



swiss*electric*  
*research*

---

## ***Zwischenbericht 2010***

MBR-II

Vergärung von Gülle und  
Cosubstraten im  
Membran-Bio-Reaktor

---

Autoren: J.-L. Hersener<sup>1</sup>, U. Meier<sup>2</sup>, S. Künzli<sup>3</sup>, M. Kühni<sup>3</sup>, U. Baier<sup>3</sup>

Institutionen: <sup>1</sup>Ingenieurbüro HERSENER, <sup>2</sup>MERITEC GmbH, <sup>3</sup>ZHAW

Adresse: ARGE MBR II, CH-8542 Wiesendangen

Telefon: 052 338 2525

Email: [info@agrenum.ch](mailto:info@agrenum.ch)

Dauer des Projekts: 1.12.2008 – 30.11.2012

Datum: 30.11.2010

<b>Management Summary .....</b>	<b>4</b>
Ausgangslage.....	4
Zielsetzung .....	4
Ergebnisse .....	4
Ausblick .....	5
Kurze, prägnante Ausführungen .....	5
<b>Phasenbericht der Versuche an der MBR – Versuchsanlage .....</b>	<b>7</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>8</b>
<b>2 Problemstellung.....</b>	<b>8</b>
<b>3 Zielsetzung .....</b>	<b>8</b>
<b>4 Material und Methodik .....</b>	<b>9</b>
4.1 Rohgülle .....	9
4.2 Separierung .....	10
4.3 MBR-Versuchsanlage.....	11
4.4 Ultrafiltration .....	12
4.5 Messtechnik.....	12
4.6 Berechnungsgrundlagen .....	12
<b>5 Resultate.....</b>	<b>13</b>
5.1 Übersicht .....	13
5.2 Vergärungsversuche im MBR.....	14
5.3 UF-Retentat .....	16
5.4 UF-Permeat .....	17
5.5 Separierung .....	19
5.6 Ultrafiltration .....	19
5.7 Energieträger Gülle .....	20
<b>6 Diskussion.....</b>	<b>21</b>
6.1 Rohgülle .....	21
6.2 Dünngülle .....	22
6.3 Separierung .....	23
6.4 Ultrafiltration .....	24
6.5 Vergärungsprozess .....	25
<b>7 Leistungsvergleich konventioneller Rührkessel mit MBR.....</b>	<b>26</b>
<b>8 Wirtschaftlichkeit.....</b>	<b>27</b>
8.1 Grundlagen.....	27
8.2 Investitionsbedarf und Betriebskosten.....	28
8.3 Kosten-Nutzenvergleich MBR mit konventioneller Vergärung.....	30
<b>9 Implementierung .....</b>	<b>31</b>
<b>10 Folgerungen .....</b>	<b>33</b>

<b>11 Kommunikation.....</b>	<b>33</b>
<b>12 Ausblick.....</b>	<b>35</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>36</b>
<b>Phasenbericht der Versuche an der MBR – Laboranlage.....</b>	<b>38</b>
<b>1 Zielsetzung .....</b>	<b>39</b>
<b>2 Material und Methode .....</b>	<b>39</b>
<b>3 Resultate.....</b>	<b>40</b>
3.1 Vorversuche .....	40
3.2 Versuchsbeginn.....	42
3.3 Gärversuch mit HRT 4 d und SRT $\infty$ (Tag 60 bis 134).....	43
3.4 Batchbetrieb (Tag 134 bis 148) .....	43
3.5 Gärversuch mit HRT 4 d und SRT $\infty$ (Tag 148 bis 313).....	43
3.6 Vergärungsversuch mit HRT 4 d und SRT 60 d (Tag 313 bis 378).....	45
3.7 Versuch mit HRT 7 d und SRT 60 d .....	49
3.8 Vergärungsversuch mit HRT 2.5 d und SRT 60 d .....	50
3.9 Vergärungsversuch mit HRT 2.5 d und SRT 30 d .....	51
3.10 Weitere Versuche .....	51
<b>4 Diskussion.....</b>	<b>52</b>
<b>5 Folgerung .....</b>	<b>53</b>
<b>6 Ausblick.....</b>	<b>53</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>54</b>

## Management Summary

### **Ausgangslage**

Hofdünger, v.a. Gülle, stellt mit rund 53 PJ neben Wald das grösste Biomassepotential in der Schweiz dar (Oettli, 2004). Eine Konversionspfad ist die Vergärung zu Biogas. Konventionelle Biogasanlagen (Rührkessel) haben den Nachteil, dass bei jeder Beschickung von Frischmaterial gleichzeitig Substrat aus dem Reaktor ausgeschleust wird. Neben unvergorenem Substrat gehen damit auch aktive Bakterien verloren. Dies reduziert die Leistungsfähigkeit der Gasproduktion.

Das neue System des Membranbioreaktors (MBR) hingegen hält die aktive Bakterienmasse mittels der Ultrafiltrationsmembran im Reaktor zurück, Wasser und Salze können passieren. Der Rückhalt der Biomasse erhöht die Leistungsfähigkeit der Biogasproduktion. Das Verfahren ist prädestiniert für Flüssigkeiten und bietet sich ideal für die Vergärung von Gülle an. Zudem wird durch die Trennung von Salzen und organischem Material ein Flüssigdünger produziert, der stickstoffeffizienter und somit umweltfreundlicher eingesetzt werden kann sowie zusätzlich graue Energie einsparen hilft.

### **Zielsetzung**

Während drei Versuchsphasen sollen die Leistungsfähigkeit, die Wirtschaftlichkeit sowie die Implementierung des MBR-Systems untersucht werden. Dabei werden drei Substrate nämlich Gülle, Konzentrat aus Gülle (Retentat) sowie Konzentrat aus Gülle mit flüssigem Abfall untersucht. Dies erfolgt auf zwei Anlagen. Die Versuchsanlage im halbtechnischen Massstab dient zur Abklärung der *Verfahrenstechnik*, *Wirtschaftlichkeit* und *Implementierung*. Die Prozesstechnik und die biologischen Grenzen werden mittels einer Laboranlage untersucht.

### **Ergebnisse**

#### Versuchsanlage

Die *Leistungsfähigkeit* bei der Vergärung von Gülle ist im MBR doppelt so hoch wie in konventionellen Biogasanlagen. Die Gasausbeute konnte gegenüber Rohgülle mit 270 l/kg organischer Substanz (OTS) auf 610 l/kg OTS bei einer Aufenthaltsdauer (HRT) von 10 Tagen gesteigert werden. Die HRT lässt sich im Gegensatz zu konventionellen Anlagen mit mehr als 20 Tagen bis auf 4 Tage reduzieren, ohne dass eine Beeinträchtigung des Prozesses eintritt. Damit ist eine Reduzierung des Fermentervolumens um bis zu 80 % möglich. Bezogen auf die zugeführte OTS-Menge, konnte die Biogasproduktion von 27 % im Rührkessel auf 65 % im MBR erhöht werden. Die filtrierte Flüssigkeit aus der Ultrafiltration (UF), das sogenannte Permeat, ist hygienisch einwandfrei und kann ideal als Stickstoff- und Kaliumdünger stofflich verwertet werden.

Die Schwelle der *Wirtschaftlichkeit* wird mit ausschliesslich Gülle beim MBR vor 35'000 Jahrestonnen erreicht. Bei konventionellen Anlagen ist eine noch höhere Verarbeitungsmenge erforderlich.

Die *Implementierung* erfordert bei beiden Verfahren einen überbetrieblichen Einsatz. Das MBR-System bietet zusätzlich die Chance Gülle zu einem wertvollen Flüssigdünger weiterzuverarbeiten. Damit kann durch weiteres Aufkonzentrieren das Ausbringvolumen stark reduziert werden und der Nährstoffeinsatz effizienter und energiesparender erfolgen.

### Laboranlage

Die HRT konnte auf 4 Tage reduziert werden, wobei eine Gasausbeute von rund 400 NI/kg OTS erreicht wurde. Gegenüber den Literaturwerten von Rindergülle mit einer Gasausbeute von 370 l/kg OTS bei einer HRT von 21 bis 35 Tage lassen sich bei kürzerer HRT vergleichbare Gasausbeuten erzielen. Mit dem Permeat gehen organische Säuren durch die Membran, was bei kurzer HRT zu einem theoretischen Gasverlust von 20% führt. Dies allerdings nur, wenn das Permeat angeimpft würde, was nicht der Praxis entspricht. Trotzdem wurde bei dieser extrem kurzen HRT ein ähnlicher Gasertrag erzielt, wie in herkömmlichen Anlagen mit mehr als 20 Tagen HRT.

### **Ausblick**

Das innovative MBR-Verfahren erlaubt eine vielseitige Prozessführung und damit die Nutzung unterschiedlicher Biomassesortimente. Damit erhöht sich die Chance für eine spätere Implementierung.

Nach den Vergärungsversuchen mit Gülle, erfolgt im nächsten Jahr die Untersuchung von UF-Retentat. Offen ist, ob mit diesem Substrat eine weitere Gassteigerung pro kg OTS zu erreichen ist. Selbst wenn dies nicht erreicht werden kann, kann durch die Vergärung des Retentats der Reaktor bei gleichem Durchsatz um Faktor sechs reduziert werden sowie die Transportvolumina massiv gesenkt werden.

In der letzten Versuchsphase wird UF-Retentat mit flüssigen Abfällen vergoren. Die Biogasproduktion kann damit weiter gesteigert und die Wirtschaftlichkeit verbessert werden. Pro Anlage ist weniger Material notwendig, was zu einer grösseren Verbreitung dieser Technologie in der Praxis führt.

### **Kurze, prägnante Ausführungen**

#### Beurteilung des MBR Systems (nach bisherigen Erkenntnissen):

- Vergärungsprozess läuft stabil, selbst wenn relativ rasch prozessrelevante Änderungen erfolgen
- Bei geringer Raumbelastung ( $< 2 \text{ kg OTS/m}^3 \cdot \text{d}$ ) höhere Gasausbeuten als beim Rührkessel
- Höchste Gasausbeute mit rund 620 l/kg OTS bei halb so langer HRT wie im Rührkessel
- Schlammalter (SRT) kann bei Mischgülle nicht unter 20 d liegen, da schnelle Tendenz zur Versäuerung
- Auch bei kurzer HRT von 2.5 d sind bisher keine Prozessstörungen aufgetreten

- Die SRT scheint keinen grossen Einfluss auf eine Erhöhung der Gasmenge aber auch keine hemmende Wirkung auf den Abbauprozess auszuüben
- Einsparung an Nachgärlagervolumen um bis über 90%
- Im UF-Permeat finden sich organische Säuren die in Biogas umgewandelt werden, wenn Impfkultur zugegeben wird
- Das UF-Permeat ist hygienisch einwandfrei (Lebensmittelqualität)
- Die UF-Membran hält Mikroorganismen praktisch vollständig zurück
- Der MBR ist leistungsfähiger als das Rührkesselsystem
- Der MBR ist schneller wirtschaftlich als die konventionelle Vergärung
- Das MBR-System ist für Gülle geeignet und die Machbarkeit ist gegeben

## **Phasenbericht der Versuche an der MBR – Versuchsanlage - Vergärung von Dünngülle -**

Autoren:

U. Meier, MERITEC GmbH

J.-L. Hersener, Ingenieurbüro HERSENER

30. November 2010

## 1 Einleitung

Konventionelle Biogasanlagen zur Vergärung von Gülle werden meistens nach dem Prinzip des Rührkesselreaktors betrieben. Das System hat sich in der Praxis bewährt und ist in der Technik relativ einfach. Ein Nachteil des Rührkesselsystems besteht darin, dass bei jeder Beschickung des Reaktors ein Teil der aktiven Bakterienmasse ausgeschwemmt wird. Dies reduziert die Leistungsfähigkeit des Verfahrens und führt zu langen Aufenthaltszeiten mit entsprechend grossen Fermentervolumina. Zudem können die Grobstoffe in der Rohgülle verfahrenstechnische Probleme im Anlagenbetrieb hervorrufen. Das vergorene Substrat muss in einem Nachgärtank gelagert werden. Ausserdem ist es nicht hygienisch einwandfrei. Die Ausbringung erfolgt mit den gleichen Einschränkungen wie normale, unvergorene Gülle. Dabei können hohe Ammoniakemissionen auftreten.

## 2 Problemstellung

Ein neues System zur Steigerung der Effizienz des anaeroben Abbauprozesses stellt der Membran-Bio-Reaktor (MBR) dar. Bei diesem Reaktorsystem werden die Bakterien und die noch nicht vergorenen organischen Substanzen von einer Ultrafiltrationsmembrane (UF) zurückgehalten und in den Reaktor zurückgeführt. Bei der Behandlung von Gülle erfolgt vorgängig eine Separierung. Die Dünngülle ohne die Grobpartikel gelangt in die Vergärung. Es ist zu erwarten, dass dadurch ein schnellerer Abbauprozess mit höheren Gasausbeuten möglich wird. Die UF-Membran hält Keime zurück, sodass von einer Steigerung der Hygiene im Filtrat (UF-Permeat) ausgegangen werden kann.

In den Jahren 2004 und 2005 konnte mit finanzieller Unterstützung des Bundesamtes für Energie (BFE) die Eignung des MBR für den Einsatz mit Gülle abgeklärt und die grundsätzliche Machbarkeit des Verfahrens nachgewiesen werden [Hersener 2007]. Die verfahrens- und prozesstechnischen Anforderungen an das System müssen hingegen noch vertiefter abgeklärt werden.

Die zusätzliche Aufbereitung mittels Umkehrosmose (RO) bringt weitere Vorteile betreffend Einsparungen beim Lagervolumen für die Flüssigdünger sowie beim Transport- und Ausbringaufwand. Ausserdem können die Nährstoffe effizienter eingesetzt werden. Die aufbereitete Düngerfraktion lässt sich mit der Ammoniakstrippung zu einem Handelsdünger weiterbehandeln. Damit kann Abwärme genutzt werden, was den vielfach schlechten Wärmenutzungsgrad auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen steigert.

## 3 Zielsetzung

In der hier beschriebenen Projektphase 2 wurde separierte Dünngülle von Schweinen und Milchvieh verwendet. Folgende Ziele stehen im Vordergrund:

### *Leistungsfähigkeit*

Darlegen der Leistungsfähigkeit des MBR-Systems (Raumbelastung, Gasausbeute, Gasqualität, Gasmenge, Hydraulische Verweildauer (HRT), Schlammaufenthaltsdauer (SRT)) und mit der konventionellen Vergärung vergleichen. Die verfahrenstechnischen Grenzen der Vergärung im MBR erläutern. Soweit möglich sind die biologischen Limiten herauszufinden.

#### *Wirtschaftlichkeit*

Die Investitions- und Betriebskosten des MBR-Systems berechnen. Einsparpotentiale durch Effizienzsteigerung und Volumenreduktion aufzeigen. Weiterbehandlungsmöglichkeiten, wie die Umkehrosmose zur Salzabtrennung und –konzentrierung sowie die Herstellung eines flüssigen Mineraldüngers mittels der Ammoniakstrippung nach der UF erwähnen.

#### *Implementierung*

Eignung und Grenzen der Aufbereitung für die Praxis bestimmen sowie Nutzen für die Landwirtschaft darstellen. Den Einsatz der Düngerfraktionen und die Anforderungen an die Ausbringtechnik abschätzen.

## **4 Material und Methodik**

### **4.1 Rohgülle**

Für die Versuche wurde Gülle aus dem Milchvieh- und Schweinestall der ART in Tänikon verwendet (Tab. 1). Bei der Rindergülle handelt es sich um Milchviehgülle aus einem Boxenlaufstall. Stroh als Einstreu wird im Liegeboxenbereich verwendet. Neben Proteinkonzentrat (1.5 kg/Tier • Tag) sowie Leistungsfutter, das in Abhängigkeit der Milchleistung zugegeben wird, werden ganzjährig Mais-, Grassilage, Dürrfutter und Rübenschnitzel zugefüttert.

Die Schweinegülle stammt von Mastschweinen, die in einem Mehrflächenstall gehalten werden. Die Liegeflächen sind nicht perforiert, der Aktivitätsbereich ist perforiert und die Auslauffläche ist zur Hälfte mit Spaltenbodenelementen ausgestattet. Die Schweine werden mit Futtermitteln gefüttert (Vormast: UFA 321-5, Ausmast: UFA 331-4). Stroh, geschnitten mit einer Länge von ca. 10 cm, wird als Einstreu und Beschäftigungsmaterial eingesetzt.

**Tabelle 1:** Gehalte in der verwendeten Rohgülle

Parameter Einheit	TS %	OTS in % der TS	pH	Ntot g/kg TS	NH4 g/kg TS	P2O5 g/kg TS	K2O g /kg TS	DOC mg/l	TOC mg/l	CSB mg/l
Schwein										
Durchschnitt	1.8	64.1	7.8	101.5	57.8	54.6	87.1	1'805	2'791	19'350
Minimum	1.3	58.0	7.5	61.8	36.6	45.9	65.7	680	1'069	15'800
Maximum	2.7	69.2	8.0	125.8	69.4	66.9	114.2	2'438	4'708	25'700
Rind										
Durchschnitt	4.3	73.3	7.6	45.9	15.8	17.8	74.1	5'772	8'417	46'667
Minimum	3.1	71.5	7.2	40.0	13.0	12.9	58.8	4'254	4'577	35'750
Maximum	5.4	74.6	7.8	54.9	18.1	20.4	89.1	8'445	13'380	55'700

## 4.2 Separierung

Zur Separierung der Rohgülle steht ein statisches Bogensieb ohne Nachentwässerung der Feststoffe zur Verfügung (Abb. 1). Die Maschenweite des Spaltsiebes beträgt 0.5 mm. Die Beschickung des Geräts erfolgt mit einer drehzahlgeregelten Tauchpumpe.



**Abbildung 1:** Das für die Separierung der Rohgülle eingesetzte statische Bogensieb

Die separierte Dünggülle wurde in Transporttanks gepumpt und die Feststoffe zurück in die Rohgüllegrube geführt. Nach der Separierung ist die jeweilige Dünggülle von Rindern und Schweinen in die Vorlage der Versuchsanlage gepumpt und gemischt worden.

**Tabelle 2:** Gehalte in der Dünggülle (Mischung aus 50 % Rinder und 50 % Schweinegülle)

Parameter Einheit	TS %	OTS in % der TS	pH	Ntot mg/l	NH4 mg/l	P2O5 mg/l	K2O mg/l	DOC mg/l	TOC mg/l	CSB mg/l
Durchschnitt	1.88	57.38	7.7	1'966	996	519	2'434	2'171	3'106	20'120
Minimum	1.07	50.00	7.2	1'549	750	204	2'183	871	1'251	9'670
Maximum	2.87	68.44	7.9	3'475	1'292	941	2'778	5'345	7'800	35'400

Die separierte Dünggülle ist in einem Massenverhältnis von 50 % Rind und 50 % Schwein zur Vergärung vorgelegt worden. In Tabelle 2 sind die Gehalte in der Dünggülle angegeben.

### 4.3 MBR-Versuchsanlage

Die Versuchsanlage im halbtechnischen Massstab (Abb. 2) besteht aus einem Vorlagetank in dem die separierte Dünngülle zwischengelagert wird. Die Dünngülle wird täglich mehrmals in den Biogasreaktor, der ein maximales Nutzvolumen von 3'000 l hat, gepumpt.

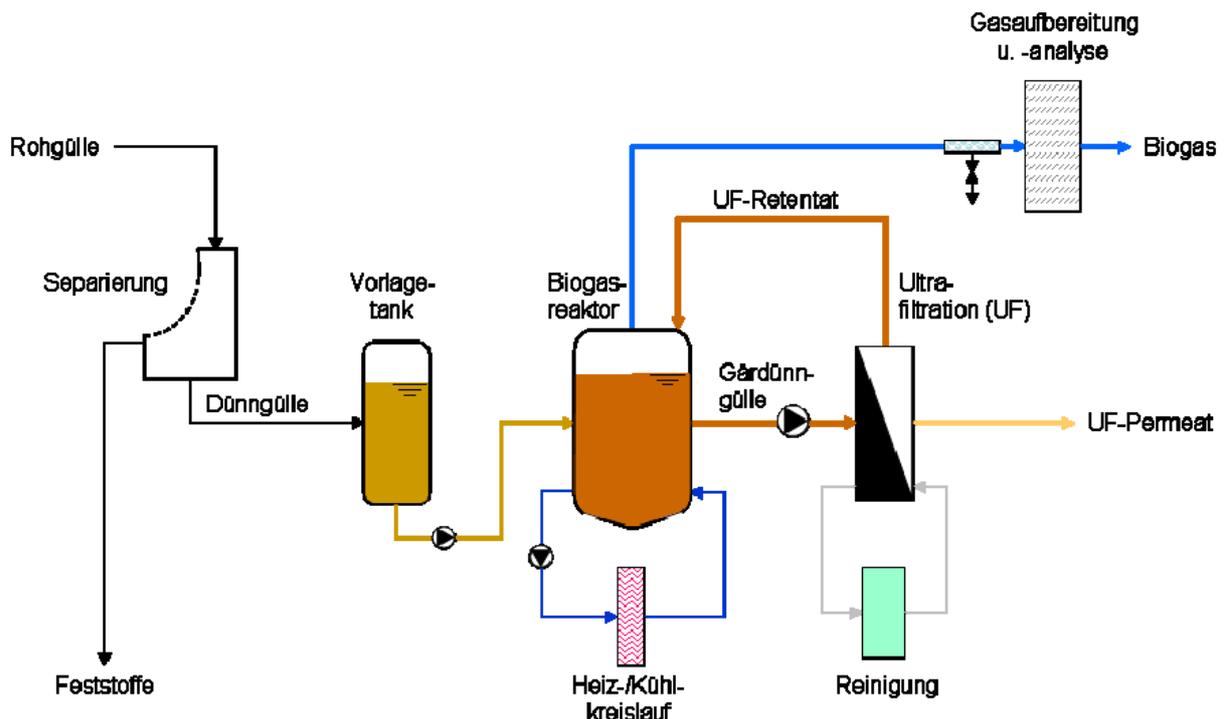
Die direkt an den Reaktor angeschlossene UF filtert den Reaktorinhalt in eine Flüssigphase, das UF-Permeat, und in ein Flüssigkonzentrat, das UF-Retentat. Das UF-Retentat wird in den Reaktor zurückgeführt.

Das UF-Permeat gelangt in die Rohgüllegrube.

Zur Sicherstellung konstanter Betriebsbedingungen im Biogasreaktor steht eine Klimatisierung zur Verfügung. Die Klimatisierung erfolgt über eine separate Umwälzpumpe, die den Reaktorinhalt über einen Wärmetauscher entweder heizt oder kühlt.

Der Reaktorinhalt wird einerseits über die UF-Pumpe andererseits über die Umwälzpumpe der Klimatisierung dauernd gerührt. Das produzierte Biogas gelangt über eine Gaskühlung und Kondensatabscheidung zur Gasmengen- bzw. Gasqualitätsmessung.

Die Versuchsanlage ist in einem isolierten Leichtbaugebäude untergebracht, damit auch im Winter Versuche gefahren werden können.



**Abbildung 2:** Vereinfachtes Schema der halbtechnischen Versuchsanlage

#### 4.4 Ultrafiltration

Bei der Ultrafiltration handelt es sich um einen druckgetriebenen Prozess. Die Filtration erfolgt nach dem Prinzip der Cross-Flow-Filtration. Die Rohflüssigkeit (Feed) wird dabei über die Membran gepumpt und gleichzeitig permeiert ein Teilstrom durch die Membran. Die konzentrierte Flüssigkeit wird Retentat und die filtrierte Flüssigkeit Permeat genannt.

Für die Versuche werden keramische UF-Membranen mit einem Trennschnitt von  $< 100$  Kilodalton (kDa) eingesetzt. Dies entspricht einer Porengrösse von  $< 0.1 \mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 0.001 \text{mm}$ ). Es handelt sich um sogenannte Rohrmembranen. Diese Membranen haben sich in der Praxis bewährt.

#### 4.5 Messtechnik

Die MBR-Versuchsanlage ist mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) ausgestattet. Sämtliche Messwerte werden laufend elektronisch erfasst und archiviert (vgl. Tab. 3). Über einen Bildschirm werden die aktuellen Werte angezeigt. Es können zudem weitere Prozessdaten und Alarmmeldungen abgefragt werden. Alle wichtigen Parameter lassen sich in einer Parameterliste, spezifisch neuen Versuchsbedingungen angepasst, manuell verändern.

**Tabelle 3:** Datenerfassung

Prozess	Parameter	Messung
Separierung	Dünngüllemenge	manuell
	pH, Leitwert, Stoffgehalte in der Roh- u. Dünngülle	manuell
Dünngüllevorlage	Menge	kontinuierlich
Biogasreaktor	Füllstand, Temperatur, Gasmenge u. -qualität	kontinuierlich
	pH, Leitwert, Stoffgehalte im UF-Retentat	manuell
Ultrafiltration	Temperatur, Druck, Flux, Pumpenleistung	kontinuierlich
	pH, Leitwert, Stoffgehalte im UF-Permeat	manuell
Heiz-/Kühlkreislauf	Temperatur, Füllstand (Wasser bzw. Kühlmittel)	kontinuierlich

Einige Daten wie pH-Wert, Leitwert und Stoffgehalte ( $N_{\text{tot}}$ ,  $NH_4$ ,  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ , DOC, TOC, CSB sowie Schwermetalle) müssen manuell gemessen bzw. im Labor analysiert werden.

#### 4.6 Berechnungsgrundlagen

Die hydraulische Verweilzeit, abgekürzt HRT, ist die mittlere Aufenthaltszeit der Gülle im Fermenter. Der Wert wird als  $HRT (d) = \text{Menge an Gülle zugeführt (m}^3\text{) pro Fermentervolumen (m}^3\text{)}$  angegeben. Die HRT im MBR unterscheidet sich nicht von der HRT in einem konventionellen Rührkessel.

Die Schlammaufenthaltsdauer (SRT) entspricht beim Rührkessel der HRT. Beim MBR hingegen kann aufgrund der Stofftrennung mittels der UF-Membran die SRT von der HRT entkoppelt werden. Beispielsweise beträgt die HRT 10 d und die SRT 20 d. Die SRT (d)

berechnet sich aus der Menge an Fermenterinhalt ( $\text{m}^3$ ) pro täglicher Schlammmentnahme ( $\text{m}^3/\text{d}$ ).

Die Raumbelastung (RB) bezeichnet die zugeführte Substratmenge pro Zeit und Fermentervolumen. In diesem Bericht wird die RB als die zugeführte OTS-Menge ( $\text{kg}/\text{d}$ ) pro Fermentervolumen ( $\text{m}^3$ ) berechnet.

Alle Angaben betreffend die Biogasmenge beziehen sich jeweils auf Normliter (NI).

## 5 Resultate

### 5.1 Übersicht

Die MBR-Versuchsanlage ist vor den eigentlichen Vergärungsversuchen mit Wasser getestet worden. Am 19. Juni 2009 (Versuchstag 0) wurde der Reaktor mit 1'600 l Impfgülle aus einer landwirtschaftlichen Biogasanlage und 400 l Mischdünggülle der ART angefahren. Bis Ende April 2010 sind insgesamt 8 Gärversuche durchgeführt worden (Tab. 4). Ein weiterer Versuch hat begonnen.

Bei allen Gärversuchen ist nach einer Adaptionsphase der Biologie an neue Betriebsbedingungen die MBR-Anlage während mindestens drei Aufenthaltsperioden betrieben worden.

Der Reaktorinhalt ist im Verlauf des Betriebs sukzessive reduziert worden, damit entsprechend kürzere Aufenthaltszeiten erzielt werden konnten. Der erste Versuch mit 20 Tagen (d) Aufenthaltsdauer (HRT) und ohne Schlammmentnahme ( $\text{SRT} = \infty$ ) aus dem Reaktor musste aufgrund mess- und verfahrenstechnischer Probleme abgebrochen werden. Es stellte sich heraus, dass die Gasqualitätsmessung ab dem 60. Versuchstag zeitweise keine plausiblen Werte mehr anzeigte. Ein entsprechender Umbau der Messinstallation und die Behebung einer nicht detektierbaren Undichtigkeit in der Gasleitung lieferten anschliessend stabile Gasqualitätswerte.

**Tabelle 4:** Durchgeführte Vergärungsversuche

Versuch Nr.	HRT d	SRT d	Reaktorinhalt l	Versuchszeit d
1	20	40	2000	125
2	10	65	1600	39
3	10	40	1600	46
4	5	20	1250	24
5	5	15	1250	8
6	4	20	1250	34
7	7.5	20	1250	35
8	7.5	40	1250	27

Im Weiteren führte das hohe Schlammalter dazu, dass der TS-Gehalt im UF-Retentat von 5.3 % und 64 % OTS zu Beginn des Versuchs auf 7.2 % TS und 64 % OTS angestiegen ist. Dies deutet darauf hin, dass kein vollständiger Abbau der OTS erfolgt. Somit musste die Anlage für die weiteren Versuche mit einer kontinuierlichen Entnahme von UF-Retentat betrieben werden. Dabei wurden verschiedene HRT zwischen 20 d bis 4 d bei jeweils unterschiedlichen SRT von 65 d bis 15 d gefahren (vgl. Tab.4).

## 5.2 Vergärungsversuche im MBR

Die Fermentertemperatur lag in allen Versuchen um 37°C. Die im Versuch mit HRT von 20 Tagen und SRT von 40 d erzielten Gasausbeuten mit 280 l/kg OTS sind mit denjenigen der Rohgülle mit 266 l vergleichbar, weshalb nach einer Messperiode entsprechend einer einzigen HRT eine Verkürzung der HRT vorgenommen wurde (Tab. 5). Aufgrund einer Undichtigkeit in der Gasleitung lag der CH<sub>4</sub>-Gehalt mit 51 % tief, weil Luft angesaugt wurde.

**Tabelle 5:** Gasqualität, Gasmenge, Gasausbeute, Raumbelastung (RB), Temp. und pH während der Gärversuche in zeitlicher Reihenfolge

Parameter Einheit	CH <sub>4</sub> %	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> +CO <sub>2</sub> %	Gasmenge l/h	Gasausbeute l/kg OTS	RB kg OTS/m <sup>3</sup> ·d	Reaktortemp. °C	pH im UF-Retentat
<b>HRT 20 d, SRT 40 d</b>								
<b>Mittelwert</b>	<b>51</b>	<b>30</b>	<b>81</b>	<b>15</b>	<b>281</b>	<b>0.7</b>	<b>36.7</b>	<b>7.8</b>
Min	24	14	39	10	173	0.3	31.8	7.8
Max	62	37	99	22	527	0.7	39.8	7.8
<b>HRT 10 d, SRT 65 d</b>								
<b>Mittelwert</b>	<b>63</b>	<b>33</b>	<b>96</b>	<b>30</b>	<b>447</b>	<b>1.4</b>	<b>36.6</b>	<b>7.7</b>
Min	61	31	92	15	227	0.7	32.3	7.7
Max	66	35	101	47	690	2.0	37.5	7.8
<b>HRT 10 d, SRT 40 d</b>								
<b>Mittelwert</b>	<b>63</b>	<b>32</b>	<b>95</b>	<b>41</b>	<b>617</b>	<b>1.0</b>	<b>37.0</b>	<b>7.7</b>
Min	61	31	91	30	395	0.8	36.4	7.7
Max	65	33	98	50	801	1.4	37.5	7.8
<b>HRT 5 d, SRT 20 d</b>								
<b>Mittelwert</b>	<b>65</b>	<b>32</b>	<b>97</b>	<b>57</b>	<b>346</b>	<b>3.4</b>	<b>37.0</b>	<b>7.7</b>
Min	63	31	93	45	290	1.9	36.5	7.6
Max	66	33	99	64	467	3.8	37.4	7.9
<b>HRT 5 d SRT 15 d</b>								
<b>Mittelwert</b>	<b>60</b>	<b>36</b>	<b>96</b>	<b>43</b>	<b>240</b>	<b>3.5</b>	<b>36.9</b>	<b>7.6</b>
Min	56	33	88	34	154	3.3	36.3	7.4
Max	63	39	102	54	310	4.3	37.4	7.7
<b>HRT 4 d SRT 20 d</b>								
<b>Mittelwert</b>	<b>66</b>	<b>32</b>	<b>97</b>	<b>62</b>	<b>296</b>	<b>4.0</b>	<b>36.8</b>	<b>7.6</b>
Min	64	30	94	46	222	4.0	34.9	7.5
Max	67	33	100	70	335	4.5	37.4	7.6
<b>HRT 7.5 d; SRT 20 d</b>								
<b>Mittelwert</b>	<b>65</b>	<b>32</b>	<b>97</b>	<b>41</b>	<b>407</b>	<b>2.3</b>	<b>37.0</b>	<b>7.6</b>
Min	64	31	94	32	237	1.2	35.8	7.5
Max	67	33	100	49	759	2.9	39.1	7.6
<b>HRT 7.5 d; SRT 40 d</b>								
<b>Mittelwert</b>	<b>65</b>	<b>32</b>	<b>97</b>	<b>42</b>	<b>373</b>	<b>2.2</b>	<b>36.9</b>	<b>7.6</b>
Min	62	30	92	36	307	1.9	34.6	7.5
Max	66	33	100	51	509	2.4	38.7	7.6

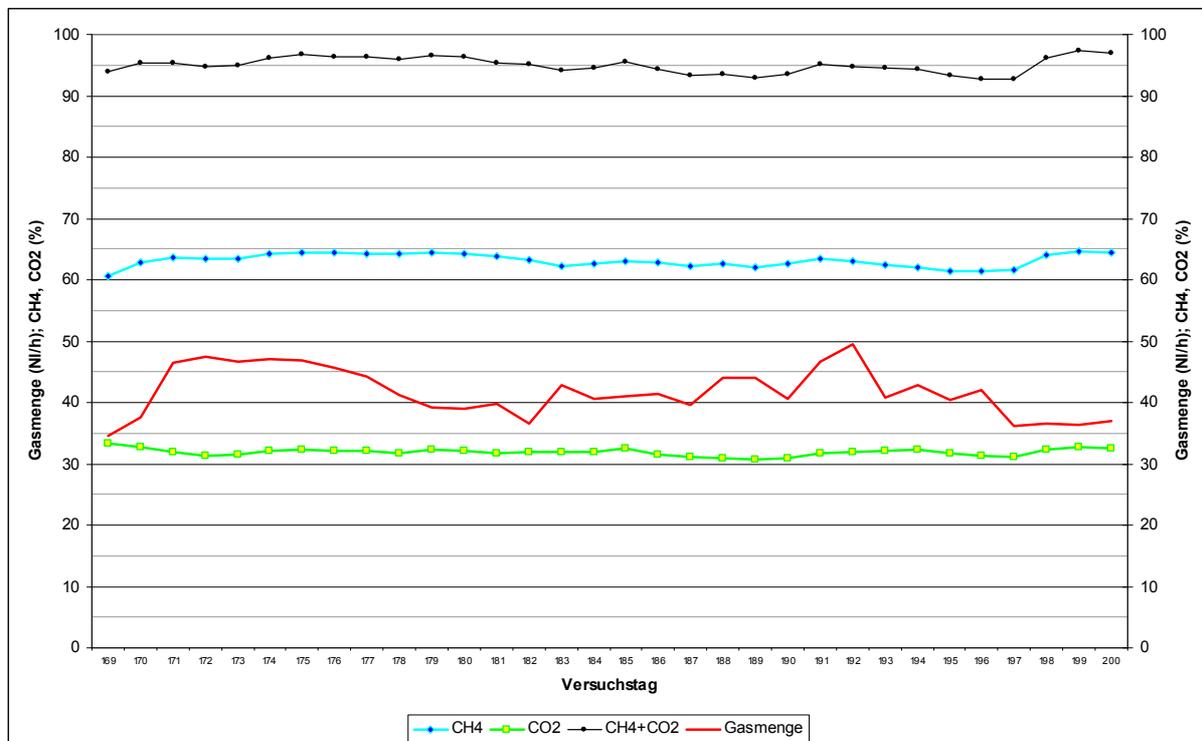
Der Versuch mit einer HRT von 10 d und einer SRT von 65 d ergab knapp 450 l/kg OTS bei einer Raumbelastung (RB) von 1.37 kg OTS/m<sup>3</sup> · d. Die Gasqualität schwankte zwischen 61 und 66 % CH<sub>4</sub>. Der Versuch musste aufgrund zu hoher TS-Konzentration im UF-Retentat (Reaktorinhalt) abgebrochen werden. Die geringe Viskosität führte zu technischen Problemen im Heiz-Kühl-Kreislauf als auch bei der UF. Der TS-Gehalt im UF-Retentat erreichte 8.2 %. Nach Verdünnung des Reaktorinhalts auf 6.5 % TS lief die UF wieder betriebssicher.

Eine Überschreitung dieser TS-Grenze von 6.5 % sollte in der Praxis vermieden werden.

Die besten Ergebnisse lieferte der Versuch mit einer HRT von 10 d und einer SRT von 40 d (vgl. Abb. 3). Die Gasausbeute erreichte 617 l/kg OTS mit einem CH<sub>4</sub>-Gehalt von 63 %. Die

RB mit  $1 \text{ kg OTS/m}^3 \cdot \text{d}$  war tief. Im Vergleich dazu beträgt die Gasausbeute der Mischrohrgülle im Batchversuch 266 l/kg OTS.

Mit dem MBR konnte die Gasausbeute um über 230 % gesteigert werden.

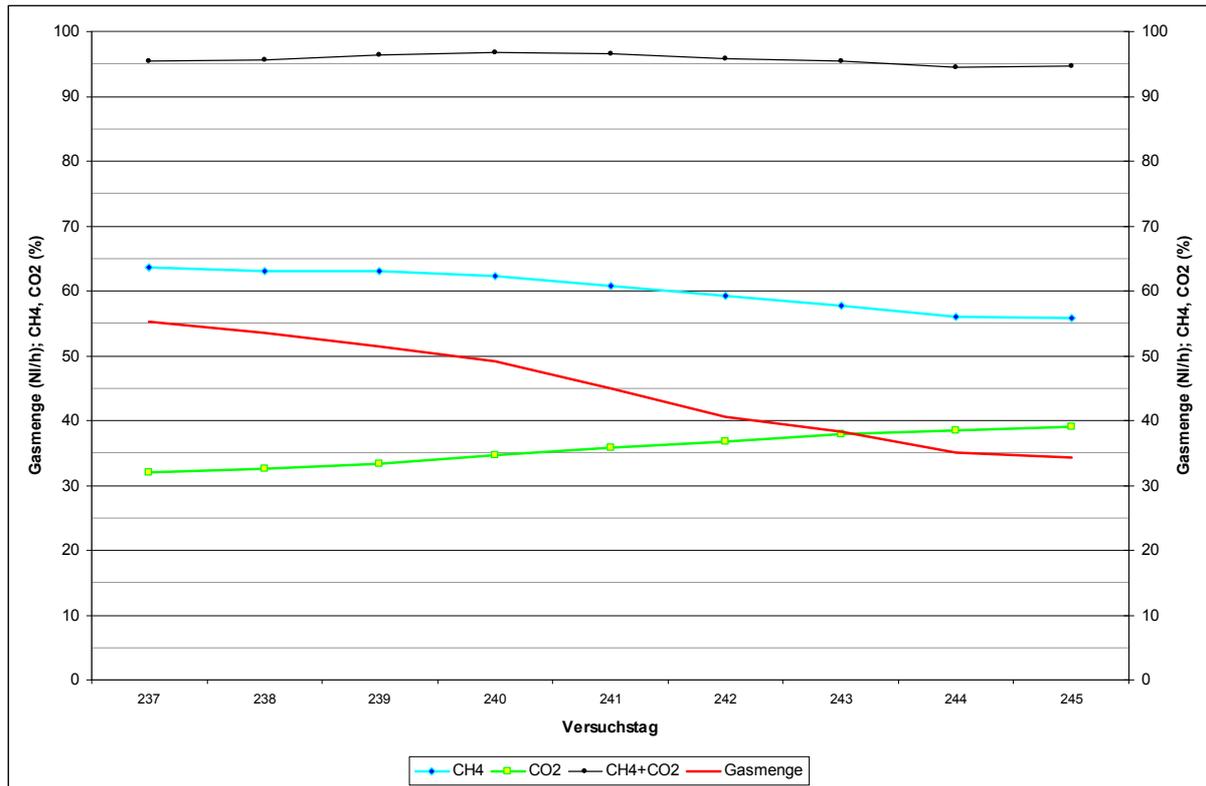


**Abbildung 3:** Verlauf der Gasmenge und Gasqualität während des Vergärungsversuchs mit HRT 10 d und SRT 40 d

Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Gasmenge und –qualität während des Versuchs mit einer HRT von 5 d und einer SRT von 15 d.

Die kurz bemessene SRT führte einerseits zu einer abnehmenden Gasproduktion von 55 l/h zu Beginn des Versuchs auf 34 l/h am Ende, andererseits sank der CH<sub>4</sub>-Gehalt von 63 % auf 55 %. Gleichzeitig erhöhte sich der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Biogas von 32 % auf 39 %. Zusätzlich zeigte der pH-Wert ebenfalls sinkende Werte und erreichte gegen Ende des Versuchs 7.4 (Tab. 5). Diese Werte, vor allem die abnehmende Gasmenge und -qualität, sind Indizien für eine sich anbahnende Versäuerung des Vergärungsprozesses. Der Versuch wurde abgebrochen.

Aus prozesstechnischen Gründen sollte ein Schlammalter von 20 Tagen nicht unterschritten werden.



**Abbildung 4:** Verlauf der Gasmenge und Gasqualität während des Vergärungsversuchs mit HRT 5 d und SRT 15 d

Um mögliche Grenzen des biologischen Abbauprozesses aufzeigen zu können, wurde eine weitere Reduktion der HRT auf 4 d bei einer SRT von 20 d vorgenommen. Die Gasausbeute betrug 296 l/kg OTS (Tab. 5) und lag damit um etwa 10 % über derjenigen von Rohgülle. Die Gasqualität von mehr als 65 % CH<sub>4</sub> und einem pH-Wert von 7.6 weisen auf stabile Prozessbedingungen hin, obwohl die RB bei 4 kg OTS/m<sup>3</sup> • d lag.

Eine weitere Verkürzung der HRT auf weniger als 4 d konnte nicht vorgenommen werden, da die entsprechende Membranfläche der UF nicht zur Verfügung steht.

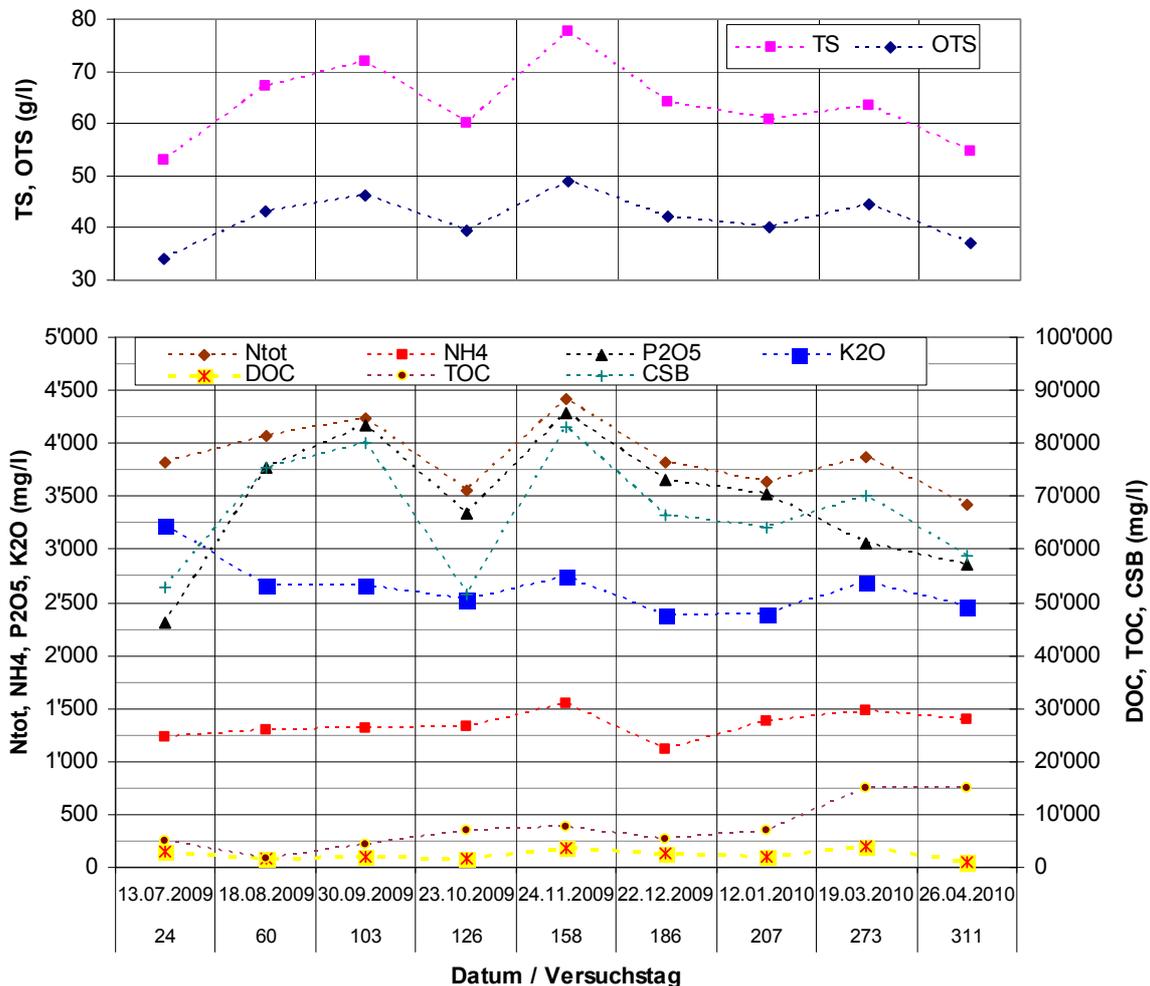
### 5.3 UF-Retentat

Bis zum 103. Versuchstag, dem Beginn des Versuchs mit HRT 20 d und SRT 40 d, ist kein Retentat entnommen worden. Die Gehalte von N<sub>tot</sub> und vor allem von P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> steigen entsprechend von 3'800 mg/l auf 4'200 mg/l bzw. von 2'300 mg/l auf über 4'100 mg/l an (vgl. Abb. 5). Der NH<sub>4</sub>- und K<sub>2</sub>O-Gehalt bleiben konstant.

Zwischen dem 103. und 126. Versuchstag (23. Okt. bzw. 24. Nov. 2009) nahmen die Gehalte von TS, OTS, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CSB und TOC ab. Der Grund dafür dürfte die verdünnte Dünngülle mit einem TS-Gehalt von 1 % sein, die während dieser Periode zur Beschickung des Reaktors diente.

Zwischen dem 126. und 158. Tag ist die Anlage bei einer SRT von 65 d in Betrieb gewesen. Auch unter diesen Betriebsbedingungen steigen die Gehalte, insbesondere von P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, an.

Während des 186. und 207. Versuchstages wurde eine SRT von 40 d gefahren, was zu geringen Gehaltsveränderungen führte.



**Abbildung 5:** Verlauf der Gehalte im UF-Retentat

Beim Betrieb der MBR-Anlage mit einer SRT von 40 d fallen, ohne Berücksichtigung des Massenverlusts durch das Biogas, 2,5 Massen-% als UF-Retentat (Gärssubstrat) bzw. bei einer SRT von 20 d 5 Massen-% an.

Im Vergleich zu einer konventionellen Biogasanlage mit rund 100 % Gärssubstrat und entsprechend notwendigen Nachgärlagervolumen, reduziert sich beim MBR das Volumen für das Nachgärlager um mehr als 95 %.

## 5.4 UF-Permeat

Die Gehalte im UF-Permeat zeigen während eines Zeitraums von 9 Monaten (Juli 2009 bis März 2010) konstante Werte (Abb. 6). Es ist ersichtlich, dass hauptsächlich  $\text{NH}_4$ - und  $\text{K}_2\text{O}$ -Salze die Membrane passieren,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , partikulärgebunden, hingegen zurückgehalten wird. Der TS-Gehalt im Permeat beträgt im Mittel 0,6 % mit einem OTS-Anteil von knapp 23 %. Dies entspricht mit 1,5 g OTS/l einem praktisch vollständigen Rückhalt der OTS an der UF-Membran. Vor allem Salze, wie Ammonium- und Kalisalze, treten durch die UF-Membran.

Das UF-Permeat zeigt gleichmässiger Gehalte als Rohgülle. Beispielsweise weist die Rohgülle für N<sub>tot</sub> Schwankungen zwischen 1'110 und 2'260 mg/l oder auch für K<sub>2</sub>O von 1'180 und 2'050 mg/l auf.

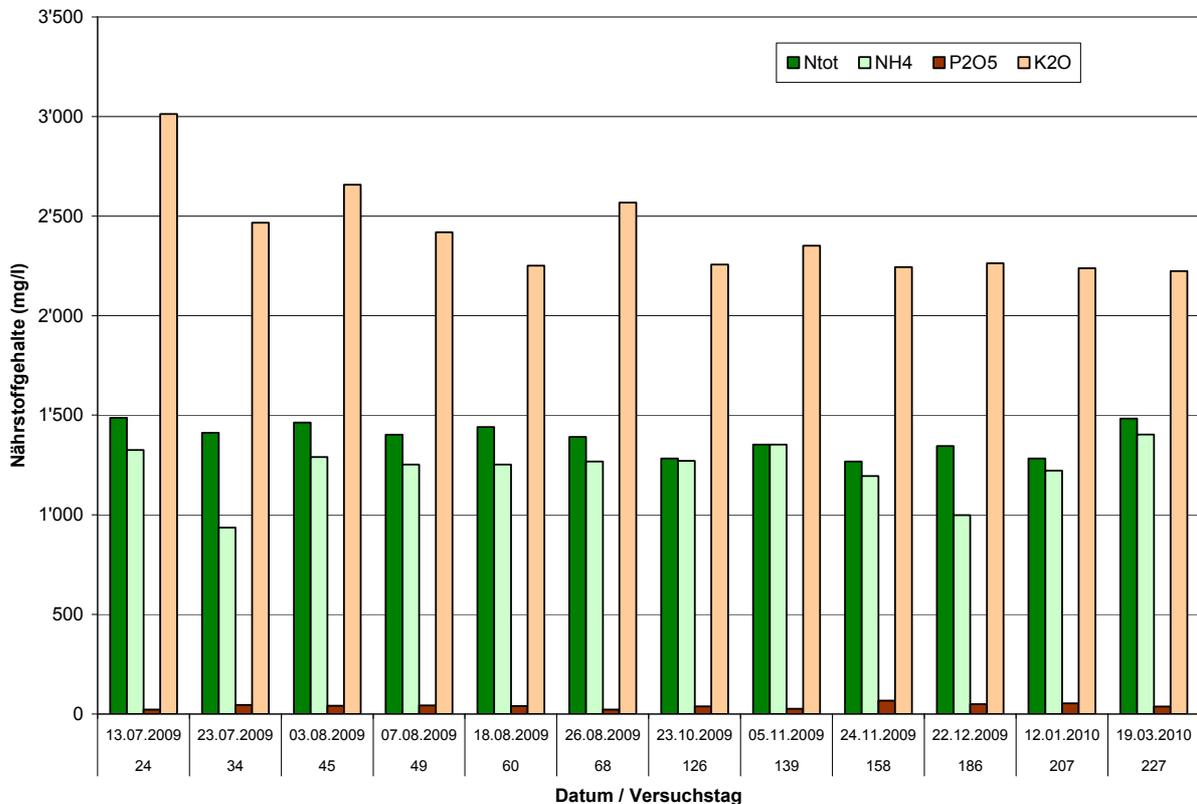


Abbildung 6: Gehalte im UF-Permeat

Tabelle 6 zeigt die Daten aus den Hygieneuntersuchungen der Rohgülle, der separierten Dünngülle, des UF-Retentats und UF-Permeats. Es ist zu erkennen, dass die Vergärung zu einer Erhöhung der Hygiene führt. Das UF-Permeat entspräche den Hygieneanforderungen eines Lebensmittels, wenn die Herkunft nicht bekannt wäre. Die Anforderungen an die Trinkwasserqualität werden nur bei den aerob mesophilen Keimen mit 400 Keimbildende Einheiten/g (KbE) gegenüber 300 KbE/g im Trinkwasser nicht erfüllt. Das UF-Permeat ist hygienisch einwandfrei.

Tabelle 6: Hygieneuntersuchung von Rohgülle, Dünngülle, UF-Retentat und UF-Permeat

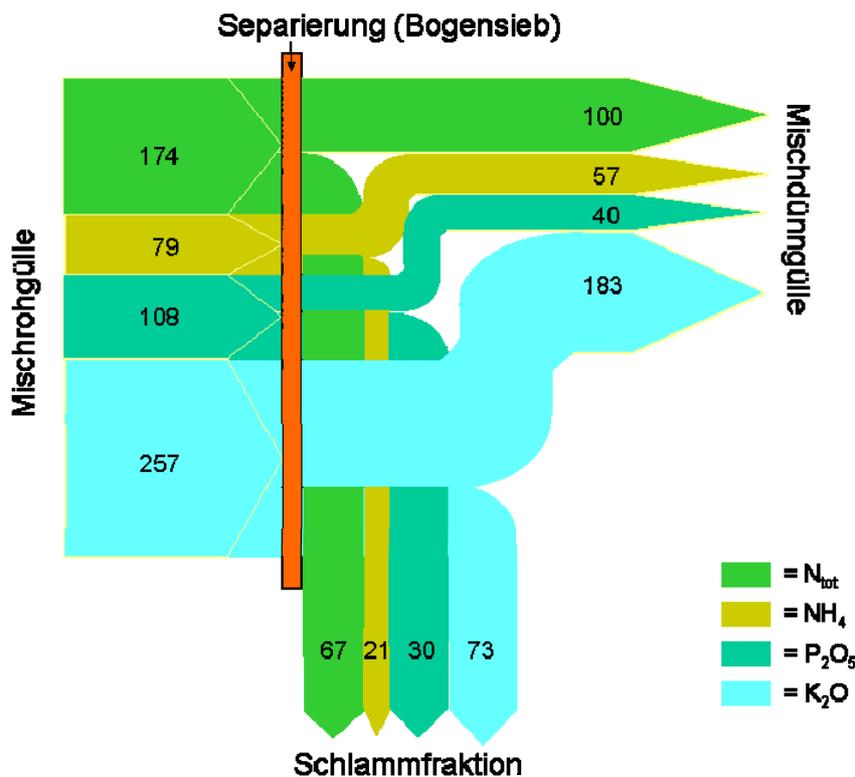
Parameter	Prüfverfahren	Einheit	Rohgülle	Dünngülle	UF-Retentat	UF-Permeat
Aerobe mesophile Keime	ISO 4833	KbE/g	31'600'000	24'400'000	8'200'000	400
Enterobacteriaceen (Coliforme)	ISO 21528-2	KbE/g	110'000	60'000	980	< 10
Enterokokken	SLMB 1406.1	KbE/g	60'000	190'000	8'700	< 10
Hefen	SLMB 1411	KbE/g	900	800	< 100	< 10
Schimmelpilze	SLMB 1412	KbE/g	4'200	2'500	3'600	< 10
Escherichia coli	ISO 16649-2	KbE/g	90'000	100'000	1'050	< 1
Staphylokokken koagulase positiv	ISO 6888-2	KbE/g	< 100	< 100	< 100	< 10
Salmonella spp.	ISO 6579	in 25 g	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar
Listeria spp.	ISO 11290-1	in 25 g	positiv	positiv	positiv	nicht nachweisbar
Listeria monocytogenes	ISO 11290-2	in 25 g	positiv	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar
Buttersäurebakterien (Clostridien)	ALP 2001	KbE/g	500	<100	300	< 100
Anaerobe Sporenbildner	ALP 1996	pro g (MPN)	> 22600	> 22600	> 22600	< 2.7

Bemerkungen: spp. = subspecies; SLMB = Schweiz. Lebensmittelbuch; ALP = Eidg. Forschungsanstalt Agroscope Liebefeld-Posieux; KbE = Keimbildende Einheiten

## 5.5 Separierung

Die Separierung der Rohgülle erfolgt mit einem statischen Bogensieb, das keine Nachentwässerung der Feststoffe, wie beispielsweise Pressschneckenseparatoren, erzielt. Dies zeigt sich darin, dass die Feststoffe mit einem TS-Gehalt um 10 % als Schlamm anfallen.

In Abbildung 7 ist der Stofffluss bei der Siebung von Mischrohgülle aufgezeigt. Aufgrund der fehlenden Nachentwässerung der Feststoffe verbleiben mehr gelöste Stoffe in der Schlammfraktion. Dies lässt sich am Abtrenngrad von  $\text{NH}_4$  und  $\text{K}_2\text{O}$  mit 26 bzw. 28 % erkennen. Die Mengen an  $\text{P}_2\text{O}_5$  im Feststoff bzw. Dünggülle stimmen mit denjenigen in der Mischrohgülle nicht überein, was vermutlich auf die Probenahme zurückzuführen ist.



**Abbildung 7:** Stofffluss bei der Separierung (Basis: 100 kg Mischrohgülle, Nährstoffmengen in g)

Bezüglich des OTS-Abtrenngrads kann aufgrund von Praxisdaten festgestellt werden, dass mit Separiergeräten, die eine Nachentwässerung aufweisen, rund 30 % der OTS mit den Feststoffen abgetrennt werden. Diese abgetrennte OTS-Menge gelangt somit nicht in den Biogasreaktor.

## 5.6 Ultrafiltration

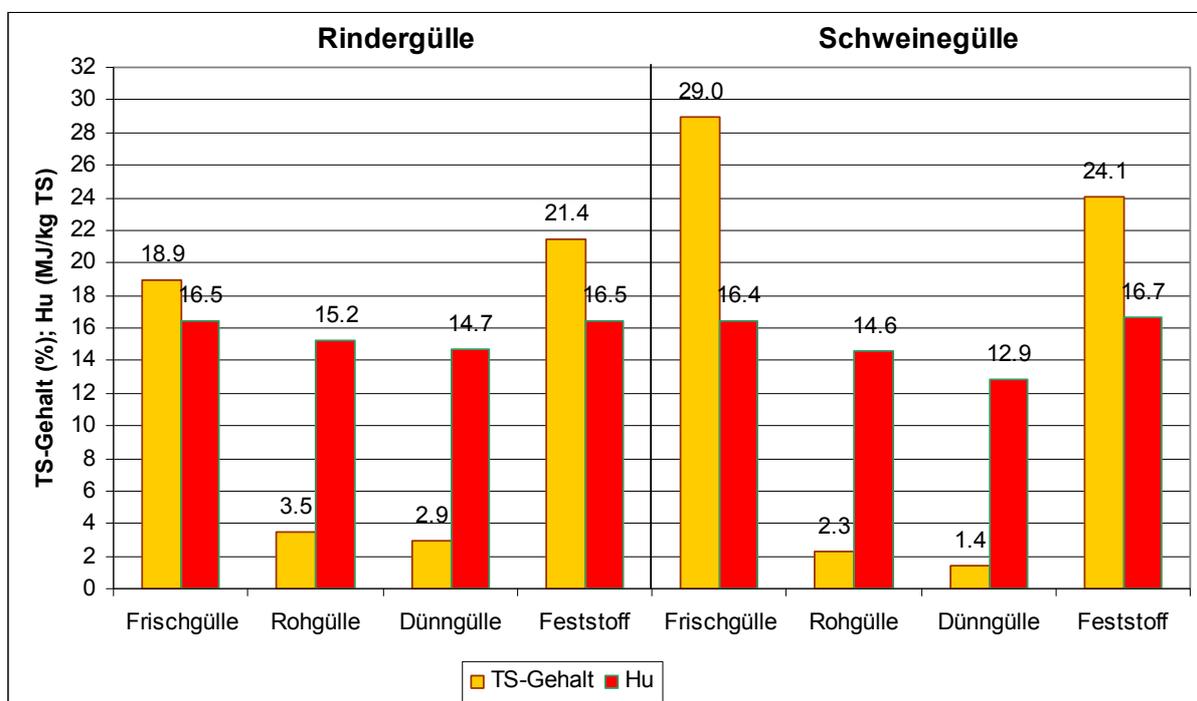
Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der UF stellt das zeitliche Verhalten der Fluxleistung, d.h. der Durchsatzleistung an der Membran, dar. Die Versuche zeigen, dass mit den eingesetzten Membranen und mit Hilfe einer entsprechenden Prozess-Steuerung ein über mehrere Wochen konstanter Flux erzielt werden kann.

Für den Praxisbetrieb der UF ist eine regelmässige Reinigung der Membranen angezeigt. Bei der Verarbeitung von Gülle reicht eine wöchentliche CIP-Reinigung (CIP = Cleaning in Place) aus. Dabei wird die Anlage vollautomatisch mit Wasser bzw. entsprechenden Chemikalien gereinigt.

Die MBR-Versuchsanlage wurde bei einer Druckdifferenz von rund 0.6 bis 1 bar betrieben.

## 5.7 Energieträger Gülle

Zur Bestimmung des Energiegehalts von frischem Kot von Rindern und Schweinen sowie von deren Rohgülle bzw. Feststoffen und Dünngülle aus der Separierung wurden entsprechende Proben gezogen. Von den Proben ist der untere Heizwert (Hu) berechnet worden (Abb. 8).



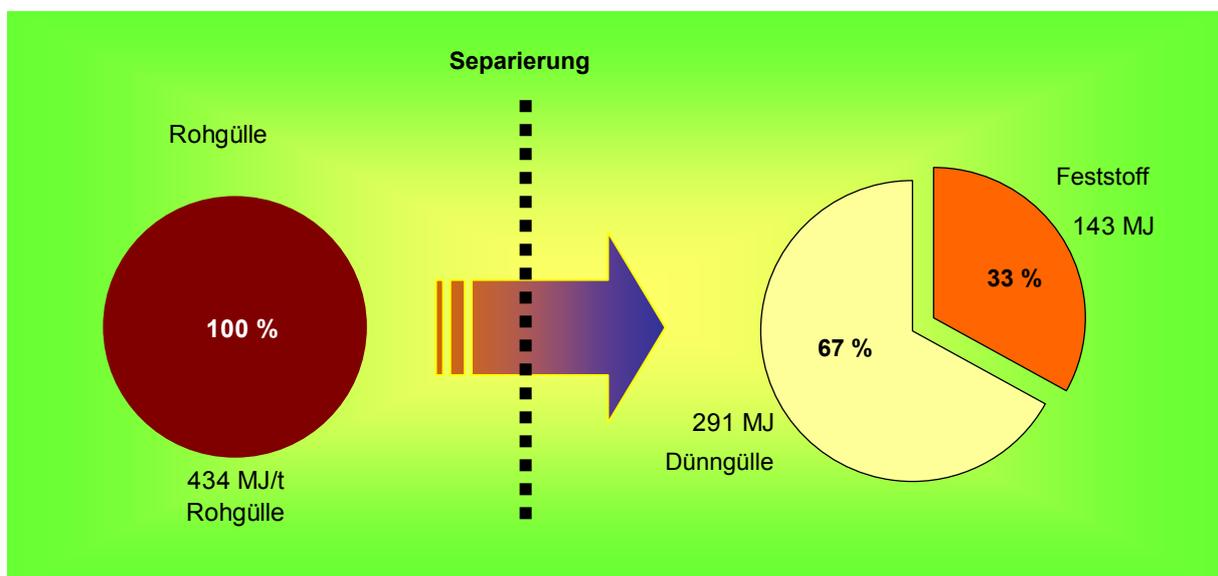
**Abbildung 8:** TS-Gehalt und unterer Heizwert (Hu) unterschiedlicher Güllefraktionen

Bei der Frischgülle handelt es sich um direkt vom Tierplatz entnommene Kotproben. Die Rohgülle ist aus der Güllegrube beprobt worden. Von dieser Rohgülle sind mittels Filtration Dünngülle und Feststoffe bereitgestellt worden. Die Filtration erfolgte über Beutelfilter mit 1 mm Maschenweite. Bei dieser Fest-Flüssig-Trennung handelt es sich um eine Kuchenfiltration. Dies bedeutet, dass sich während der Filtration eine Feststoffschicht auf dem Filter aufbaut, die zusätzlich als Filter wirkt.

Aufgrund der TS- und Heizwertanalyse konnten die Heizwerte der Rohgülle mit den einzelnen Fraktionen aus der Separierung verglichen werden (Abb. 9). Für die in den Versuchen verwendete Mischgülle (Rohgülle) ergibt sich ein Heizwert von 434 MJ/t Rohgülle. Nach einer Separierung fallen daraus 291 MJ für die Dünngüllenanteil und 143 MJ

für die Feststoffanteil an. Damit liegen 67 % der Energiemenge von der Rohgülle in der Dünngülle vor.

In der Praxis erfolgt die Separierung in der Regel mit Siebpressschnecken. Bei diesem Gerät wird der Feststoff während des Trennvorgangs an einer Siebfläche entlang gefördert. Dabei wird der Feststoff kontinuierlich entwässert und gleichzeitig eine sich aufbauende zu mächtige Filterschicht auf der Siebfläche verhindert. Dies führt dazu, dass keine Kuchenfiltration erfolgt und damit vermehrt Feinstpartikel in die Dünngülle gelangen können. Folglich ist der Abtrenngrad an TS und OTS geringer als jener bei der Trennung mit Beutelfiltern.



**Abbildung 9:** Energiegehalt und –anteile von Rohgülle (Mischgülle), Feststoff und Dünngülle, Berechnungsbasis: 1'000 kg Mischrohgülle

## 6 Diskussion

### 6.1 Rohgülle

Verglichen mit den Daten aus den Grundlagen zur Düngung im Acker- und Futterbau [GRUDAF 2009] fällt bei der Schweinerohgülle der hohe Verdünnungsgrad mit 1 : 1.7 auf, der aufgrund des TS-Gehalts von 1.8 % gegenüber 5 % berechnet werden kann (Tab. 7). Die OTS-Menge von knapp 12 kg/m<sup>3</sup> entspricht 89 % der unverdünnten Gülle, was auf einen entsprechenden Abbau in der Lagergrube hindeutet. Der Grund dürfte darin liegen, dass diejenige Mastschweinegülle, die im Stall anfällt, vor dem Ablassen in die Grube in einem Kanal während ca. 50 bis 60 Tagen zwischengelagert wird.

Den Lagereinfluss auf das Gasbildungspotential hat [Baserga 1996] anhand von frischem und gelagertem Mist mit 340 gegenüber 160 l/kg OTS dargelegt. Eine vergleichbar geringe Gasausbeute wurde bei Schweinerohgülle im Labor mit knapp 170 l/kg OTS nachgewiesen.

Bei den Nährstoffgehalten liegt das K<sub>2</sub>O mit anteilmässig 99 % bei den Gehalten der unverdünnten Gülle. Für N<sub>tot</sub>, NH<sub>4</sub> und P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> liegen die Werte bei 85 %, 69 % und 72 %. Beim Stickstoff lassen die geringeren Mengen auf entsprechende Verluste schliessen.

**Tabelle 7:** Gehalte in der Schweine- bzw. Rinderrohgülle im Vergleich mit den GRUDAF-Daten

Parameter		TS	OTS	N <sub>tot</sub>	NH <sub>4</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Einheit		kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	g/m <sup>3</sup>	g/m <sup>3</sup>	g/m <sup>3</sup>	g/m <sup>3</sup>
Schwein	Durchschnitt	18.2	11.7	1848	1053	995	1586
Rind	Durchschnitt	43.2	31.7	1986	685	770	3206
Schwein	GRUDAF	50.0	36.0	6000	4200	3800	4400
Rind	GRUDAF	90.0	70.0	4300	2300	1800	8000

Die Rindviehgülle weist einen Verdünnungsfaktor von etwa 1 : 1 auf. Die Gehalte weichen vor allem beim NH<sub>4</sub> von den Werten gemäss GRUDAF ab. Der geringe NH<sub>4</sub>-Gehalt ist nicht erklärbar, da der N<sub>tot</sub>-Gehalt mit dem Verdünnungsgrad multipliziert praktisch den GRUDAF-Werten entspricht.

Die Rindviehrohgülle hat im Labor im Batchansatz während 21 Tagen etwa 270 l/kg OTS Biogas gebildet. Nach [Wellinger 1991] liegen die Werte der Gasausbeute von Milchviehgülle nach 21 Tagen bei 260 bis 270 l.

Die Verdünnung der Gülle mit Wasser ist in der Schweiz, insbesondere im Futterbauggebiet verbreitet. Für eine Behandlung der Rohgülle führen grosse Wassermengen zu höheren Kosten. Ein allfälliger Abbau der OTS vor der Vergärung mindert die Leistungsfähigkeit einer energetischen Nutzung der Gülle.

Die Qualitätsanforderungen bezüglich Schwermetallgehalte werden von der Rinderrohgülle eingehalten (Tab. 8). Die Schweinegülle hingegen enthält beinahe das Doppelte an Cu und dreimal soviel Zn wie vorgeschrieben!

**Tabelle 8:** Schwermetallgehalte in der Schweine- bzw. Rinderrohgülle im Vergleich mit den Qualitätsanforderungen (ChemRRV, Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung)

Parameter	Pb	Cd	Cu	Ni	Zn	Hg
Einheit	mg/kg TS					
Schwein	<12	0.72	196.23	10.51	1219.18	0.10
Rind	<12	0.19	30.19	6.31	145.37	0.09
ChemRRV	120	1	100	30	400	1

## 6.2 Dünngülle

Die Dünngülle weist grosse Schwankungen im TS- und OTS-Gehalt auf (Abb. 10). Höhere Gehalte sind zu Beginn der Versuche, Juni – Juli 2009, Mitte November 2009 (152. Versuchstag) sowie Mitte März 2010 (271. Versuchstag) zu verzeichnen. Im Sommer kann davon ausgegangen werden, dass die Rohgülle mit Niederschlagswasser verdünnt wird, weshalb die Gehalte tendenziell sinken. Gegen Ende des Jahres und im Winter, wenn keine Gülle ausgebracht werden kann, wird soweit möglich auf eine Verdünnung der Gülle

verzichtet, was steigende Gehalte zur Folge hat. Die hohen TS- bzw. OTS-Gehalte am 152. Versuchstag dürften auf die Probennahme zurückzuführen sein.

Die Vergärung von Dünngülle wird als Variante zusammen mit Klärschlamm oder auch in einem Verfahren mit einer weitergehenden biologischen Nährstoffelimination von [Döhler 1999] beschrieben. Für den Biomasserückhalt im Fermenter wurde beispielsweise ein Schlammbettreaktor als am besten geeignet ermittelt. Die HRT liegt für Schweinedünngülle bei 5 Tagen. Für ein weiteres Verfahren ist nach der Separierung die Dünngülle (Schweine- u. Rindergülle) in einem Festbettreaktor bei einer HRT von 5 Tagen vergoren worden.

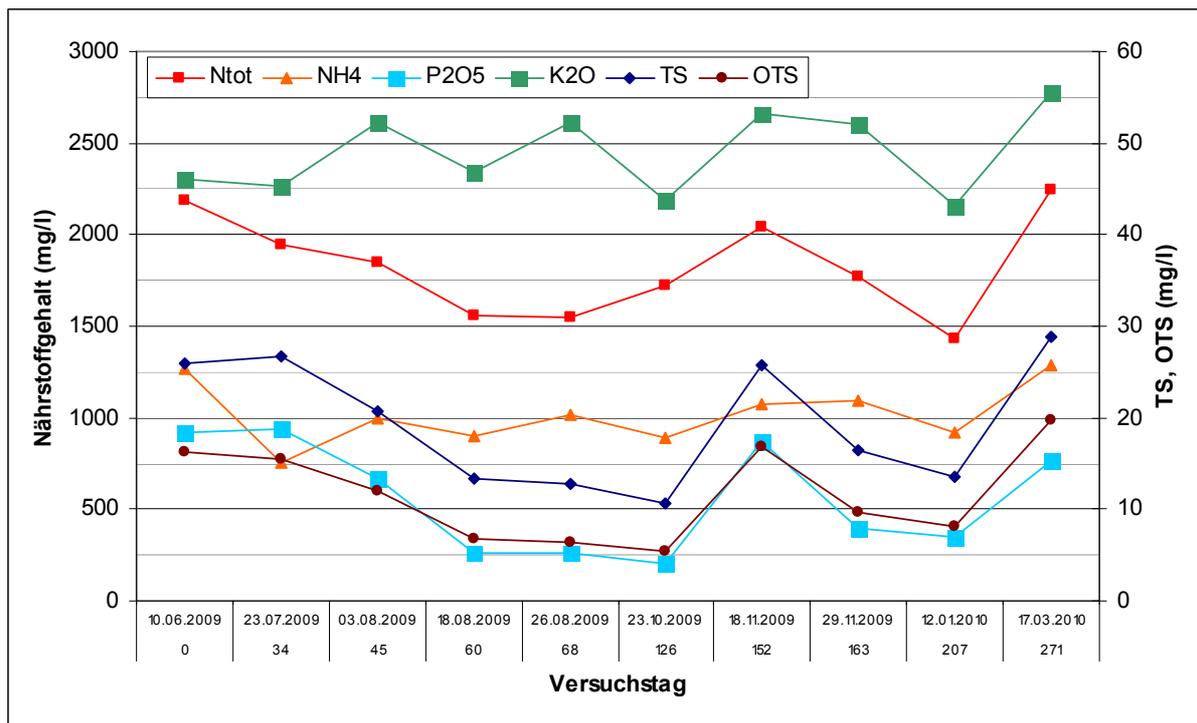


Abbildung 10: Verlauf der Gehalte in der Dünngülle

### 6.3 Separierung

Die Separierung der Rohgülle ist eine bekannte Massnahme zur Verbesserung der Gülleeigenschaften. In der landwirtschaftlichen Praxis werden hauptsächlich Pressschneckenseparatoren verwendet. Diese Geräte weisen eine Nachentwässerung der Feststoffe auf. Somit lassen sich je nach Gülleart und Geräteeinstellung Feststoffe mit einem TS-Gehalt von mehr als 30 % herstellen. Das für die Versuche eingesetzte Bogensieb verfügt über keine Nachentwässerung und produziert deswegen Schlamm mit rund 10 % TS anstatt Feststoffe. Als Folge davon werden auch mehr Nährstoffe, etwa 30 % an N, P und K gegenüber rund 20 % bei einer Pressschnecke, mit dem Schlamm abgetrennt.

In der Praxis sind Fest-Flüssig-Trennverfahren im Zusammenhang mit der Vergärung als nachgeschaltete Behandlungsstufe des Gärsubstrats verbreitet. Das flüssige Separat wird beispielsweise bei der Vergärung von trockensubstanzreichen Substraten zur Verdünnung und gleichzeitig als Impfmaterail verwendet [Schulz 1996].

Eine andere in der Praxis seltene Anwendung der Separierung ist die Eliminierung von Grobstoffen vor der Vergärung. Aus der Partikelverteilung geht hervor, dass mittels der Separierung vor allem die groben Festpartikel ab mehr als 300 Micron (0.3 mm) abgetrennt werden [Hepherd 1975]. In Laborversuchen konnte Kolisch 1994 nachweisen, dass bei der Vergärung von Schweinedünngülle gegenüber Schweinerohgülle der Feststoffanteil nur wenig anaerob abgebaut wird. Hingegen wird die in der Dünngülle vorrangig in gelöster Form vorliegende organische Substanz abgebaut. Eigene Untersuchungen bei der Separierung von Schweinegülle (vgl. Tab. 9) haben ergeben, dass die separierten Feststoffe wenig zur Biogasproduktion beitragen [Hersener, Meier 2002].

**Tabelle 9:** Gaserträge bei der Separierung von Schweinegülle [Hersener, Meier 2002]

Gasertrag Rohgülle	7.2 l Gas/l Gülle	0.27 l Gas/g TS
Gasertrag Dünngülle	6.8 l Gas/l Gülle	0.31 l Gas/g TS
Gasertrag Feststoff	0.03 l Gas/g Feuchtgewicht	0.087 l Gas/g TS

Wird das MBR-Verfahren mit einer UF direkt mit dem Biogasreaktor betrieben, ist eine Grobstoffabtrennung der Rohgülle erforderlich, damit ein sicherer Anlagenbetrieb der UF gewährleistet ist.

Im Fall einer Covergärung oder bei der Vergärung von Materialien, deren Grobstoffe im Wesentlichen zur Gasbildung beitragen, muss eine andere Prozessführung gewählt werden (vgl. Kapitel 9).

## 6.4 Ultrafiltration

Die Membranfiltration ist zur Behandlung von Gülle geeignet [Reimann 1993 und 1994, Meier 1995]. Die UF bezweckt die Abtrennung von OTS und deren Rückführung in den Fermenter. Dies verdeutlicht Tabelle 10 mit einem OTS-Abtrenngrad von mehr als 96 %.

**Tabelle 10:** Vergleich der mittleren Gehalte im UF-Retentat und UF-Permeat

Parameter Einheit	TS mg/l	OTS mg/l	Ntot mg/l	NH4 mg/l	P2O5 mg/l	K2O mg/l	DOC mg/l	TOC mg/l	CSB mg/l
UF-Retentat	63.7	41.7	3'874	1'343	3'440	2'635	2'400	7'538	66'922
UF-Permeat	6.56	1.56	1'380	1'254	42	2'344	638	778	2'096

Schwermetalle werden aufgrund ihrer Grösse tendenziell an der UF-Membran zurückgehalten und im UF-Retentat angereichert. Tabelle 11 zeigt, dass im UF-Retentat ausser beim Zn wegen der kontinuierlichen Entnahme von Schlamm aus dem Reaktor keine Anreicherung von Schwermetallen erfolgt.

**Tabelle 11:** Schwermetallgehalte in den verschiedenen Produkten im Vergleich zu den Qualitätsanforderungen (ChemRRV, Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung)

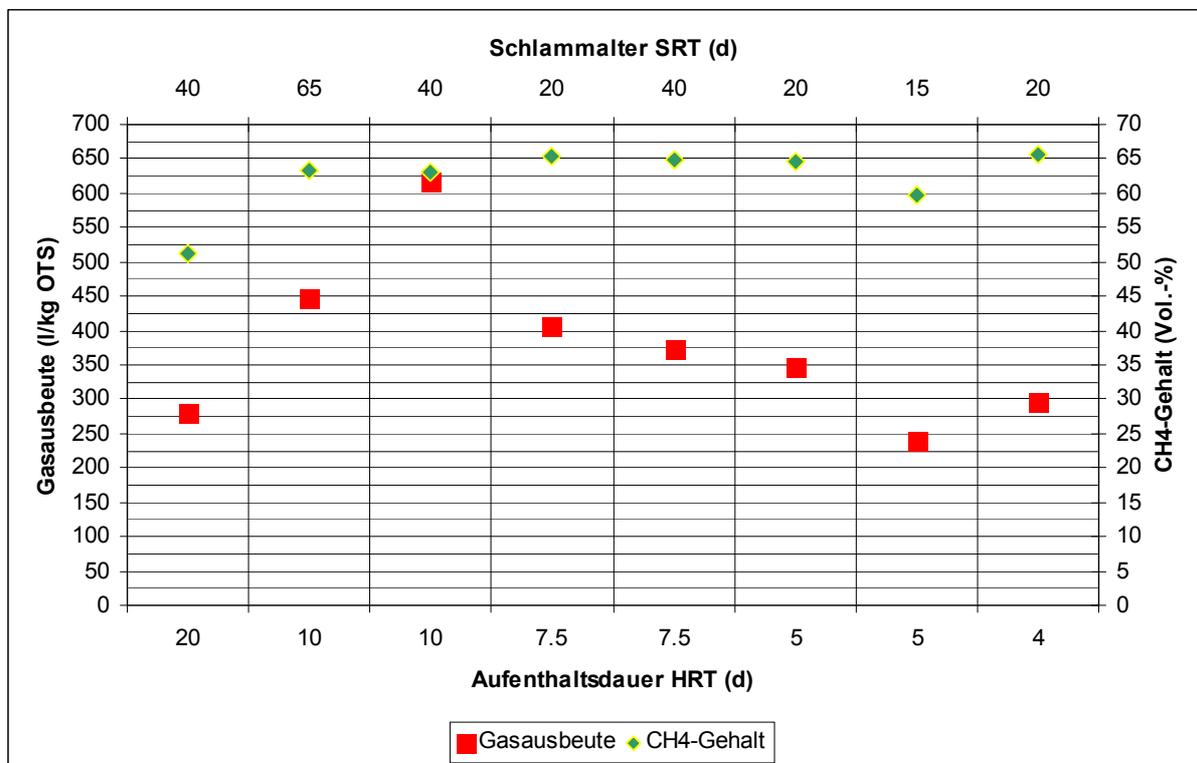
Material	Tier	Datum	Pb mg/kg TS	Cd mg/kg TS	Cu mg/kg TS	Ni mg/kg TS	Zn mg/kg TS	Hg mg/kg TS
Rohgülle	Schwein	10.06.2009	<12	0.72	196	11	1219	0.1
Rohgülle	Rind	10.06.2009	<12	0.19	30	6	145	0.1
Dünngülle	Mischung	12.01.2010	<12	0.33	74	8	454	<0.1
UF Retentat	Mischung	30.09.2009	<12	0.72	147	37	804	<0.1
UF Retentat	Mischung	12.01.2010	<12	0.66	158	29	1100	<0.1
UF Permeat	Mischung	12.01.2010	<12	<0.1	<10	11	<40	<0.1
ChemRRV			120	1	100	30	400	1

Verglichen mit den Vorschriften werden hingegen bei Cu und Zn die Gehalte überschritten, was auf die entsprechend hohen Werte in der Schweinerohgülle zurückzuführen ist.

Falls eine Vermarktung des UF-Retentats angestrebt wird, müsste der Anteil an Schweinegülle reduziert oder die Fütterung angepasst werden.

## 6.5 Vergärungsprozess

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Vergärungsversuche im MBR ist ersichtlich, dass der Abbauprozess auch bei kurzen Aufenthaltszeiten von 4 Tagen stabil abläuft. Der pH-Wert liegt um 7.6, die Gasqualität ergab Volumenanteile für CH<sub>4</sub> von 63 bis 66 % bzw. für CO<sub>2</sub> von 32 bis 33 %. Die Gasmenge schwankte aufgrund der unterschiedlichen Konzentrationen in der Dünngülle.



**Abbildung 11:** Vergärungsversuche mit Mischdünngülle im MBR

Der Versuch mit einer HRT von 5 Tagen und einer SRT von 15 Tagen (vgl. Abb. 11) weist darauf hin, dass das Schlammalter auf die Prozessstabilität einen Einfluss hat. Indizien, wie

die Abnahme im CH<sub>4</sub>-Gehalt mit gleichzeitigem Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehalts im Gas sowie ein Rückgang in der produzierten Gasmenge sprechen für eine Verschlechterung des biologischen Prozesses. Der Versuch wurde daher vorzeitig abgebrochen.

Eine Hypothese bei der Vergärung von Gülle im MBR ist die Möglichkeit mit der Trennung von HRT und SRT einen zusätzlichen Umsatz an schlecht bzw. langsam abbaubarer OTS zu erreichen. Nach bisherigen Erkenntnissen führt eine SRT von mehr als 40 Tagen zu keiner Zunahme der Gasproduktion wie aus den Versuchen mit einer HRT von 10 Tagen und einer SRT von 65 Tagen im Vergleich zum Versuch mit gleicher HRT und einer SRT von 40 Tagen zeigt (Abb. 11).

Eine Verringerung der HRT und damit eine Erhöhung der Raumbelastung führen zu einer abnehmenden Gasausbeute. In Reaktoren ohne Biomasserückhalt wird berichtet, dass Mindestverweilzeiten von 10 Tagen nicht unterschritten werden sollen, damit die Prozessstabilität gewährleistet werden kann [Wellinger 1991]. Mit dem MBR kann die HRT auf 4 Tage verkürzt werden. Allerdings sinkt die Gasausbeute auf 300 l/kg OTS bei einer Raumbelastung von 4 kg OTS/ m<sup>3</sup> · d.

Kurze Verweilzeiten sind mit Reaktoren in denen Einbauten zur Ansiedelung der Bakterien dienen, erzielbar. Beispielsweise wird bei sogenannten anaeroben Biofiltrationsverfahren von 15 Stunden und weniger berichtet [Konstandt in Stadlbauer 1982].

Eine grobe OTS-Bilanzierung für den Versuch mit einer HRT von 10 d und einer SRT von 40 d ergibt bei einem Fermenterinhalt von 1'250 l einen OTS-Eintrag von ca. 2.5 kg/d und einen OTS-Austrag von 1.5 kg/d als Biogas bzw. 1.3 kg als UF-Retentat und UF-Permeat. Die Abweichung von etwa 10 % ist vermutlich auf die Probenahme und die Gehaltsschwankungen zurückzuführen.

## 7 Leistungsvergleich konventioneller Rührkessel mit MBR

Zur Beurteilung des MBR-Verfahrens mit der konventionellen Vergärung im Rührkessel wurden die Werte aus den Versuchen mit der MBR-Versuchsanlage verwendet. Als Berechnungsbasis sind 1'000 l Rohgülle angenommen worden. Mit den in der Tabelle 12 verwendeten Daten erzielt das Rührkesselverfahren bei einer Gasausbeute von 266 l/kg OTS 4'190 l CH<sub>4</sub> pro m<sup>3</sup> Rohgülle entsprechend 100 %. Im MBR-System gelangt separierte Dünngülle. Bei einem berechneten Feststoffvolumen von 5 % werden 950 l Dünngülle im System vergoren. Der TS-Abtrenngrad ist mit 30 % kalkuliert, was bei einer Gasausbeute von 616 l/kg OTS einen Methanertrag von 169 % bezogen auf die dem Vergärungssystem zugeführte OTS-Menge ergibt.

Nach [Hersener 1998] beträgt der Energieinhalt (H<sub>v</sub>) von Güllefeststoffen 15.4 MJ pro kg TS, was etwa 4.2 kWh entspricht. Beim Rührkessel liegt die Energieeffizienz bezogen auf den System-Input bei 27 % im Vergleich zum MBR mit 65 %. Die Gesamteffizienz bleibt beim Rührkessel bei 27 % beim MBR hingegen fällt die Effizienz auf knapp 46 %, da mit der Separierung ein Teil der TS bzw. OTS in Form der Feststoffe nicht in die Vergärung gelangt.

**Tabelle 12:** Leistungsvergleich von konventioneller Vergärung und MBR

Parameter	Einheit	konv. RK	MBR
Rohgülle	l	1000	-
Dünngülle	l	-	950
TS	g/kg	36.2	25.3
OTS	g/kg	26.0	18.2
Gasausbeute	l/kg OTS	266.1	616.9
Gasmenge	l	6926	11241
Methangehalt	Vol.-%	60.5	63.1
Methanmenge	l CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup>	4190	7091
Methanertrag	relativ	100%	169%
Heizwert	kWh	154.2	107.9
Gasertrag	kWh	41.8	70.7
Energieeffizienz	System-Input	27.1%	65.5%
Gesamteffizienz	relativ	27.1%	45.8%

Einen wichtigen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Vergärung von Gülle übt die OTS aus. In den Versuchen wurde Rohgülle eingesetzt, die gelagert war und deswegen ein Abbau der OTS stattfand. Aufgrund der Gehaltsanalysen kann davon ausgegangen werden, dass bei frischer Gülle eine weitere Leistungssteigerung von 10 % angenommen werden kann. Demzufolge würde die Gesamteffizienz beim Rührkessel auf rund 30 % und beim MBR auf gegen 50 % ansteigen.

## 8 Wirtschaftlichkeit

### 8.1 Grundlagen

Für die Kostenkalkulation sind das MBR-System (MBR) und das konventionelle Rührkesselverfahren (konv. RK) mit unterschiedlichen GÜllemengen, 15'000, 30'000 und 35'000 m<sup>3</sup>/Jahr, entsprechend etwa 400, 800 bzw. 900 GVE, verglichen worden (Tab. 13).

Die Kalkulationen beziehen sich ausschliesslich auf die Vergärung von Gülle ohne zusätzliche Substrate, wie landwirtschaftliche Reststoffe oder Abfälle aus der Lebensmittelverarbeitung.

Die Arbeitskosten sind mit Fr. 42.- pro Stunde auf der Basis eines ausserlandwirtschaftlichen Arbeitseinsatzes gemäss Maschinenkosten der ART kalkuliert [Gazzarin 2009]. Für die UF sind organische Membranen vorgesehen, die für die Behandlung von Gülle geeignet sind. Die Variante mit 35'000 m<sup>3</sup> im Jahr wurde gewählt, weil unter optimalen Voraussetzungen bezüglich Durchsatzleistung an der Membran (Flux) die UF ein Kostenoptimum erreicht. Die Vergütung für die Stromeinspeisung bzw. für die Wärmeverwertung basieren auf der Richtlinie kostendeckende Einspeisetarife [KEV, 2010]. Das Nachgärlager ist ein Bestandteil der Vergärung, wobei beim MBR nur für 5 % der Rohgülmengen Lagerraum zur Verfügung gestellt werden muss. Das UF-Permeat benötigt kein Nachgärlager.

**Tabelle 13:** Grundlagen für die Kostenkalkulation

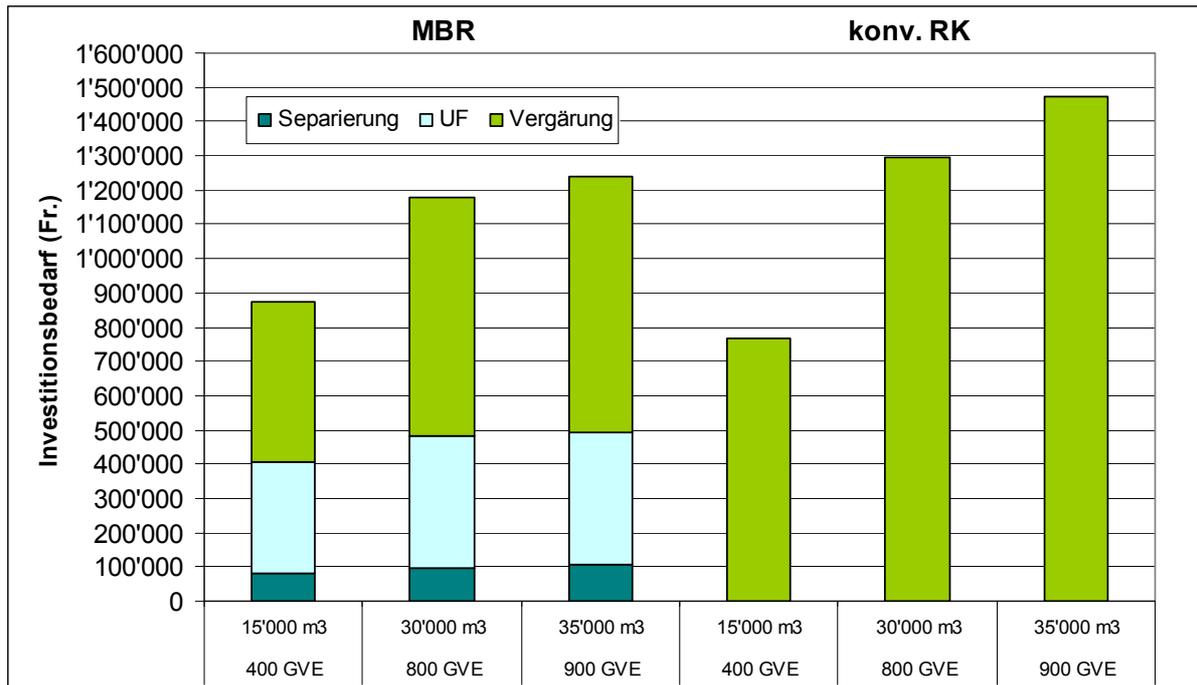
Parameter	MBR	konv. RK	Einheit
Abschreibung Anlagenteile	10	10	Jahre
Abschreibung Bauten	20	20	Jahre
Kapitalzins (auf Gesamtinvestition)	4	4	%
Versicherung (auf Gesamtinvestition)	1	1	%
Arbeitskosten (Lohnansatz ohne Verpflegung)	42.-	42.-	Fr./h
Stromkosten (Anlagenbetrieb)	20	20	Rp./kWh
UF:			
Membran	Organisch	-	Material
Membranlebensdauer	3	-	Jahre
Vergütung für Stromeinspeisung	39	39	Rp./kWh
Vergütung für Wärmeverwertung (Wärmebonus)	2	2	Rp./kWh
Rohgülleverdünnung	1 : 1	1 : 1	Faktor
OTS-Gehalt in der Rohgülle	-	26	kg/m <sup>3</sup>
OTS-Gehalt in der Dünngülle	18.2	-	kg/m <sup>3</sup>
HRT	10	20	d
SRT	40	20	d

konv. RK = konventioneller Rührkessel

## 8.2 Investitionsbedarf und Betriebskosten

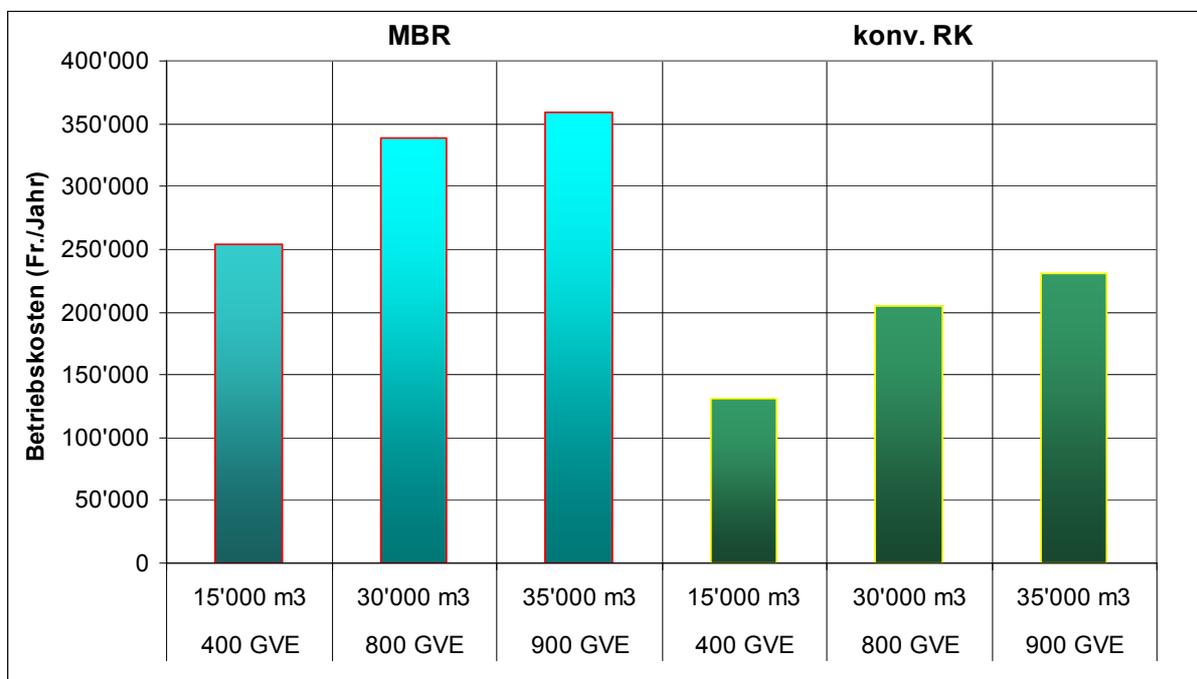
Bei einer Güllemenge von 15'000 m<sup>3</sup> im Jahr liegt der Investitionsbedarf inklusive Nachgärlager für das MBR-System bei rund Fr. 880'000.- und für das konventionelle Biogasverfahren bei Fr. 770'000.- (vgl. Abb. 12). Werden 35'000 m<sup>3</sup> Gülle pro Jahr verarbeitet, betragen die Investitionskosten für den MBR etwa Fr. 1'200'000.- bzw. für das Rührkesselverfahren Fr. 1'470'000.-.

Das MBR-Verfahren weist im Vergleich zum konventionellen Rührkesselsystem bei 15'000 m<sup>3</sup> Gülle im Jahr einen um rund 15 % höheren Investitionsbedarf auf. Mit zunehmender Güllemenge tragen die Kosten für das Nachgärlager zu höheren Investitionskosten der konventionellen Vergärung bei.

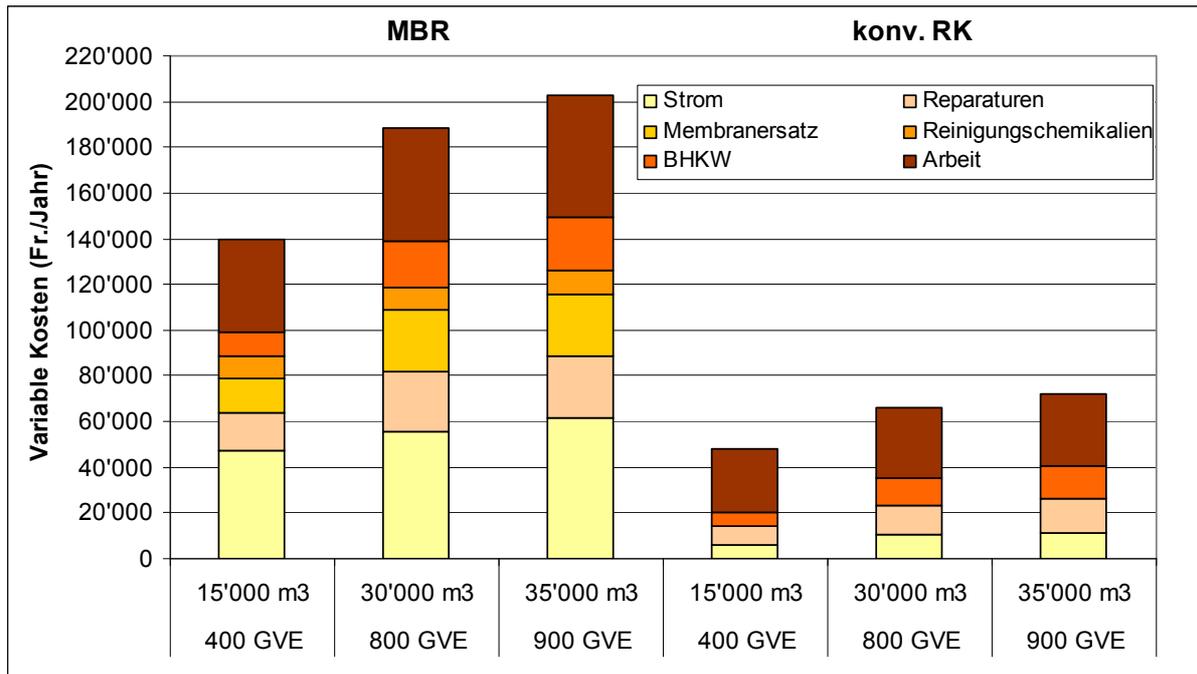


**Abbildung 12:** Investitionsbedarf des MBR-Verfahrens im Vergleich zum konventionellen Rührkesselverfahren

Die Betriebskosten des MBR liegen um gut Fr. 100'000.- pro Jahr über denjenigen des Rührkessels (Abb. 13).



**Abbildung 13:** Betriebskosten des MBR-Verfahrens im Vergleich zum konventionellen Rührkesselverfahren



**Abbildung 14:** Variable Kosten des MBR-Verfahrens im Vergleich zum konventionellen Rührkesselverfahren

Die variablen Kosten ohne die fixen Kosten in Abbildung 14 belaufen sich bei 15'000 m<sup>3</sup> Gülle im Jahr auf Fr. 140'000.- beim MBR im Vergleich zum konventionellen Biogasverfahren mit Fr. 48'000.-. Kosten von Fr. 210'000.- pro Jahr verursacht der MBR bei einer Güllemenge von 35'000 m<sup>3</sup> bzw. knapp Fr. 75'000.- beim Rührkessel.

Die variablen Kosten des MBR sind im Vergleich zum konventionellen Gärverfahren beinahe dreimal höher. Im Wesentlichen beeinflussen dabei die Energiekosten sowie die Reinigungs- und Membranersatzkosten für die UF die Höhe der Betriebskosten.

### 8.3 Kosten-Nutzenvergleich MBR mit konventioneller Vergärung

In Abbildung 15 sind die Betriebskosten der beiden Vergärungsverfahren mit den Erlösen aus der Stromvergütung und einem Wärmebonus bei einer allfälligen Wärmenutzung dargestellt.

Unter Anrechnung der Erlöse aus der Stromvergütung erzielen beide Verfahren bei 30'000 m<sup>3</sup> Gülle im Jahr einen Verlust von je rund Fr. 25'000.- pro Jahr. Bei zusätzlichem Erlös aus der Wärmeverwertung (Wärmebonus mit Rp. 2/kWh) resultiert ein Verlust von Fr. 9'000.- beim MBR bzw. von Fr. 15'000.- beim Rührkessel.

Das MBR-Verfahren erzielt einen Gewinn von Fr. 7'000.- mit der Stromvergütung bzw. Fr. 25'000.- pro Jahr inklusive Wärmebonus bei der Verarbeitung von 35'000 m<sup>3</sup> Gülle im Jahr. Das konventionelle Vergärungssystem hingegen erzielt einen Verlust von etwa Fr. 14'000.- mit Stromvergütung bzw. Fr. 2'000.- im Jahr inklusive Wärmebonus.

Um das Kosten-Nutzen-Verhältnis zu verbessern, müsste die Behandlung der schlecht biologisch abbaubaren Substanzen in Betracht gezogen werden. Dies könnte einerseits bei

der Rohgülle, beispielsweise über eine Vorversäuerung oder mittels einer entsprechenden Behandlung des UF-Retentats erfolgen.

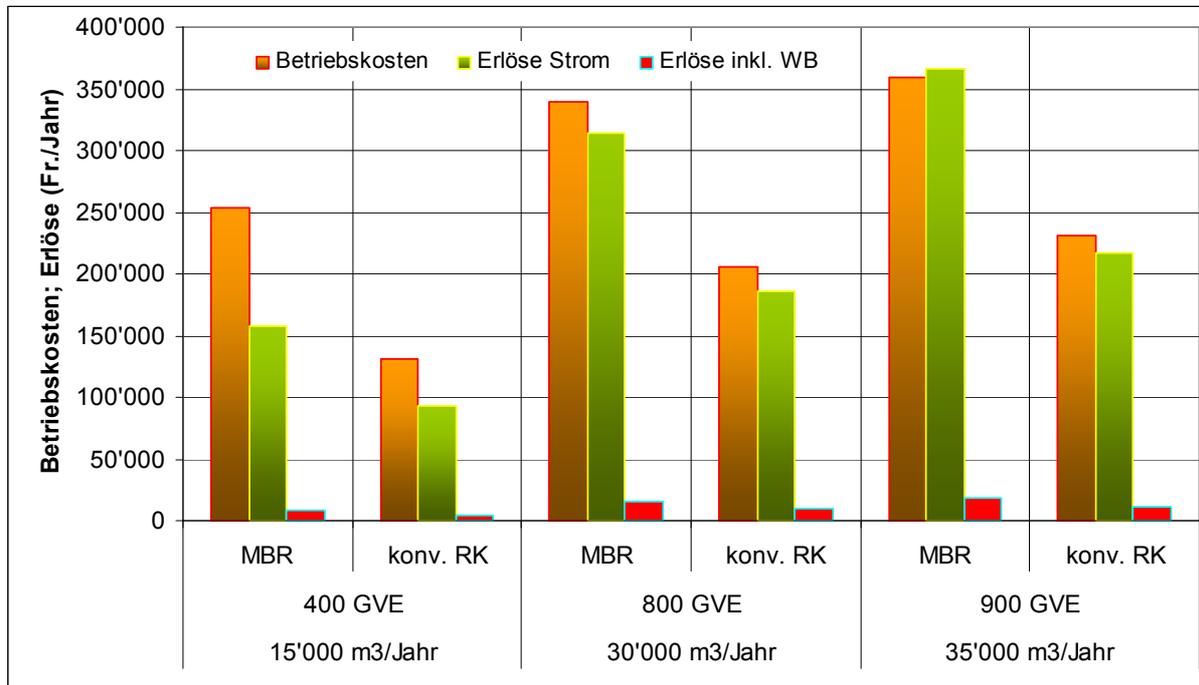


Abbildung 15: Vergleich Kosten und Erlöse

## 9 Implementierung

Die Membrantrennung ist für die Aufbereitung von Gülle geeignet [Meier 1995]. Diverse Membrantrennanlagen mit UF und RO (Umkehrosmose) zur Behandlung von Gülle bzw. Gärsubstrat konnten mittlerweile in der Praxis realisiert werden.

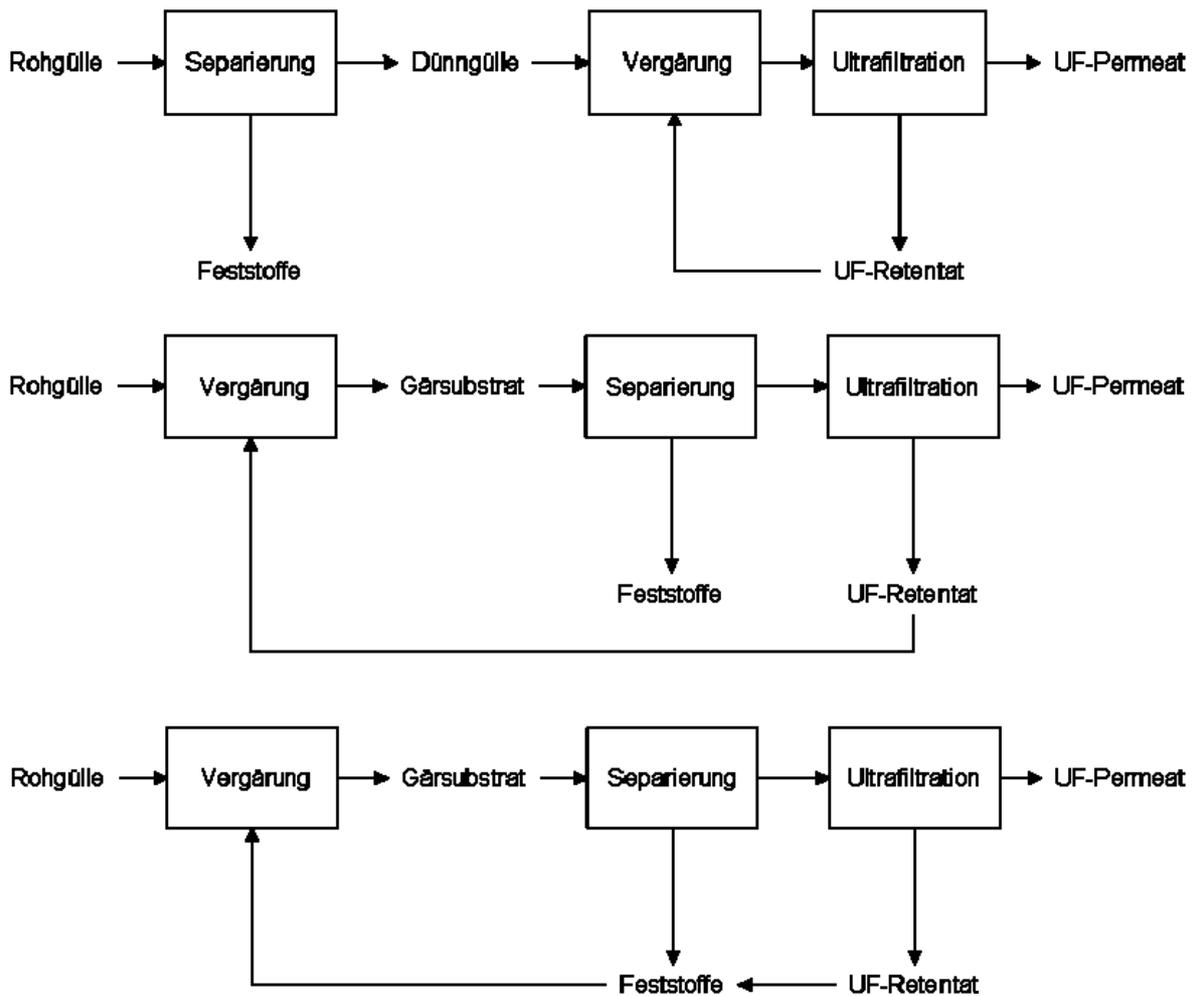
Das MBR-Verfahren ist verfahrenstechnisch machbar [Hersener 2007] und die Praxistauglichkeit konnte in den Versuchen mit der MBR-Versuchsanlage nachgewiesen werden.

Aufgrund der erforderlichen Rohgüllemengen von etwa 30'000 m<sup>3</sup> und mehr im Jahr kommen nur überbetrieblich genutzte Anlagen in Betracht.

In Abbildung 16 sind 3 verschiedene Konzepte zur Implementierung des MBR-Systems bei der Vergärung von Gülle dargestellt.

Das oben aufgezeigte Konzept basiert auf dem klassischen MBR-Verfahren mit einer Vorbehandlung der Rohgülle über eine Separierung und einer Vergärung mit direkt betriebener UF. Vorteile dieser Prozessführung sind die Ausschleusung hemmender Substanzen und das geringere Fermentervolumen. Nachteilig wirkt sich aus Sicht einer Energieertragsmaximierung der Verlust an OTS in Form der Feststoffe aus.

Das 2. Konzept in der Mitte der Abbildung 16 umfasst eine konventionelle Vergärung der gesamten Gülle. Nach der Vergärung wird das Gärsubstrat separiert und die Gärdünngülle über die UF weiterbehandelt. Das UF-Retentat gelangt zurück in den Fermenter. Da bei der Separierung nicht alle Bakterien und nicht alle umgesetzten organischen Bestandteile abgetrennt werden, kann davon ausgegangen werden, dass ein Teil davon mit der UF zurück in den Fermenter geführt wird. Die Leistungsfähigkeit betreffend produzierte Gasmenge liesse sich dadurch noch weiter steigern.



**Abbildung 16:** Konzepte zur Implementierung des MBR-Systems

Das 3. Konzept ist mit dem 2. vergleichbar, wobei die Feststoffe mit dem UF-Retentat zusammen in den Reaktor zurückgeführt werden. Mit dieser Variante könnte eine Energiemaximierung erreicht werden.

Bei der Covergärung kann das klassische MBR-System (Abb. 16 oben) nicht umgesetzt werden. Grobpartikel würden zu einer Verstopfung der UF-Membranen führen. Die beiden anderen Verfahrenskombinationen hingegen liessen sich in der Praxis auch mit Cosubstraten umsetzen.

Die Möglichkeiten einer Covergärung mit dem MBR-Verfahren werden detaillierter in einer späteren Projektphase untersucht.

## 10 Folgerungen

Nach derzeitigem Kenntnisstand kann über das MBR-Verfahren zur Vergärung von Mischdüngülle, 50 Massen-% Rinder- und 50 Massen-% Schweinegülle, folgendes festgehalten werden:

- Aus verfahrenstechnischer Sicht ist der MBR bis 6.5 % TS im UF-Retentat (Reaktorinhalt) ein betriebsicheres Verfahren.
- Die Ultrafiltration trennt praktisch die gesamte OTS ab und damit ist eine Rückführung in den Reaktor möglich.
- Prozesstechnisch sind bisher keine Hemmungen durch die UF-Retentatrückführung aufgetreten.
- Die höchste Gasausbeute mit 617 l/kg OTS wurde bei einer Aufenthaltsdauer von 10 Tagen und einem Schlammalter von 40 Tagen erzielt. Die Rohgülle erreicht dagegen 266 l/kg OTS bei einer Aufenthaltsdauer von 20 Tagen.
- Eine schnellere Vergärung mit einer Aufenthaltsdauer von bis zu 4 Tagen und einer Gasausbeute von 296 l/kg OTS ist möglich.
- Durch Einstellung eines entsprechenden Schlammalters können die TS-Konzentration und die Nährstoffgehalte im UF-Retentat konstant gehalten werden.
- Ein Schlammalter von 20 d ist für die Gewährleistung stabiler Prozessbedingungen nicht zu unterschreiten.
- Das UF-Permeat weist konstante Nährstoffgehalte auf und enthält vor allem Ammonium- und Kalisalze sowie wenig Phosphor.
- Die Hygiene des UF-Permeat ist einwandfrei.

## 11 Kommunikation

Der Standort der Versuchsanlage an der Eidg. Forschungsanstalt (ART) in Tänikon bietet die Gelegenheit das MBR-Verfahren einem breiten Publikum zu präsentieren.

Folgende Anlässe wurden genutzt:

- Tag der offenen Tür vom 6. September 2009
- Bautagung, 17./18. November 2009
- Agrartechniktage, 16. Juni 2010
- Diverse Führungen für in- und ausländische Fachleute, Anlagenbetreiber und Firmen

Weiter wurde das Projekt in weiteren Publikationen und Vorträgen vorgestellt:

- Posterpräsentation anlässlich der Verleihung des „Swiss Electric Research Award 2009“, 16.9.2009 in Bern.
- ETG-Tagung, 20.10.2009, „Automatisierung in der Sekundärtechnik“, organisiert vom SEV (Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik): Steuerungstechnologie bei Biogasanlagen, U. Meier
- Landfreund 1/2010: Artikel „Biogas wie bisher – nur mit fünfmal kleinerer Anlage“, Autor: Paul Müri

- Biogas wie bisher – nur 5 mal kleiner. Transfer, 3, 12.09 (zhaw interne F&E Zeitschrift, erscheint 2 – 4 mal jährlich, U. Baier, 2009)
- Bulletin des SEV, Novemberausgabe 2010: Der Membran-Bio-Reaktor ein neues Verfahren zur Steigerung der Effizienz bei der Vergärung von Gülle“; U. Meier, J.-L. Hersener
- In Vorbereitung: Projektpräsentation/Interview in ENERGEIA, der Zeitschrift des Bundesamtes für Energie
- Separation of hydraulic and biomass retention time in high rate membrane biodigesters. 5th Czech-Swiss Biotechnology Symposium, June 15.-17.2011, Prague, CZ (zugesagt), Baier et al. 2011.
- Beitrag in der Zeitschrift *Umweltperspektiven*, zugesagt, zeitlich noch nicht fixiert. Baier et al, 2011.

## 12 Ausblick

Das MBR-System eröffnet neue Perspektiven einerseits im Umgang mit Gülle andererseits bei der Biogasproduktion. Es besteht die Möglichkeit die energetische mit der stofflichen Nutzung zu kombinieren. Die Effizienz der Vergärung lässt sich steigern, was die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens erhöht.

Aus verfahrenstechnischer Sicht ist das MBR-Verfahren mit Gülle betriebssicher. Der klassische MBR ist für partikelfreie Flüssigkeiten geeignet. Mit entsprechenden Anpassungen der einzelnen Prozessstufen kann auf unterschiedliche Inputmaterialien flexibel reagiert werden. Somit können auch feststoffreiche Inputmaterialien behandelt werden.

Die Anforderungen an die Mess-, Steuer- und Regeltechnik (MSR) sind hoch, aber gleichzeitig trägt diese Technik für einen biologisch und technisch sicheren Betrieb bei. Neue Ansätze mit Hilfe der MSR-Technik den biologischen Prozess weiter zu optimieren, beispielsweise konstante RB im Reaktor zu fahren, könnten die Leistungsfähigkeit des Systems noch weiter steigern helfen.

Aus Sicht einer Maximierung der Energieausbeute können mehrere Behandlungsvarianten in Betracht gezogen werden. Eine Variante stellt die Vorversäuerung des Inputmaterials, eine andere die Nachbehandlung des UF-Retentats dar. Eine weitere Möglichkeit könnte die Unterteilung der Vergärung in eine Flüssig- und Feststofflinie bieten.

Im aktuellen Projekt MBR-II sind weitere Versuche zur Vergärung von UF-Retentat an Stelle von Dünggülle vorgesehen. Auch hiermit könnten neue Erkenntnisse zu einer Optimierung der Vergärung von Gülle beitragen.

## Literaturverzeichnis

Baserga U., Neukomm H., Co-Vergärung von Festmist und verschiedenen landwirtschaftlichen Abfallprodukten in einer Flüssigbiogasanlage, im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE), Schlussbericht, 10 S., 1996.

Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV, Stand: 1. März 2010.

Gazzarin Ch., Albisser Vögeli G., Maschinenkosten 2009/2010, ART-Bericht Nr. 717, 48 S., 2009.

GRUDAF: Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau, Agroscope Changins-Wädenswil (ACW) und Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), 2009.

Hepherd R.Q., Experiments on slurry handling, treatment and land application at the N.I.A.E., 1968- 1974, Report no. 15, National Institute of Agricultural Engineering, West Park, Silsoe, Bedford, 24 S., 1975.

Hersener J.- L., Meier U., Membranbioreaktor, Forschung (MBR), Pilotanlage und Messkampagne, im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE), Schlussbericht, 48 S., 2007.

Hersener J.- L., Meier U., Vergleich von Energieumwandlungsverfahren für Gülle (ENKON), im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE), Schlussbericht, 97 S., 2002.

Hersener J.- L., Bühler R., Energetische Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse, Band 2, Energetische Nutzung von Hofdüngerbrennstoffen, im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE), 39 S., 1998.

KEV: Richtlinie kostendeckende Einspeisevergütung, Bundesamt für Energie (BFE), 16 S., 2010.

Kolisch G., Gemeinsame Stabilisierung von Klärschlamm und separierter Gülleflüssigkeit. In: Umweltverträgliche Gülleaufbereitung. KTBL, 20-32, 1994.

Meier U., Hartmann Chr., Güllenaufbereitung mittels Membrantrenntechnik, Forschungsanstalt Tänikon (FAT), Schlussbericht, 71 S., 1995.

Oettli, B. et al.: Potentiale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz, im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BfE), 2004.

Reimann W., Membrantrennverfahren zur Aufbereitung flüssiger landwirtschaftlicher Reststoffe, Forschungsbericht 8, Institut für Agrartechnik Bornim, 1994.

Reimann W., Dynamische Membrantrennverfahren, Landtechnik Nr. 12, 1993.

Schulz H., Biogas – Praxis, Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, ökobuch, 1. Aufl., 187 S., 1996.

Stadlbauer E. A., et al., Biogasanlagen, Band 103, Kontakt & Studium Energiewesen, expert verlag, 244 S., 1982.

Wellinger A., Baserga U., Edelmann W., Egger K., Seiler B., Biogas-Handbuch, Grundlagen – Planung – Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen, Verlag Wirz Aarau, 2. Aufl., 178 S., 1991.

## **Phasenbericht der Versuche an der MBR – Laboranlage - Vergärung von Dünngülle -**

Autor:  
Samuel Künzli  
Wissenschaftlicher Assistent, ZHAW

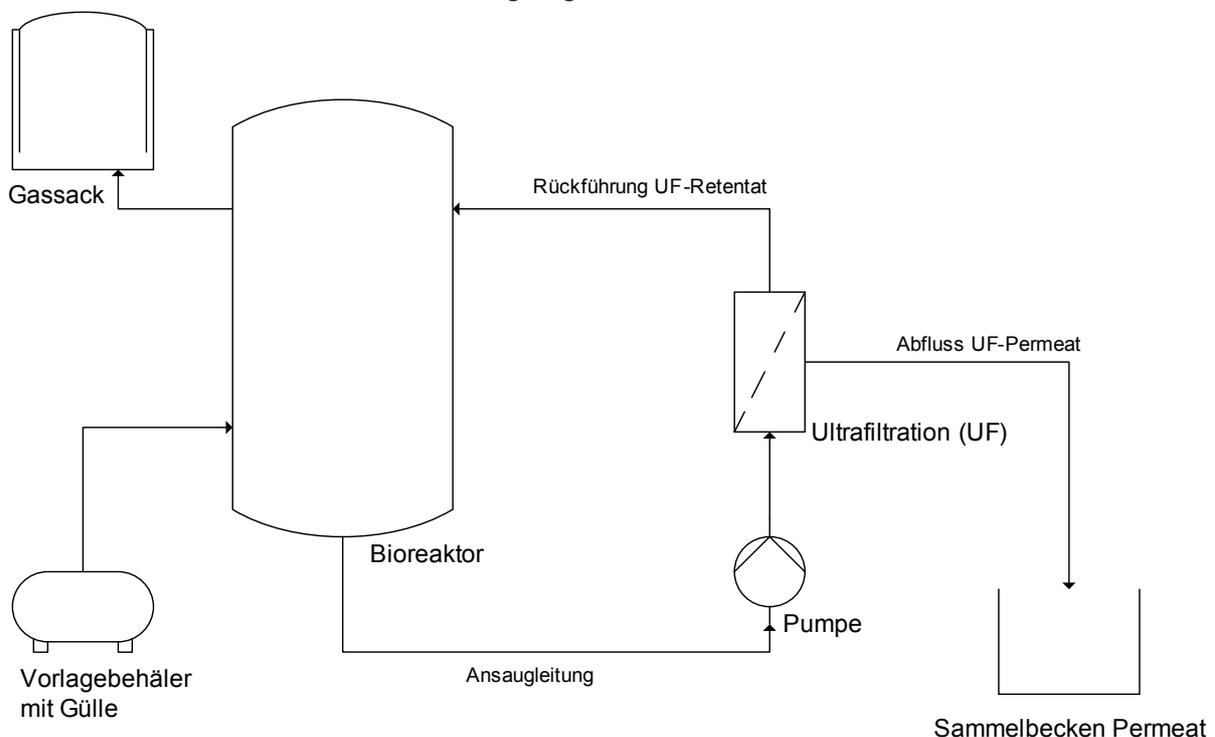
19.01.2011

## 1 Zielsetzung

An der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaft (ZHAW) am Standort Wädenswil wird zum MBR II Projekt ein Bioreaktor mit 30 l Inhalt gekoppelt an eine Ultrafiltrationsanlage betrieben. Das Ziel der Versuche an der Laboranlage ist es, die aktive Biomasse mit Hilfe der Ultrafiltration zurückzuhalten und die hydraulische Aufenthaltszeit (HRT) zu reduzieren um so auf kleinerem Volumen den gleichen oder allenfalls einen höheren Biogasertrag gegenüber einer Anlage ohne Biomasserückführung zu erzielen. In wie weit die Aufenthaltsdauer verkürzt werden kann ohne dass Prozesshemmungen auftreten, stellt eine weitere Fragestellung dar. Der Rückhalt an Biomasse, Mikroorganismen, soll nachgewiesen werden. Zusätzlich soll abgeklärt werden, ob ohne Entnahme von Schlamm aus dem Reaktor und damit eine theoretisch unendlich lange Schlammaufenthaltsdauer (SRT) zu einem weitergehenden Abbau an organischer Substanz (OTS) führt. Soweit möglich sollen die biologischen Grenzen des Systems aufgezeigt werden.

## 2 Material und Methode

Die Abbildung 1 zeigt die schematische Darstellung der Labor – Versuchsanlage. Eingesetzt wird ein Bioreaktor mit einem Volumen von 30 Liter, welcher an eine Ultrafiltration (UF) gekoppelt ist. Mit Hilfe einer Schneckenpumpe wird der Reaktorinhalt über einen Keramikfilter (< 100 kD) filtriert und das UF–Retentat zurück in den Reaktor geführt. Die dabei entstehende Umwälzung reicht für die Durchmischung des Reaktorinhaltes aus. Der Betrieb der Anlage und die Aufzeichnung einzelner Grössen werden über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) geregelt und aufgezeichnet. Das UF–Permeat wird in einem Sammelbecken zwischengelagert.



**Abbildung 1:** 30 Liter Labor-Versuchsanlage an der ZHAW in Wädenswil [1].

Von der verwendeten Dünngülle wird deren Gaspotential in Gasbildungsversuchen (GB 21) ermittelt.

Während des Betriebes des Bioreaktors werden weitere GB 21 Versuche mit unterschiedlichen Güllefraktionen als auch dem UF – Retentat und dem UF – Permeat durchgeführt. Die eingesetzte Gülle ist ein Gemisch aus gesiebter Schweine- und Rindergülle (1:1) und stammt aus der Forschungsanstalt in Tänikon (ART). Während der Versuchsdauer fällt die Gülle unterschiedlich an. In Tabelle 1 werden die Güllegehalte zusammenfassend aufgeführt.

**Tabelle 1:** Gehalte in der Dünngülle

Dünngülle	TOC [mg/l]	CSB [mg/l]	N (total) [mg/l]	NH <sub>4</sub> -N [mg/l]	P (total) [mg/l]	pH	TS [%]	OTS [in % d. TS]
Minimum	2710	10500	1295	905	111	7.2	1.1	55
Maximum	8550	28850	2430	1345	419	7.6	2.9	69
Durchschnitt	6368	21690	1846	1128	270	7.3	2.1	66.7

Der Reaktor wurde mit 6 l Schlamm aus den GB 21 Versuchen als Inokulum und 14 l frischer Dünngülle gestartet. Es werden Gärversuche mit unterschiedlicher HRT und verschiedener SRT durchgeführt. Begonnen wird mit einer HRT von 20 Tagen und es wird kein Schlamm entnommen, was einem unendlichen Schlammalter entspricht. In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die verschiedenen Versuche aufgeführt. Die Betriebstemperatur des Reaktors liegt im mesophilen Bereich bei rund 37°C.

**Tabelle 2:** Durchgeführte Versuche im Laborreaktor

Versuchstage	Versuchsbedingungen	Bemerkungen
0 bis 60	HRT 20 d, SRT ∞	Einfahren der Anlage, Aufbau Biomasse
60 bis 134 (67 bis 85)	HRT 4 d, SRT ∞	diverse Unterbrüche, da Probleme mit der Pumpe; längste Betriebsphase am Stück waren 18 Tage (67. bis 85. Versuchstag)
134 bis 148	Batchbetrieb	
148 bis 313	HRT 4 d, SRT ∞	Havarie Tag 186
313 bis 378	HRT 4 d, SRT 60 d	-
378 bis 429	HRT 7 d, SRT 60 d	-
429 bis 455	HRT 2.5 d, SRT 60 d	-
ab 455	HRT 2.5 d, SRT 30 d	Noch am laufen

## 3 Resultate

### 3.1 Vorversuche

Um das Gaspotential des Substrates zu ermitteln, wurden Gasbildungsversuche über jeweils 21 Tage, kurz GB21 durchgeführt. Neben der Dünngülle (1:1 Rinder- und Schweingülle)

wurden auch Batchversuche mit einzelnen GÜllefraktionen aus der RohgÜlle (Rinder- und SchweinegÜlle separat) gemacht. Von der RohgÜlle wurden über ein Bogensieb mit einer Maschenweite von 0.5 mm die Feststoffe abgetrennt (vgl. Tab. 3). Diese wurden ausgepresst (Feststoff gepresst) um weitere Flüssigkeit (Restflüssigkeit) abzutrennen. So ergab es aus der RohgÜlle fünf Fraktionen die auf ihr Gaspotential untersucht wurden. Die Gasausbeuten der einzelnen Fraktionen sind in Tabelle 3 aufgeführt. Daraus ist zu erkennen, dass die RindergÜlle im Batchversuch eine höhere Ausbeute ergibt als die SchweinegÜlle. Die SchweinegÜlle enthält einen geringeren Anteil an OTS als RindergÜlle. Daher fällt bei der SchweinegÜlle der Unterschied der Gasausbeute von der RohgÜlle zur DünngÜlle weniger ins Gewicht. Auch wird angenommen, dass die Gasausbeute beim Feststoff höher liegt, da dieser einen höheren Anteil an abbaubarem Material enthält als die DünngÜlle.

**Tabelle 3:** Ermittelte Gasausbeuten aus den GB 21 Versuchen der verschiedenen GÜllefraktionen [NI/kgOTS].

	RohgÜlle	DünngÜlle	Feststoff	Feststoff gepresst	Restflüssigkeit
Schwein	134	127	195	199	129
Rind	272	222	275	260	237

In den Gasbildungsversuchen für die eingesetzte DünngÜlle (Schwein : Rind 1:1) wurde in 21 Tagen eine spezifische Gasausbeute von 320 Normliter (NI) pro kg OTS erzielt.

Da mit dem Permeat noch rund 20 % der OTS der zugeführten DünngÜlle aus dem Reaktor entfernt wird, wurde dessen Gaspotential mittels GB 21 bestimmt. Bei den GB 21 - Versuchen mit Permeat wurde eine Gasausbeute von bis zu 750 NI/kg OTS erreicht was einer praktisch vollständigen Umsetzung der OTS entspricht. Anhand der Abbildung 2 ist zu erkennen, dass der Abbau im Permeat nach 4 Tagen beginnt, dann aber rasch ansteigt und nach insgesamt 17 Tagen fast vollständig abgeschlossen ist. Nachfolgendes Rechenbeispiel zeigt den Gasverlust durch die Permeatentnahme.

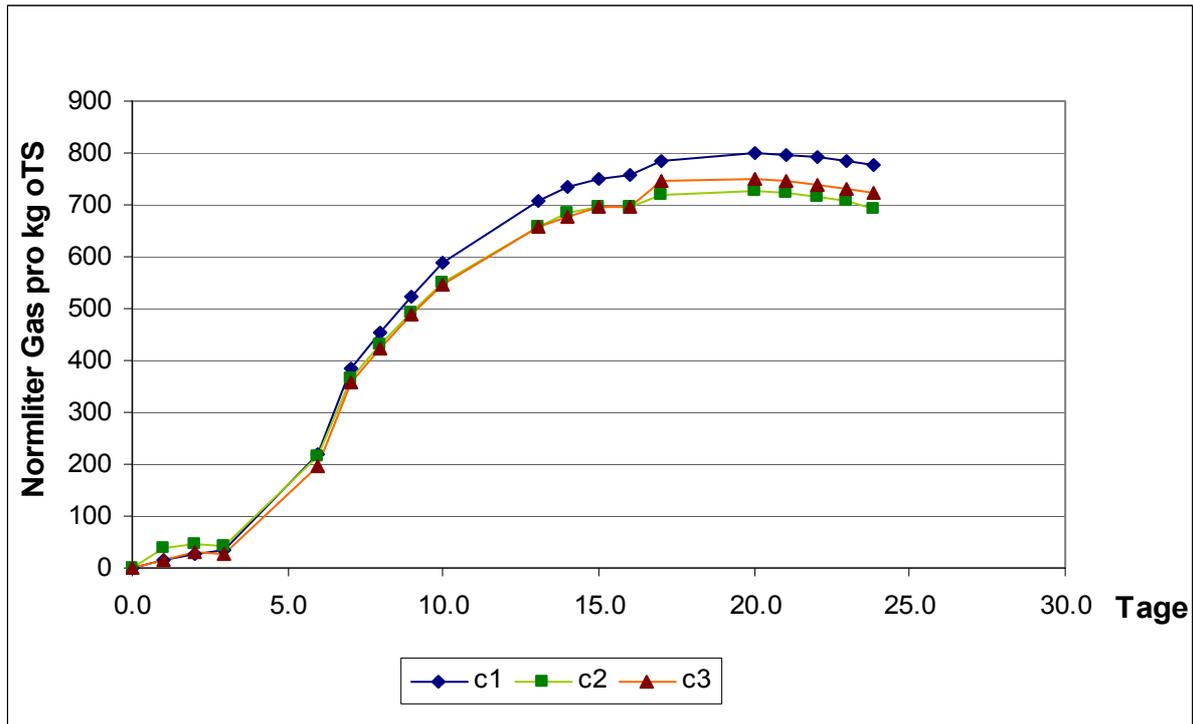
Aus dem Versuch mit HRT 7 d und SRT 60 d ergibt sich pro 20 l Reaktorinhalt:

Beschickungsmenge  $2.86 \text{ l/d} \times 1.8 \% \text{ OTS} \times 300 \text{ l} = 15.4 \text{ l Gas/d}$ ,

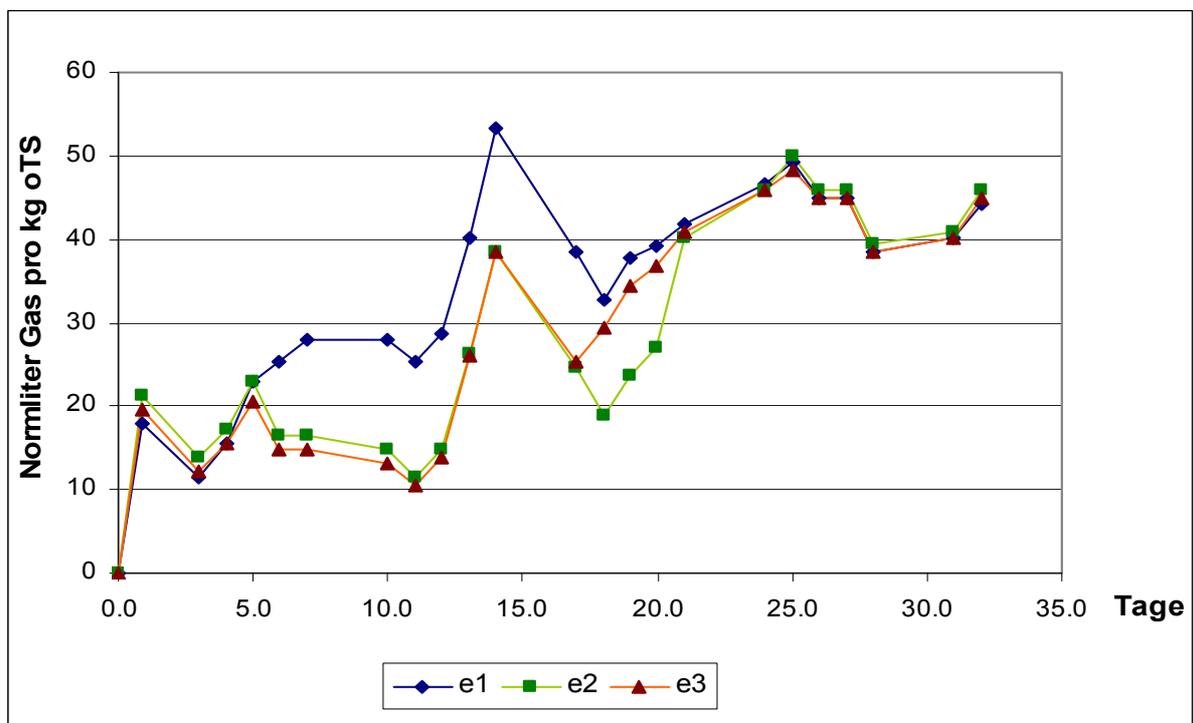
UF-Permeat:  $2.86 \text{ l/d} \times 0.25 \% \text{ OTS} \times 750 \text{ l} = 5.4 \text{ l Gas/d}$

Gasverlust = 35 %

Der Versuch ohne Inokulum ergab beim Permeat noch knapp 50 NI/kg OTS (Abbildung 3), was einem Gasverlust von etwa 2 % entspricht. Da durch die UF – Membran die Mikroorganismen zurückgehalten werden, sollte das Permeat frei davon sein. Es wird erwartet, dass kein Gas mehr entsteht. Da von aussen Mikroorganismen in den offenen Permeatbehälter gelangen können, können davon kleine Mengen an Gas durch den Permeatabbau entstehen. Des Weiteren kann das Permeat noch etwas Biogas enthalten, welches mit durch die UF-Membran gelangt ist und schliesslich beim Versuch freigesetzt wurde.



**Abbildung 2:** Zeitlicher Verlauf des GB 21 – Versuches mit dem Permeat aus dem Laborreaktor bei HRT 7 d SRT 60 d



**Abbildung 3:** Zeitlicher Verlauf der Gasbildung des Permeates ohne Inokulum

### 3.2 Versuchsbeginn

Am 14.5.2009 wurde der Laborreaktor mit einer HRT von 20 Tagen in Betrieb genommen. Erfahrungsgemäss werden drei Zyklen gefahren um einen stabilen Zustand, den

sogenannten steady state zu erreichen. In den ersten 60 Tagen werden die Mikroorganismen an die Gülle adaptiert und die Biomasse im Reaktor wird aufgebaut.

### 3.3 Gärversuch mit HRT 4 d und $SRT \infty$ (Tag 60 bis 134)

Die zweite Versuchsphase war begleitet mit einigen technischen Ausfällen, was das Erreichen einer stationären Phase erschwerte. Die längste kontinuierliche Betriebszeit am Stück umfasste 18 Tage bei einer HRT von 4 d. In dieser Zeit wurde eine spezifische Gasausbeute von rund 400 NI/kg OTS erreicht. Dieser Wert liegt über der Gasmenge aus dem Vorversuch und konnte während der weiteren Versuchszeit nicht mehr erreicht werden.

### 3.4 Batchbetrieb (Tag 134 bis 148)

Aufgrund weiterer Unterbrüchen wurde die Impellerpumpe durch eine Exzentrerschneckenpumpe ersetzt. Bis dahin verlief der Versuch als Batch weiter. Anschliessend wurde der Reaktor erneut mit einer HRT von 4 d und ohne Schlammernahme betrieben. In den verschiedenen Batchphasen ist jeweils eine Abnahme der Gehalte im Reaktorinhalt (UF-Retentat) zu erkennen (siehe Abbildung 2) was auch anzunehmen ist, da keine frische Gülle zugeführt wird. Interessanterweise nimmt die Gasmenge zu Beginn einer Batchphase sprunghaft zu und dann im weiteren Verlauf stetig ab (siehe Abbildung 3 und 7).

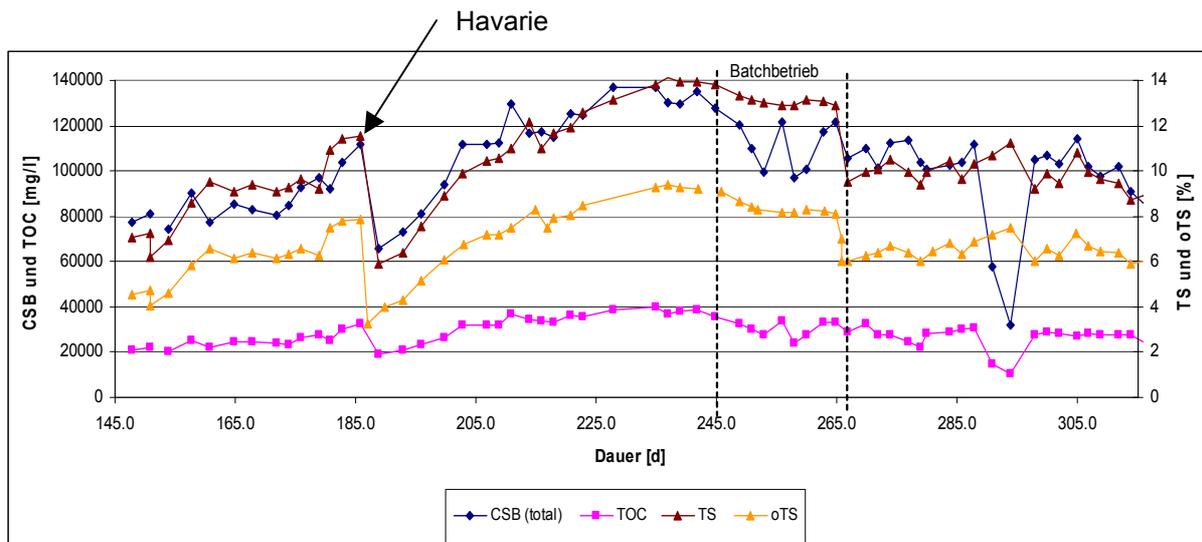
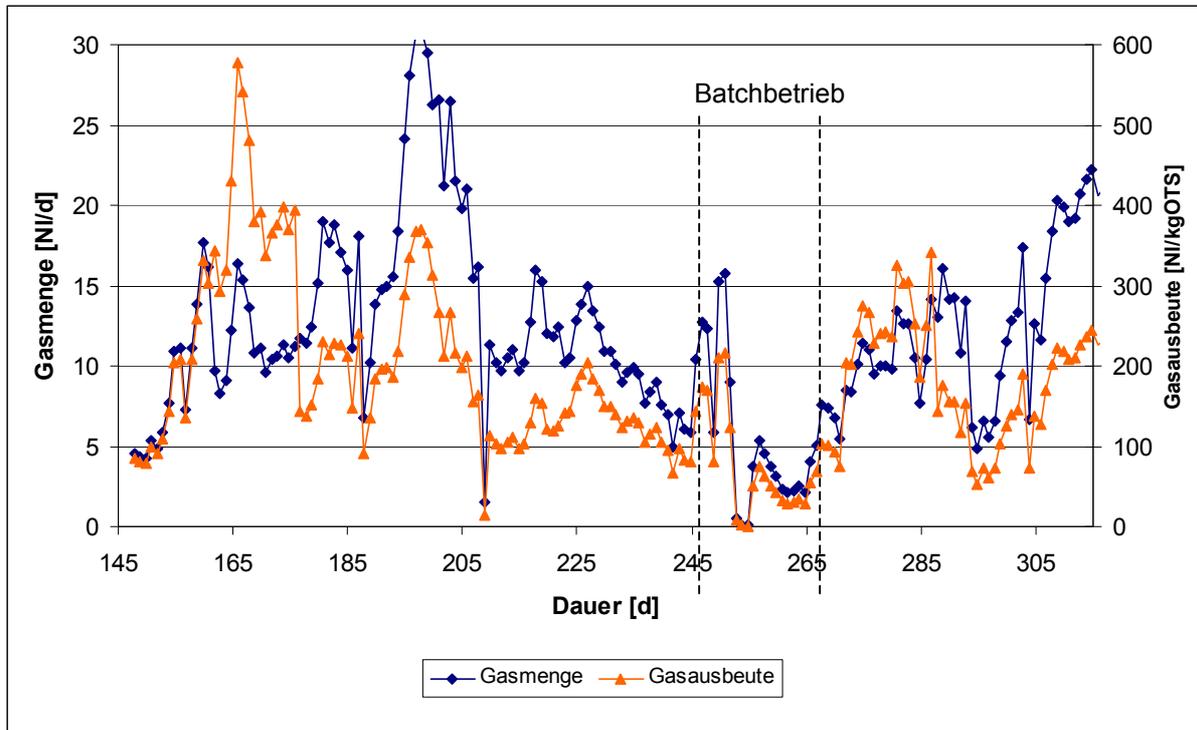


Abbildung 4: Verlauf der Gehalte im UF-Retentat (Reaktorinhalt) von Tag 145 bis 313.

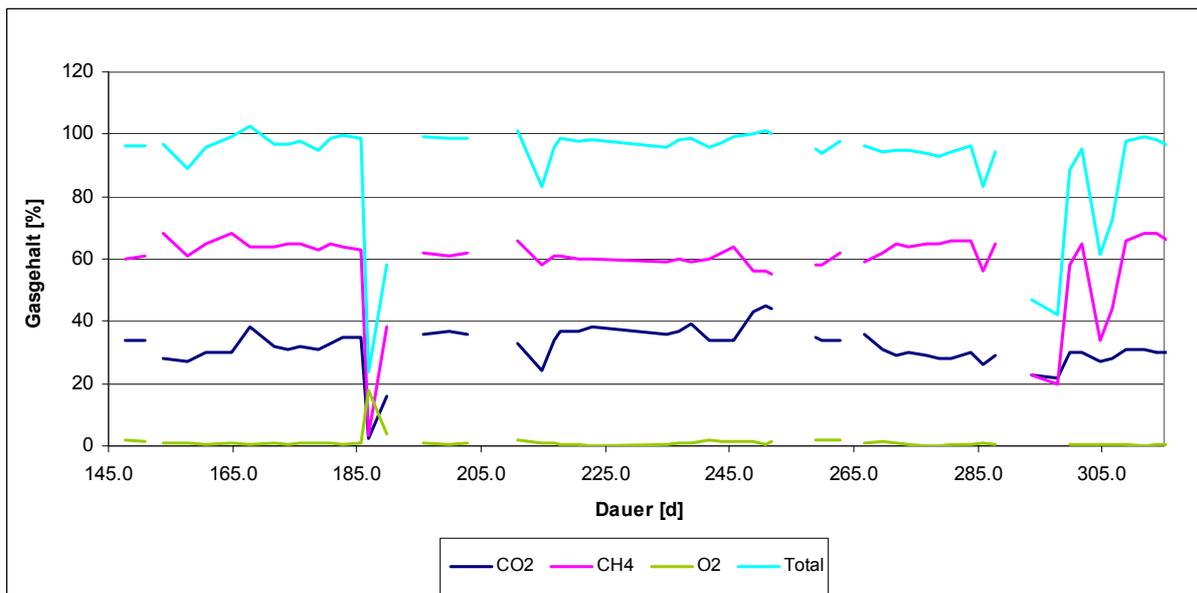
### 3.5 Gärversuch mit HRT 4 d und $SRT \infty$ (Tag 148 bis 313)

Über 7 Monate stand der Laborreaktor bei einer HRT von 4 d in Betrieb. In dieser Zeit schwankte die Menge an produziertem Biogas stark, die Gaszusammensetzung hingegen blieb über längere Zeit relativ gleichmässig (Abb. 3). Bei der Havarie am 185. Tag ging etwa ein Viertel des Reaktorinhaltes verloren. Der Reaktorinhalt wurde mit frischer Gülle wieder auf 20 Liter eingestellt, was zu einer Verdünnung führte. Die Gasmenge stieg gleich danach an und es wurde über mehrere Tage eine Gasausbeute von über 350 NI/kg OTS erreicht. Die höhere Gasausbeute kommt einerseits aus der zusätzlichen Zugabe von frischem Substrat andererseits auch aufgrund der Abnahme der Raumbelastung durch die Havarie.

Es wird angenommen, dass eine höhere Zuführung an OTS (hohe Raumbelastung) die Umsetzung der Biomasse in Gas beeinträchtigt. Auch ist eine Kumulierung von nichtabbaubarer Substanz möglich, welche den Abbau hemmen könnte. Durch die Havarie wurde dem entgegengewirkt. Im weiteren Verlauf ist eine stetige Zunahme an Stoffgehalten zu erkennen (Abbildung 2) und gleichzeitig nimmt die Gasmenge wieder ab (Abbildung 3).



**Abbildung 5:** Gasmenge und Gasausbeute des Laborreaktors bei HRT 4 d, SRT  $\infty$  (Tag 147 bis 313).



**Abbildung 6:** Biogaszusammensetzung (Versuch mit HRT 4 d, SRT  $\infty$ ).

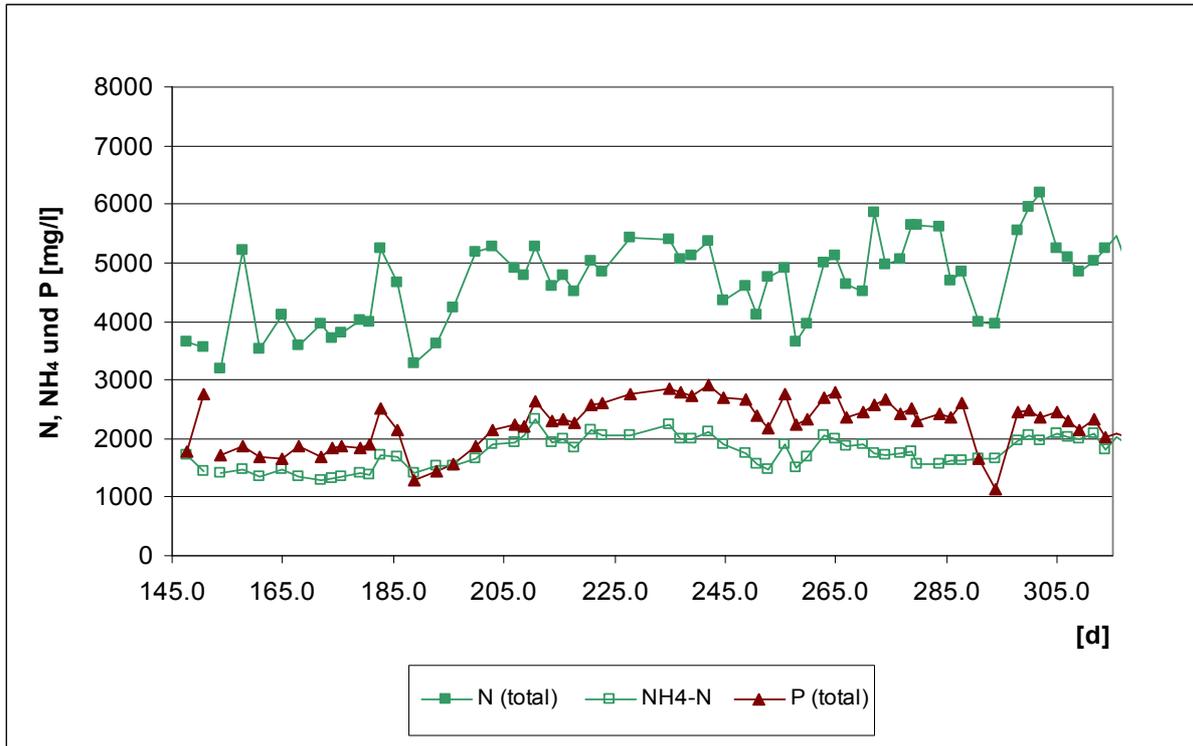
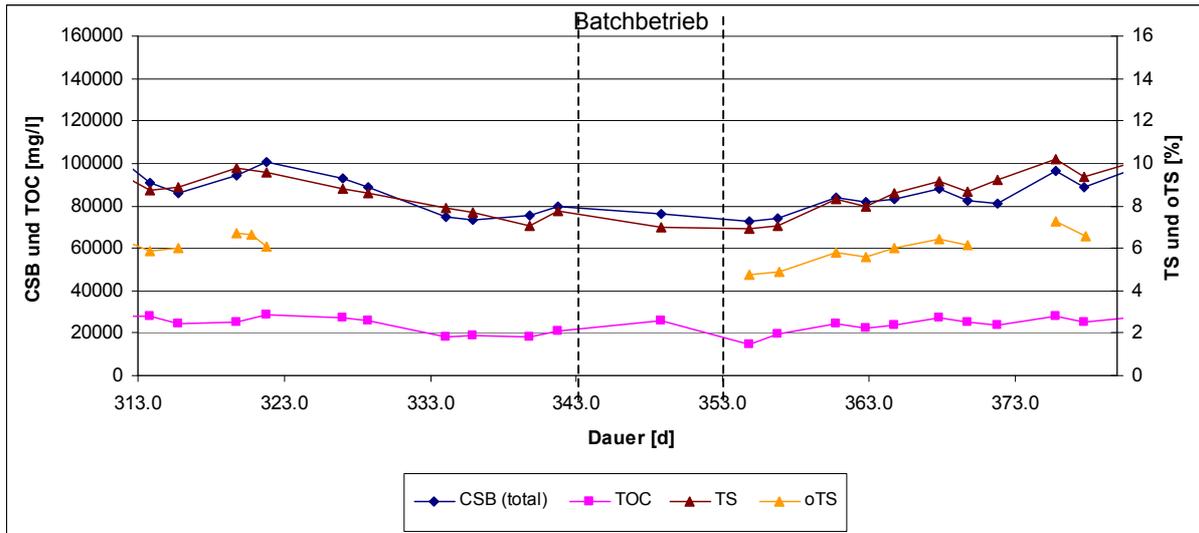


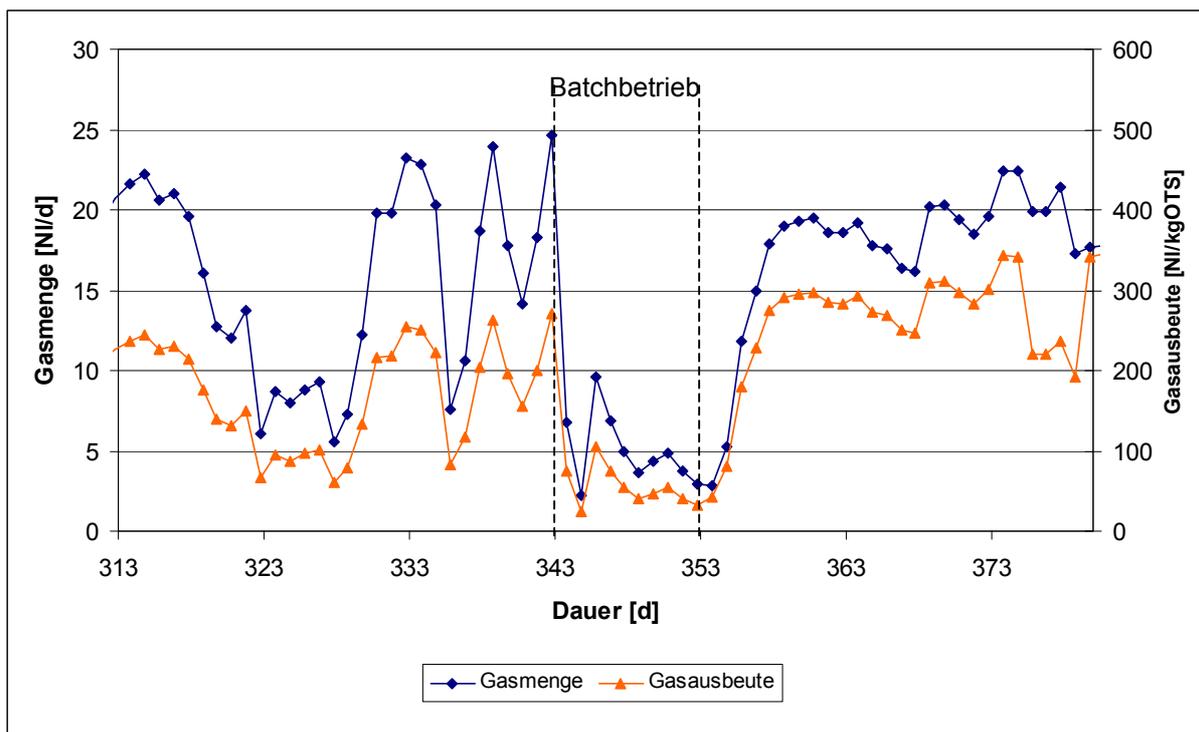
Abbildung 7: Verlauf der Nährstoffgehalte im Reaktor (Versuch mit HRT 4 d, SRT  $\infty$ ).

### 3.6 Vergärungsversuch mit HRT 4 d und SRT 60 d (Tag 313 bis 378)

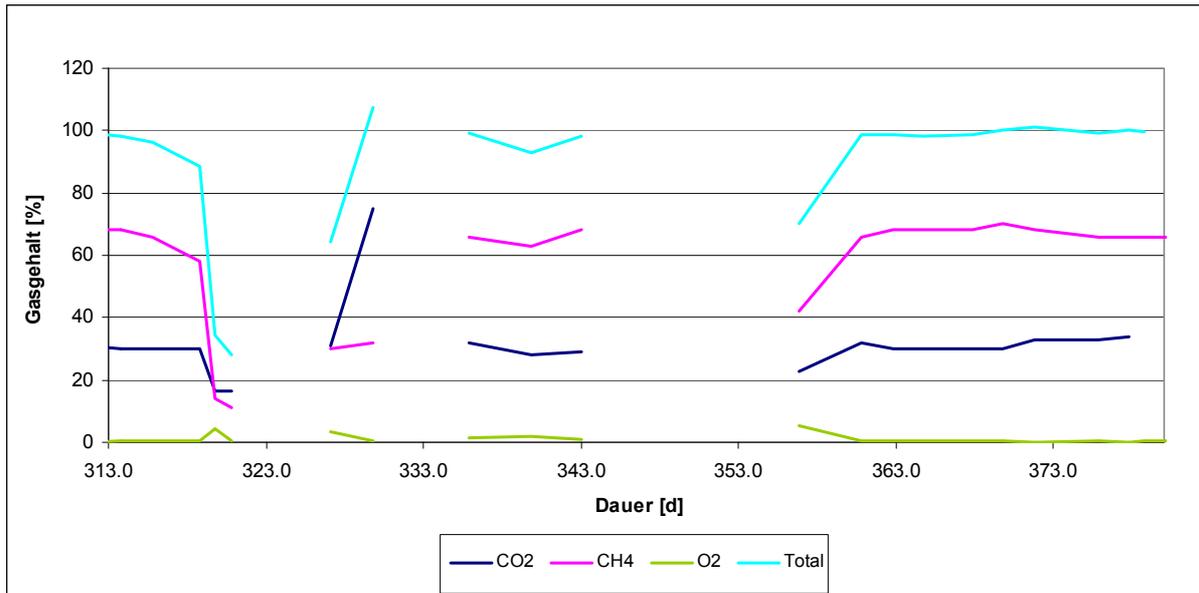
Um das Aufkumulieren von nicht abbaubarem Material, welches die Abbauleistung verringern könnte, zu reduzieren, wurde in einer weiteren Untersuchungsphase das Schlammalter auf 60 d herabgesetzt. In dieser Zeit ist zu erkennen, dass die Gasmenge im Durchschnitt wieder etwas gestiegen ist. In der Zeit von Tag 323 und 328 (Abbildung 7) liegt die Gasmenge tiefer, da Gasmengen über undichte Stellen an der Pumpe ausgetreten sind. Ein weiterer Rückgang der Gasmenge ist zwischen dem 344. und 353. Versuchstag zu verzeichnen, weil keine frische Gülle zugeführt wurde (Batchbetrieb). Im weiteren Verlauf werden wieder Gasmengen von knapp 300 NI/kg OTS erreicht. Diese liegen zwar unter den Werten von über 400 NI/kg OTS, weisen jedoch eine höhere Gleichmässigkeit sowohl in der Gasmenge wie auch in deren Zusammensetzung an CO<sub>2</sub> (32 %) und CH<sub>4</sub> (68 %) auf (vgl. Abbildung 8).



**Abbildung 8:** Verlauf der Gehalte im Laborbiogasreaktor bei HRT 4 d und SRT 60 d (Tag 313 bis 378).



**Abbildung 9:** Gasmenge und Gasausbeute bei HRT 4 d und SRT 60 d (Tag 313 bis 378).



**Abbildung 10:** Biogaszusammensetzung in Vol.-% (Versuch mit HRT 4 d, SRT 60 d).

Beim Vergleichen der verschiedenen Versuchsphasen ist zu erkennen, dass mit der Zunahme der TS im Reaktor die spezifische Gasausbeute abnimmt (Abb. 9). Mit der Verringerung der SRT nimmt die spezifische Gasausbeute wieder zu. Um die Gasausbeute zu optimieren, wird in einer weiteren Versuchsphase die HRT erhöht und später auch die SRT herabgesetzt. Mit dem Erhöhen der HRT ist die Raumbelastung im Reaktor deutlich zurückgegangen und gleichzeitig ist eine Zunahme der spezifischen Gasausbeute zu erkennen (Abbildung 9).

Berechnung der Werte aus den verschiedenen stationären Phasen:

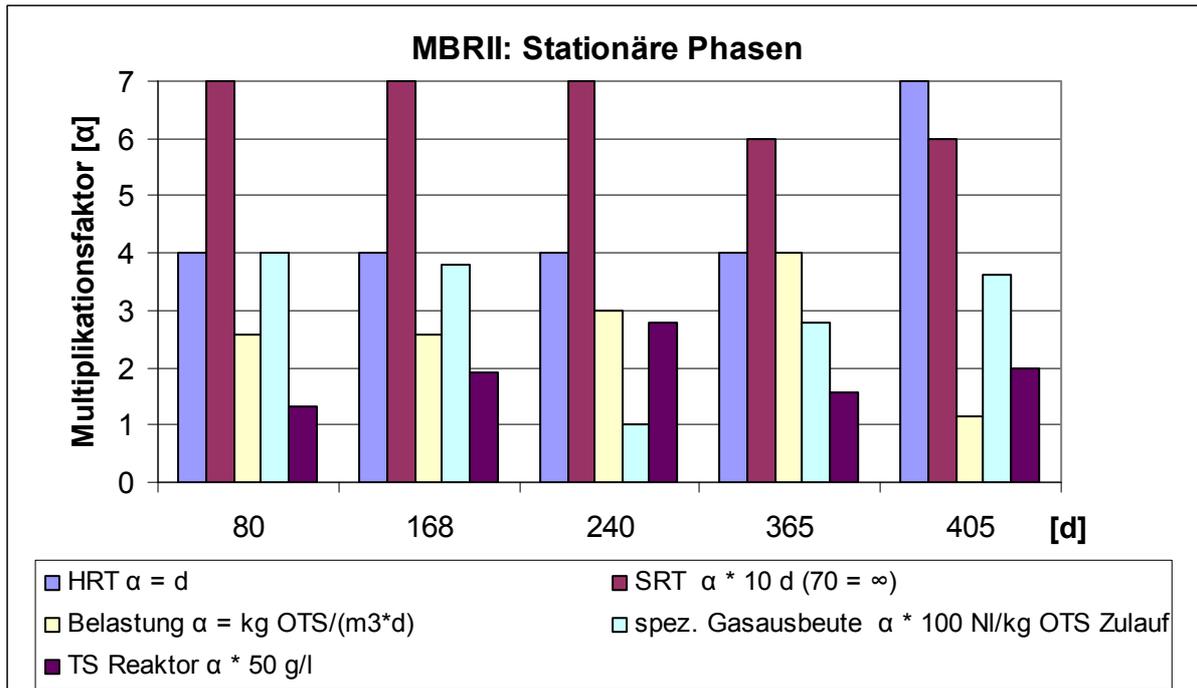
Die HRT und SRT sind festgelegte Werte. Um die Belastung im Reaktor zu berechnen, wurde der OTS der zugeführten Dünggülle durch die HRT dividiert:

$$\text{Belastung} = \frac{\text{OTS}}{\text{HRT}} = \left[ \frac{\text{g/l}}{\text{d}} \right] = \left[ \frac{\text{kgOTS}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}} \right]$$

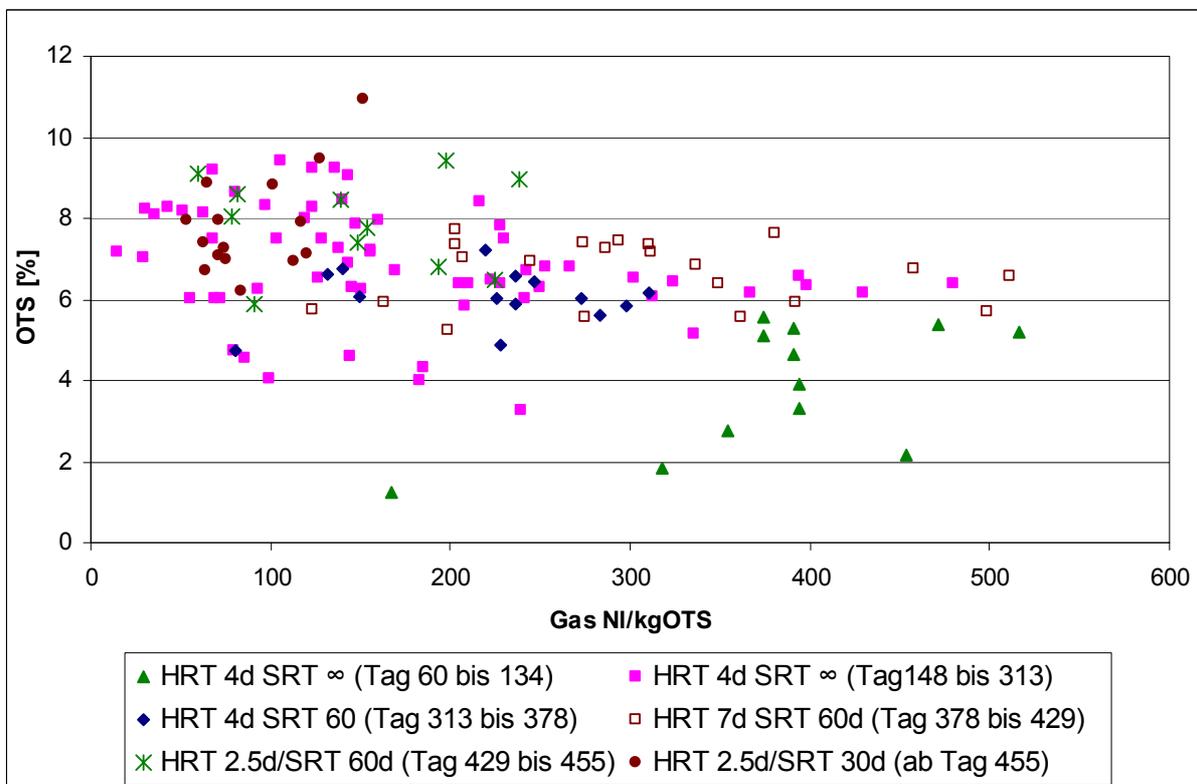
Die spezifische Gasausbeute wurde wie folgt berechnet:

$$\text{spez. Gasausbeute} = \frac{\text{Gasmenge täglich}}{\text{OTS} \cdot \text{Zulauf täglich}} = \left[ \frac{\text{Nl} \cdot \text{l}}{\text{kg} \cdot \text{l}} \right] = \left[ \frac{\text{Nl}}{\text{kgOTS}} \right]$$

Um die verschiedenen Werte nebeneinander in einer Grafik darzustellen wurde ein Multiplikationsfaktor  $[\alpha]$  eingeführt. So können die entsprechenden Größen auf den effektiven Wert berechnet werden. Die Säulenhöhe entspricht dem Faktor  $[\alpha]$ .



**Abbildung 11:** Vergleich der stationären Phasen der einzelnen Versuchsphasen wobei die Werte von einzelnen Tagen gezeigt werden. Letzte Phase (Versuchstag 405) wird in Kap. 3.7 genauer beschrieben. Letzte Phase (405) wird in Kap. 3.7 genauer beschrieben.



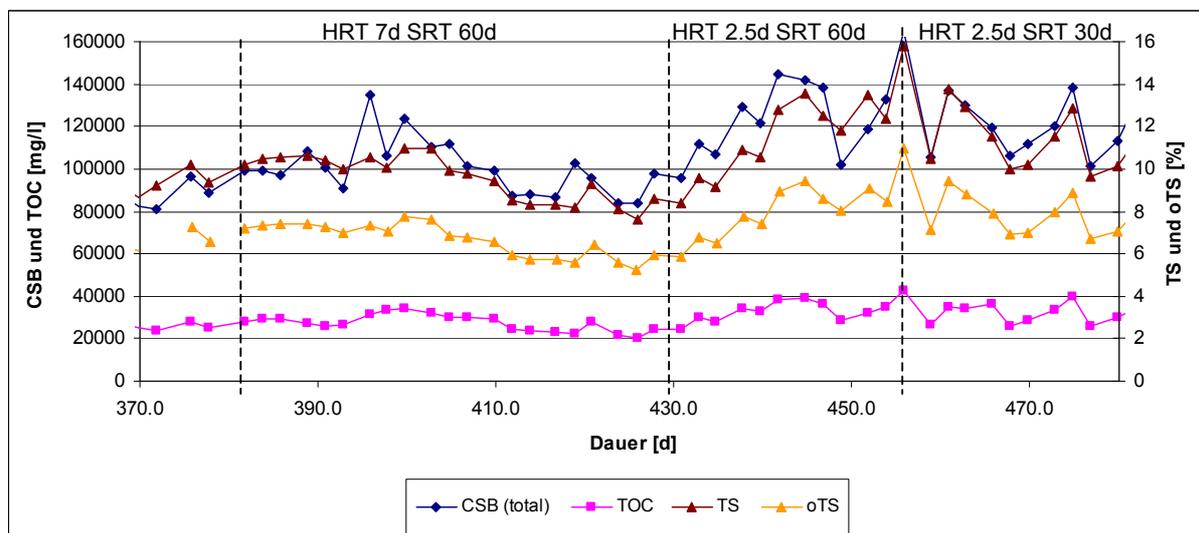
**Abbildung 12:** Darstellung der spezifischen Gasausbeute (NI/kg OTS) gegenüber der organischen Trockensubstanz (OTS in % d. FS) im Reaktor während den verschiedenen Vergärungsphasen.

Ein weiterer Vergleich der Vergärungsphasen zeigt eine Tendenz in der die spezifische Gasausbeute mit der Zunahme an OTS im Reaktor zurückgeht (Abb. 10). Dabei ist zu beachten, dass diese Tendenz ab einem OTS-Gehalt von 5 % zu erkennen ist. In der ersten Versuchsphase (HRT 4 d SRT  $\infty$  Tag 60 bis 134) liegen die Werte stark auseinander. Der Reaktor wurde mit einer tiefen OTS gestartet, welcher danach stetig zunahm, wobei auch die Gasmenge anstieg. Es wird davon ausgegangen, dass bei höherem Feststoffanteil die Gasproduktion aufgrund zu hoher Raumbelastung zurückgeht. Auch können sich hemmende Stoffe ansammeln, die die Umsetzung in Biogas beeinflussen. Indem die Schlammverweilzeit SRT herabgesetzt wird, soll diesem Effekt entgegengewirkt werden. Ebenso wird dadurch der OTS stabilisiert, was in den beiden Versuchsphasen mit SRT 60 zu erkennen ist.

### 3.7 Versuch mit HRT 7 d und SRT 60 d

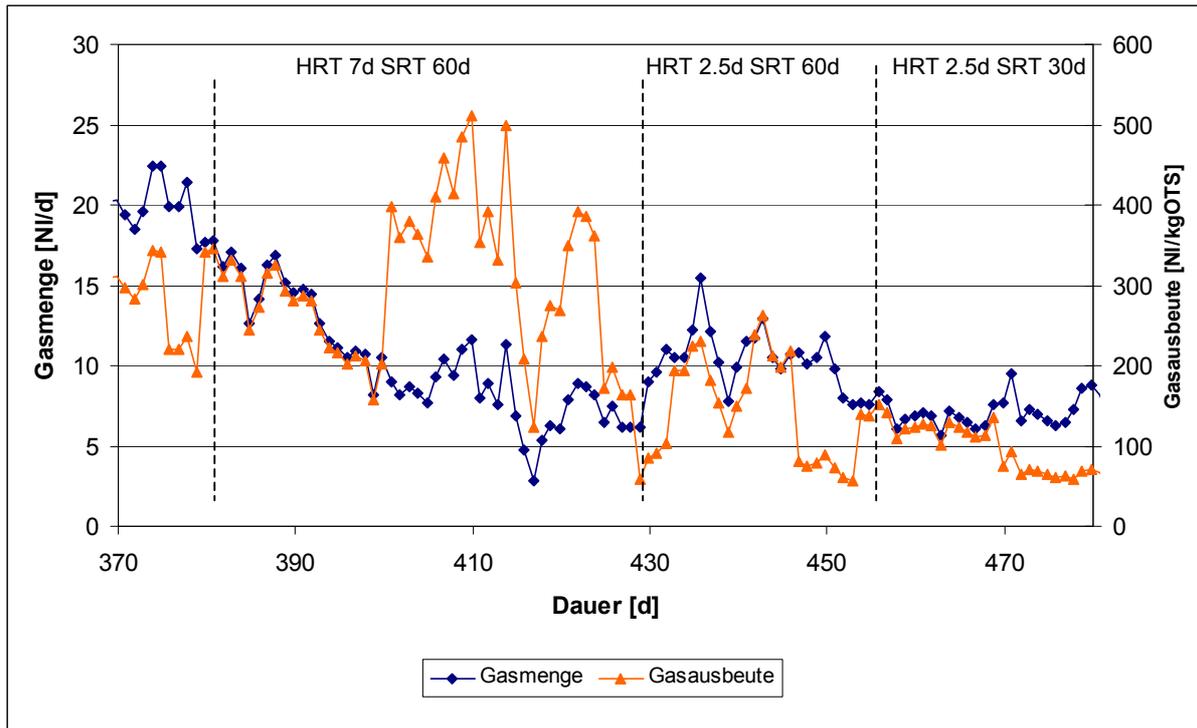
Durch die Erhöhung der HRT von 4 auf 7 d wurde die Raumbelastung wieder reduziert. Aufgrund der geringeren Güllezufuhr nahm auch die Gesamtgasmenge ab. Die spezifische Gasausbeute lag jedoch höher als zuvor. Im Vergleich mit den anderen Gärversuchen ist zu erkennen, dass die Raumbelastung einen Einfluss auf die Gasausbeute hat. Siehe dazu auch Tabelle 5 und Abbildung 9.

Bisher zeigt dieser Versuch mit HRT 7 d und SRT 60 d den stabilsten Verlauf sowohl in der Biogaszusammensetzung als auch im Verlauf der Gehalte im Reaktor (Tabelle 5). Dies ist auch in der Abbildung 11 zu sehen wo die Inhaltstoffe weniger schwanken als in den darauffolgenden Phasen.



**Abbildung 13:** Verlauf von CSB, TOC, TS und OTS im UF-Retentat. Aufgeführt sind die drei Versuchsphasen HRT 7 d SRT 60 d, HRT 2.5 d SRT 60 d und HRT 2.5 d SRT 30 d.

Die gemessene Gasmenge nahm über die Versuchsphase stetig ab. Die Gasausbeute lag jedoch im Mittel bei rund 300 NI/kg OTS und erreichte Spitzenwerte von über 500 NI/kg OTS (Abbildung 14).



**Abbildung 14:** Gasmenge und Gasausbeute bei HRT 7 d SRT 60 d, HRT 2.5 d SRT 60 d und HRT 2.5 d SRT 30 d.

### 3.8 Vergärungsversuch mit HRT 2.5 d und SRT 60 d

In einer weiteren Versuchsphase wurde die HRT noch weiter auf 2.5 d verkürzt. Dabei ist die Belastung im Reaktor wieder stark angestiegen. Wie in Abbildung 11 zu sehen ist, nahmen die Gehalte im Reaktor stetig zu. Es kann jedoch nicht gesagt werden wie viel davon aktive Biomasse ist die zusätzlich aufgebaut wurde. Da auch etwas mehr Gas als zuvor entstanden ist, wird angenommen, dass mehr aktive Biomasse vorhanden sein muss (Abbildung 14). Da noch kein steady state erreicht wurde, wird die Anlage weiter bei einer HRT von 2.5 d betrieben. Um den starken Anstieg der Gehalte im Retentat zu stabilisieren, wurde die SRT von 60 d auf 30 d reduziert.

### 3.9 Vergärungsversuch mit HRT 2.5 d und SRT 30 d

Mit der Verkürzung der SRT auf 30 d nahmen vorgängig die Gehalte im Retentat ab. Die Menge an Biogas blieb weiterhin unter 10 NI pro Tag. Um weitere Ergebnisse zu erhalten, wurde diese Versuchsphase noch weitergeführt.

Tabelle 5: Übersicht von Gasqualität, Gasmenge, Gasausbeute, Raumbelastung, Temperatur und pH während der Gärversuche in zeitlicher Reihenfolge. Die Werte beziehen sich jeweils auf die Gesamte Versuchsphase und umfassen auch Aufbauphasen und Unterbrüche.

Parameter Einheit	CO <sub>2</sub> [%]	CH <sub>4</sub> [%]	CO <sub>2</sub> +CH <sub>4</sub> [%]	Gasmenge [NI]	Gasausbeute [NI/kg OTS]	Belastung [kg OTS/m <sup>3</sup> *d]	Reaktortemp. [°C]	pH im Retentat
<b>HRT 4 d, SRT ∞</b>								
Min	15.0	33.0	48.0	4.3	129.6	1.9	24.2	7.4
Max	45.0	72.0	100.0	21.6	542.5	2.1	36.2	7.9
<b>Mittelwert</b>	<b>30.1</b>	<b>62.7</b>	<b>92.8</b>	<b>10.8</b>	<b>273.7</b>	<b>2.0</b>	<b>32.6</b>	<b>7.6</b>
<b>HRT 4 d, SRT ∞</b>								
Min	2.4	3.4	5.8	0.1	0.9	1.4	23.7	7.2
Max	45.0	68.0	102.0	31.1	578.0	5.0	40.2	8.0
<b>Mittelwert</b>	<b>31.8</b>	<b>58.5</b>	<b>90.3</b>	<b>11.6</b>	<b>179.9</b>	<b>3.6</b>	<b>34.9</b>	<b>7.6</b>
<b>HRT 4 d, SRT 60 d</b>								
Min	16.5	11.2	27.7	2.2	24.3	3.3	22.8	7.3
Max	75.0	70.0	107.0	24.6	342.6	4.5	41.1	7.8
<b>Mittelwert</b>	<b>31.2</b>	<b>56.0</b>	<b>87.2</b>	<b>14.7</b>	<b>186.3</b>	<b>3.9</b>	<b>35.2</b>	<b>7.5</b>
<b>HRT 7 d, SRT 60 d</b>								
Min	27.0	63.0	95.0	7.6	158.4	1.1	28.9	7.4
Max	34.0	68.0	99.3	17.8	410.7	1.9	42.8	7.7
<b>Mittelwert</b>	<b>30.9</b>	<b>66.1</b>	<b>97.5</b>	<b>12.8</b>	<b>287.3</b>	<b>1.3</b>	<b>38.6</b>	<b>7.6</b>
<b>HRT 2.5 d, SRT 60 d</b>								
Min	25.0	63.0	96.8	7.6	56.6	2.5	29.5	7.3
Max	36.0	72.0	100.9	15.4	262.0	6.7	36.5	7.7
<b>Mittelwert</b>	<b>29.3</b>	<b>68.6</b>	<b>98.9</b>	<b>10.2</b>	<b>146.6</b>	<b>4.0</b>	<b>33.7</b>	<b>7.5</b>
<b>HRT 2.5 d, SRT 30 d</b>								
Min	28.0	63.0	92.4	5.6	64.0	5.1	31.6	7.2
Max	32.0	68.0	98.4	9.4	135.9	6.2	36.1	7.5
<b>Mittelwert</b>	<b>30.1</b>	<b>65.6</b>	<b>96.1</b>	<b>6.9</b>	<b>106.2</b>	<b>5.7</b>	<b>33.4</b>	<b>7.4</b>

### 3.10 Weitere Versuche

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurden verschiedene Pulsversuche unternommen. Das Ziel war dabei, die dynamischen Systemantworten zu charakterisieren.

Begonnen wurde mit einem Essigsäure-Puls im Reaktor. Da keine Pulsantwort zu erkennen war, wurde mit einer FOS/TAC – Messung [2] der Auslastungsgrad im Reaktor bestimmt. Anhand des FOS/TAC – Wertes war die Anlage ausgelastet. Ein erneuter Puls wurde dann durchgeführt als der Reaktor im „hungrigen“ Zustand war. Da weiterhin eine Pulsantwort ausblieb, wurden weitere Versuche in kleinen Flaschen durchgeführt. Auch sind weitere Substrate, wie Natriumacetat, Glucose, Glycerol und Cellulose untersucht worden.

Entgegen den Erwartungen, zeigte das Acetat gegenüber den anderen Substraten die langsamste Abbaugeschwindigkeit. Am schnellsten abgebaut wurde Glucose vor Glycerol,

Cellulose und Essigsäure. Auch die Lag – Phase war bei Natriumacetat und Essigsäure mit 5 bis 10 Tagen länger als bei den übrigen Substraten. Somit wurde das Ausbleiben der Pulsantwort bestätigt. Warum nun von aussen zugeführtes Acetat bzw. Essigsäure nicht sofort abgebaut wurde, ist weiterhin unklar. Die Organismen im Reaktor sind ja bereits an Essigsäure als Hydrolyseprodukt adaptiert und müssten dieses sofort abbauen können. Näheres dazu in der Bachelorarbeit von Stefan Schmutz [3].

Der Auslastungsgrad wurde auch in den Versuchsphasen HRT 7 d SRT 60 d und HRT 2.5 d SRT 60 d gemessen, mit dem Ergebnis, dass der Reaktor bei HRT 7 d substratlimitiert („hungrig“) bis ausgelastet war und die Werte für HRT 2.5 d als stark belastet bis stark überlastet zu deuten waren.

## 4 Diskussion

Die Versuche im Membranbioreaktor ergaben phasenweise vergleichbare Werte mit der erzielten Gasausbeute der Dünngülle von 320 NI/kg OTS in den GB21 Vorversuchen. In der Versuchsphase mit der HRT 4 d und SRT  $\infty$  wurde sogar eine deutlich höhere Gasausbeute von gut 400 NI/kg OTS erreicht. Die Gasausbeute von der Rohgülle (Mischung) beläuft sich auf rund 270 NI/kg OTS. Gefundene Literaturwerte liegen im ähnlichen Bereich: für Rindergülle 370 l/kg OTS [4] und für Schweinegülle 202,2 ml CH<sub>4</sub>/g TS (entspricht 310 l/kg TS) erreicht nach 21-23 Tagen [5]. Mit dem MBR ist es demnach möglich vergleichbare Gasausbeuten bei kürzeren HRT zu erzielen wie in herkömmlichen Reaktoren. Es konnte auch gezeigt werden, dass die HRT auf 4 d reduziert werden kann, ohne eine geringere Gasausbeute zu erhalten. Dies deutet auf eine höhere Aktivität der Mikroorganismen hin die durch den Rückhalt der UF – Filtration erreicht wird.

Es gibt zudem keine klaren Indizien, dass sich aufgrund der Filtration im Reaktor Hemmstoffe ansammeln. Der Anstieg der Gehalte in den Versuchsphasen ohne Schlammernahme deutet darauf hin, dass sich inerte Feststoffe ansammeln, die nicht weiter abgebaut werden können. Durch das Herabsetzen des Schlammalters wurde dem entgegengewirkt. Bei der kurzen HRT von 2.5 d nehmen die Gehalte im Reaktor stärker zu. Es könnte sich hier neben einer Akkumulierung von inerten Feststoffen auch um wachsende Biomasse handeln. Mit der FOS/TAC – Bestimmung kann gezeigt werden, dass in dieser Phase die Mikroorganismen stark belastet bis überfüttert waren und daher nicht alles abbauen konnten. So wird angenommen, dass mit einer HRT von 2.5 d die Belastungsgrenze erreicht wurde. In der Annahme, dass sich die aktive Biomasse noch im Aufbau befindet wird die Versuchsphase bei HRT 2.5 d weiter betrieben.

Beim Vergleich der verschiedenen Versuchsphasen kann man zudem feststellen, dass die Belastung im Reaktor einen Einfluss auf die Gasausbeute hat. Mit höherer Belastung nahm die Gasausbeute in der Regel ab was auch aus konventionellen Anlagen bekannt ist [6].

Die Gasbildungsversuche mit dem Permeat ergaben recht hohe Gasausbeuten. Es wird angenommen, dass der Hauptanteil der OTS im Permeat kurzkettige organische Säuren sind. Diese sind gut abbaubar und könnten in einer Nachgärung zu Biogas umgesetzt werden. Dadurch könnten bis zu 20 % des OTS noch zu Biogas umgewandelt werden. Dazu wäre jedoch ein zweiter Reaktor nötig. Auch müsste das Permeat erneut mit Inokulum

angepflicht werden, da dieses aufgrund der Abtrennung an der UF-Membrane keine Mikroorganismen enthält. Bei 20% an zusätzlichem Gas sollte überdacht werden, ob eine Nachgärung in Erwägung gezogen werden sollte oder ob das Permeat als hochwertiger, organismenfreier Dünger eingesetzt werden kann.

In der Versuchsphase HRT 7 d SRT 60 d nimmt zwar die Gasmenge ab, jedoch fällt die spezifische Gasausbeute höher aus da sich diese auf den OTS in der zugeführten Gülle bezieht, welche in diesem Zeitabschnitt stark mit Wasser verdünnt ist. So gibt es bei jedem Wechsel der Gülle auch eine Änderung der Gasausbeute. Es wäre aus versuchstechnischer Sicht idealer, wenn die Zusammensetzung der Gülle auf die gesamte Versuchsdauer einheitlich wäre. So können starke Schwankungen in der Beschickung vermieden werden.

## 5 Folgerung

Aus der ersten Versuchsphase mit einer HRT 4 d und SRT  $\infty$  wurde eine hohe spezifische Gasausbeute von gut 400 NI/kg OTS erzielt. Im zweiten Gärversuch mit HRT 4 d und SRT  $\infty$  lag die Gasausbeute tiefer, die Raumbelastung jedoch höher. Mit dem Herabsetzen des Schlammalters von  $\infty$  auf 60 d nahm die Gasausbeute wieder leicht zu. Die Raumbelastung blieb allerdings im selben Bereich. Mit dem Erhöhen der HRT von 4 d auf 7 d stieg die Gasausbeute stark an, die Raumbelastung war noch halb so gross. Da durch das Herabsetzen des Schlammalters die Gasausbeute zunahm, ist anzunehmen, dass sich im Reaktor bei unendlichem Schlammalter nicht abbaubare Feststoffe ansammeln, welche die Gasproduktion stören. Auch wurde festgestellt, dass mit höherer Raumbelastung die Gasausbeute zurückging.

Der Betrieb des Reaktors lief bei einer HRT von 7 d und SRT 60 d sehr gleichmässig und wies im Verlauf des Versuches weniger Schwankungen auf als in den anderen Versuchen.

## 6 Ausblick

Der Versuch bei einer HRT von 2.5 d und 30 d SRT wird weitergeführt bis ein stabiler Zustand erreicht wird. Es soll herausgefunden werden, ob sich unter diesen Prozessbedingungen eine ausreichende Menge an aktiver Biomasse aufbauen kann um eine höhere Abbaurate und damit eine gesteigerte Gasausbeute erreichen zu können.

Anschliessend werden in der nächsten Phase Versuche mit der Vergärung von UF – Retentat aus Schweinedünngülle durchgeführt.

Mit der Vorbehandlung der Dünngülle über die UF wird nicht nur die Inputmenge reduziert, weniger als 20 % der Rohgülle, sondern es wird auch davon ausgegangen, dass die Gehaltsschwankungen durch die Konzentration mit der UF besser ausgeglichen werden können, was einen konstanteren Prozess erwarten lässt.

Parallel zu den Gärversuchen am Labor-MBR werden Gasbildungsversuche des neu eingesetzten Substrates wie auch des Reaktorinhalts und UF-Permeates durchgeführt, um zu ermitteln, ob und wo, wie grosse Verluste an Biogas bzw. organischen Säuren während des gesamten Verfahrensprozesses auftreten.

## Literaturverzeichnis

- [1] Beltrametti T. (2009): Untersuchungen zur anaeroben Behandlung von Gülle im Membranbioreaktor, Bachelorarbeit, IBT Institut für Biotechnologie, ZHAW Wädenswil, unveröffentlicht.
- [2] Lossie U. und Pütz P. (2008): Gezielte Steuerung von Biogasanlagen mittels FOS/TAC, Praxisbericht HACH LANGE, Art. Nr. DOC042.72.20011.Mar08.
- [3] Schmutz S. (2010): Vergärung von Gülle in einem anaeroben Membranbioreaktor, Bachelorarbeit, IBT Institut für Biotechnologie, ZHAW Wädenswil, unveröffentlicht.
- [4] Linke B. (2005): Biogasgewinnung - Versuche für die Praxis, VDL-Journal 55 (6): 4-5.
- [5] Wang Y., Zhang Y., Meng L., Wang J., Zhang W. (2009): Hydrogen–methane production from swine manure: Effect of pretreatment and VFAs accumulation on gas yield, biomass and bioenergy 33: 1131-1138.
- [6] Linke, B.; Vollmer, G.-R.; Mähnert, P (2006): Kinetik der Biogasgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen bei kontinuierlicher Prozessführung als Grundlage für die Bemessung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Schlussbericht zum FNR-Verbundvorhaben 22011402, Potsdam