaten, aus externen Laboranalysen, sowie Daten von Labor- und Pilotversuchen.

Sämtliche relevanten Daten werden für eine Datenanalyse aufbereitet. Ein erster Schritt beinhaltet dabei die vertiefte Betriebsdatenauswertung bezogen auf die Hauptfragestellungen, eine Liste relevanter Anlagenkennzahlen, Sensitivitätsanalysen sowie grafische Auswertungen. Die Resultate werden anschliessend mit Literaturangaben abgeglichen und in einem Fachgremium besprochen.

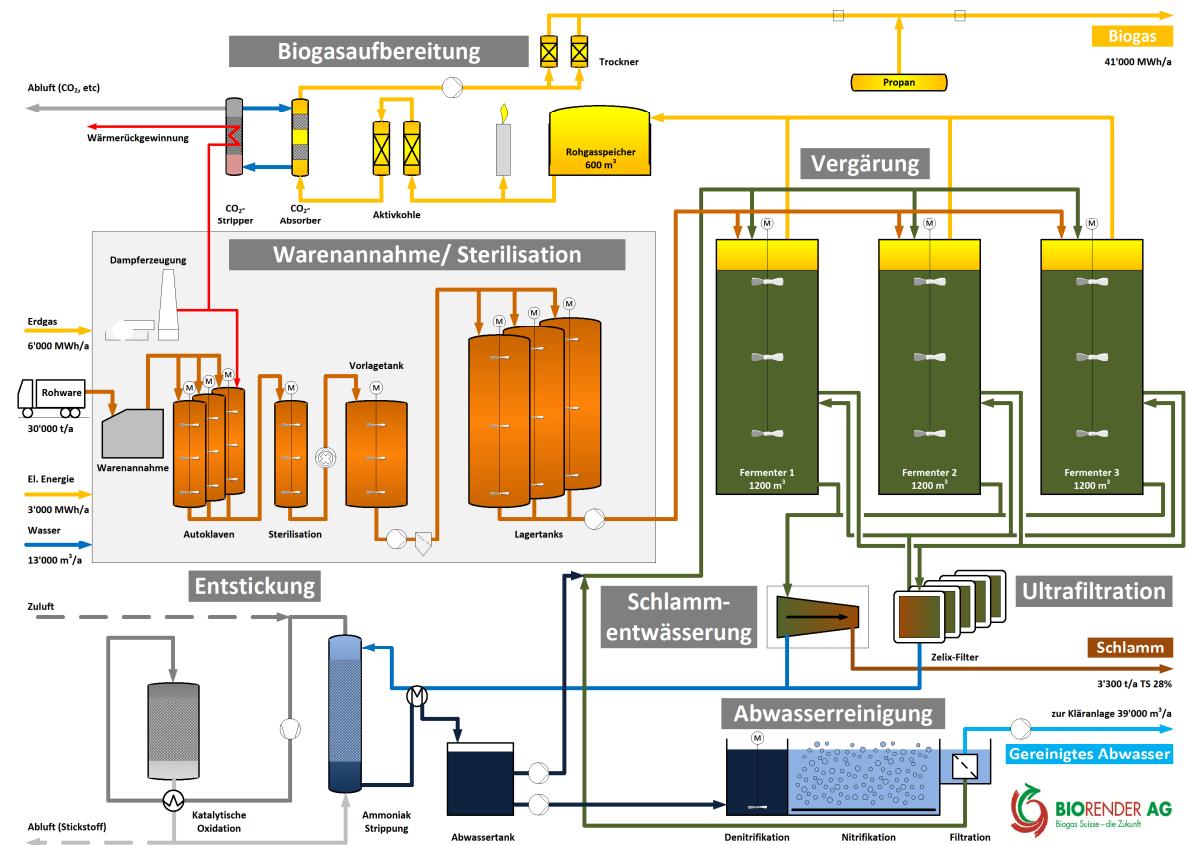
Zur Erreichung der in dieser ersten Phase des Projekts gesteckten Ziele wird folgendes Vorgehen definiert:

- Sichtung, Aufbereitung und Auswertung des vorhandenen Datenmaterials,
- eventuell zusätzliche Datenerhebung,
- Literaturstudium zu den definierten Fragestellungen,
- Interpretation des vorhandenen Datenmaterials,
- Formulierung von Thesen zur Ursachenfindung der Hauptprobleme
- Aufstellen eines Massnahmenkatalogs zur Ursachenfindung der Hauptprobleme,
- Formulierung von möglichen Massnahmen zur Ursachen- & Problembekämpfung,
- Aufstellen von Arbeitshypothesen zur Ursachen- & Problembekämpfung,
- Aufstellen von Arbeitshypothesen bezüglich weiterer Verbesserungsansätze.

# 3 Anlagentechnik und Betrieb

## 3.1 Anlagenbeschreibung

Das nachfolgende, stark vereinfachte Prozessschema zeigt das Gesamtprojekt im Überblick:



**Tabelle 2:** Vereinfachtes Prozessschema der Gesamtanlage

### Sterilisation

Die angelieferte Rohware (TNP) wird im Batch-Verfahren in Autoklaven erhitzt und während mehrerer Stunden bei mindestens 135°C gekocht. Dabei zerfallen die Produkte, selbst Knochen, und werden bei einer maximalen Partikelgrösse von 8 mm über Misch- und Vorlagetank sowie einen Fett-Abscheider in drei Lagertanks überführt. Das hygienisch einwandfreie Sterilisat wird im Vorlagetank zur Biogasentschwefelung mit Eisenchlorid versetzt und von da in die drei Fermenter gepumpt. Diese werden parallel mit wechselndem Niveau betrieben und haben je ein Nutzvolumen von ca. 900 bis 1'150 m³.

### Co-Substrate und Betriebsabwässer

Weitere Substratinputs in die Fermenter geschehen aus dem Reservebecken (flüssige Co-Substrate) und aus dem Mischbecken (sämtliche Betriebsabwässer, Co-Substrate, Kondensat der Gastrocknung, Überschusschlamm der internen ARA, zeitweiliger Rücklauf des Dekanterzentrates). Zusätzlich verfügen die Fermenter über einen Brauchwasseranschluss an der Fermenterdecke und in der Schaumfalle, über welche bei Bedarf Antischaummittel zugegeben werden kann.

## Ultrafiltration, Schlammentwässerung, Stripping und betriebsinterne ARA

Eine Ultrafiltrationsanlage zieht auf einer Fermenterhöhe von etwa 5 Metern Schlamm aus den Fermentern ab. Dem Gärslamm werden up-stream über Kantenspaltfilter Feststoffe entzogen, die zurück in die Fermenter geführt werden. Das Permeat der UF wird dem Ammoniak-Stripper zugeführt, während das Retentat zurück in die Fermenter gelangt.

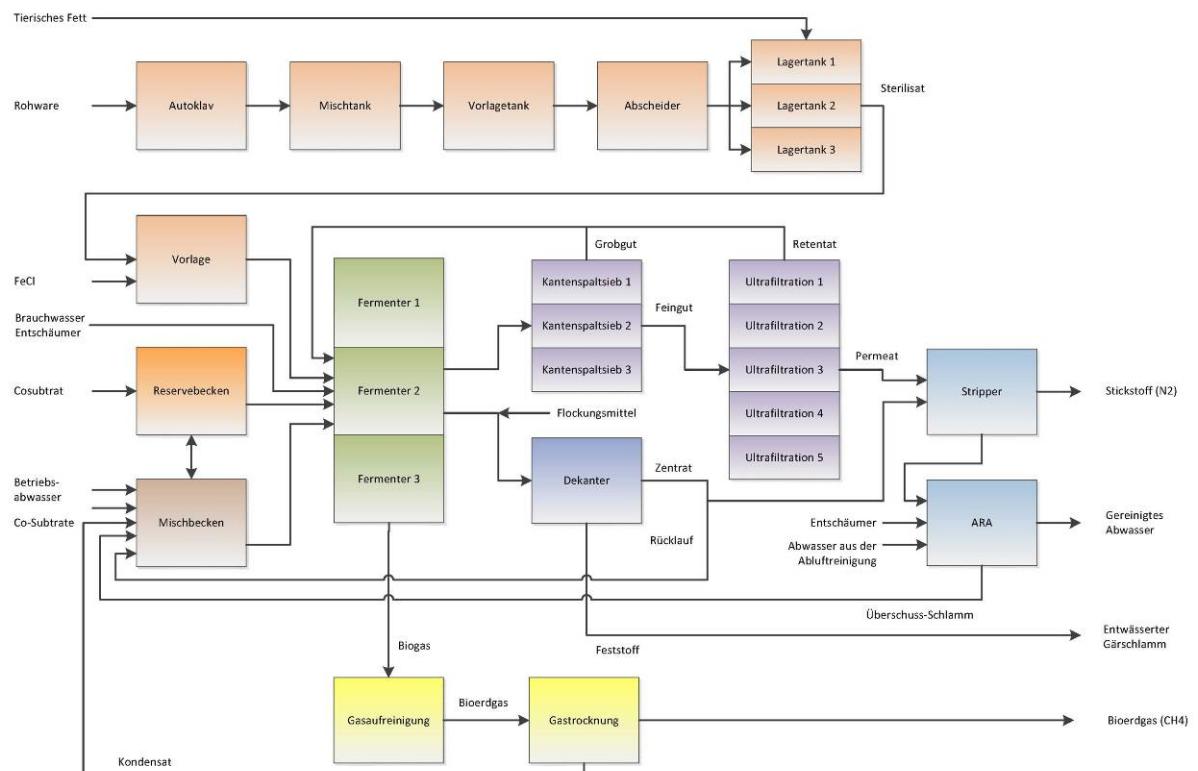
Der Restschlamm wird aus den Fermentern im Pumpensumpf direkt abgezogen, mit Fällungs- und Flockungshilfsmitteln (FHM) versetzt und über einen Dekanter entwässert. Als Fällmittel und zur Senkung des pH-Werts wird Eisenchlorid verwendet, das biologisch abbaubare Flockungshilfsmittel wird in Essigsäure gelöst. Der entwässerte Schlamm wird in einer KVA verbrannt, das Zentrat gelangt zusammen mit dem Permeat der UF in den Stripper und anschliessend in die betriebsinterne ARA.

Für die Stripping wird der pH-Wert wieder angehoben. Die Ammoniumreduktion im Permeat beträgt rund 90%. Der grössere Teil des gestrippten Permeats gelangt zurück in die Fermenter und reduziert dort den Ammoniumgehalt. Der Rest wird der betriebseigenen Kläranlage zugeführt. Diese entfernt neben dem CSB auch das Restammonium. Das Ammoniak in der Stripperluft wird katalytisch zu Luftstickstoff oxidiert. Dies ist ein exothermer Prozess, sodass die Ammoniak-Stripping energieautark betrieben werden kann.

## Biogas-Aufbereitung und Abluftreinigung

Zwei in Serie geschaltete Filter mit imprägnierter Aktivkohle entfernen das restliche  $H_2S$  aus dem Rohbiogas. Nun erfolgt die Gasaufbereitung über eine Aminwäsche und eine Gastrocknungsanlage. Als einzige Gasaufbereitungsanlage in der Schweiz verfügt Biorender über eine Propangaszugabe, um den Brennwert von 11.1 kWh/Nm<sup>3</sup> auf 11.3 kWh/Nm<sup>3</sup> zu erhöhen. Dieser Brennwert ist für die Einspeisung ins 5-bar-Netz der Technischen Betriebe Wil (TBW) vorgeschrieben.

Weder im obigen Prozessschema noch auf dem nachfolgenden Fliessbild dargestellt ist die aufwändige Abluftreinigungsanlage der Biorender AG. Die Anlage besteht für die stark belastete Abluft aus einer mehrstufigen Wäscheranlage und einer mehrstufigen Biofilteranlage. Auch die schwach belastete Abluft wird über eine 2-stufige Wäscheranlage und eine Biofilteranlage gereinigt. Geruchsbelastigungen können damit nachhaltig vermieden werden.



**Tabelle 3:** Vereinfachtes Blockfliessbild der Gesamtanlage

## Innovative Anlagentechnik

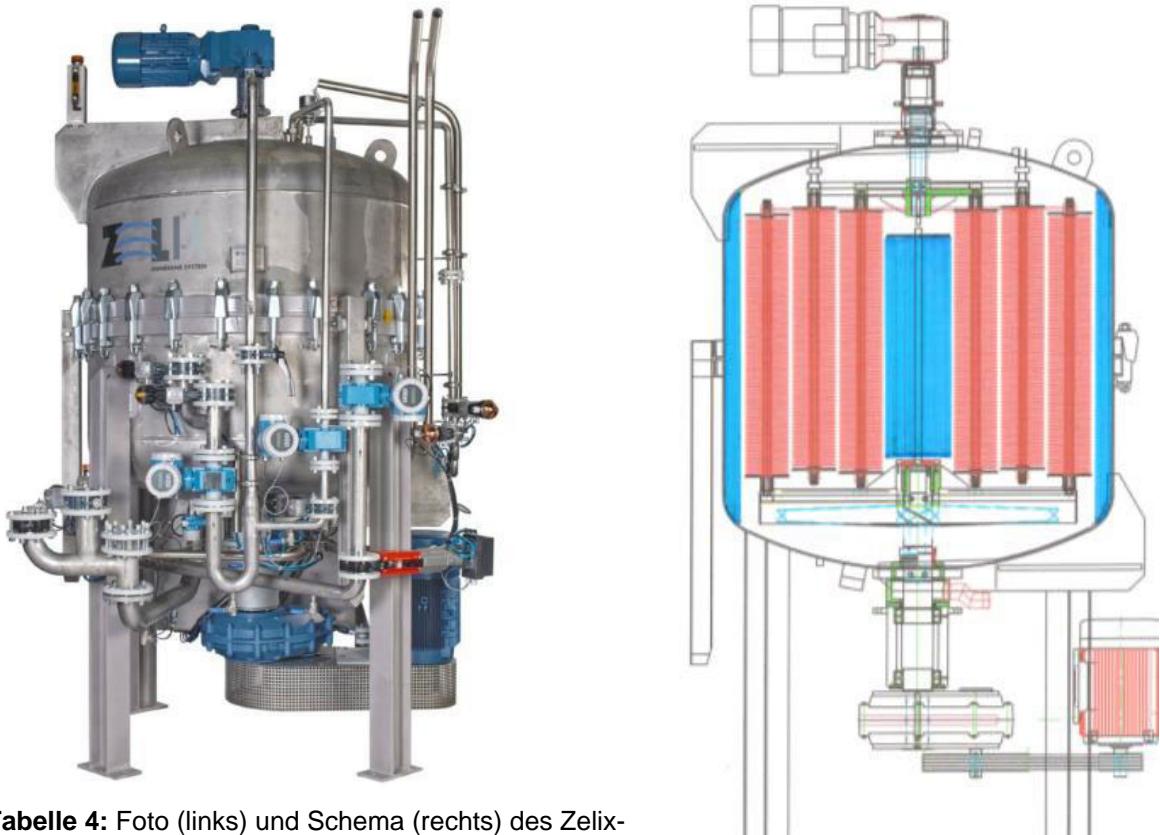
Kurz zusammengefasst sind die Besonderheiten dieser Anlage:

- ein ziemlich konstantes, stark protein- und fetthaltiges Ausgangsprodukt, welches eine äusserst spezialisierte, gut angepasste, jedoch empfindliche Fermenter-Biozönose zur Folge hat.
- ein äusserst sensibler Flüssigkeitshaushalt, da die hydraulischen Ausgangsströme (definiert durch Ultrafiltrationsleistung und Schlammentwässerung) einerseits über die maximale hydraulische Kapazität der Gesamtanlage entscheiden und andererseits zur Verdünnung hoher Hemmstoffkonzentrationen verwendet werden.
- neuartige, unkonventionelle Verfahrenskombinationen insbesondere bei der Gärrestaufbereitung, bei welcher mit parallelen Stoffströmen zum einen auf die Schlammentwässerung mittels Dekanter, zum anderen auf die Biomasserrückführung durch die Ultrafiltration gefahren wird.
- die Entkoppelung der hydraulischen Retentionszeit und des Schlammtalters durch den Einsatz einer Ultrafiltrationsanlage zur Entnahme von Flüssigkeit aus dem Fermenter, wobei der Schlammtal im Fermenter gehalten wird (Membranbioreaktor).
- die Rückführung verschiedener Stoffströme und die Verwertung sämtlicher Betriebswässer, was einerseits die Gefahr von Kontamination mit Bioziden und Reinigungsmitteln beinhaltet, andererseits eine Kumulation von Störstoffen, wie z.B. eine Feinstoffanreicherung fördert.

## 3.2 Ultrafiltration

### 3.2.1 Prinzip der Ultrafiltration

Die Ultrafiltration bei der Biorender AG besteht aus fünf Modulen des Herstellers Pantrecon. Die ZELIX 110/90 Module bestehen aus jeweils drei Rotorringen, wobei der mittlere Ring statisch, der innere und äussere Ring beweglich ist. Im Betrieb rotieren die beweglichen Ringe in entgegengesetzten Strömungsrichtungen.



**Tabelle 4:** Foto (links) und Schema (rechts) des Zelix-Moduls 110/90 (Quelle: Pantrecon, 2014)

Die einzelnen Filterscheiben der Rotorringe sind von trapezoider Form und sorgen gemäss Hersteller zusammen mit der Rotationstechnologie für eine dynamische Strömung auf der gesamten Membranoberfläche.

Besonders gut geeignet seien diese Module für höherviskose Flüssigkeiten, höhere Konzentrationen, biologisch und chemisch sensible Inhaltsstoffe und wechselnde Bedingungen in Feedvolumen und Inhaltsstoffen. Sie finden daher speziell Anwendung in der Filtration von Biomasse und von Ölen.

Ein voll bestücktes Modul verfügt über eine gesamte Filterfläche von ca. 90-130 m<sup>2</sup>.

### 3.2.2 Entscheidende Prozessparameter für die Durchsatzleistung

#### Konzentrationspolarisation und Fouling

Zur Beschreibung des Stofftransports bei einer Ultrafiltration werden oft zwei grundlegende Modelle verwendet, die auch nebeneinander auftreten können.

Das Lösungs-Diffusions-Modell beschreibt den Transport durch die Membran mittels Diffusion. Während des Filtrationsprozesses kann dabei durch Moleküle eine Grenzschicht aufgebaut werden. Dadurch entsteht ein Konzentrationsgefälle (elektrochemisches Potenzial), der zu einem reduzierten Flux, d.h. Transmembranfluss führt. Dieser Effekt, bei dem es zu einer Anhäufung von zurückgehaltenen Makromolekülen an der Membranoberfläche kommt, wird Konzentrationspolarisation genannt. Der maximale Permeatfluss ergibt sich bei der Sättigungskonzentration einer bestimmten Substanz an der Membran.

Das hydrodynamische Modell beschreibt den rein konvektiven Transport durch die Poren der Membran. Auch hier können Partikel, welche nicht durch die Membran passieren, eine Sekundärschicht auf der Membran bilden und zu einem reduzierten Flux führen. Diese Deckschichtbildung wird als Scaling bezeichnet. Wenn die partikulären Stoffe nicht rasch genug von der Membranoberfläche wegtransportiert werden, wird von Fouling gesprochen, bei zusätzlichem Aufwuchs von Mikroorganismen von Bio-fouling.

Eine zunehmende Konzentration von Partikeln an der Membranoberfläche bewirkt eine raschere Ausbildung von Deckschichten und daher eine Verringerung des Fluxes.

Zusammengefasst können folgende Phänomene auftreten, die zu einer verminderten Durchsatzleistung des Permeatflusses durch die Membran führen:

- Porenverstopfung,
- Adsorption von Substratpartikeln an der Membranoberfläche,
- chemische Interaktion zwischen Membran und Lösung,
- Gelbildung,
- Bakterienwachstum.

#### Cross-Flow

Bei einer Querstrom-Filtration strömt das zu filtrierende Substrat an der Oberfläche der Ultrafiltration entlang (Cross-Flow). Aufgrund einer Druckdifferenz zwischen der Vorder- und Hinterseite der Membran (Transmembrandruck) gelangt die flüssige Fraktion (Permeat) durch die Membran, während das Konzentrat (Retentat) auf der Membran-Vorderseite abgezogen wird. Fouling und Konzentrationspolarisation werden in einer Cross-Flow-Filtration stark eingeschränkt.

Für den optimalen Betrieb einer Cross-Flow-Filtration, insbesondere wenn Fouling-Effekte eine Rolle spielen, ist der Cross-Flow ein wichtiger Parameter, der einen entscheidenden Einfluss auf den Flux ausübt.

#### Strömung und Turbulenzen

Bei einer Cross-Flow-Filtration ist eine gleichmässige Überstömung der Membran entscheidend. Da die Leistung eines Ultrafiltrations-Moduls jedoch auch direkt von der verfügbaren Filteroberfläche abhängt, haben die möglichst hohe Packungsdichte und die Reinigungszugänglichkeit (Spülbarkeit) ebenfalls einen wichtigen Einfluss.

Die Strömung wird grundsätzlich durch die Modulkonstruktion und das Filterdesign, die spezifische Anordnung der Filterflächen, die Membrandicke und spezielle Einbauten direkt beeinflusst.

Die Bildung von Turbulenzen auf der Membran-Vorderseite ist erwünscht, da sie zur Ablösung von Deckschichten oder Verhinderung von Konzentrationspolarisation führen.

## Transmembrandruck

Die Ultrafiltration, bei welcher aufgrund der kleinen Poren ein erhöhter Stofftransportwiderstand besteht, wird oft unter erhöhtem Betriebsdruck betrieben. Bei diesem druckgetriebenen Filtrationsverfahren hat der Druckabfall über die Membran einen entscheidenden Einfluss. Grundsätzlich nimmt der Flux mit erhöhtem Transmembrandruck linear zu. Bei erhöhtem Druck nimmt aber auch die Interaktion der zu filtrierenden Flüssigkeit mit der Membran zu, was zu Fouling führen kann. In diesem Fall spricht man im Gegensatz zum membrankontrollierten Permeatfluss, von einem decksichtkontrollierten.

Teilt man den Permeatfluss durch den Transmembrandruck, spricht man von der Permeabilität einer Membran. Eine langsame, aber stetige Abnahme der Permeabilität einer Membran deutet auf eine Veränderung der Membran beispielsweise durch stetiges Eindringen von kleinen Partikeln in Hohlräume, Ausfällungen aufgrund von Sättigungskonzentrationen oder Deckschichtbildung durch biologisches Wachstum.

## Temperatur

Eine Temperaturerhöhung hat oft positiven Einfluss auf die Durchflussleistung, die meist durch die geringere Viskosität erklärt werden kann.

## pH-Wert

Der pH-Wert kann grossen Einfluss auf die Durchsatzleistung einer Ultrafiltrationsanlage haben. Mineralsalze werden beispielsweise vermehrt bei hohen pH-Werten gebildet und verstärken dadurch Scaling-Effekte (Kabsch-Korbutowicz *et al.*, 1999). Die Herabsetzung des pH-Werts kann gegenteilige Wirkung haben, wenn dadurch beispielsweise das Ausfällen von Carbonaten verhindert wird.

## Elektrische Felder und andere Wechselwirkungen

Wechselwirkungen zwischen dem Substrat und der Membran zum Beispiel durch elektrische Ladungen sowie Hydrophobie bzw. Hydrophilie können den Permeat-Durchfluss entscheidend beeinflussen.

## 3.3 Schaumbildung und Schaumzerstörung

### 3.3.1 Ansätze zur Schaumvermeidung

Gemäss Moeller *et al.* (2012) steht bei der Schaumvermeidung die Prävention an erster Stelle.

Nebst den Eigenschaften der Ausgangssubstrate ist auch die Schaumbildung durch Stress der Biozönose ein verbreitetes Phänomen in Biogasanlagen. Die Mikroorganismen reagieren nachweislich nicht nur sensibel auf eine ungeeignete Betriebsführung der Anlage (Schwankungen aufgrund der Fütterung, Nährstoffmangel, Überfütterung, pH-Wert, Temperatur etc.), sondern auch auf eine ungeeignete Anlagentechnik (Scherstress, pH-, Druck- und Temperaturgradienten).

Insbesondere bei der Inbetriebnahme oder beim Wiederanfahren der Anlage beispielsweise nach technischen Änderungen und Durchführung von Instandhaltungsmassnahmen ist oft Fingerspitzengefühl gefragt.

## Substrate

Abgesehen von einem nicht ausgewogenen Substratmix können auch einzelne Substrate oder Stoffe für die Schaumbildung verantwortlich sein. Bekannte schaumfördernde Ausgangssubstrate sind bei-

spielsweise schnell abbaubare Substrate wie Fette und Öle, wie auch solche mit hohen Proteinanteilen. Getreide, ob in Form von Schrot oder aber auch Ganzpflanzensilage vor allem von Roggenprodukten können stark schaumbildende Eigenschaften aufweisen. Stärke, Pektin und andere Kohlenhydrate können auf den Schaum eine stabilisierende Wirkung zeigen.

Störstoffhaltige Substrate können eine übermässige Schaumbildung auslösen. Dazu gehören z.B. solche mit bioziden Eigenschaften wie Schimmelpilz und Antibiotika, aber auch hemmende Konzentrationen von Ammonium oder Schwefelwasserstoff und schaumbildende Betriebshilfsmittel.

Schliesslich kann auch die Korngrösse der Ausgangssubstrate einen Einfluss haben. Die Mahlfeinheit von Getreideprodukten spielt beispielweise für die Schäumungsintensität und Schaumstabilität eine wichtige Rolle.

## Betriebsregime

Hat der Betreiber einer Vergärungsanlage seine Prozesse im Griff und versteht er die chemischen, physikalischen und biologischen Abläufe seiner Verfahrensschritte, kann er durch adäquaten Anlagenbetrieb das Phänomen der übermässigen Schaumbildung unter Umständen vermeiden. Ein möglichst konstantes, optimiertes Rühr- und Fütterungsregime und eine stabile Prozessführung sind dabei sehr wichtig.

## Anlagentechnik

Genau so entscheidend ist aber auch die installierte Anlagentechnik. Ein grosses Augenmerk muss dabei auf die hydraulische Situation im Fermenter und der peripheren Anlagenteile gerichtet sein. Turbulente Strömungen, aber auch strömungsarme Regionen können entscheidend zur Schaumbildung beitragen, insbesondere, wenn sie zur Sedimentation von Feststoffen führt. Das Aufrühren von Sedimenten hat ebenfalls schaumbildende Wirkung. Im Vordergrund bezüglich der installierten Anlagentechnik stehen daher die Rühr- und Pumptechnik, die Strömungsführung und Druckverhältnisse, sowie die Einbringtechnik von Stoffflüssen in den Fermenter. Wichtig ist aber auch die Situation bezüglich des Wärmehaushalts.

Bei einem Vergleich von *Pagilla et al (1997)* zwischen einer mechanisch und einer gasdurchmischten Vergärungsanlage zeigte sich, dass die Schaumneigung im gasdurchmischten System wesentlich höher war. Der Einfluss von Gasblasen auf die Strömungsverhältnisse und die Schaumbildung an der Gärslamboberfläche ist also nicht ausser Acht zu lassen.

### 3.3.2 Massnahmen zur Schaumbekämpfung

Im Idealfall bestehen die Massnahmen zur Schaumbekämpfung darin, eine Schaumbildung überhaupt zu verhindern. Ansätze dazu sind auf der Ebene der obigen drei Gebiete, namentlich der Ausgangssubstrate, der Betriebsführung und der Anlagentechnik zu suchen.

Je nach Situation, wenn zur Schaumzerstörung auf ein schaumbildendes Substrat nicht verzichtet werden kann oder wenn die Ursache für die Schaumbildung nicht eindeutig festgestellt werden kann, ist eine effiziente Symptombekämpfung angezeigt. Wie in der folgenden Tabelle dargestellt, kommen in der biotechnologischen Praxis verschiedene Prinzipien zur Schaumzerstörung oder Kombinationen davon zur Anwendung: thermische, mechanische und die chemische Verfahren. Für die Biogaspraxis eignen sich aber meist aus Kostengründen nur wenige davon.

Zusätzlich zu den oben erwähnten Massnahmen kann hier noch die Schwimm- bzw. Deckschichtbildung als mechanische Schaumbekämpfungsmassnahme erwähnt werden. Das Prinzip dieser Massnahme liegt darin, eine Schaumbildung an der Flüssigkeitsoberfläche erst gar nicht zuzulassen.

**Tabelle 5:** Methoden zur Schaumzerstörung (Quelle: [Moeller et al., 2013](#))

Verfahren	Prinzip	Vor-/Nachteile für Biogaserzeugung
<b>Thermische Verfahren</b>		
<b>Erhitzen</b>	Kontakt mit Heizflächen oder Dampf	+ universell - hoher Energiebedarf - Verkrustungen an den Wärmetauschern
<b>Mechanische Verfahren</b>		
<b>Rotierende Einbauten</b>	Scherbeanspruchung des Schaums	+ universell und einfach - Investitionskosten - schnell bewegte Teile - zusätzlicher Energiebedarf
<b>Ultraschall-Desintegration</b>	Zerstörung der Schaum stabilisierenden Strukturen (z. B. fadenförmige Mikroorganismen)	+ zusätzlicher Aufschluss von schwer abbaubaren Strukturstoffen + Zellaufschluss und Verflüssigung des Gärkorns - zusätzlicher Energiebedarf
<b>Tropfenberegnung</b>	Zerschlagen von Lamellen durch rasches Aufsaugen der Flüssigkeit in die Adsorptionsschichten	+ wartungsfrei + niedrige Investitionskosten + auch für kleinblasige Schäume geeignet
<b>Chemische Verfahren</b>		
<b>Entschäumerzugabe zum Substrat</b>	Verminderung der Grenzflächenspannung des Substrats	+ sehr wirkungsvoll auch in der Schaumprävention + geringer apparativer Aufwand - enge Auswahl, es dürfen nur silikonfreie Entschäumer verwendet werden - zusätzliche Betriebskosten
<b>Aufsprühen des Entschäumers</b>	Verdrängen von Schaum stabilisierenden Stoffen von der Grenzfläche Beschleunigung des Drainage-Effekts Verminderung der Grenzflächenelastizität	+ zusätzlicher mechanischer Effekt durch Aufsprühen + schnellere Wirkung durch direkten Kontakt mit Schaum + sehr wirkungsvoll auch in der Schaumprävention + geringer apparativer Aufwand - enge Auswahl, es dürfen nur silikonfreie Entschäumer verwendet werden - zusätzliche Betriebskosten

Zusätzlich zu den oben erwähnten Massnahmen kann hier noch die Schwimm- bzw. Deckschichtbildung als mechanische Schaumbekämpfungsmassnahme erwähnt werden. Das Prinzip dieser Massnahme liegt darin, eine Schaumbildung an der Flüssigkeitsoberfläche gar nicht zuzulassen.

## 3.4 Schwefelhaltige Störstoffe im Biogas

Gemäss Lubenau (2012) konnten bei Stichprobenahmen im Rohbiogas und aufbereitetem Biomethan unterschiedlichste Schwefelverbindungen nachgewiesen werden. Nebst dem im Gas der Biorender gefundenen Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ), Dimethylsulfid (DMS), Ethyl (EM)- und Methylmercaptan (MM), wurden auf anderen Vergärungsanlagen auch Konzentrationen an iso-Propylmercaptan, Dimethylsulfid (DMDS) und Kohlenoxidsulfid (Carbonylsulfid, COS) detektiert.

Bezüglich der Reingas-Qualität spielen bei der Biorender folgende schwefelhaltigen, organisch-chemischen Verbindungen eine Rolle:

- Schwefelwasserstoff, bzw. Dihydrogensulfid;  $H_2S$
- Dimethylsulfid (DMS), bzw. Methylthiomethan;  $C_2H_6S$
- Ethylmercaptan (EM), bzw. Ethanethiol;  $C_2H_6S$
- Methylmercaptan (MM), bzw. Methanethiol;  $CH_4S$

### 3.4.1 Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ )

Die Bildung von Schwefelwasserstoff als Produkt der Biogasbildung bei schwefelhaltigen Ausgangssubstraten ist lange bekannt (Buswell und Müller, 1952), genauso sind die korrosiven und toxischen Eigenschaften hinlänglich erforscht. Zur sogenannten Biogasentschwefelung haben sich die chemisch-physikalische Methode der Schwefelfällung, z.B. mittels Eisenchlorid und die biologische in- oder ex-situ Entschwefelung durchgesetzt und etabliert.

Aufgrund der Eisenchlorid-Dosierung in die Fermenter und dem zweistufigen Reinigungsverfahren mittels Aktivkohlefilter ist die Schwefelwasserstoff-Konzentration im Reinbiogas bei der Biorender ein untergeordnetes Thema.

### 3.4.2 Dimethylsulfid (DMS; $C_2H_6S$ )

Wie der Name und die Strukturformel  $CH_3-S-CH_3$  bereits zeigen, besteht dieser leicht entzündliche und sehr leicht flüchtige, einfachste Thioether aus zwei Methylgruppen, die über eine Einfachbindung mit einem Schwefelatom verbunden sind. DMS wird auch Methylthiomethan genannt. Seine Dämpfe sind schwerer als Luft. Der Siedepunkt von DMS liegt bei 37°C.

DMS ist gemäss Steudel (2008) die biogen am häufigsten in die Atmosphäre emittierte Schwefelverbindung und wird als toxisch eingestuft. DMS entsteht als Produkt anaerober Stoffwechselvorgänge von Mikroorganismen, z.B. von Phytoplankton, wird aber auch beim Kochen von verschiedenen Gemüsen (Kohl) und Getreide gebildet und ist ein Eiweißabbauprodukt. DMS ist ein Abbauprodukt z.B. von Dimethylsulfoniumpropionat (DMSP), von Ethylmercaptan (EM) oder S-Methylmethionin (SMM).

Gemäss Untersuchungen von Lubenau (2011) ist DMS durch Aktivkohle schlecht absorbierbar und besitzt daher die Eigenschaft, bei der Biogasreinigung mittels Aktivkohle rasch durchzubrechen. Bei der Einspeisung von Biomethan ins Erdgasnetz kann dies schwerwiegende Konsequenzen haben.

Die Vermutung liegt nahe, dass DMS im Fermenter gebildet wird oder direkt über das Rohmaterial eingetragen wird. Die Messungen bei der Biorender AG bestätigen diese Annahme.

### 3.4.3 Methylmercaptan (MM; $CH_4S$ )

Auch unter dem Namen Methanethiol bekannt, besitzt das gasförmige MM die Summenformel  $CH_3-SH$  und ist daher das einfachste Thiol. Der Siedepunkt liegt bei ca. 6°C.

Methanethiol kommt in verschiedenen pflanzlichen und tierischen Abfallstoffen vor, da es natürlich z.B. in Nüssen und Käse, aber auch im Blut, Gehirn und anderen Organen vorkommt.

MM entsteht beispielsweise beim bakteriellen Abbau von Proteinen. Als Hauptzerfallsprodukt von Dimethylsulfoniopropionat (DMSP) wird es von Bakterien zu DMS umgewandelt.

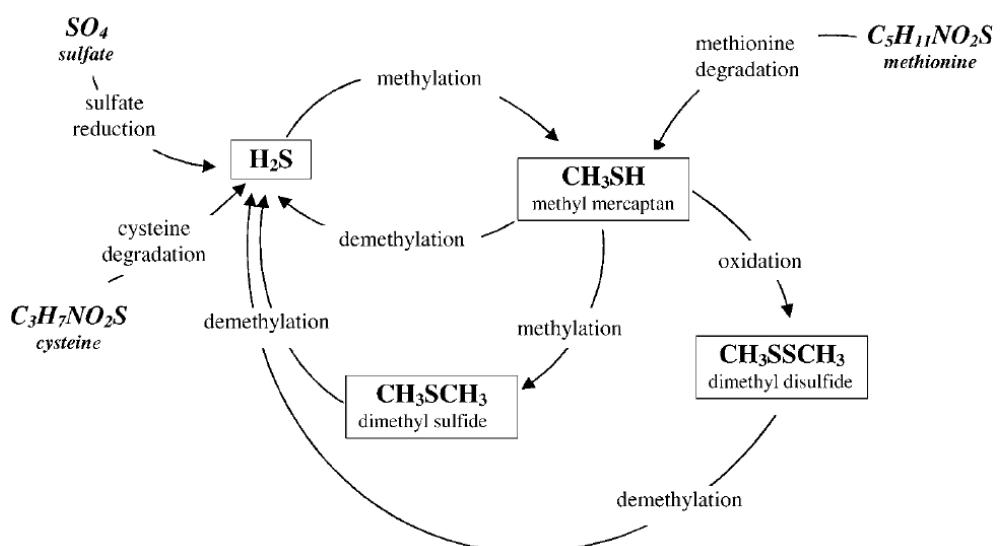
### 3.4.4 Ethylmercaptan (EM; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>S)

Ethylmercaptan, auch bekannt unter dem Namen Ethanethiol, besteht wie das DMS aus zwei C, sechs H und einem S-Atom, besitzt jedoch die Summenformel CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-SH. Der Siedepunkt liegt etwas tiefer, als derjenige des DMS bei 35°C. EM ist schlecht wasserlöslich. Es gehört zur Gruppe der Thiole und wirkt daher als schwache Säure und besitzt ebenfalls gesundheitsschädliche und leicht entzündliche Stoffeigenschaften.

### 3.4.5 Bildung der organischen Schwefelverbindungen

Die Bildung von Dimethylsulfid DMS, Methylmercaptan MM und andere Schwefelverbindungen resultieren aus dem Proteinabbau (Higgins, 2006). Dabei ist die Bildung der Schwefelverbindungen abhängig von der Temperatur (Du, 2012 und Chen, 2011).

Das nachfolgende Abbauschema zeigt, dass aber immer der „normale“ Schwefelwasserstoff als Ausgangsstoff vorhanden sein muss.



**Abbildung 1:** Abbauschema aus: Higgins et al. (2006), Cycling of volatile organic sulfur compounds in anaerobically digested biosolids and its implications for odors, Water Environment Research, Volume 78

### 3.4.6 Grenzwerte bei der Einspeisung ins Erdgasnetz

Die Problematik von C-haltigen Schwefelverbindungen im Biogas ist bisher noch kaum in den Vordergrund gerückt, kann aber bei der Einspeisung von Biomethan ins Erdgasnetz auch aufgrund der revisierten Richtlinie des SVGW (2008) ins Gewicht fallen.

Bei der Einspeisung von Biomethan ins schweizerische Erdgasnetz bestehen sowohl für den Schwefelwasserstoff, als auch für den Gesamtschwefel und für Mercaptane Grenzwerte, die in folgender Tabelle aufgelistet werden:

**Tabelle 6:** Grenzwerte zur Einspeisung von schwefelhaltigem Biomethan (SVGW, 2008)

Parameter	Grenzwert*	Einheit
Gesamtschwefel*	30	[mg/Nm <sup>3</sup> ]
Schwefelwasserstoff**	5	[mg/Nm <sup>3</sup> ]
Mercaptane**	5	[ppmV]

\* betrifft 24h-Mittelwert; eine maximale, temporäre Überschreitung von 20% ist zulässig

\*\* im odorisierten Gas

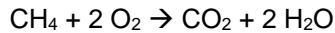
## 3.5 Leistungsgrenze der Anlage

### 3.5.1 Substratbedingte Leistungsgrenzen

#### Maximale spezifische Biogasproduktion und Abbaubarkeit

Die maximale Biogas- und Methanausbeute [Nm<sup>3</sup>/kg CSB] hängt primär von der Zufuhr und vom Abbau der organischen, abbaubaren Substanz im Ausgangsmaterial ab. Der Abbaugrad kann über den CSB bilanziert werden.

Zur Berechnung des CSBs von Methan wird die folgende Formel zu vollständigen Oxidation von CH<sub>4</sub> mit O<sub>2</sub> herangezogen:



1 mol CH<sub>4</sub> entsprechen 16 g bzw. 22.4 Normliter. Diese verbrauchen zur Oxidation zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O 64 g O<sub>2</sub>. 1 kg CSB entspricht also einer Menge von 0.350 Nm<sup>3</sup> Methan.

#### Biogasproduktivität

Die Biogasproduktivität [Nm<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>\*d)], bezogen auf das produzierte Biogas oder Methan pro Fermentervolumen und Tag dient der Charakterisierung von Reaktorleistungen. Die Leistung einer Biogasanlage kann so angegeben werden und mit anderen Vergärungsverfahren verglichen werden.

### 3.5.2 Systembedingte Leistungsgrenzen

#### Stoffdurchsatz

Der Stoffdurchsatz [m<sup>3</sup>/d] bezogen auf den täglichen Volumenstrom der Ausgangsubstrate durch die Fermentation, setzt sich zusammen aus der Futtersuppe (Sterilisierte TNP), aus Co-Substraten und sämtlichen Betriebsabwässern.

Der Stoffdurchsatz durch die Fermenter ist biologisch limitiert durch das minimale Schlammalter und die maximal mögliche Raumbelastung, allenfalls durch die minimale hydraulische Verweilzeit (Abbau). Die hydraulische Limitation besteht bei der Anlage der Biorender AG zurzeit jedoch hauptsächlich dadurch, dass dem System aufgrund der begrenzten Permeat-Leistung der Ultrafiltration nicht genügend Flüssigkeit entnommen werden kann.

Der maximale Stoffdurchsatz limitiert die Leistung einer Anlage.

#### Hydraulische Verweilzeit bzw. Stoffaufenthaltszeiten

Die hydraulische Verweilzeit (HRT) gibt grundsätzlich an, wie lange ein Substratpartikel im Fermenter verweilt. Bei Systemen mit einer Entkopplung von HRT und SRT (Schlammalter) entspricht diese Retentionszeit nicht unbedingt der Verweilzeit eines Substratpartikels. Während gelöste Stoffe bei einem Membranbioreaktor durch die Membran diffundieren, werden partikuläre Stoffe zurückgehalten bzw. zurückgeführt und verweilen daher länger im Fermenter.

Bei der Anlage der Biorender AG wird die hydraulische Verweilzeit durch die Zugabe von Ausgangssubstraten, aber auch Betriebsabwässer und Rückführströme beeinflusst. Zur Berechnung können – bei Vernachlässigung der Verluste über die Gasphase – die abgeführten Stoffströme über die Schlammentwässerung (Feststoffentsorgung) und das abgeführte, gereinigte Abwasser der betriebsinternen ARA herangezogen werden.

Die Aufenthaltszeit der partikulären Substratbestandteile entspricht dem Schlammalter. Minimale hydraulische Verweilzeiten und Stoffaufenthaltszeiten sind stark substrat- und betriebsabhängig und daher anlagenspezifisch.

## Schlammalter

Das Schlammalter wird definiert durch den Stoffstrom, welcher dem System über die Schlammwäscherung mittels Dekanter entnommen wird, da nur dort biologisch aktive Biozönose dem Fermenter entnommen wird. Da beim Kantenspaltsieb und der nachgeschalteten UF sämtliche Feststoffe wieder den Fermentern zugeführt werden, haben diese Verfahrensschritte grundsätzlich keinen Einfluss auf das Schlammalter.

Bei einer Vergärung ist ein minimales Schlammalter durch die Verdoppelungszeit der methanogenen Mikroorganismen limitiert. Aufenthaltszeiten von über 10-15 Tage sind erforderlich, um ein Auswaschen der Biologie zu verhindern.

## CSB-Raumbelastung

Die CSB-Raumbelastung [kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d)] berechnet sich aus der täglich der Vergärung zugeführten CSB-Fracht und dem Fermenter-Nutzvolumen.

Die Belastung der Biozönose mit organisch abbaubarem Material ist eine anlagenspezifische Größe, zumal die Mikroorganismen auf der Anlage der Biorender AG durch die speziellen Milieubedingungen und das Monosubstrat stark spezialisiert sind.

## CSB-Schlammbelastung

Die CSB-Schlammbelastung errechnet sich aus dem Quotient der CSB-Tagesfracht und dem Trockensubstanzgehalt im Fermenter.

Die Belastung der Biozönose mit organisch abbaubarem Material ist eine anlagenspezifische Größe, zumal die Mikroorganismen auf der Anlage der Biorender AG durch die speziellen Milieubedingungen und das Monosubstrat stark spezialisiert sind.

### 3.5.3 Biologische Leistungsgrenzen und Limitationen

#### Milieubedingungen

##### Temperatur

Übliche mesophile Vergärungstemperaturen liegen in einem Bereich zwischen 35 und 38°C. Eine Tendenz zu erhöhten, mesophilen Temperaturen (40 bis 45°C) besteht insbesondere bei NaWaRo-Anlagen. Effekte von Temperaturerhöhungen sind grundsätzlich bekannt. Einflüsse z.B. auf Löslichkeitsgleichgewichte und Phasenübergänge stellen dabei eine Hauptproblematik.

Erfahrungen und spezifische Daten im Betrieb von Fermentern mit einer leicht über dem „normalen“ mesophilen Bereich liegenden Temperatur sind den Autoren nicht bekannt.

##### pH-Wert

Optimale pH-Werte für die Fermentation liegen je nach Literatur zwischen ca. 6.8 und 7.5. Die Vergärung bei der Biorender stellte sich seit Inbetriebnahme bei Werten zwischen 7.8 und 8.4 ein.

#### Nährstoffe und Spurenelemente

##### C/N- und C/N/P/S-Verhältnis:

In der einschlägigen Fachliteratur sind C/N-Verhältnisse zwischen 15:1 und 100:1 im organisch abbaubaren Substrat als günstige Werte genannt. Substrate mit zu tiefen C/N-Verhältnissen tendieren zu erhöhter Ammonium-Konzentration, was zu Hemmeffekten führen kann. Für die anaerobe Abbaubarkeit ist das C/N-Verhältnis jedoch wenig aussagekräftig, da die Biomasse beispielsweise auch lignifiziert und daher nicht abbaubar vorliegen kann.

Da die Biozönose beim anaeroben Abbau nur wenig Biomasse aufbauen, ist der Nährstoffbedarf verhältnismässig tief. Für die Methanisierung genügen C/N/P-Verhältnisse von 100:4:1 bis 500:5:1 bezogen auf den oTS bzw. C/N/P/S-Verhältnisse von 1000:10:2:1.

Je nach Form, wie Natrium (Na), Kalium (K), Kalzium (Ca) und Magnesium (Mg) vorliegen, können diese Elemente ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf den Substratabbau und somit auf die Biogasproduktion haben.

Prozesshemmende Wirkungen von Alkali- und Erdalkalimetallen wie Natrium, Kalium und Kalzium, welche unter anderem regulierende Eigenschaften bezüglich des pH-Werts und der Osmose besitzen oder Wechselwirkungen mit Fettsäuren eingehen, sind bekannt. Gemäss Kaltschmitt (2009) liegen die hemmenden Konzentrationen von Na bei 6-30 g/l (Adaptation bis zu 60 g/l), von K bei 3 g/l, von Ca bei 2.8 g/l  $\text{CaCl}_2$  und von Mg ab 2.4 g/l  $\text{MgCl}_2$ .

### Spurenelemente

Der Bedarf an einem Minimum von Spurenelementen wie B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, W und Zn wird im Idealfall durch das Substrat oder allenfalls die Zugabe von Prozesshilfsmitteln gedeckt. Wiederum ist hier die Bindungsform, d.h. die Zugänglichkeit für die Mikroorganismen von grosser Bedeutung.

### Effekte von Ausfällungen und Flockungen

Kalziumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) beginnt gemäss Deublein und Steinhauser (2010) ab einer Konzentration von 100 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen auszuflocken. Ab höheren Konzentrationen ( $> 500 \text{ mg/l Ca}^{2+}$ ) kann einerseits die Bildung von Biofilmen und Biomasse positiv beeinflusst werden, andererseits können Kalkrückstände auch zu unerwünschten Ablagerungen und Verstopfungen führen.

Bei höheren Kalziumkonzentrationen verbinden sich auch verschiedene Phosphatgruppen mit den freien  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen, was beispielsweise zur Bildung von Apatit führen kann.

Magnesium-Ammonium-Phosphate (MAP) werden insbesondere bei turbulenten Strömungen und höheren pH-Werten gebildet.

Die Eisenchlorid-Zugabe in den Fermenter führt abgesehen von der Ausfällung von Schwefel, auch zur Bindung von Phosphor und Carbonaten.

## 3.5.4 Inhibition durch Störstoffe

### Flüchtige organische Säuren (FOS)

Gemäss Büeler (2013) liegen Sollwerte der Säure-Konzentrationen bei folgenden Maximalwerten:

	Max. Sollbereich	Hemmung
• Essigsäure:	3'000 mg/l	
• Propionsäure:	700 mg/l	( $> 1'000 \text{ mg/l}$ )
• Buttersäure:	10 mg/l	
• Iso-Buttersäure	20 mg/l	( $> 50 \text{ mg/l}$ , gemäss Deublein und Steinhauser, 2010)
• Valeriansäure	100 mg/l	
• Iso-Valeriansäure	20 mg/l	

Die Propionsäure-Konzentration sollte ein Drittel der Essigsäure-Konzentration nicht übersteigen.

### Stickstoffspezies

Hemmefekte auf die Biozönose durch erhöhte Ammonium- und Ammoniak-Konzentrationen sind bekannt. In der Literatur werden störende Einflüsse ab ca. 2.5 g/l Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) im Gärget und 0.15 g/l Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) im Biogas beschrieben. Bei gut adaptierten Gärslämmen und konstanter Substratzufuhr können gemäss Kaltschmitt (2009) jedoch problemlos auch höhere Konzentrationen von bis zu 10 g/l Ammonium ohne Limitierung gefahren werden.

Nebst dem pH-Wert und Wechselwirkungen mit Kalzium- und Natrium-Ionen hat auch das Schlammalter einen grossen Einfluss auf die Adaptation bzw. Toleranz der Biozönose.

### Schwefelspezies

Nebst seinen korrosiven Eigenschaften kann Schwefelwasserstoff bereits ab Konzentrationen von ca. 50 ppm toxisch auf die Mikroorganismen wirken. Betriebsbeispiele ohne Hemmwirkung von Biogasanlagen mit  $\text{H}_2\text{S}$ -Konzentrationen im vier- oder gar fünfstelligen Bereich sind jedoch ebenfalls bekannt.

Der entsprechende Hemmwert von  $S^{2-}$  liegt gemäss Kaltschmitt (2009) bei 100 mg/l. Hemmende Wirkung von Molekülen mit Thio-Brücken wurden ebenfalls schon beobachtet.

### Schwermetalle

Schwermetalle entfalten ihre hemmende Wirkung gemäss Kaltschmitt (2009) und Deublein und Steinhäuser (2010) in Form von freien Ionen oder in Carbonat-Form. In der Literatur werden folgende Konzentrationen angegeben:

	als Ionen	in Carbonat-Form	toxisch (adaptiert)
• Chrom (Cr):	28-300 mg/l	530 mg/l	500 mg/l
• Kupfer (Cu):	40-300 mg/l	170 mg/l	170-300 mg/l
• Eisen (Fe):		1'750 mg/l	
• Nickel (Ni):	10-300 mg/l		300-1'000 mg/l
• Molybdän (Mn)			1'500 mg/l
• Blei (Pb):	8-340 mg/l		
• Zink (Zn):	> 400 mg/l	160 mg/l	250-600 mg/l
• Cadmium (Cd)	8-340 mg/l	180 mg/l	340 mg/l

Neutralisationseffekte durch Sulfid-Fällung und Komplexbildung mittels Polyphosphaten sind möglich.

### Salzgehalt

Büeler (2013) gibt einen Sollwert für den Salzgehalt von 18-34 mS/cm an.

### Desinfektionsmittel, Antibiotika, Tenside

Aufgrund ihrer antibakteriellen Wirkung können Desinfektionsmittel und Antibiotika je nach Wirkungsweise beim anaeroben Abbau zu Hemmeffekten ab ca. 1-100 mg/l führen (Deublein und Steinhäuser, 2010). Adaptation bei konstanter Zufuhr ist gut möglich.

## 4 Durchsatzleistung der Ultrafiltration

### 4.1 Zieldefinition

Gemäss Anlagenauslegung ist bei Nominallast eine gesamte Flüssigkeitszufuhr in die Vergärungsanlage von ca. 130 m<sup>3</sup>/d zu erwarten. Daher muss dem System über das gereinigte Abwasser der betriebsinternen ARA eine ähnliche Menge an Flüssigkeit abgeleitet werden können.

Bei einer ungefähren Produktion von 75 m<sup>3</sup>/d Dekanter-Zentrat (bestimmt das Schlammalter), welches über den Stripper auf die betriebsinterne ARA geführt wird, müssen zusätzliche 65 m<sup>3</sup>/d über die Ultrafiltration und schliesslich die betriebsinterne ARA das System verlassen (Annahme: gasförmige Verluste über das Biogas, den Stripper etc. seien vernachlässigbar). Zur Verdünnung der hohen Ammoniumkonzentration im Rohmaterial und im Gärslamm werden zusätzliche Abwassermengen benötigt.

Bei einem ausgelegten Permeat-Fluss von knapp 17 m<sup>3</sup>/h, also maximalen 400 m<sup>3</sup>/d würde ein genügend grosser Spielraum bestehen, um den Gärslamm mit betriebsinternem Wasser zu verdünnen. Bei Vollauslastung der Anlage mit 70 m<sup>3</sup> Rohware pro Tag könnte eine Verdünnung des Stickstoffgehalts um einen Faktor 4.4 erreicht werden.

### 4.2 Datenlage

#### 4.2.1 Zusammenfassung der Datenlage per Juni 2012

Aufgrund der gravierenden Probleme mit der Ultrafiltrationsanlage wurde im 1. Halbjahr 2012 eine Zusammenstellung der bis Mitte 2012 durchgeföhrten Versuche und Massnahmen erstellt. Diese Daten sind im Bericht von Cornelia Graf, *Ultrafiltrationsanlage bei Biorender, Durchgeföhrte Versuche und Massnahmen zur Verbesserung der Permeatleistung* festgehalten.

Die Datenlage hat sich seit dieser Zeit nicht grundsätzlich verändert. Allerdings hat sich der bereits damals beobachtete Trend, dass die Permeatleistung der UF laufend sinkt, unabhängig vom Alter der Membranen weiter verstärkt.

#### 4.2.2 Untersuchungen zur Partikelgrössenverteilung

Der bereits beschriebene Trend, dass sich die Permeatleistung laufend verschlechtert, auch wenn neue Membranen eingesetzt werden, lässt den Schluss zu, dass sich die Qualität des Zulaufmaterials auf die Ultrafiltration laufend verschlechtert. Die zugeführte Rohware hat sich aber im Verlaufe der Betriebszeit von Biorender nicht verändert. Somit liegt die Vermutung nahe, dass sich Stoffe im Verlaufe der Zeit im System anreichern. Dies können Feinststoffe sein, welche durch die Ultrafiltration zurückgehalten, durch den Dekanter aber nicht ausgeschieden werden. Aus diesem Grund wurden bei der zhaw und bei Envilab Versuche zur Partikelgrössenverteilung durchgeföhr.

Die Qualität des Zulaufs zur Ultrafiltration bei Biorender wurde mit dem Zulauf einer nahezu baugleichen, gut funktionierenden Anlage auf der kommunalen Kläranlage Wangen-Wiedlisbach verglichen.

Beispielhaft sind unten 2 Resultate dargestellt:

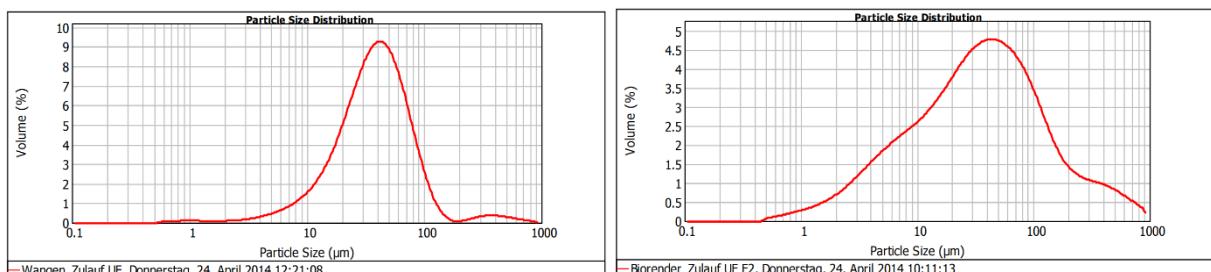
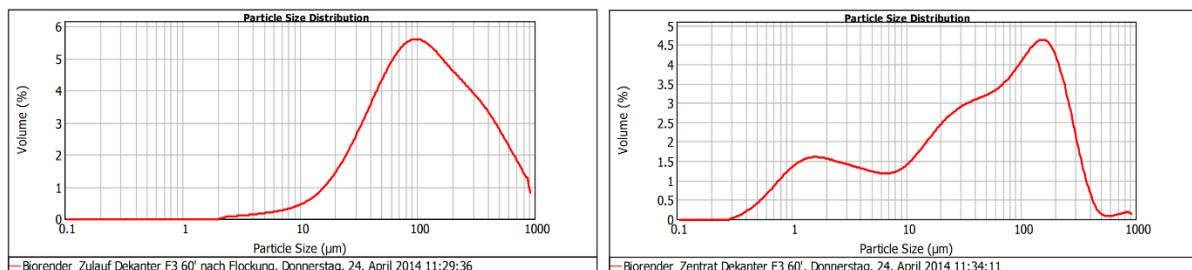


Abbildung 2: Vergleich der Korngrössenverteilung im Zulauf der UF Wangen und UF Biorender

Die Messungen zeigen sehr deutlich, dass das Maximum der Korngrößenanteile bei beiden Anlagen bei 40 bis 50 µm liegt. Bei Biorender ist aber ein wesentlich grösserer Anteil der Partikel deutlich unter 10 µm. Dieses Resultat unterstützt die These, dass Feinstoffe für die schlechte Permeateleistung der UF verantwortlich sein könnten.

Weshalb können die Feinstoffe nicht geflockt und mit dem Dekanter ausgetragen werden? Dazu die beiden folgenden Grafiken:



**Abbildung 3:** Vergleich der Korngrößenverteilung im Zulauf des Dekanters und im Zentral

Diese Messungen zeigen sehr deutlich, dass die Feinstoffe nach der Flockung gebunden sind, im Dekanter die Flocken aber wieder aufgebrochen werden und deshalb im Zentral ein grosser Anteil an Feinststoffen vorliegt.

Dies ist zu verhindern, was möglicherweise eine andere Technologie als einen Dekanter erfordert.

Weitere Messungen zur Korngrößenverteilung zeigen, dass die Feinststoffe im gesamten Betrieb vorhanden sind. Vom Substrat bis zum Schaum. Sie werden also vermutlich mit der Rohware eingeschleppt beziehungsweise durch das Sterilisieren der Rohware erzeugt und nicht vollständig durch die Schlammwäscherung eliminiert. Diese Feinststoffe können auch die Schaumbildung (siehe Kapitel 6) unterstützen.

### 4.3 Arbeitshypothesen

Für den verringerten Durchsatz einer Ultrafiltration kommen gemäss Betreiber, Experten und Fachliteratur unterschiedlichste Ursachen und Kombinationen davon in Frage. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Ultrafiltrationsmodule der Biorender hinsichtlich einzelner Ursachen analysiert, Detektionsmöglichkeiten sowie Massnahmen zur Ursachen- und/oder Symptombekämpfung aufgelistet und bewertet.

Folgende möglichen Ursachen werden analysiert:

- Verringerung der verfügbaren Membranoberfläche durch Gasakkumulation
- Verringerung der verfügbaren Membranoberfläche durch Verschmutzung
- Chemisch/physikalische Veränderung der Membranoberfläche
- Beeinträchtigung der hydraulischen Verhältnisse an der Membran
- Bildung eines schlecht durchlässigen, inerten Sekundärlayers
- Bildung eines schlecht durchlässigen, biologisch aktiven Sekundärlayers
- Verstopfung von Membranporen
- Veränderung der Subrateigenschaften
- Ungünstige Betriebsparameter
- Ungeeigneter Verfahrensschritt
- Ungeeignete Up-Steam-Prozessierung des Gärslamms
- Ungeeignete Up-Steam-Prozessierung des Rohmaterials



## 4.4 Bewertung

**Tabelle 7:** Arbeitshypothesen zu möglichen Ursachen und Bekämpfungsmassnahmen des begrenzten Durchsatzes der Ultrafiltration

Legenden:		A	B	C	
			0 nicht durchführbar	0 nicht durchführbar	
	1 nicht problematisch	1	1 kaum durchführbar	1 kaum lösbar	
	2 kaum oder teilweise problematisch	2	2 aufwändig durchführbar	2 aufwändig zu lösen	
	3 vermutlich problematisch	3	3 gut durchführbar	3 einfache Lösung möglich	
<b>Fokus auf</b>	<b>1-3 Ursache für Reduzierte Permeateleistung</b>	<b>1-3 Detektion</b>	<b>1-3 Bekämpfung</b>	<b>A * A * B * C</b>	
<b>Membranoberfläche</b>	3 Gasakkumulation auf der Membranrückseite (Druckentlastung)	2 Korrelation Durchsatz, Transmembranbranddruck / Entgasung	2 Betriebseinstellungen, technische Anpassungen	36	
	3 Gasakkumulation auf der Membravorderseite (Strömung)	2 Korrelation Durchsatz, Modulanpassungen / Entgasung	2 Betriebseinstellungen, technische Anpassungen	36	
	3 Gasakkumulation auf der Membravorderseite (Affinität/Adhesion)	2 Korrelation Durchsatz, Gasproduktion / Entgasung	2 Betriebseinstellungen, technische Anpassungen	36	
	2 Gasakkumulation auf der Membravorderseite (Schaumbildung)	2 Korrelation Durchsatz, Schaumbildung / Schaumzerstörung	2 Betriebseinstellungen, technische Anpassungen	16	
<b>Unsachgemäße Reinigung</b>	2 Falsches Reinigungsintervall bzw. Spülfrequenz	3 Korrelation Durchsatz, Spülfrequenz / Tests	2 Betriebseinstellungen, technische Anpassungen	24	
	1 Ungeeignetes Reinigungsmittel	3 Korrelation Durchsatz, Spülmittel / Tests	3 Alternatives Reinigungsmittel	9	
	1 Ungeeigneter Reinigungsablauf	2 Labortests	2 Betriebseinstellungen, technische Anpassungen	4	
<b>Ungenügender Unterhalt</b>	3 Zu hohe Standzeiten der Membrane / zu hoher Verschleiss	3 Korrelation Durchsatz, Wartungsarbeiten	2 Wartung und Unterhalt verbessern	54	
<b>Ablagerungen</b>	2 Im Zulauf (Rohrleitung, Kantenspaltsieb): verminderter Stoffstrom	2 Korrelation Durchsatz, Reinigung Zulauf	2 Zulauf reinigen	16	
	3 Im Modul: ungünstige Strömungsverhältnisse	2 Labortests, Anpassungsmassnahmen	2 technische Anpassungen	36	
	1 Im Modul: gestörte Rotordrehung	2 Datenanalyse Momentaufnahme Rotoren	2 technische Anpassungen	4	
	3 im Modul: verminderte Membranoberfläche	2 Labortests, vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	36	
	1 im Ablauf: (Rohrleitung, Stripper): verminderter Stoffstrom	2 Korrelation Durchsatz, Reinigung Ablauf	2 Ablauf reinigen	4	
<b>Strömungsverhältnisse</b>	1 Ungünstige Anordnung Membraneinheiten (Membranabstände)	2 vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	4	
	2 Ungünstige Anordnung Membraneinheiten (Membraneigung)	2 vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	16	
	2 Ungünstige Anordnung Membraneinheiten (Strömungsbrecher)	2 vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	16	
	3 Ungünstige Gesamthydraulik im Modul	2 vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	36	
<b>in erter Sekundärlayer</b>	3 Akkumulation von Stoffen (Feinstoffe, Knochenmehl)	3 Datenanalyse, Labortests, vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	54	
	3 Akkumulation von Stoffen (Lipide)	3 Datenanalyse, Labortests, vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	54	
	3 Akkumulation von Stoffen (Proteine)	3 Datenanalyse, Labortests, vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	54	
	3 Akkumulation von Stoffen (Schleimstoffe, Gele)	3 Datenanalyse, Labortests, vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	54	
	3 Akkumulation von Stoffen (Moleküle/Verbindungen)	3 Datenanalyse, Labortests, vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	54	
	3 Adhesion von Stoffen an der Membran	3 Datenanalyse, Labortests, vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	54	

Fokus auf	1-3 Ursache für Reduzierte Permeateleistung	1-3 Detektion	1-3 Bekämpfung	A * A * B * C
<b>biologischer Sekundärlayer</b>	1 Biofilm-Bildung (Fouling)	3 Datenanalyse, Labortests, vor Ort Tests	2 Betriebseinstellungen, technische Anpassungen	6
<b>Ungeeignete Betriebseinstellung</b>	1 Überschreitung maximale Durchflussmenge (critical flux)	3 Datenanalyse, vor Ort Tests	2 Betriebseinstellungen, technische Anpassungen	6
	1 Ungünstiges Beschickungsintervall	2 vor Ort Tests	3 Betriebseinstellungen	6
	2 Ungünstiger Druck Zulauf / Ablauf Permeat	3 vor Ort Tests	3 Betriebseinstellungen	36
	2 Ungünstiger Transmembranbrandruck	3 vor Ort Tests	3 Betriebseinstellungen	36
	3 Ungünstige Drehrichtung/Drehzahl der Rotoren	3 vor Ort Tests	3 Betriebseinstellungen	81
<b>Ungeeignete Substrateigenschaften</b>	3 Ungünstige Viskosität	2 Labortests, vor Ort Tests	2 Betriebsmittelzugabe, technische Anpassungen	36
	3 Ungünstige Temperatur	2 Labortests, vor Ort Tests	2 Betriebseinstellungen, technische Anpassungen	36
	3 Ungünstiger pH-Wert	2 Labortests, vor Ort Tests	2 Betriebseinstellungen, technische Anpassungen	36
	3 Ungünstige Partikelgröße der Ausgangssubstrate	2 vor Ort Tests	2 Betriebseinstellungen, technische Anpassungen	36
<b>Ungeeigneter Verfahrensschritt</b>	1 Ungeeigneter UF-Typ	2 Pilotierung	2 technische Anpassungen	4
	2 Zu hohe Zielsetzung (Pilotierung unter unrealistischen Bedingungen)	2 vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	16
<b>Ungeeigneter Up-Stream-Prozess</b>	3 Kantenspaltsiebe eignen sich nicht	2 Pilotierung, vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	36
	3 Zusätzlicher Vorbehandlungsschritt wird benötigt	2 Pilotierung, vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	36
	2 Entnahmestutzen aus dem Fermenter ist ungünstig	2 vor Ort Tests	2 technische Anpassungen	16



#### 4.4.1 Sekundärlayer und Porenverstopfung

##### Feinststoffe

Die Feinststoffe sind sicher eine, vielleicht die wichtigste, Ursache für die laufend abnehmende Permeatleistung der UF. Sie sind aus dem System zu entfernen. Dazu stehen drei denkbare Möglichkeiten zur Diskussion:

- Änderung der Technologie der Schlammentwässerung so, dass die Feinststoffe weitestgehend vollständig abgetrennt und mit dem Schlamm entsorgt werden.
- Separate Behandlung des Überschussschlammes der betriebseigenen Kläranlage. Damit würden die Feinststoffe, welche mit dem Zentrat und über den Stripper in die Kläranlage gelangen ausgeschleust.
- Änderung der TNP-Vorbehandlung bezüglich der Autoklavier- und Kochbedingungen. Kürzere Kochzeiten und dadurch grössere Substrat-Partikel, könnten zu einer Entschärfung des Feinstoff-Problems führen.

Zu überlegen ist auch eine Kombination der oben erwähnten Möglichkeiten.

Weitere Stoffeln der Literatur sind verschiedene Stoffe beschrieben, die zu einer Sekundärlayer-Bildung oder zu einer Porenverstopfung führen können. Durch Analysen, Labor-, Pilotierungs- und/oder Vor-Ort-Versuche ist zu prüfen, ob allenfalls Lipide, Proteine, Schleimstoffe, Gele oder andere chemische Verbindungen Ursache für eine verminderte Durchsatzleistung der UF sind.

##### Wechselwirkungen

Elektrische Felder und andere physikalische oder chemische Wechselwirkungen zwischen dem Substrat und der Membran sind ebenfalls häufige Ursache von verminderten Durchsätzen. Mittels Veränderung der Substrat- oder Membraneigenschaften können solche Phänomene detektiert und eliminiert werden.

#### 4.4.2 Eisendosierung

Eisensalz wird in Form von Eisen-III-chlorid in das Substrat vor der Vergärung dosiert. Der Sinn der Eisendosierung liegt in der Reduktion der H<sub>2</sub>S-Konzentration in den Fermentern. Weiter werden mit dem Abfallprodukt Eisen-III-chlorid auch Schwermetalle und damit auch Spurenelemente zugegeben.

Eisen bildet aber mit sehr vielen Substanzen Verbindungen und Ausfällungen. Es ist deshalb offen, ob das Eisen nicht auch zur Bildung von Feinststoffen beiträgt und/oder es Fällungsprodukte erzeugt, die auf den Membranen problematisch sind.

#### 4.4.3 Gasbildung in der Ultrafiltration

Der Zulauf aus der Vergärung ist ein Schlamm, der mit CO<sub>2</sub> gesättigt ist. Bei Druckschwankungen wird das CO<sub>2</sub> ausgasen. Das kann auf der Anlage gut festgestellt werden. Eine Verbesserung der Situation könnte eine gezielte Entgasung des Zulaufs zur Ultrafiltration sein. Eine solche Entgasung könnte ein Bogensieb sein, welches evtl. unterstützt wird durch eine Ultraschallbehandlung. Das Bogensieb, richtig eingesetzt, könnte auch die technischen Probleme der bestehenden Kantenspaltfilter lösen.

Werden die Ultrafiltrationsbehälter geöffnet, so werden Ablagerungen festgestellt, die einen sandigen Eindruck hinterlassen. Dies kann Sand sein, oder aber es sind feine Knochensplitter. Auf jeden Fall sind diese Stoffe schlecht für den Betrieb der UF und ganz schlecht für die Standzeit der Membranen. Deshalb sind diese Stoffe aus dem Kreislauf zu entfernen. Dies könnte evtl. durch den Einsatz von Hydrozyklen erfolgen.

Sowohl der Einsatz von Bogensieben, mit und ohne Ultraschallunterstützung, wie auch der Einsatz von Hydrozyklenen sind vorgängig grosstechnisch zu pilotieren.

#### 4.4.4 Verzicht auf die Ultrafiltration

Es gibt Literaturhinweise darauf, dass Fermenter mit Ammoniumkonzentrationen von > 10'000 mg/l erfolgreich betrieben wurden. Wird das Betriebsabwasser nicht über die Fermenter sondern direkt der Betriebskläranlage zugeführt, so kann bei einem Schlammalter von 35 Tagen und einem NH<sub>4</sub>-N-Gehalt von 10'000 mg/l auf die Ultrafiltration verzichtet werden, wenn die Auslastung der Anlage auf 65% reduziert wird.

Bei der Anlage der Biorender AG konnte bis heute keine Limitierung der Abbauleistung durch hohe Stickstoffgehalte festgestellt werden. Zwar wurde ein Optimum bezüglich der Schaumbildung bei pH 8.2 festgestellt, entsprechend einem Ammoniumgehalt von knapp 5'000 mg/l, aber bezüglich Umsatzleistung und Biogasbildung sind keine Abhängigkeiten gefunden worden.

Eine Pilotierung mit Ammoniumgehalten von >> 6'000 mg/l sollte unbedingt durchgeführt werden.

#### 4.4.5 Betriebseinstellungen

Betriebliche Optimierungen sind durchaus möglich. Allerdings benötigen seriös durchgeführte betriebliche Versuche und Anpassungen viel Zeit und Expertenwissen. Für die Versuche einerseits und für die Dokumentation andererseits.

Eine regelmässige Überprüfung der wichtigsten Anlagenparameter der Ultrafiltrationsmodule und der vorgeschalteten Prozesse (z.B. Kantenspaltsieb) könnte eine entscheidende Leistungssteigerung zur Folge haben. Dabei sind insbesondere die Druck- und Strömungsverhältnisse (Druck Zulauf, Transmembrandruck und Cross-Flow, d.h. Drehrichtung und Drehzahl der Rotoren), sowie allenfalls die Temperatur, die Viskosität und der pH-Wert zu verändern.

Die personellen und fachmännischen Ressourcen auf der Anlage der Biorender AG reichen dazu leider nicht aus.

#### 4.4.6 Wartung und Unterhalt

Die Instandhaltung der technischen Systeme, Geräte und Betriebsmittel sorgt dafür, dass der funktionsfähige Zustand erhalten bleibt oder gar verbessert werden kann. Eine vorbeugende Instandhaltung kann Ausfälle und Störungen von nicht redundanten Anlagenteilen vorbeugen und die Verfügbarkeit und somit die Leistung von ganzen Anlagen oder einzelnen Anlagenteilen verhindern. Nebst der optimalen Nutzung der Lebensdauer von Anlagenteilen verbessert ein professioneller Unterhalt auch die Betriebssicherheit und ermöglicht eine personelle und finanzielle Planung.

Aufgrund der bereits beschriebenen personellen und finanziellen Engpässe wird auf der Anlage der Biorender AG keine geplante und genügend frequentierte Instandhaltung durchgeführt. Insbesondere bei den UF-Membranen bestehen zu hohe Standzeiten, ein zu hoher Verschleiss und ein zu geringer Reinigungszyklus. Dies ist unbedingt zu ändern.

# 5 Schaumbildung und –bekämpfung

## 5.1 Zieldefinition

Definiertes Ziel bezüglich der Schaumhöhe ist, dass die Fermenter bei einem Gärschlammniveau zumindest gemäss Auslegung auf knapp 15 Metern bzw. einem Nutzvolumen von rund  $3 \times 1'000 \text{ m}^3$  betrieben werden können und ein Ansprechen der Schaumfallen grundsätzlich vermieden oder kontrolliert genutzt werden kann. Dies würde eine ungefähre maximale Schaumhöhe von 3 Metern bedeuten und einen konstanten Anlagenbetrieb sowie eine effiziente Schaumbekämpfung voraussetzen.

Die Höhe des Schaums liegt seit dem 14.11.2012 im Durchschnitt sämtlicher Messungen der einzelnen drei Fermenter bei ca. 3.5 m. Höchstwerte liegen bei über 6.5 m.

## 5.2 Datenlage

Seit dem 14.11.2012 wird in sämtlichen drei Fermentern vom Betriebspersonal täglich ca. ein bis maximal zehn Mal das Schaumniveau protokolliert. Mittels Zeitverlauf und durch eine Gegenüberstellung mit verschiedenen Betriebsparametern, die online gemessen werden bzw. in die Datenbank des Prozessleitsystems eingespeist werden, wird versucht, Ursachen für die Stärke der Schaumbildung in den einzelnen Fermentern zu evaluieren.

Eine detailliertere Schaumcharakterisierung, welche beispielsweise durch Protokollierung der Schaumart, Schaumkonsistenz oder Schaumfarbe realisiert werden könnte, fand bisher nicht statt. Unterschiedliche Schaumarten, z.B. was die Blasengrösse, Schaumkonsistenz (leicht, klebrig) oder Farbe (beige bis schwarz) betrifft, sind zwar gut feststellbar, wurden aber nur in Ausnahmefällen schriftlich festgehalten.

Bezüglich der Schaumcharakterisierung und der Inhaltsstoffe sind bisher nur vereinzelte Analysen gemacht worden. Nebst einer Fett- und Stickstoffbestimmung wurden im Frühjahr 2011 auch mikroskopische Aufnahmen gemacht. Gleichzeitig wurde eine Schaumprobe aufgeheizt, um dessen Stabilität bei erhöhten Temperaturen zu beobachten. Die Ergebnisse ergaben einen hohen Fettanteil und tiefen Stickstoffgehalt im Schaum verglichen mit dem Gärschlamm. Die mikroskopischen Aufnahmen zeigten keine Anzeichen auf fadenbildende Mikroorganismen. Die Schaumstabilität bei Erhöhung der Temperatur war gering, d.h. der Schaum fiel innert kurzer Zeit zusammen.

Spezifische technische Änderungsmassnahmen auf der Anlage oder Anpassungen im Betrieb zur Schaumbekämpfung wurden durchgeführt. So wurden beispielsweise unterschiedliche Dosiermengen von verschiedenen Entschäumern getestet. Bezogen auf die Einbringtechnik des Entschäumers fanden keine spezifischen Tests statt. Der Entschäumer wurde seit Anbeginn entweder über den Brauchwasseranschluss an der Fermenterdecke zugegeben oder über den Wasseranschluss der Schaumfalle.

### 5.2.1 Online-Daten

Zur Berechnung der tatsächlichen Schaumhöhe können die Online-Daten zur hydrostatischen Füllstandsmessung herangezogen werden. Der Flüssigkeits-Füllstand wird dabei vom beobachteten Schaumniveau abgezogen. Eine gewisse Ungenauigkeit besteht darin, dass der hydrostatische Druck des Schaums selbst ebenfalls in die Füllstandsmessung eingeht und dass eine scharfe Phasengrenze zwischen Gärschlamm und Schaum kaum besteht. Unterschiede in der Dichte des Schaums und des Gärschlammms sowie Inhomogenitäten im Gärschlamm können unter Umständen zu erheblichen Fehlern bei der Bestimmung der tatsächlichen Schaumhöhe führen.

Es wurde festgestellt, dass die tatsächliche Füllstandshöhe mit den Angaben der Füllstandsmessung nicht übereinstimmt. Grund dafür sind vermutlich Gasblasen im Gärslamm, die zu einer durchschnittlichen Dichte im Gärslamm führen, welche deutlich kleiner als 1 kg/l ist. Der tatsächliche Füllstand beträgt je nach Schaumsituation und Gasproduktion daher schätzungsweise rund 10 bis 20% mehr, als die gemessene. Folglich ist die tatsächliche Schaumhöhe bei einem angegebenen Füllstand von ca. 11 Metern ca. 1-2 Meter kleiner, als berechnet.

## 5.2.2 Hand-Daten

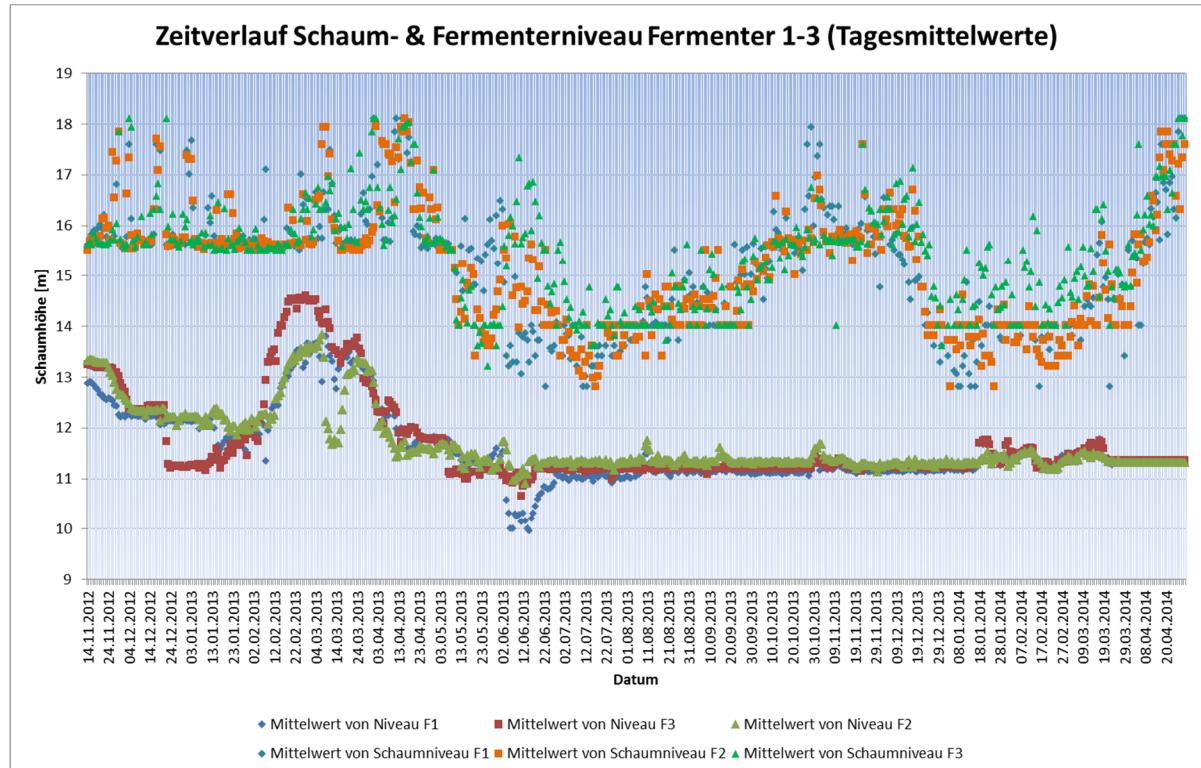
### Protokoll Schaumniveau und berechnete Schaumhöhe

Seit dem 14.11.2012, d.h. bis Ende April 2014 während über 500 Tagen wurde vom Betriebspersonal das Schaumniveau in den drei Fermentern je ca. 4-5 mal täglich abgeschätzt und protokolliert. Da eine detaillierte Auswertung dieser Daten durch das Betriebspersonal bisher kaum stattfand, wurden diese Daten im Rahmen dieses Projekts für eine detaillierte Auswertung aufbereitet.

In den nachfolgend dargestellten vier Diagrammen sind sämtliche protokollierten Daten aufgetragen:

1. im Zeitverlauf des beobachteten Schaumniveaus der Fermenter 1-3 (Tagesmittelwerte),
2. im Zeitverlauf der ermittelten Schaumhöhe der Fermenter 1-3 (Tagesmittelwerte),
3. nach Tagesuhrzeit sortierte Messwerte des Schaumniveaus (Tagesganglinie),
4. nach Wochentag sortierte Messwerte des Schaumniveaus (Wochenganglinie).

Die Schaumniveaus in den drei Fermentern zeigen mittel- und langfristig ähnliche Trends. Im Fermenter 1 ist das Schaumniveau seit November 2013 eher etwas tiefer, als bei Fermenter 2, bei Fermenter 3 teilweise deutlich höher. Der Zeitverlauf der Netto-Schaumhöhe (siehe Abbildung unten) zeigt ebenfalls ähnliche Trends für alle drei Fermenter.



**Abbildung 4:** Zeitverlauf des Fermenter- und Schaumniveaus der Fermenter 1-3 vom 14.11.12 – 27.04.14 (Tagesmittelwerte in Metern über dem Fermenterhöhe)

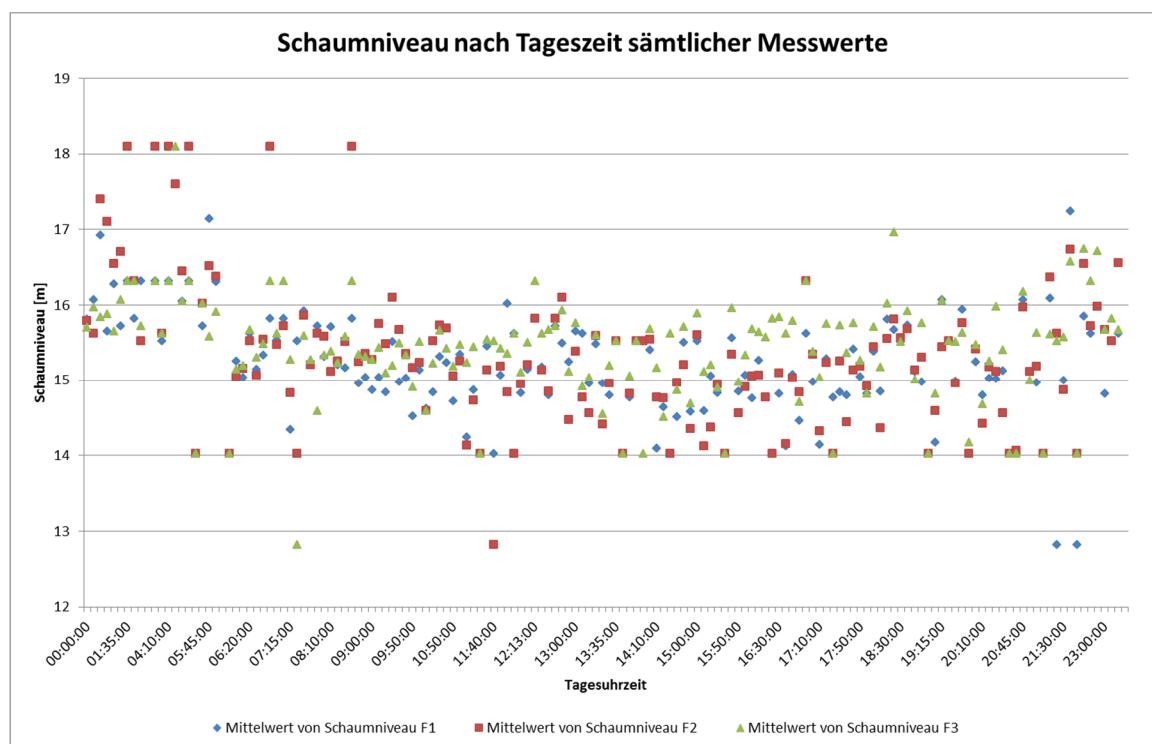
Von Beginn der Protokollierung des Schaumniveaus im November 2012 bis im Mai 2013 wurde versucht, das Schaumniveau in den Fermentern auf einer Fermenterhöhe von ca. 16 bis 17 Metern zu halten, indem die Fermenter-Füllhöhe des Gärslamms dynamisch angepasst wurde. Die Fermenter-

Füllhöhen schwankten dabei zwischen ca. 11 und 14 Metern, die Schaumhöhe folglich zwischen 3 und 6 Metern. Das Schaumniveau erreichte bei dieser Betriebsweise fast wöchentlich die Fermenterdecke auf ca. 18 Metern.

Seit dem Mai 2013 wird die Fermenter-Füllhöhe konstant auf ca. 11 Metern gehalten, was anfänglich einen guten Effekt auf die Netto-Schaumhöhe zeigte. Bei einer durchschnittlichen Schaumhöhe von rund 2 Metern im Juli 2013 stieg diese jedoch kontinuierlich an und erreichte im November 2013 Spitzen zwischen 5 und 6 Metern. Im Verlaufe des Dezembers 2013 senkte sich die Schaumhöhe dann in den Fermentern 1 und 2 wieder auf rund 2-3 Meter, die Schaumhöhe im Fermenter 3 schwankte zwischen 2.5 und 4.5 Metern.

Im April 2014 war in allen drei Fermentern ein starker Anstieg der Schaumhöhe bei konstanten Fermenter-Füllhöhen zu beobachten. Das Schaumniveau erreichte gegen Ende April 2014 Maximalhöhen.

Gemäss nachfolgendem Diagramm zeigt sich bezüglich des Schaumniveaus eine klare Tageszeitabhängigkeit. Ab ca. 20:00 Uhr steigt das durchschnittliche Niveau des Schaums auf ca. 16 bis 18 Meter an und erreicht oft zwischen 1:00 Uhr und 6:00 Uhr morgens maximale Werte. Zwischen ca. 6:00 Uhr Morgens und 20:00 Uhr Abends ist ein durchschnittliches Schaumniveau zwischen Fermenterhöhe 14 und 16 Metern zu beobachten.



**Abbildung 5:** Messwerte des Schaumniveaus in den Fermentern 1-3 vom 14.11.12 – 26.03.14 nach Tagesuhrzeit sortiert (Durchschnittswerte sämtlicher Messungen).

Die Durchschnittswerte bezogen auf den Wochentag zeigen bei sämtlichen Fermentern Minimalwerte am Freitag und Maximalwerte am Samstag (siehe Abbildung unten). Über die Arbeitswoche ist von relativ konstanten Werten, allenfalls mit leicht abnehmender Tendenz auszugehen.

Das durchschnittliche Schaumniveau seit Messbeginn liegt bei Fermenter 1 mit 15.21 m am tiefsten, bei Fermenter 2 mit 15.26 m etwas höher und bei Fermenter 3 mit 15.46 m deutlich am höchsten.

**Abbildung 6:** Messwerte des Schaumniveaus in den Fermentern 1-3 vom 14.11.12 – 26.03.14 nach Wochentag sortiert (Durchschnittswerte sämtlicher Messungen).

## Schaumcharakterisierung

- Beobachtung Schaumart

Das Betriebspersonal hat unterschiedliche Schaumqualitäten bezüglich Grösse, Struktur, Konsistenz, Stabilität und Farbe festgestellt. Diese Beobachtungen sind bisher nicht regelmässig bzw. systematisch protokolliert worden und können daher nicht analysiert werden.

- Schaumanalysen

Schaumproben wurden nach Inhaltsstoffen (Fett- und Stickstoffgehalt) analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass der Schaum im Vergleich zum Gärschlamm einen hohen Anteil an Fetten aber weniger Protein enthält. Die Fettgehalte im Schaum steigen deutlich, bei Temperaturen im Fermenter von < 36°C. Dies weist auf eine Flotation nicht verflüssigter Fettanteile hin.

Interne Analysen von Schaum- und Gärschlammproben bezüglich der Parameter TS, „Gesamtstickstoff“ und „Fett“ wurden am 09.05.2014 vom Fermenter 1 und 3 durchgeführt. Bei beiden Fermentern beinhaltet die Schaumprobe deutlich höhere Fettgehalte und tiefere Stickstoffkonzentrationen, als der entsprechende Gärschlamm. Die Vermutung liegt daher nahe, dass im Fermenter nicht abgebaute Anteile von tierischem Fett den entsprechenden Schaum bilden. Zahlen einfügen

- Mikroskopie Schaum

Gemäss Betreiber wurden zu einem dem Autoren unbekannten Zeitpunkt Schaumproben mikroskopiert. Die Ergebnisse zeigten gemäss Betreiber, dass der Schaum keine fadenförmigen Mikroorganismen enthält.

### 5.2.3 Pilotversuche

Pilotversuche zur Schaumbildung und –bekämpfung wurden durch Biorender bisher keine durchgeführt.

### 5.2.4 Versuche auf der Anlage

Auf der Suche nach Gründen für die Schaumbildung und zur Verhinderung derselben wurden Versuche auf der Anlage durchgeführt. Dazu gehörten u.a. technische Verbesserungsmassnahmen, Anpassungen im Betrieb sowie Modifikationen in der Rohwarenzugabe. Eine systematische Auswertung solcher Massnahmen wurde vom Betriebspersonal jedoch nicht durchgeführt.

Modifikationen und Tests bezüglich der Art und Dosierung des Antischaummittels als Massnahmen zur Bekämpfung des Schaums wurden auf der Anlage schon mehrfach, jedoch ebenfalls kaum systematisch durchgeführt.

## Anpassung Betriebsregime

Typische Anpassungen im Betriebsregime zur Schaumbekämpfung bei starker Schaumbildung sind:

- die Senkung der Fermenter-Füllhöhe,
- die Senkung der Beschickungsmenge von TNP (bezogen auf den CSB)
- die Einstellung der Fermenter-Füllhöhe bezogen auf den Rührwerksflügel
- die Zugabe von Antischaummittel,
- die Zugabe von Brauchwasser,
- die Zugabe von Abwasser aus dem Abwasserpufferbecken
- die Anpassungen des Beschickungsregimes,
- die Anpassungen des Rührregimes (Rührfrequenz, Rührrichtung),
- diverse Anpassungen im up-stream-Prozess der Co-Substratzugabe (Anmischen),
- die Automatisierung des UF-Betriebs

Abklärungen und Versuche zur Verhinderung der Schaumbildung wurden folgende durchgeführt:

- die Detektion eines möglichen Bodensatzes,
- das Umpumpen von Gärslamm im Kreis,

#### Fermenter-Füllhöhe:

Am 01.09.2012 wird die Fermenter-Füllhöhe bei Fermenter 1 und 3 so eingestellt, dass sich der oberste Rührflügel an der Oberkante des Schaums befindet.

Am 21.05.2013 wird zweimal täglich bei den Fermentern 1 und 2 der Fermenter-Füllstand gesenkt.

Am 27.05.2013 wird die regelmässige Absenkung des Fermenter-Füllstands (Schaukelprogramm zwischen den Fermentern 1 und 2) automatisiert.

Seit dem 07.11.2013 findet aufgrund der neu installierten Zirkulationsleitung keine Fermenter-Füllstands-Absenkung mehr statt.

#### Beschickungsregime:

Ab dem 08.03.2012 wird die Ultrafiltration und Beschickung eines spezifischen Fermenters nicht mehr zeitgleich durchgeführt.

Ab dem 18.07.2012 wurde bei allen Fermentern neu 4 mal täglich Tierschlamm beschickt.

Ab dem 31.08.2012 wurde der Fermenter 3 neu 16 mal täglich Tierschlamm beschickt.

#### Rührregime:

Am 25.10.2012 wurde die Rührfrequenz im Fermenter 3 auf 48 Hz eingestellt, während der Substratzugabe auf 50 Hz.

Am 29.10.2012 wurde die Rührfrequenz im Fermenter 3 auf 47 Hz eingestellt, am 30.10.2012 wieder auf 48 Hz, am 03.12.2012 auf 42 Hz.

#### Bodensatz:

Am 03.03.2012 wurde der Fermenter 2 auf einen allfälligen Bodensatz geprüft. Mit einem Lot konnte eine Fermenterhöhe von 18.91 m festgestellt werden bei einer Höhe gemäss Plan von 18:95 m. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass zu diesem Zeitpunkt kein massiver Bodensatz im Fermenter 2 bestand.

Am 27.08.2012 wurde der Fermenter 3 auf einen allfälligen Bodensatz geprüft. Die Prüfung ergab eine Fermenterhöhe von 18.88 m, was wiederum die Vermutung zulässt, dass zu diesem Zeitpunkt kein massiver Bodensatz bestand.

### **Anpassung Anlagentechnik**

#### • Provisorische Installation einer Rezirkulationsleitung:

Am 08.10.2012 wurde der Fermenterinhalt des Fermenters 3 über eine provisorische Rezirkulationsleitung geführt. Mittels Exzinterschnecken-Pumpe wurde damit dem Fermenter aus dem Pumpensumpf Gärslamm entnommen und auf Niveau 11.50 m wieder zugeführt. Die Zirkulation fand während rund 12 Stunden bei einem Durchfluss von ca. 15-20 m<sup>3</sup>/h statt.

Am 15.10.2012 wurde das TNP-Sterilisat über diese Leitung dem Fermenter zugegeben. (starke Schaumbildung)

Ab dem 08.05.2013 wird die Rezirkulation nur noch während der Arbeitszeit betrieben.

Am 11.11.2013 wird die Rezirkulation ausser Betrieb genommen.

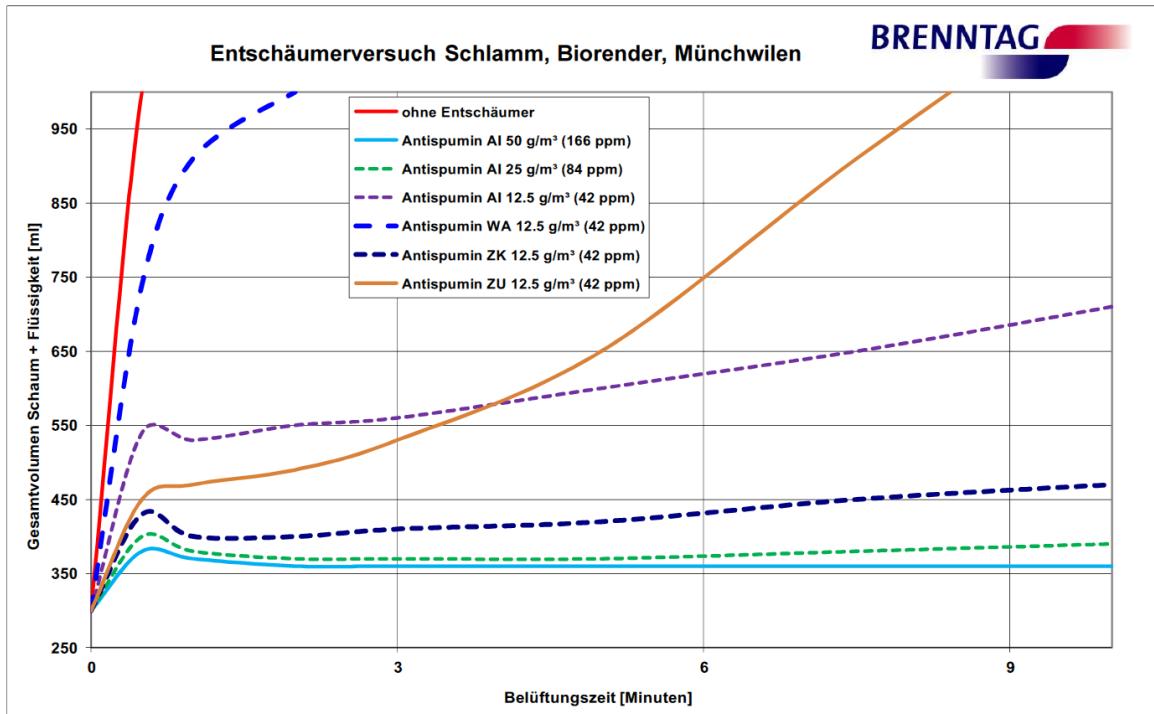
#### • Neuinstallation einer Rezirkulationsleitung:

Seit dem 07.11.2013 ist die Rezirkulationsleitung im Fermenter 1 in Betrieb. Mittels Exzinterschnecken-Pumpe wird damit dem Fermenter aus dem Niveau 0 m Gärslamm entnommen und auf Niveau 11.50 m wieder zugeführt. Die Zirkulation findet während 24 Stunden pro Tag bei einem Durchfluss von ca. 60 m<sup>3</sup>/h statt.

- Schaumbekämpfung mittels Zugabe von Antischaummittel:

Das Antischaummittel wird entweder von Hand, d.h. über die Wasserzugabe in der Schaumfalle oder automatisiert über Brauchwasserleitung direkt in die Fermenter bzw. bei aktiver Schaumfalle über deren Wasseranschluss statt.

Das am besten geeignete Produkt wurde durch Versuche des Entschäumerlieferanten ermittelt.



**Tabelle 12:** Versuche zur Bestimmung des optimalen Antischaummittels

Weiter wurden im Laufe der Betriebszeit diverse Anpassungen vorgenommen:

- Anpassung der Zugabe von Tierschlamm:

Am 07.05.2012 wurden die Zugabeleitungen des Tierschlammes mittels Schlauch um ca. 5 m verlängert und die Substratzugabe daher neu unterhalb des Fermenterfüllstands realisiert.

- Anpassung der Rezirkulation von Gärslamm:

Am 14.04.2011 wurde im Fermenter 1 ein Prallteller installiert, der den Gärslamm beim Umpumpen auf der Gärslammonoberfläche verteilt. Nach dem Abstellen der Pumpe wurde eine starke Schaumbildung beobachtet, später auch in der betriebsinternen ARA.

- Anpassung der Zugabe von Hilfs- und Betriebsmitteln:

Die Zugabe von Eisenchlorid (Fe-II-Cl) zur Entschwefelung findet seit dem 05.06.2013 nicht mehr direkt in die Fermenter statt, sondern geschieht nun über die Vorlage zur Fermenterbeschickung.

Die Zugabe von Fällungs- und Flockungshilfsmitteln zur Schlammtennwässerung mittels Dekanter wird ab 25.10.2012 neu über eine Flockungsmitteldosierung (FlocFormer) realisiert.

## Substratmodifikation

- Rohware TNP:

Die Rohware TNP kann Biorender nicht gezielt anpassen. Es muss verarbeitet werden, was angeliefert wird. Zusätze oder andere Rohware kann gezielt dazu genommen werden.

- Fett zum Auffetten

Um mehr Gas zu produzieren, ohne dass der Ammoniumgehalt in den Fermentern zu stark ansteigt, bietet sich die Zugabe von Fett an. Dies wird regelmässig gemacht ab Herbst 2012. Aktuell wird der Fettgehalt auf 13.5 % eingestellt.

- Glykol

Auch Glykol wird seit Februar 2014 zur Steigerung der Gasproduktion zugegeben.

- Co-Substrate zur Abdeckung evtl. fehlender Spurenelemente

Am 13.01.2012 wurde dem Fermenter 2 rund 20 m<sup>3</sup> Gülle zugegeben.

Vom 30.03.12 bis 23.06.12 wurden täglich 25 m<sup>3</sup> Faulschlamm der ARA Matzingen zugegeben.

- Spurenelemente

Am 09.06.2012 wurde in den Fermenter 1 eine Spurenelementlösung (Rezept Finsterwalder) zugegeben.

- Antischaummittel:

Ab dem 20.09.2012 wird bei Fermenter 3 täglich das Antischaummittel Antispumin AI von Brenntag dosiert (70 ml pro m<sup>3</sup> Tierschlamm).

Am 30.10.12 wird eine Charge Altfrötttierfett (780 kg) angenommen, um als Antischaummittel zu testen.

- Anpassung der Zugabe von Hilfs- bzw. Betriebsmitteln:

Am 12.11.12 wurde die Zugabe von Eisenchlorid (FeCl) erhöht von 6 auf 8 kg/t Tierschlamm.

Am 06.12.12 wurde die Zugabe von Enzymen (Lieferant Brenntag) mit einer Dosierung von ca. 30 ml/t Tierschlamm gestartet.

Am 07.01.12 wurde Dosierung der Zugabe von Enzymen (Lieferant Brenntag) auf rund 60 ml/t Tierschlamm verdoppelt.

Am 15.04.13 wurde die Zugabe von Enzymen (Lieferant Chestonag) gestartet.

Am 10.05.13 wurde die Zugabe von Enzymen (Lieferant Chestonag) gestoppt.

Am 15.05.13 wurde die Zugabe von Enzymen (Lieferant Brenntag) mit einer Dosierung von ca. 30 ml/t Tierschlamm gestoppt.

Diverse Flockungshilfsmittel (FHM) der VTA/ACAT/Flonex wird ab dem 12.03.2011 (VTA Polyacrylamid) verwendet.

Am 15.08.2011 wird ein pulverförmiges FHM (VTA) verwendet.

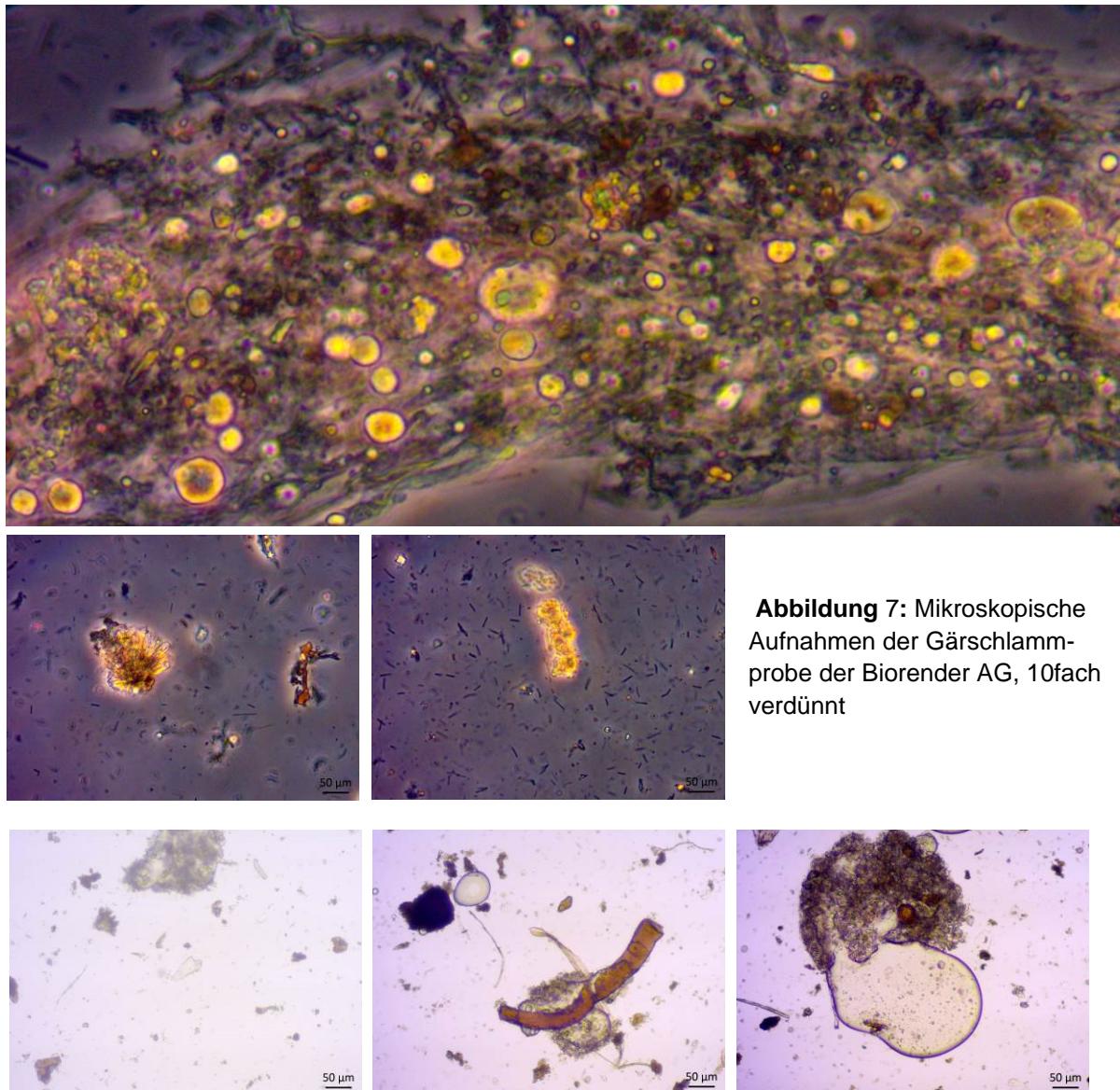
Ab 11.10.2012 wird ein FHM von Flonex verwendet.

Die früher eingesetzten Polyacrylamide sind biologisch nicht oder nur schwer abbaubar. Ihre Wirkung auf die Schaumbildung und die Ultrafiltration ist nicht bekannt. Die Dosierung musste, um eine gute Abtrennleistung zu erhalten um Faktor 5 bis 6 mal höher angesetzt werden, als dies bei konventionellen Anlagen üblich ist. Als Flockungshilfsmittel für den Dekanter wird seit dem 5.12.12 nicht mehr ein Polymacrylamid verwendet, sondern biologisch abbaubares (Chitosan).

## 5.3 Datenerhebung

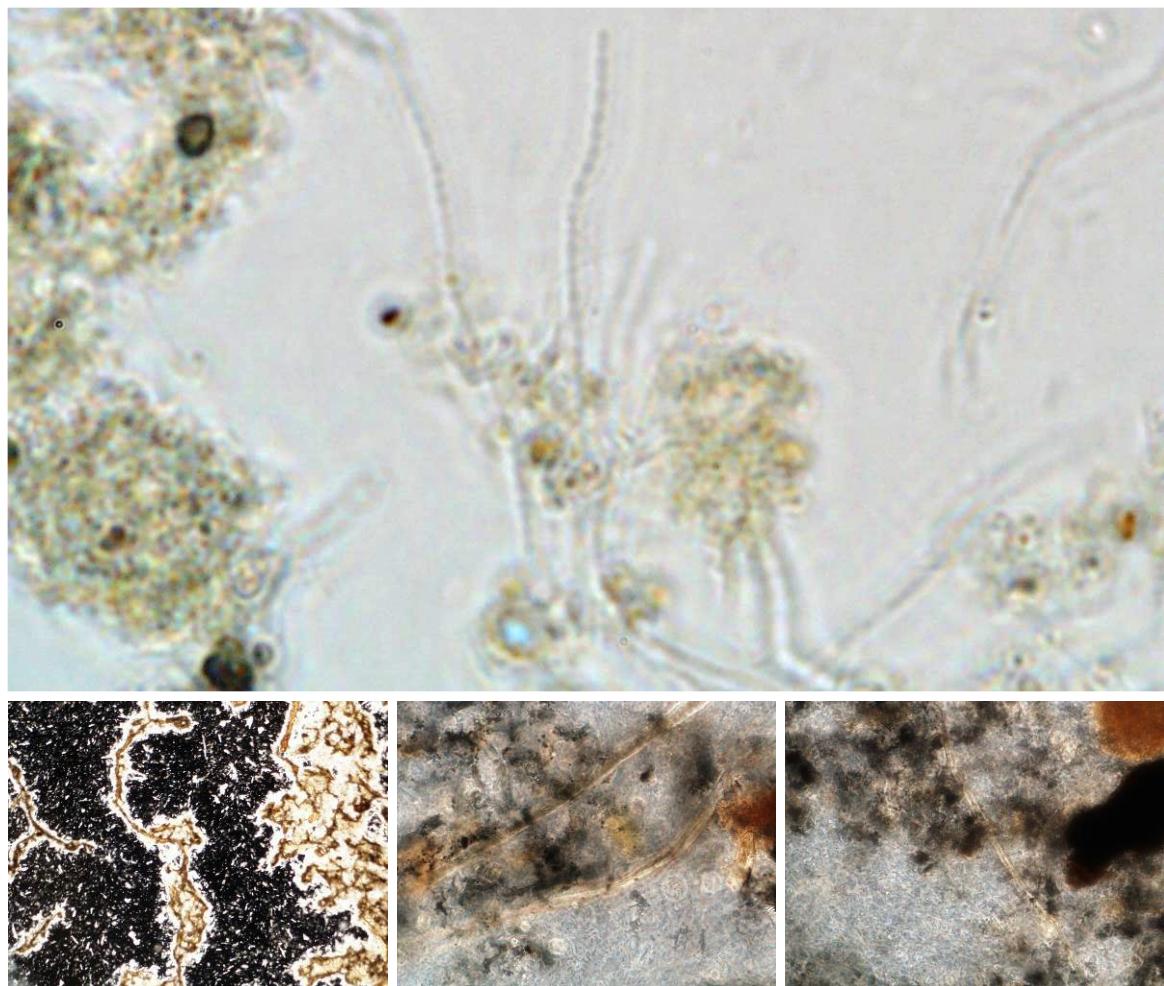
### 5.3.1 Mikroskopie

Am 13.05.2014 wurden Gärslamm- und Schaumproben aus dem Fermenter 2 sowie Schaum aus der aeroben Stufe der betriebsinternen ARA entnommen. Die mikroskopischen Aufnahmen (siehe nachfolgende Abbildungen) zeigen, dass ausschliesslich beim Schaum der ARA fadenförmige Mikroorganismen zu finden sind.



**Abbildung 7:** Mikroskopische Aufnahmen der Gärslammprobe der Biorender AG, 10fach verdünnt

**Abbildung 8:** Mikroskopische Aufnahmen des Sterilisats der Biorender AG, 10fach verdünnt



**Abbildung 9::** Mikroskopische Aufnahmen des ARA-Schaums der Biorender AG; unverdünnt (Aufnahmen von Lucie Moeller)

Es könnte auf dem Foto oben um den nocardioformen Actinomyceten *Nostocoida limicola* handeln, der gemäss Schade und Lemmer (2002) oft in Kläranlagen mit starken Schaum- und Schwimmschlammbildung beobachtet wird. Unten dargestellte Strukturen entsprechen eher solchen von Muskelfasern oder allenfalls von Pilzhyphen.

### 5.3.2 Laborversuche an der zhaw

#### Schaumtest (18.12.2013 – 06.01.2014)

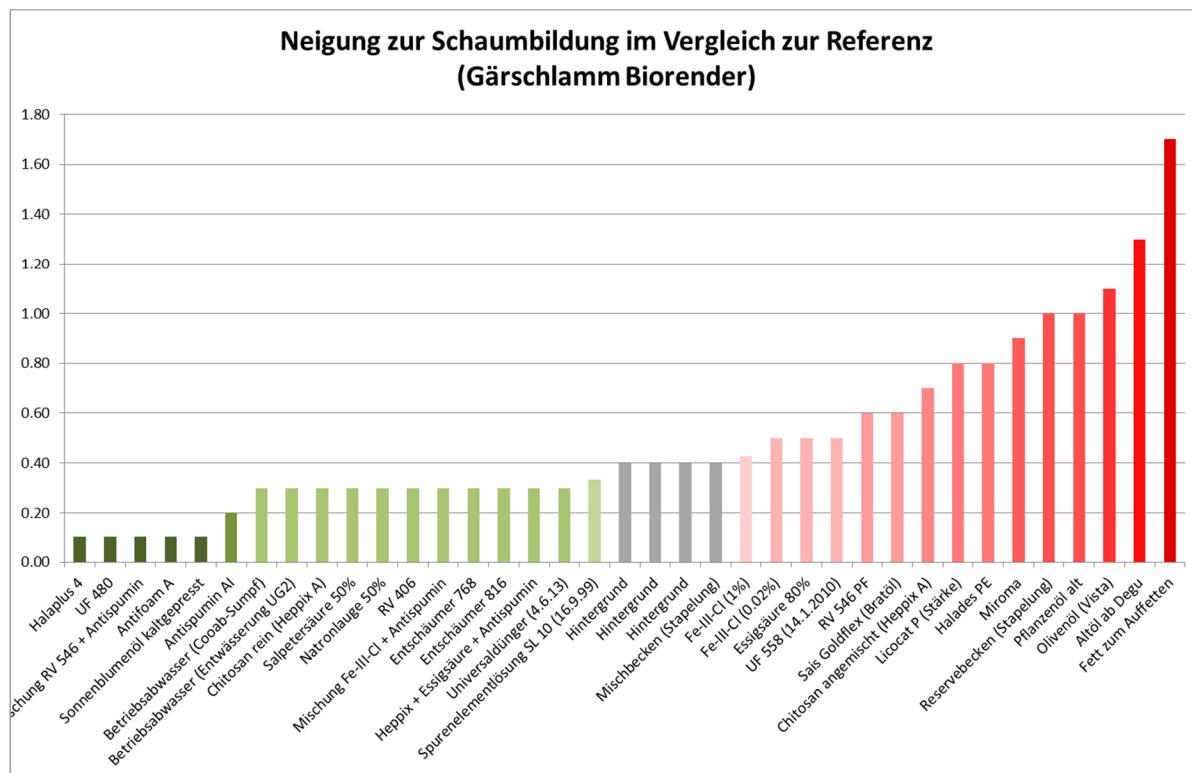
##### Vorgehen:

- Für diesen Versuch wurden unterschiedlichste Substrate und Hilfsmittel, die auf der Anlage der Biorender verwendet werden, einer Gärslammprobe zugegeben. Zusätzlich wurde je eine Testflasche mit verschiedenen Entschäumern, mit pflanzlichen Ölen sowie mit Nährstoffzusätzen angeetzt. Als Referenz wurde der Gärslamm ohne Zusätze verwendet.
- Von sämtlichen wässrigen Substraten wurden die pH-Werte gemessen.
- 400 ml des Gärslamms wurde bei Zimmertemperatur mit 0.1 ml bis maximal 25 ml Probe versetzt und über Nacht auf 40°C aufgeheizt.
- Da bei sämtlichen Ansätzen keine Schaumbildung auftrat, wurden die Testflaschen nach rund 40 Stunden manuell geschüttelt. Dabei trat bei wenigen Ansätzen eine geringe Schaumbildung auf. Der Schaum bedeckte im Maximalfall die Substratoberfläche.

- Während weiteren rund 18 Versuchstagen wurden die Proben bei 40°C gehalten und im Schüttler bei 100 rpm geschüttelt. Die Schaumbildung wurde an fünf verschiedenen Testtagen visuell protokolliert (1=Schaum bedeckt kleinen Teil der Oberfläche; 2=Schaum bedeckt ca. Hälfte der Oberfläche; 3=Schaum bedeckt gesamte Oberfläche; 4=Schaumdicke grösser 1 mm).
- Zur Auswertung wurden die Summen der sechs Messungen pro Ansatz gebildet und miteinander verglichen. Abhängigkeiten zwischen der Schaumbildung und dem pH-Wert der Zusätze

#### Resultate:

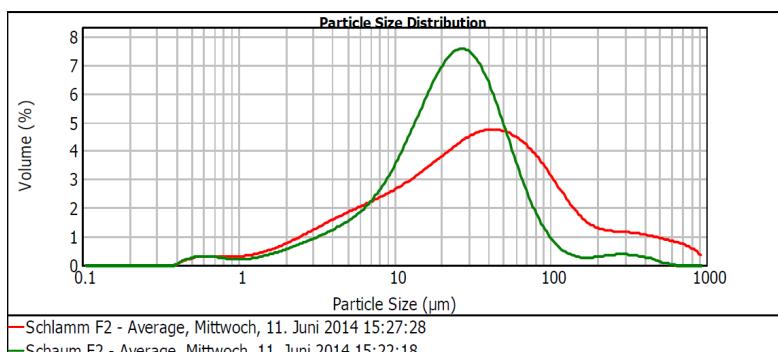
Die verschiedenen Inhaltsstoffe zeigen deutliche Unterschiede bei der Tendenz zur Schaumbildung. Die Schaumbildung nahm im Verlaufe der Versuchszeit allerdings bis gegen Null ab -> wenn die Inhaltsstoffe abgebaut werden, ist eine Schaumbildung nur noch stark reduziert erkennbar.



**Tabelle 16:** Schaumtest mit Gärschlamm der Biorender mit unterschiedlichen Zusätzen.

#### Korngrößenverteilung (11.06.2014)

Der im untenstehenden Diagramm dargestellte Vergleich der Korngrößenverteilung der Gärschlamm- und der entsprechenden Schaum-Probe zeigt klar, dass der Schaum nicht dieselbe Beschaffenheit aufweist, wie das Gärget. Hauptbestandteil des Schaums sind Partikel mit einer Grösse von ca. 20-40 µm, während der Gärschlamm vermehrt aus grösseren Partikeln von ca. 30-80 µm besteht.



**Abbildung 10:** Vergleich der Korngrößenverteilung im Schaum und Gärschlamm des Fermenters 2 der Biorender AG

## 5.4 Arbeitshypothesen

### Gegenüberstellung der Schaumhöhe mit weiteren Betriebsparametern

Diverse Online-Daten und auch von Hand aufgenommene Daten, welche in die Datenbank des Prozessleitsystems eingetragen wurden, können herangezogen werden, um allfällige Zusammenhänge zur Schaumhöhe aufzudecken.

Im Rahmen dieser Projektphase wurden folgende Parameter der ermittelten Schaumhöhe gegenübergestellt:

- Fermenter-Füllstand,
- Fermenter-Temperatur,
- pH-Wert des Gärslamms,
- CSB-Konzentration im Gärslamm,
- TSS-Konzentration im Gärslamm,
- NH4+-Konzentration im Gärslamm,
- Alkalinität im Gärslamm,
- FOS-Konzentration im Gärslamm,
- Biogasproduktion in kWh,
- H<sub>2</sub>S-Konzentration im Rohbiogas,
- H<sub>2</sub>S-Konzentration vor Propangasdosierung
- Biomethan-Temperatur an der Reingasübergabestelle (TBW),
- Beschriftungsmenge aus dem Mischbecken (Co-Substrate, Betriebsabwasser),
- Beschriftungsmenge aus dem Fett-Tank (Zusatz tierische Fette),
- Beschriftungsmenge Überschusschlamm (ÜSS) aus der Abwasserreinigung,
- Beschriftungsmenge Retentat-Rücklauf aus der Ultrafiltration,
- Durchflussmenge Ultrafiltration.

Folgende möglichen Ursachen werden analysiert:

- Gärsubstrate und Prozess-Hilfsmittel
- Inhaltsstoffe des Gärslamms
- ungünstige Eigenschaften des Gärsubstrats (Oberflächenspannung, Viskosität, Korngrösse)
- Gradienten/Phasenbildung im Fermenter (e.g. Schwimmschicht, Ablagerungen)
- ungünstige Substratvorbehandlung (Zerkleinerung, Anmischung)
- ungünstige biologische Ursachen (e.g. fadenförmige Mikroorganismen, Biogasbildung)
- Nährstoff- bzw. Spurenelement-Mangel
- ungünstige Nährstoffverhältnisse
- Störstoffe (e.g. Ammonium, Antibiotikum, Schwermetall)
- hydraulische Prozesseigenschaften (e.g. Pumpentechnik, Rührtechnik/Durchmischung, Einbringtechnik)
- ungünstige Verfahrensschritte (e.g. Sterilisation, Ultrafiltration, Schlammtennwässerung, Stripping, Abwasserreinigung)
- ungünstige Fermenter-Geometrie (e.g. Fermenterhöhe, Eigenschaften Gasblasen)
- ungünstige Prozessparameter (Biogasproduktion, Raumbelastung, Gärtemperatur, pH-Wert)
- ungünstige betriebliche Einstellungen (Rühr- und Beschriftungsregime, Substratzugabe, lokale Temperaturverhältnisse)
- ungeeignetes Antischaummittel (falsche Zusammensetzung/Dosierung/Einbringtechnik)



## 5.5 Bewertung

In der nachfolgenden Matrix sind die aufgestellten und bewerteten Arbeitshypothesen zu möglichen Ursachen und Bekämpfungsmassnahmen der Schaumbildung dargestellt:

**Tabelle 8:** Arbeitshypothesen zu möglichen Ursachen und Bekämpfungsmassnahmen der Schaumbildung

Legenden:	A	B	C				
		0	nicht durchführbar	0	nicht durchführbar		
		1	kaum durchführbar	1	kaum lösbar		
		2	aufwändig durchführbar	2	aufwändig zu lösen		
		3	gut durchführbar	3	einfache Lösung möglich		
Fokus auf	1-3	Ursache für Schaumbildung oder -stabilisierung	1-32	Detektion	1-33	Bekämpfung	A*A*B*C
<b>Sterilisat</b>	3	Schlachtabfälle	1	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	1	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	9
	3	Blutschlamm	1	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	1	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	9
	3	Flotate	1	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	1	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	9
	3	Borsten/Federn	1	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	2	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	18
	3	Kadaver	1	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	1	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	9
	3	Lebensmittelabfälle (Speisereste, Rüstabfälle etc.)	1	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	1	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	9
	3	Sterilisat (gemischt)	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	1	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	27
<b>Co-Substrat</b>	1	Verpackte Lebensmittelabfälle	1	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	3	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	3
	1	Miroma (Rivella-Reststoffe; Milchserum)	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	3	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	9
	3	Weizen-Abschwemml-Milch	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	3	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	81
	1	Stripper-Rückführung	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	1	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	3
	2	Kondensat Biogasaufreinigung	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	2	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	24
	3	ÜSS	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse, Mikroskopie	2	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	54
<b>Hilfsmittel</b>	1	Enzyme	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	3	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	9
	1	FeCl	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	1	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	3
	1	FHM	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	3	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	9
	1	Kartoffelstärke (Licocat)	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	3	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	9
	1	NaOH	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	3	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	9
	1	Reinigungsabwasser	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	2	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	6
	2	Desinfektionsmittel	2	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	1	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	8
<b>Inhaltsstoff</b>	3	Fett	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	1	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	27
	3	Protein	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	1	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	27
	3	Polysaccharide	3	Schaumtest, Inhaltsstoffanalyse	2	Verzicht/Alternative, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	54
<b>Eigenschaft</b>	1	Oberflächenspannung	3	Analytik	3	Zusatz (Antifoam), Schwimmkörper	9
	2	Viskosität	2	Analytik	2	Enzympräparate	16
	3	Körngröße	3	Analytik	1	Vorbehandlung	27
	3	Struktur	2	Laborversuche/Pilotierung	2	Zusatz (Stroh)	36
<b>Inhomogenität</b>	1	Schwimmschicht	0	n.a.	0	n.a.	0
	1	Ablagerung	3	Probenahme	2	Rühren, Absaugen, Ausbaggern...	6
<b>Biogasbildung</b>	1	Menge	3	Datenanalyse	1	Anpassung Anlagentechnik	3
	3	Hydrolyse (schaumbildende Stoffe werden freigesetzt)	2	Laborversuche/Pilotierung	2	Anpassung Anlagentechnik, Vorbehandlung, Betriebsoptimierung	36

Fokus auf	1-3	Ursache für Schaumbildung oder -stabilisierung	1-32	Detektion	1-33	Bekämpfung	A*A*B*C
Fermenter	1	Geometrie	1	Simulation/M odellierung, Anpassung Anlagentechnik	1	Anpassung Anlagentechnik	1
	2	Hydraulik, Druckverhältnisse		Verhältnisse im Betrieb verändern		Verhältnisse im Betrieb verändern	
Betriebsregime	3	Rühren	3	Betrieb/Anlagentechnik anpassen	2	Betrieb/Anlagentechnik anpassen	54
	3	Beschicken		Betrieb/Anlagentechnik anpassen		Betrieb/Anlagentechnik anpassen	
Prozessgrössen	2	lokale Temperaturgradienten	2	Labo rversuche/Pilotierung	2	Wärmetauscher	16
	2	Druckgradient		Betrieb/Anlagentechnik anpassen		Betrieb/Anlagentechnik anpassen	
3	Abbaubarkeit	2	Labo rversuche/Datenanalyse	3	Verzicht/Alternative Substrat, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung	54	
	Raumbelastung		Datenanalyse/ev. Pilotierung		Verzicht/Alternative Substrat, Vorbehandlungsmöglichkeit, Mengenanpassung		
3	Gärtemperatur	3	Datenanalyse/Labo rversuche	3	Betriebseinstellung	81	
	Gärtemperaturschwankungen		Datenanalyse/Labo rversuche		Anpassung Anlagentechnik		
2	pH-Wert Gärslamm	3	Datenanalyse/Labo rversuche	2	pH-Korrektur	24	
	FOS gesamt		Datenanalyse		Betriebseinstellung		
3	FOS einzeln	2	Analytik	2	Betriebseinstellung, Prozesskontrolle	36	
	Mikroorganismen (fadenbildende)		Mikroskopie		Ausdünnen, Milieu verändern		
2	Mikroorganismen (schaumbildende; z.B.: tensidbildend)	1	Mikroskopie	2	Ausdünnen, Milieu verändern	8	
	spezialisierte Biozönose		Nachimpfen		Nachimpfen, Rohmaterialzusammensetzung anpassen		
2	Absterbeprozess/Absterbephase	1	Anpassung Schlammlalter, Belastung etc.	3	Betriebseinstellung	12	
	Mangel		Analyse, Zugabe		Zugabe, Rohmaterialzusammensetzung anpassen		
Nährstoffe	3	Überangebot	Analys, Labo rversuche	2	Vorbehandlung, Rohmaterialzusammensetzung anpassen	4	
	1		Analys, Labo rversuche, Zugabe		Zugabe, Rohmaterialzusammensetzung anpassen		
Spurenelemente	3	Mangel	Analys, Labo rversuche, Zugabe	3	Zugabe, Rohmaterialzusammensetzung anpassen	81	
	3	Mangel	Labo rversuche, Zugabe		Zugabe, Rohmaterialzusammensetzung anpassen		
Störstoffe	3	Ammonium, Ammoniak	Analys, Labo rversuche	2	pH-Korrektur, Rohmaterialzusammensetzung anpassen, Adsorption, Entfernen	54	
	1	Schwefelwasserstoff, Schwefel-IONen	Analys, Labo rversuche		Verzicht/Alternative Substrat, Vorbehandlungsmöglichkeit		
3	Antibiotika	2	Analys, Labo rversuche	1	Verzicht/Alternative Substrat, Vorbehandlungsmöglichkeit	18	
	Schwermetalle (z.B. Fe, Ni, Cu, Cr, Pb, Zn)		Analys, Labo rversuche		Verzicht/Alternative Substrat, Vorbehandlungsmöglichkeit		
Vorbehandlung	2	Feinstoffe	Analys, Labo rversuche	2	Anpassung Anlagentechnik	36	
	3	Zerkleinerung Rohware	Anpassung Anlagentechnik		Anpassung Anlagentechnik		
2	Temperatur	2	Anpassung Anlagentechnik	2	Anpassung Anlagentechnik	16	
	2	Druck	Anpassung Anlagentechnik		Anpassung Anlagentechnik		
Anlagentechnik	2	Anmischung/Homogenisierung	Anpassung Anlagentechnik	2	Anpassung Anlagentechnik	16	
	1	Fermenter-Rührwerk	Anpassung Anlagentechnik		Anpassung Anlagentechnik		
2	Pumpen	2	Anpassung Anlagentechnik	2	Anpassung Anlagentechnik	16	
	2	Rohrleitungen	Anpassung Anlagentechnik		Anpassung Anlagentechnik		
3	Einbringtechnik	2	Anpassung Anlagentechnik	2	Anpassung Anlagentechnik	36	
	1	falsche Zusammensetzung	Labo rversuche, Zugabe		Änderung Antischaummittel		
1	ungünstige Dosierung	3	Labo rversuche, Zugabe	3	Betriebseinstellung	9	
	2	ungünstige Einbringtechnik	Anpassung Anlagentechnik		Anpassung Anlagentechnik		



## 5.6 Bewertung der Arbeitshypothesen

### 5.6.1 Inhaltstoffe Schaum

#### Fette, Proteine, Polysaccharide

Es ist aus betriebsinternen Analysen bekannt, dass im Schaum der Fettanteil deutlich höher ist, als der Fettanteil im Gärget selbst. Aufgrund der bisherigen Analysen weniger wahrscheinlich, jedoch ebenfalls schaumverursachend können Proteine oder Polysaccharide sein.

Weitere Analysen der Zusammensetzung des Schaums liegen nicht vor. Wir erachten es als sinnvoll, den Schaum analytisch genauer zu untersuchen.

Ein erhöhter Fettanteil kann verschiedene Ursachen haben. Bei tiefen Temperaturen in den Fermentern, das heißt bei  $< 37^{\circ}\text{C}$  ist der Fettanteil im Schaum deutlich angestiegen. Das Fett wird dann offenbar nicht mehr flüssig vor sondern kalt aus und flotiert. Dies führte dazu, dass die Temperatur in den Fermentern auf  $> 38^{\circ}\text{C}$  angehoben wurde.

Falls tatsächlich Fettanteile im Gärsubstrat zur Schaumbildung führen, ist eine Anpassung des upstream Prozesses (Vorbehandlung, Beschickung) in Betracht zu ziehen.

### 5.6.2 Beschicken/Rühren/Schlammwässeung

#### Beschicken

Es ist sicher von Bedeutung, wo und wie das Substrat zugegeben wird. Die Realisierung einer Zirkulationsleitung in Fermenter 1 und die Zugabe des Substrats in diese Rezirkulation hat deutliche Verbesserungen gebracht. Die Zugabe über die Rezirkulation erfolgt auf dem Niveau von 11.7 m und somit in etwa auf der Höhe, oder sogar leicht über dem aktuell betriebenen Niveau. Denkbar ist, dass eine Zugabe weiter unten im Reaktor besser ist, da der Weg des Substrates, und damit z.B. des Fetts bis an die Oberfläche grösser ist und eine bessere Einmischung zur Folge hat. Die Bildung einer fetthaltigen Schwimmschicht ist durchaus vorstellbar und würde die hohen Fettanteile im Schaum verglichen mit dem Gärslamm erklären.

Die Beschickung der Fermenter mit TNP erfolgt über einen Vorlagetank und dann über einen Kühler. Die Beschickung der Fermenter mit allen andern Stoffen erfolgt direkt ab dem Mischbecken in die Fermenter. Es ist denkbar, dass eine Mischung aller zugegebenen Stoffe im Vorlagebehälter und dann eine gemeinsame Einstellung der Zugabetemperatur eine Verbesserung der Einmischung zur Folge haben könnte. Lokale Temperaturgradienten, welche zur Schaumbildung beitragen könnten, würden so abgeschwächt oder gar eliminiert.

#### Rühren

Die Rührwerke sind mit drei Flügeln ausgerüstet. Mit Bariumchlorid wurden Einmischversuche durchgeführt. Diese Versuche haben gezeigt, dass beim Eintauchen aller drei Flügel eine gute Durchmischung erreicht wird. Ist das Niveau im Fermenter knapp unter dem oberen Flügel, bleibt dort Material liegen und wird schlecht eingemischt. Es wurde überlegt, die Flügelhöhe des oberen Rührflügels zu verändern oder einen zusätzlichen Rührflügel einzubauen. Damit könnte die Durchmischung verbessert und ein Einmischen des Schaums erreicht werden. Dies bei grösserer Füllhöhe als heute.

#### Schlammwässeung

In Kapitel 5.2.2 wird gezeigt, dass die Schaumhöhen sowohl von der Tageszeit wie auch vom Wochentag abhängig sind. Dies deutet darauf hin, dass die einzige Verfahrensstufe im Bereich der Fermenter, welche nicht kontinuierlich betrieben wird, die Schlammwässeung, einen Einfluss hat.

Grund dafür könnten beispielsweise lokale Temperaturunterschiede, aber auch schaumbegünstigende Druck- und Strömungsverhältnisse sein.

Weitere Untersuchungen und alternative Betriebsweisen bezüglich der hydraulischen Situation direkt auf der Anlage könnten Verbesserungspotenziale aufzeigen.

### 5.6.3 Ausgangssubstrate/Betriebsmittel

Im Bereich der tierischen Nebenprodukte hat die Biorender AG nur sehr begrenzt Einfluss darauf, was als Rohware zu verarbeiten ist. Im Bereich der restlichen Substrate können problematische Stoffe zurückgewiesen, respektive nicht angenommen werden. Frei ist Biorender in der Wahl der betrieblichen Hilfsstoffe.

#### Betriebshilfsmittel

Für die Schlammentwässerung wurde von Polyacrylamiden auf Chitosan umgestellt. Diese Umstellung schien anfänglich positive Auswirkungen auf die Schaumhöhe zu haben. In einem längeren Zeitraum ist dies aufgrund des Datenmaterials nicht belegbar.

Wird der Überschussschlamm der betriebseigenen Kläranlage extern entsorgt (siehe Kapitel 5.6.4), so kann auf das Ziel einer weitestgehenden Feinststoffrückhaltung im Dekanter verzichtet werden. Dadurch liessen sich die Betriebskosten und allenfalls auch die Schaumbildung deutlich reduzieren.

#### Strukturmaterial

Die Zugabe von Strukturmaterial wird von allen Experten als eine positive Option für die Bekämpfung der Schaumproduktion beurteilt. Demgegenüber steht der Einsatz der Ultrafiltration, welche durch dieses Strukturmaterial belastet würde.

Die Zugabe von Strukturmaterial ist aber im Falle eines Verzichtes auf die UF (siehe Kapitel 4.4.4) eine weiter zu verfolgende Option.

### 5.6.4 Überschussschlamm der aeroben Abwasserreinigung

Der Zulauf zur betriebseigenen Kläranlage besteht im Wesentlichen aus dem Ablauf des Strippers (neben dem Abwasser aus der Abluftreinigung). In diesem Abwasser sind sowohl Feinststoffe wie auch andere Stoffe enthalten, die nicht abgebaut, sondern an den Schlamm angelagert werden. Die Schwebstoffrückhaltung in der Biologie erfolgt durch eine Ultrafiltration. Alle Feinststoffe, aber auch alle an den Belebtschlamm angelagerten Störstoffe werden dadurch zurück gehalten und verbleiben im Überschussschlamm. Der Überschussschlamm wird wieder in die Fermenter zurückgeführt.

Dadurch gelangen alle Feinststoffe und Störstoffe aus dem Abwasser zurück in die Fermenter.

Es soll eine Überschussschlammendickung erstellt werden, sodass der ÜSS extern entsorgt werden kann. Bis ein solches System eingerichtet ist, soll der ÜSS flüssig extern abgegeben werden.

### 5.6.5 Betriebseinstellungen und -kontrolle

#### Röhren

Die Fahrweise der Fermenter hat einen grossen Einfluss auf die Schaumbildung und die Schaumbekämpfung. Es hat sich gezeigt, dass das Niveau in den Fermentern idealerweise im Bereich eines Rührflügels gehalten wird. Leider muss dies heute beim mittleren Rührflügel erfolgen, da sonst der Spielraum für das Schaumvolumen zu gering ist. Sobald sich eine Entspannung ergibt, soll das Niveau auf den oberen Rührflügel angehoben werden. Ist dies längerfristig nicht möglich, so ist der obere Rührflügel abzusenken.

#### Temperatur

Andere Vergärungsanlagen betreiben ihre Fermenter bei höheren Temperaturen (bis 45°C). Dies könnte auch für Biorender eine positive Option sein. Dies ist aber bei einem Reaktor oder besser noch in der Pilotanlage zuvor zu testen.

## Raumbelastung und FOS, Abbau und Biogasbildung

Der CSB-Abbau, die spezifische Biogasproduktion, wie auch die Raumbelastung der Fermenter soll regelmässig kontrolliert werden. Die Beschickung muss so eingestellt werden, dass die „Flüchtigen Organischen Säuren“ FOS im vorgegebenen Rahmen gehalten werden (siehe Kapitel 3.5.4). Periodisch sollen die Fettsäuren nicht nur als Sammelparameter, sondern einzeln bestimmt werden.

Ziel ist es, einen möglich konstanten Betrieb, d.h. eine möglichst gleichmässige Fütterung der Biözönose zu erreichen und allfällige biologische Betriebsprobleme schnellstmöglich zu detektieren, um vorbeugende Massnahmen treffen zu können.

### 5.6.6 Nährstoffmangel ausgleichen

Die Hauptnährstoffe wie Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor sowie Eisen sind im Gärget von Biorender ausreichend, das heisst im Überfluss vorhanden.

Sekundäre Nährstoffe und essenzielle Spurenelemente können, zumindest zeitweise in ungenügender Konzentration vorliegen. Dies ist regelmässig zu überprüfen und allenfalls auszugleichen.

Es ist möglich, dass für einen optimalen Abbau der TNP die gezielte Zugabe von Vitaminen und/oder Enzymen vorteilhaft ist. Dies ist aus unserer Sicht zwingend mit einem Reaktor der Grossanlage oder aber in der Pilotanlage zu testen.

### 5.6.7 Schaumbekämpfung verbessern

Es ist aufgrund des Ausgangssubstrats davon auszugehen, dass immer wieder Situationen auftreten, welche zu einer übermässigen Schaumbildung führen.

Es sind daher technische Massnahmen zu treffen, welche verhindern, dass deswegen die Anlage ausser Betrieb genommen werden muss. Dazu können folgende Massnahmen dienen:

- Verbesserung der Funktion der bestehenden Schaumfallen,
- optimierte Zugabe von Antischaummitteln,
- Erstellen von Sprühdüsen zur Bekämpfung des Schaums in den Fermentern (zu prüfen ist, ob für die Besprühung Gärget verwendet werden kann – Einsparung Wasser),
- Zugabe von Schwimmkörpern, um die Schaumbildung an der Oberfläche zu verhindern.

# 6 Störstoffe im Biogas

## 6.1 Zieldefinition

Fehlcharge des gereinigten Bio-Methans durch Überschreitung der Grenzwerte von Gesamtschwefel, Schwefelwasserstoff oder Mercaptanen sollen vermieden werden. Idealerweise wird dies durch eine Reduktion der schwefelhaltigen Störstoffe im gereinigten Biomethan erreicht, damit sämtliches Biomethan ins Erdgasnetz eingespeist werden kann.

Unter der Annahme, dass das im Rohbiogas enthaltene Dimethylsulfid zeitweilig durch den Aktivkohlefilter durchbricht und auf dem Weg zum Trockner zu Methyl- und Ethyl-Mercaptanen umgewandelt wird, soll entweder die DMS-Konzentration im Rohbiogas oder die Methyl- und Ethyl-Mercaptan-Spuren im gereinigten Biomethan entfernt bzw. vermieden werden.

## 6.2 Arbeitshypothesen

### 6.2.1 Bildung der Schwefelverbindungen im Ausgangssubstrat

Der Siedepunkt von Dimethylsulfid (DMS) liegt bei rund 37°C. Falls DMS bereits vor dem Fermenter im Ausgangssubstrat gebildet wird, könnte es bereits dort aus der Gasphase entfernt werden.

Damit DMS und auch allfälliges Ethylmercaptan (EM) schon vor dem Fermenter in den gasförmigen Zustand übergehen, muss sämtliches Substrat auf Temperaturen über deren Siedepunkten, also über 37°C aufgeheizt werden. Ein Entfernen der entsprechenden Gasphasen z.B. im Lagertank könnte die Problematik entschärfen.

Wir empfehlen eine Analyse der Gasphase der einzelnen Substratlager hinsichtlich schwefelhaltiger Verbindungen.

### 6.2.2 Bildung der Schwefelverbindungen in den Fermentern

Die Bildung von DMS und Methylmercaptan MM und andere Schwefelverbindungen resultieren aus dem Proteinabbau (Higgins, 2006). Das Abbauschema (Kapitel 3.4.5) zeigt, dass der „normale“ Schwefelwasserstoff als Ausgangsstoff vorhanden sein muss. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, das H<sub>2</sub>S im Fermenter tief zu halten.

Dies kann z.B. mit entsprechender Eisendosierung erreicht werden. Wegen den problematischen Eisenverbindungen, die entstehen können (siehe Kapitel 4.4.2), ist die Dosiermenge zu optimieren.

Zur Unterstützung der Rohbiogasentschwefelung mittels Eisensalzen und zur Minimierung der Hilfsmittelzugabe kann durch Einblasen von Sauerstoff in die Gasphase der Fermenter und mit Hilfe von Aufwuchskörpern die biologische Schwefelwasserstoffentfernung gefördert werden.

### 6.2.3 Entnahme der Schwefelverbindungen aus dem Biomethan

Eine Alternative dazu, bei jeder n'ten Regeneration das Regenerationsgas zu verwerfen wäre, das noch heisse Regenerationsgas über speziell behandelte Aktivkohle zu führen und die Schwefelverbindungen so zu eliminieren. Dies wäre vor einer Realisation zu testen.

Allenfalls wäre bereits eine Rückführung des Regenerationsgases in den Headspace des Fermenters bzw. vor die Aktivkohlestufe zielführend, da MM und EM von der Aktivkohle bedeutend besser absorbiert wird, als DMS.

## 6.3 Bewertung

Eine Analyse von schwefelhaltigen Verbindungen an einigen Punkten wurde bereits durchgeführt. Einer detaillierteren Beprobung stehen ausschliesslich finanzielle Aspekte entgegen.

Der Optimierung der Eisendosierung steht nichts im Wege. Damit wurde bereits begonnen. Für die Installation einer biologischen In-Situ-Entschwefelung wird reiner Sauerstoff benötigt. Die Möglichkeiten einer entsprechenden Dosierung und eine allfällige Installation von Aufwuchskörpern sind abzuklären.

Die Entfernung der Schwefelverbindungen aus dem Regeneriergas über behandelte Aktivkohle ist mit der Verbrennung des Regenerationsgases zu vergleichen. Schneidet der Einsatz von Aktivkohle im theoretischen Vergleich besser ab, ist die Technologie zu prüfen.

# 7 Leistungsgrenze der Fermentation

## 7.1 Zieldefinition

Die Anlage wurde konzipiert, eine Gasproduktion von 113 MWh/d erzeugen zu können. Dieses Ziel soll grundsätzlich erreicht werden.

Von dieser Zielsetzung kann unter bestimmten Bedingungen abgewichen werden. Diese sind:

- **Rohware:** es steht nicht ausreichend Rohware zur Verfügung, um die Anlage gemäss Auslegung betreiben zu können
- **Gasabnehmer:** Das produzierte Biogas kann nicht in vollem Umfang an die Gasnetzbetreiber abgegeben werden
- Eine **Kostenanalyse** zeigt, dass die Anlage mit einer geringeren Auslastung wirtschaftlicher betrieben werden kann.

Die oben dargelegten Überlegungen weisen darauf hin, dass eine Anlagenauslastung von > 70% erreicht werden sollte. Eine 100%-Auslastung erscheint zurzeit wenig realistisch (Rohware resp. Gasabnehmer fehlen).

## 7.2 Arbeitshypothesen

- Die Abbauleistung kann grundsätzlich erreicht werden, sofern die Fermenter mit der Soll-Füllhöhe betrieben werden können.
- Die Abbauleistung kann grundsätzlich erreicht werden, sofern die Fermenter mit der Soll-Ammonium-Konzentration betrieben werden können.

## 7.3 Bewertung

Nachfolgend eine Übersicht der Auslegungswerte der Vergärungsanlage mit einigen Vergleichswerten aus dem Betrieb der ersten Monate 2014 (01.01.2014 bis 19.05.2014):

Parameter	Mittelwert 2014	Anteil des Auslegewerts	Auslegewert	Einheit
Gesamt-Nutzvolumen Vergärung	2'200	74%	2'850	[m <sup>3</sup> ]
Füllhöhe Fermenter	11.4	77%	14.8	[m]
Totalinput wässrige Lösungen	83.7	46%	130	[m <sup>3</sup> /d]
Totalinput Rohware	31.1	45%	68.5	[t/d]
Totalinput CSB in der Rohware	18.6	54.7	34	[t CSB/d]
CSB-Raumbelastung	8.9	74%	12	[kg CSB/(m <sup>3</sup> *d)]
Gasproduktion	59'900	53%	113'000	[kWh/d])
FOS	52	104%	< 50	mVal
pH Gärslamm	8.1	n.a.	8.1	[ $\cdot$ ]
Ammonium im Gärslamm	6'161	154%	4'000	[g/m <sup>3</sup> ]
Gärtemperatur	40.0	n.a.	37-39	[°C]
Schlammalter*	38	109%	35	[d]
Durchfluss Zulauf Dekanter	52.2	64%	81.5	[m <sup>3</sup> /d]
Durchfluss Permeat von UF	35.3	8.8%	400	[m <sup>3</sup> /d]

### 7.3.1 Substratbedingte Leistungsgrenzen

#### Maximale spezifische Biogasproduktion und Abbaubarkeit

Der berechnete, maximale Methanertrag pro zugeführter Tonne CSB liegt stöchiometrisch bei 350 Nm<sup>3</sup>. Auf der Anlage der Biorender lagen die Werte des eingespeisten Biomethans im Jahre 2013 bei 303 Nm<sup>3</sup>/t CSB und in den ersten Monaten des Jahres 2014 wiederum bei 305 Nm<sup>3</sup>/t CSB.

Aus den Stoffbilanzen ergibt sich daraus ein CSB-Abbau von etwa 84 % (Berechnungswerte 01.01.2014 bis 19.05.2014: 83.9 % des zugeführten CSB befinden sich im Biogas, 1.4 % des zugeführten CSB im Abwasser und 14.7 % im Schlamm). Dieser Wert ist gut. Es ist aber auch denkbar, dass er weiter gesteigert werden kann. In den Pilotversuchen wurden etwa 90% Abbauleistung erreicht.

**Anmerkung:** Die im Betriebsprotokoll Biorender festgehaltenen Werte sind Berechnungswerte des Betriebes und mit einem systematischen Fehler behaftet. Sie dienen nur zur Betriebsführung. Die tatsächlichen Werte sind durch Stoffbilanzen zu ermitteln.

#### Biogasproduktivität

Die Vergärung der Biorender AG zeigt in der Zeit von 01.01 bis 19.05.2014 eine Biogasproduktivität von durchschnittlich 179 m<sup>3</sup> Biomethan/(m<sup>3</sup> Rohware TNP). Dabei wurde eine Biogasproduktion von durchschnittlich 3.1 m<sup>3</sup> Biomethan/(m<sup>3</sup> Fermentervolumen\*d) erreicht.

### 7.3.2 Systembedingte Leistungsgrenzen

#### Hydraulische Verweilzeit

Bei einem maximalen hydraulischen Belastung der Vergärung gemäss Anlagenauslegung von 130 m<sup>3</sup>/d und einem Nutzvolumen für die Vergärung von durchschnittlich ca. 2'850 m<sup>3</sup> ergibt sich eine hydraulische Retentionszeit von etwa 22 Tagen.

Die hydraulische Verweilzeit bei der Biorender AG lag in den ersten fünf Monaten des Jahres 2014 bei 30 Tagen. Die hydraulische Verweilzeit wird, im Gegensatz zu konventionell betriebenen Anlagen, durch den Einsatz der Ultrafiltration von der Schlammaufenthaltszeit entkoppelt und ist daher nur von untergeordneter Bedeutung, d.h. bei schlecht oder langsam abbaubaren Substraten entscheidend.

Die hydraulische Belastung der Anlage liegt im Vergleich zur Auslegung also ca. 73% und könnte bezüglich der hydraulischen Verweilzeit also problemlos noch erhöht werden.

#### Schlammalter

Ein Schlammalter von rund 35 Tagen wurde als Sollwert bei der Auslegung der Anlage angenommen. Bei einem Netto-Gärvolumen von 2'850 m<sup>3</sup> entspricht dies einem täglichen Gärslamm-Volumen von knapp 82 m<sup>3</sup>, welches dem System über die Schlammwäscherung mittels Dekanter entnommen wird. Da beim Kantenspaltsieb und der nachgeschalteten UF sämtliche biologisch aktiven Stoffströme wieder den Fermentern zugeführt werden, haben diese Verfahrensschritte keinen Einfluss auf das Schlammalter. Das Schlammalter bei der Biorender lag in den ersten fünf Monaten des Jahres 2014 bei 38 Tagen.

Eine Verringerung des Schlammalters auf ca. 30 Tage ist durchaus vorstellbar. Dadurch könnte die Entwässerung mit einem Durchsatz von rund 79% betrieben werden. Da die Schlammwäscherung ohnehin nur während der Arbeitszeiten betrieben wird, stellt die installierte Dekantertechnologie bezüglich des Schlammalters keine Limitation dar.

#### Stoffdurchsatz

Eine jährliche Zufuhr von 25'000 Tonnen Rohwaren TNP und 5'000 Tonnen Rohwaren Co-Substrate entspricht einem Durchsatz durch die Sterilisation von etwa 83 m<sup>3</sup>/d. Durch den Einsatz von Direkt-

dampf erhöht sich dieser Wert auf rund 100 m<sup>3</sup>/d. Aufgrund der Verwertung sämtlichen Betriebsabwassers wurde bei der Anlagenauslegung von einer hydraulischen Belastung der Beschickungssysteme und der Fermenter von 130 m<sup>3</sup>/d ausgegangen.

Seit Inbetriebnahme der Anlage kommt der Flüssigkeitshaushalt der Biorender AG durch den begrenzten Durchsatz der UF immer wieder an seine Grenzen. Der Durchsatz durch die UF ist oft zu klein, um den durch die Fütterung und das Betriebsabwasser vorgegebenen minimalen Gesamtdurchsatz der Anlage wegzuführen. Die Folge davon sind erhöhte Stickstoffkonzentrationen im Gärslamm und verringerte Durchsatzleistung der Fermentation. Beide Aspekte zeigen negativen Einfluss auf die Biogasproduktion und allenfalls auch auf die Schaumbildung und -bekämpfung.

Ohne die hydraulische Begrenzung des UF-Durchsatzes könnte die Gesamtleistung der Anlage massiv vergrössert werden. Bei der gleichzeitigen Elimination des Stickstoff-Problems (Verdünnung toxischer Ammonium- und Ammoniakkonzentrationen) scheint der nächste Engpass in relativ grosser Ferne. Aufgrund der massiven Schaumbildung könnte dies die Raumbelastung der Fermenter sein.

### CSB-Raumbelastung

Die Vergärung wurde für eine Belastung der Fermentation mit ca. 34 t CSB/d ausgelegt. Dies entspricht bei ca. 100 m<sup>3</sup> Substrat pro Tag einem CSB von ca. 340 g/l und bei einem Netto-Gärvolumen von 2'850 m<sup>3</sup> einer CSB-Raumbelastung von ca. 12 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d).

Die Vergärung der Biorender AG wurde in der Zeit von 01.01 bis 19.05.2014 mit durchschnittlich 21.4 Tonnen CSB pro Tag beschickt. Dies entspricht einer Belastung von 8.9 kg CSB/m<sup>3</sup> Fermentervolumen und Tag).

Hemmefekte durch eine zu hohe organische Belastung der Fermenter wurden bisher noch nicht entdeckt. Bei einer Vergrösserung des Fermentationsvolumens auf den Auslegewert, kann aber der Substrat-Durchsatz und damit die Fermentationsleistung um über 20% gesteigert werden, ohne eine Erhöhung der Raumbelastung. Dies bedingt jedoch eine Schaumvermeidung oder effiziente Schaumbekämpfung.

### 7.3.3 Biologische Leistungsgrenzen und Limitationen

#### Milieubedingungen

##### Temperatur

Übliche mesophile Vergärungstemperaturen liegen in einem Bereich zwischen 35 und 40°C. Erfahrungen im Betrieb von Fermentern in einer leicht über dem „normalen“ mesophilen Bereich liegenden Temperatur, d.h. zwischen 40 und 45°C zeigen gute und stabile Betriebsbedingungen.

Dies soll getestet werden, wobei dabei auf die Bildung von organischen Schwefelverbindungen geachtet werden muss.

##### pH-Wert

Optimale pH-Werte für die Fermentation liegen je nach Literatur zwischen 6.8 und ca. 7.5.

Die Vergärung bei der Biorender stellte sich seit Inbetriebnahme bei Werten zwischen 7.6 und 8.4 ein. Dieser pH-Wert ist eine direkte Folge der hohen Ammoniumkonzentration und kann nicht – oder nur mit unverhältnismässig hohem Chemikalieneinsatz – verändert werden.

Eine Optimierung des pH-Werts geht mit einer verminderten Ammonium- bzw. Ammoniakkonzentration einher.

#### Nährstoffe und Spurenelemente

##### C/N- und C/N/P/S-Verhältnis:

In der einschlägigen Fachliteratur sind C/N-Verhältnisse zwischen 15:1 und 100:1 im organisch abbaubaren Substrat als günstige Werte genannt. Substrate mit zu tiefen C/N-Verhältnissen tendieren

zu erhöhter Ammonium-Konzentration, was zu Hemmeffekten führen kann. Für die anaerobe Abbaubarkeit ist das C/N-Verhältnis jedoch wenig aussagekräftig, da die Biomasse beispielsweise auch ligifiziert und daher nicht abbaubar vorliegen kann.

Da die Biozönose beim anaeroben Abbau nur wenig Biomasse aufbauen, ist der Nährstoffbedarf verhältnismässig tief. Für die Methanisierung genügen C/N/P-Verhältnisse von 100:4:1 bis 500:5:1 bezogen auf den oTS bzw. C/N/P/S-Verhältnisse von 1000:10:2:1.

Je nach Form, wie Natrium (Na), Kalium (K), Kalzium (Ca) und Magnesium (Mg) vorliegen, können diese Elemente ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf den Substratabbau und somit auf die Biogasproduktion haben.

Prozesshemmende Wirkungen von Alkali- und Erdalkalimetallen wie Natrium, Kalium und Kalzium, welche unter anderem regulierende Eigenschaften bezüglich des pH-Werts und der Osmose besitzen oder Wechselwirkungen mit Fettsäuren eingehen, sind bekannt. Gemäss Kaltschmitt (2009) liegen die hemmenden Konzentrationen bei Na bei 6-30 g/l (Adaptation bis zu 60 g/l), bei K bei 3 g/l, bei Ca bei 2.8 g/l CaCl<sub>2</sub> und bei Mg ab 2.4 g/l MgCl<sub>2</sub>.

### Spurenelemente

Der Bedarf an einem Minimum von Spurenelementen wie Fe, Zn, Cu, Mo, Mn, Co, Ni, Se, W und Mg soll mit Hilfe des Substrats gedeckt sein. Wiederum ist hier die Bindungsform, d.h. die Zugänglichkeit für die Mikroorganismen von grosser Bedeutung. Spurenelemente wurden zeitweise zugegeben, ohne erkennbaren Erfolg.

### Vitamine / Enzyme

Ob Vitamine und/oder Enzyme die Abbauleistung (Abbaugeschwindigkeit und Abbaugrad) verbessern können wurde nicht getestet.

### Effekte von Ausfällungen und Flockungen

Kalziumkarbonat (CaCO<sub>3</sub>) beginnt gemäss „Deublein“ ab einer Konzentration von 100 mg/l Ca<sup>2+</sup>-Ionen auszuflocken. Ab höheren Konzentrationen (>500 mg/l Ca<sup>2+</sup>) kann einerseits die Bildung von Biofilmen und Biomasse positiv beeinflusst werden, andererseits können Kalkrückstände auch zu unerwünschten Ablagerungen und Verstopfungen führen.

Bei höheren Kalziumkonzentrationen verbinden sich auch verschiedene Phosphatgruppen mit den freien Ca<sup>2+</sup>-Ionen, was beispielsweise zur Bildung von Apatit führen kann.

Magnesium-Ammonium-Phosphate (MAP) werden insbesondere bei turbulenten Strömungen und höheren pH-Werten gebildet.

Das Eisenchlorid, welches für die Sulfidreduzierung und als Nährstoff zugegeben wird, kann viele, nicht hier nicht definierbare Fällungsprodukte bilden, welche bei der Ultrafiltration wie auch auf die Schaumbildung negativen Einfluss haben kann. Eine Hemmung im Vergärungsprozess schliessen wir aus.

## 7.3.4 Inhibition durch Störstoffe

### Toxische Substanzen

#### Stickstoffspezies

Hemmeffekte auf die Biozönose durch erhöhte Ammonium- und Ammoniak-Konzentrationen sind bekannt. In der Literatur werden störende Einflüsse ab ca. 2.5 g/l Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) im Gärget und 015 g/l Ammoniak (NH<sub>3</sub>) im Biogas beschrieben.

Bei gut adaptierten Gärslämmen und konstanter Substratzufuhr können jedoch problemlos auch höhere Konzentrationen bis zu 10 g/l Ammonium ohne Limitierung gefahren werden. Nebst dem pH-Wert und Wechselwirkungen mit Kalzium- und Natrium-Ionen hat gemäss Kaltschmitt (2009) auch das Schlammalter einen grossen Einfluss auf die Adaptation bzw. Toleranz der Biozönose.

Auf der Anlage der Biorender wurden bereits über längere Zeiträume Ammonium-Konzentrationen von über 6.5 g/l erreicht. Ein negativer Einfluss auf die spezifische Biogasproduktion konnte dabei nicht

festgestellt werden. Allenfalls scheinen hohe Ammoniumkonzentrationen von über 4.8 g/l jedoch einen schaumfördernden Effekt zu haben. Dennoch ist eine Fahrweise mit höheren Konzentrationen zu testen.

### Schwefelspezies

Nebst seinen korrosiven Eigenschaften kann Schwefelwasserstoff bereits ab Konzentrationen von ca. 50 ppm toxisch auf die Mikroorganismen wirken. Betriebsbeispiele ohne Hemmwirkung von Biogasanlagen mit H2S-Konzentrationen im vierstelligen Bereich sind jedoch ebenfalls bekannt. Der entsprechende Hemmwert von  $S^{2-}$  liegt gemäss Kaltschmitt (2009) bei 100 mg/l. Hemmende Wirkung von Molekülen mit Thio-Brücken wurden ebenfalls schon beobachtet.

Durch die Zugabe von Eisenchlorid in das Substrat vor der Zugabe in die Fermenter kann die Sulfid-Konzentration tief, das heisst weit unter der limitierenden Grenze gehalten werden.

### Desinfektionsmittel, Antibiotika, Tenside

Desinfektionsmittel werden bei Biorender ebenso eingesetzt wie Tenside. Diese sind im Betriebsabwasser enthalten und gelangen so auch in die Fermenter. Die eingesetzten Konzentrationen sind jedoch in einer so geringen Menge, dass nicht davon auszugehen ist, dass sie den Betrieb der Fermenter nachhaltig beeinflussen. Auf Reinigungsmittel, mit bekannten toxischer Wirkung auf anaerobe Abbauprozesse (wie quartäre Ammoniumverbindungen) wird bewusst verzichtet.

Antibiotika können durch die Rohware eingetragen werden. Der Typ dieser Antibiotika ist nicht bekannt. In wie weit diese Stoffe durch die Sterilisation zerstört werden ist genauso wenig bekannt wie die Antwort auf die Frage, ob die Biozönose der Anaerobie auf diese Antibiotika eine Immunität entwickelt.

### **Schwermetalle**

Verschiedene Analysen des Gärsubstrates haben keine Konzentrationen an Schwermetallen ergeben, die eine Hemmung des Abbaus zur Folge haben könnten.

## **7.3.5 Leistungsgrenzen nach Bewertung**

Die Bewertung der einzelnen Punkte, welche die Leistungsgrenze beeinflussen ergibt, dass die massgebende Grösse für die Leistungsgrenze der reduzierte Füllstand der Fermenter darstellt. Mit lediglich 74 % des Füllvolumens dürfen auch nicht mehr als 74 % der Leistung erwartet werden.

Es ist nicht bekannt, ob höhere Ammoniumgehalte im Gärsubstrat die Abbauleistungen einschränken. Nach Kaltschmitt (2009) kann Gärtschlamm auf Werte von > 10 g/l Ammonium adaptiert werden. Bei der Anlage Grossfurtner (Ortner M. 2010) wurde demgegenüber eine Beeinträchtigung der Biogasausbeute festgestellt. Über die Adaptionszeiten fehlen aber die Angaben. Diese mögliche Beeinträchtigung ist, auch bezüglich der Schaumproduktion, zu testen.

Aus den Vergleichsdaten ist zu vermuten, dass die projektierte Leistung der Fermenter erreicht werden kann, wenn eine Hemmung durch den Ammoniumgehalt ausgeschlossen werden kann und wenn die Anlage mit dem Gesamtvolumen betrieben werden kann.

## 8 Quellenverzeichnis

- Buswell A.M., Müller H.F. (1952): *Mechanism of Methane Fermentation*. Industrial and Engineering Chemistry
- Deublein D., Steinhauser A. (2010): *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. 2nd edition.
- Goosen M.F.A., Sablani S.S., Al-Hinai H., Al-Obeidani S. Al-Belushi R., Jackson D. (2004): *Fouling of reverse osmosis and ultrafiltration membranes: a critical review*.
- Pantreon (2014) Zelix 110/90 Serie. <http://www.pantreon.com/de/produkte-typen.html> (abgerufen am 28.05.2014)
- Kabsch-Korbutowicz M., Majewska-Nowak K., and Winnicki T. (1999): *Analysis of membrane fouling in the treatment of water solutions containing humic acids and mineral salts*.
- Lubenau, U. (2011): *Abschlussbericht – Projekt: Schwefeleintrag in das Erdgasnetz durch Biogasanlagen*. DBI – Gastechnologisches Institut gGmbH, Freiberg
- Lubenau, U. (2012): *Zusammensetzung von Biomethan und Auswirkungen auf die Gasversorgung*. DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH; DBI Fachforum Biogas, Leipzit, 07.11.2012
- Moeller L., Görsch K., Köster Y., Müller R.A., Zehnsdorf A. (2013): *Schaumbildung und Schaumvermeidung in Biogasanlagen*. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ-Bericht 01/2013
- Pagilla K., Craney K. Kido W. (1997) *Causes and effects of foaming in anaerobic sludge digesters*; Water Science and Technology - WATER SCI TECHNOL 01/1997
- Siegrist H., Wasmer H.R. (1992): *Notentsorgung von Tierschlamm von Seuchentieren in den Schlammbehandlungsanlagen von Kläranlagen*. Machbarkeitsstudie im Auftrage des BVET und BUWAL
- Steudel R. (2008), *Chemie der Nichtmetalle, Von Struktur und Bindung zur Anwendung*
- SVGW (2008): *Richtlinien für die Einspeisung von Biogas G13*. Hrsg SVGW Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches
- Graf C. (2012), *Ultrafiltrationsanlage bei Biorender, Durchgeführte Versuche und Massnahmen zur Verbesserung der Permeatleistung*, GSI Bau- und Wirtschaftsingenieure
- Du W., Parker W. (2012). *Modelling volatile organic sulfur compounds in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of methionine*, Water Research 46 2012
- Chen Y., Higgins M.J., Beightol S.M., Murthy S.N., Toffey W.E. (2011) *Anaerobically digested oder generating and pathogen indicator regrowth after dewatering*, Water Research 45 (2011)
- Ortner M., (2010) *Abwassertechnologie IFA Tulln*, PP-Präsentation 10.06.2010
- Kappert W. (2013), *Messungen Biogasanlage BIORender 17.07.2013 – 18.07.2013*: Axel Semrau GmbH&Co KG, Messbericht

## 9 Anhang

Das Datenmaterial liegt bei Biorender in elektronischer Form vor.

Die Daten, Auswertungen und Dokumentationen sind zu umfangreich um in Berichtsform abgegeben zu werden, sie sind bei Bedarf bei Biorender abfragbar.