



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 19.April 2013

MBR II

Vergärung von Gülle und Cosubstraten im Membran-Bio-Reaktor

axpo

swisselectric
research



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Landwirtschaft BLW
Office fédéral de l'agriculture OFAG
Ufficio federale dell'agricoltura UFAG
Uffizi federali d'agricoltura UFAG

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Biomasse
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Co-Finanzierung:

swisselectric research SER, CH-3001 Bern
AXPO Vertrieb AG, CH-8036 Zürich
Bundesamt für Landwirtschaft BLW, CH-3003 Bern

Auftragnehmer:

ARGE „MBR-II“
c/o Ingenieurbüro HERSENER
Untere Frohbergstrasse 1
CH-8542 Wiesendangen

Autoren:

Urs Meier, MERITEC GmbH, urs.meier@meritec.ch

Jean-Louis Hersener, Ingenieurbüro HERSENER, hersener@agrenum.ch

Urs Baier, Martin Kühni, Samuel Künzli, Fachstelle Umweltbiotechnologie
ZHAW Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, burs@zhaw.ch

BFE-Bereichsleiter: Sandra Hermle

BFE-Programmleiter: Sandra Hermle

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153030;102406

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



aspo swiss**electric**
research



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Landwirtschaft BLW
Office fédéral de l'agriculture OFAG
Ufficio federale dell'agricoltura UFAG
Uffizi federali d'agricoltura UFAG

Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 2012

MBR-II Vergärung von Gülle und Cosubstraten im Membran-Bio-Reaktor

Autoren: U. Meier¹, J.-L. Hersener², S. Künzli³, M. Kühni³, U. Baier³

Institutionen: ¹MERITEC GmbH, Ingenieurbüro HERSENER²,
³ZHAW

Adresse: ARGE MBR II,
c/o Ingenieurbüro HERSENER, CH-8542 Wiesendangen

Telefon: 052 338 25 25

Email: info@agrenum.ch

Dauer des Projekts: 1.12.2008 – 30.11.2012

Datum: 19.4.2013

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	5
Abstract.....	6
Kurzfassung.....	7
Ausgangslage.....	7
Zielsetzung	7
Ergebnisse	7
Folgerungen und Ausblick.....	9
Management Summary	10
Initial situation.....	10
Aim	10
Results	10
Conclusions and outlook	12
Teil 1: Versuche an der MBR – Versuchsanlage	13
1 Einleitung	14
2 Problemstellung.....	14
3 Projektbeschrieb und Zielsetzung	16
3.1 Arbeitsplan.....	16
3.2 Zielsetzung	17
4 Material und Methodik.....	17
4.1 Rohgülle	17
4.2 Separierung	18
4.3 MBR-Versuchsanlage.....	20
4.4 Ultrafiltration	22
4.5 Messtechnik.....	23
4.6 Berechnungsgrundlagen	23
5 Resultate.....	24
5.1 Übersicht	24
5.2 Vergärung von Dünngülle	24
5.2.1 Vergärungsversuche im MBR.....	24
5.2.2 UF-Retentat	27
5.2.3 UF-Permeat	28
5.3 Vergärung von UF-Retentat	30
5.3.1 Einleitung	30
5.3.2 Vorbehandlung zur Bereitstellung von UF-Retentat	31
5.3.3 Vergärungsversuche mit UF-Retentat	33
5.3.4 Nährstoffgehalte	34
5.3.5 Restgaspotential von vergorenem UF-Retentat	35
5.4 Vergärung von Dünngülle und Cosubstrat.....	36
5.4.1 Einleitung	36

5.4.2	Charakterisierung des Inputmaterials	36
5.4.3	Vergärungsversuche mit Dünngülle und Cosubstrat	37
5.5	Separierung	40
5.5.1	Einleitung	40
5.5.2	Bogensieb.....	40
5.5.3	Siebpressschnecke.....	41
5.6	Ultrafiltration	41
5.7	Energieträger Gülle	43
6	Diskussion.....	45
6.1	Rohgülle	45
6.2	Dünngülle	46
6.3	Separierung	47
6.4	Ultrafiltration	48
6.5	Vergärungsprozess	49
6.5.1	Vergärung von Dünngülle	49
6.5.2	Vergärung von UF-Retentat.....	50
6.5.3	Vergärung von Dünngülle und Cosubstrat.....	51
7	Leistungsvergleich konventioneller Rührkessel mit MBR.....	52
7.1	Vergärung von Dünngülle	52
7.2	Vergärung von UF-Retentat	53
7.3	Vergärung von Dünngülle und Cosubstrat.....	55
8	Wirtschaftlichkeit.....	56
8.1	Vergärung von Dünngülle im MBR	56
8.1.1	Grundlagen	56
8.1.2	Investitionsbedarf und Betriebskosten.....	57
8.1.3	Kosten-Nutzenvergleich MBR mit konventioneller Vergärung	59
8.2	Vergärung von UF-Retentat im MBR.....	60
8.2.1	Konzeptidee.....	60
8.2.2	Annahmen	61
8.2.3	Investitionsbedarf und Betriebskosten.....	61
8.3	Vergärung von Dünngülle und Cosubstrat im MBR.....	62
9	Implementierung.....	63
10	Folgerungen	65
10.1	Vergärung von Mischdünngülle im MBR	65
10.2	Vergärung von UF-Retentat im MBR.....	65
10.3	Vergärung von Mischdünngülle und Cosubstrat im MBR	66
11	Kommunikation.....	66
12	Ausblick und Handlungsbedarf.....	68
Literaturverzeichnis		70
Teil 2: Versuche an der MBR – Laboranlage.....		72
13	Zielsetzung	73

14 Laboranlage, Versuchsablauf, Material und Methoden.....	73
14.1 Laboranlage.....	73
14.2 Versuchsablauf.....	75
14.3 Material und Methoden	77
14.3.1 Material und Methode der Gasbildungsversuche	77
14.3.2 Material und Methode der Analyse	77
15 Resultate.....	79
15.1 Projektphase 1: Vorversuche.....	79
15.2 Projektphase 2: Vergärung von Mischdünnungsgülle	82
15.2.1 Versuchsbeginn mit HRT 20 d und SRT ∞ (Tag 0 bis 60).....	82
15.2.2 Vergärungsversuch mit HRT 4 d und SRT ∞ (Tag 60 bis 134).....	82
15.2.3 Batchbetrieb (Tag 134 bis 148)	82
15.2.4 Vergärungsversuch mit HRT 4 d und SRT ∞ (Tag 148 bis 313).....	83
15.2.5 Vergärungsversuch mit HRT 4 d und SRT 60 d (Tag 313 bis 378)	84
15.2.6 Vergärungsversuch mit HRT 7 d und SRT 60 d (Tag 379 bis 429)	86
15.2.7 Vergärungsversuch mit HRT 2.5 d und SRT 60 d (Tag 429 bis 455)	86
15.2.8 Vergärungsversuch mit HRT 2.5 d und SRT 30 d (Tag 455 bis 548)	88
15.2.9 Vergleich der stationären Phasen.....	88
15.2.10 Batchbetrieb Tag 548 bis 581, Umstellung auf Schweinegülle.....	90
15.3 Projektphase 3: Vergärung von UF-Retentat aus Schweinegülle.....	90
15.3.1 Vergärungsversuch mit HRT 10 d und SRT 60 d (Tag 582 - 698).....	91
15.3.2 Vergärungsversuch mit HRT 5 d und SRT 40 d (Tag 699 – 778).....	91
15.3.3 Vergärungsversuch mit HRT 20 d und SRT 40 d (Tag 779-865).....	91
15.3.4 Vergärungsversuch mit HRT 20 d und SRT 25 d (Tag 866-977).....	91
15.4 Projektphase 4: Vergärung mit Mischdünnungsgülle und Co-Substrat Rohglycerin	92
15.4.1 Vergärungsversuch bei HRT 16 d und SRT 25 d mit Mischdünnungsgülle (Tag 978 - 1021)	93
15.4.2 Vergärungsversuch bei HRT 16 d und SRT 25 d mit Mischdünnungsgülle und 5 Vol.-% Rohglycerin (Tag 1022 - 1189).....	93
15.4.3 Vergärungsversuch bei HRT 16 d und SRT 25 d mit Mischdünnungsgülle und 6-10 Vol.-% Rohglycerin (Tag 1190-1279).....	93
15.5 Übersicht der Resultate der verschiedenen Versuche	94
15.6 Weitere Versuche	96
16 Diskussion.....	97
16.1 Gasbildungsversuche GB21 mit dem UF-Permeat.....	97
16.2 Vergärungsversuche mit Mischdünnungsgülle.....	97
16.3 Vergärungsversuche mit UF-Retentat	98
16.4 Vergärungsversuche mit Mischdünnungsgülle 1:1 und Rohglycerin als Co-Substrat	98
16.5 Schwankungen der Zusammensetzung des Göllesubstrates.....	99
16.6 Temperaturschwankungen	99
17 Schlussfolgerung.....	100
18 Ausblick.....	102
Literaturverzeichnis	104

Zusammenfassung

Der Membran-Bio-Reaktor, MBR, erlaubt dank einer Membrantrennstufe, der Ultrafiltration, die Abtrennung organischer Substanz sowie Bakterien und deren Rückführung in den Biogasfermenter. An einer Versuchsanlage im halbtechnischen Massstab und einer Laboranlage wurden während rund 1'250 Tagen Versuche mit separierter Dünngülle, UF-Retentat und Dünngülle mit Cosubstrat durchgeführt. Mit Dünngülle kann das MBR-Verfahren im Vergleich zu konventionellen Rührkesselreaktoren (CSTR) bei einer HRT (hydraulischer Verweildauer) von 10 Tagen und einer SRT (Schlammaufenthaltsdauer) von 40 Tagen 610 l Biogas/kg OTS mit 63 % CH₄ im Vergleich zu Rohgülle mit 270 l bei einer HRT von 20 Tagen erzielen. Eine Verkürzung der Verweildauer auf 4 Tage ist ohne Beeinträchtigung des Abbauprozesses möglich. Mit UF-Retentat sind Raumbelastungen bis 8 kg OTS/m³ d erreicht worden. Im Betrieb mit Mischdünngülle und 7 % Rohglycerin als Co-Substrat liegt die Gasausbeute bei einer HRT von 16 Tagen und einer SRT von 25 Tagen bei 700 l/kg OTS. Die Gasausbeute von Dünngülle und Molke mit einem Anteil von 20 % beträgt bei 10 Tagen HRT und 25 Tagen SRT 560 l/kg OTS mit 53 % CH₄. Die Trennung der SRT von der HRT ermöglicht eine substratspezifisch anpassete Prozessführung. Das UF-Permeat ist hygienisch einwandfrei. Als salzhaltiger Flüssigdünger ist eine stickstoffeffiziente Düngung realisierbar oder eine weitere stoffliche Nutzung machbar. Das UF-Retentat weist ein Restgaspotential von bis zu 300 l/kg OTS auf und muss in einem Nachgärlager gelagert werden. Die Wirtschaftlichkeit von reinen Gülleanlagen kann mit dem MBR früher erreicht werden als mit konventionellen Anlagen. Der Einsatz des MBR auf bestehenden Biogasanlagen mit Co-Vergärung zur Reduktion von Nachgärlagervolumen sowie Steigerung der Gasausbeute kann im Bereich ab 5'000 t im Jahr wirtschaftlich interessant sein. Die Trennung von HRT und SRT sowie die komplette Abtrennung und Rückführung aktiver Bakterien in den Fermenter erlaubt neuartige Kombinationen der Betriebsführung und damit eine weitere Effizienzsteigerung der Biogasgewinnung. Das MBR-System ist für flüssige, wasserreiche Substrat prädestiniert. Optimierungsbedarf besteht im Bereich der Substratvorbehandlung und bei der Wirtschaftlichkeit. Neue Membransysteme lassen hierzu markante Verbesserungen erwarten.

Abstract

The membrane bioreactor MBR enables the separation of organic matter and bacteria, and their rejection into the biogas fermenter, due to a membrane separation, the ultrafiltration. At a test site at semi-industrial scale and a laboratory facility, experiments with separated slurry, UF retentate and liquid slurry with co-substrate were conducted during for more than 1,250 days. With separated slurry the MBR produces 610 l biogas per day at an HRT (hydraulic retention time) of 10 days and an SRT (sludge retention time) of 40 days with 63 % CH₄, compared to 270 l at an HRT of 20 days in continuous stirred tank reactors (CSTR) using raw manure. A reduction of the retention time to 4 days is possible without affecting the degradation process. With UF retentate loading rates have been achieved up to 8 kg OM/m³ • d. In the plant with mixed slurry and 7 % crude glycerine as a co-substrate, the gas yield was 700 l/kg OM at a HRT of 16 days and a SRT of 25 days. The gas yield from separated liquid manure and whey at a 20 % fraction was 560 l/kg OM with 53 % CH₄ at 10 days HRT and 25 days SRT. The separation of the SRT from the HRT allows substrate-specific processing. The UF permeate is perfectly hygienic. Nitrogen-efficient fertilisation is possible using this permeate as a liquid fertilizer, as well as for further treatment. The UF retentate has a residual gas potential of up to 300 l/kg OM and needs to be kept in a post-fermentation storage. By digesting only manure as a substrate the economic efficiency can be achieved earlier with the MBR than with conventional systems. The implementation of the MBR in existing biogas plants with co-digestion may be economically viable with about 5,000 tons per year by reducing the post-fermentation volumes and increasing the gas yield. The separation of HRT and SRT, and the complete removal and recycling of active bacteria in the digester, allows new operational combinations and thus a further increase in the efficiency of biogas production. The MBR system is ideal for liquid water-rich substrate. Improvement in the fields of substrate pre-treatment and economic efficiency is necessary. Significant improvements in this respect may be expected by the use of new membrane systems.

Kurzfassung

Ausgangslage

Hofdünger, überwiegend Gülle, stellt mit rund 53 PJ neben Wald das grösste Biomassepotential in der Schweiz dar (Oettli, 2004). Ein Konversionspfad ist die Vergärung zu Biogas. Konventionelle Biogasanlagen (CSTR) 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 und organische Substanzen mittels einer Ultrafiltrationsmembran (UF) im Reaktor zurück, Wasser und Salze passieren die Membran.

Zielsetzung

Während drei Versuchsphasen wurden die Leistungsfähigkeit, die Wirtschaftlichkeit sowie die Implementierung des MBR-Systems untersucht. Dabei sind drei verschiedene Substrate nämlich separierte Gülle, sogenannte Dünngülle, Konzentrat aus Dünngülle (UF-Retentat) und Dünngülle mit flüssigem Cosubstrat untersucht worden. Die Untersuchungen erfolgten auf zwei Anlagen, einer Versuchsanlage und einer Laboranlage. Die Versuchsanlage im halbtechnischen Massstab diente zur Abklärung der *Verfahrenstechnik, Wirtschaftlichkeit und Implementierung*. Die *Prozesstechnik* und die *biologischen Grenzen* wurden an der 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 und einem Schlammalter (SRT) von 40 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 Energieeffizienz 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 (Meier et al., 2008).

In der Praxis werden Biogasanlagen oft als Gemeinschaftsanlagen betrieben. Grosse Göllemengen verursachen einen entsprechenden Aufwand und Kosten für den Transport. Mittels UF kann die OTS in der Gülle vor der Vergärung konzentriert werden, was um den Faktor 5 bis 6 geringere Mengen zur Folge hat. Dadurch wird der Transportaufwand reduziert. Die Vergärung von UF-Retentat aus Schweinegülle kann im MBR bis 6,5 % TS betriebssicher gefahren werden. Höhere TS-Gehalte beeinträchtigen aufgrund der ansteigenden Viskosität die Durchsatzleistung der Membranen. Die höchste Gasausbeute konnte bei einer HRT von 20 Tagen und einem Schlammalter von 32 Tagen bei 460 l/kg

OTS erzielt werden. Das Fermentervolumen kann um mehr als 80 % gegenüber konventionellen Reaktoren reduziert werden. Kürzere HRT von 10 Tagen vermindern die Gasausbeute und führen zu einem Anstieg der TS-Konzentration im Reaktor mit Beeinträchtigung des technischen Anlagenbetriebs. Aus biologischer Sicht sind keine Hemmungen durch die Vergärung von UF-Retentat aufgetreten. Raumbelastungen über 5 kg OTS/m³ • d sind machbar. Das UF-Retentat stellt insgesamt höhere Anforderungen an die Vergärung als Dünngülle. Eine online-Messtechnik zur präziseren Charakterisierung des Substrates und des Reaktorinhaltes ist empfehlenswert.

In der dritten Versuchsphase sollte ursprünglich UF-Retentat aus Mischdünngülle und Co-Substrat untersucht werden. Aufgrund des grossen logistischen und arbeitsmässigen Aufwands zur Bereitstellung von separierter Dünngülle aus Milchviehgülle, wie die Erfahrungen aus der ersten Versuchsphase zeigten, wurde in Absprache mit der Projektoberleitung stattdessen Schweinedünngülle und Co-Substrat untersucht. Als Co-Substrat wurde Schotte (Molke) mit einem Volumenanteil von 20 % verwendet. Die Gasausbeute lag bei 10 Tagen HRT und 25 Tagen SRT bei 560 l/kg/OTS. Verglichen mit Dünngülle bewirkte die Vergärung von Molke einen Rückgang des Methangehaltes im Biogas von 63 % auf 52 bis 56 %. Die Raumbelastung lag mit durchschnittlich 1.4 kg OTS/m³ • d tief.

Bei ausschliesslicher Vergärung von Gülle ist der MBR ab etwa 30'000 Jahrestonnen gewinnbringend. Konventionelle Biogasreaktoren benötigen dafür mehr als 35'000 Jahrestonnen.

Das Konzept der Vergärung von UF-Retentat aus Schweinegülle basiert auf der Idee einer überbetrieblich eingesetzten UF-Anlage, in welcher die OTS in der Gülle konzentriert, das UF-Retentat in eine zentral betriebene MBR-Anlage transportiert und vergoren wird. Bei diesem Konzept sind erst ab 70'000 Jahrestonnen wirtschaftliche Vorteile zu verzeichnen. Bei einer solchen Anlagengrösse spielt neben der reinen Wirtschaftlichkeit die Notwendigkeit eines regionalen Nährstoffmanagements eine tragende Rolle. Mit der UF kann aus intensiv bewirtschafteten Regionen phosphorreiche UF-Retentat gewonnen werden, das gezielt in Gebiete mit einem Phosphorbedarf transportiert werden kann.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist der Einsatz des MBR auf einer konventionellen Biogasanlage mit Co-Vergärung interessant, um einerseits das Volumen an Nachgärlager zu reduzieren, und anderseits durch Rückführung des UF-Retentats in die Vergärung einen Mehrgasertrag zu erzielen. Anhand eines Praxisbetriebs mit rund 5'000 Jahrestonnen könnte eine wirtschaftliche Lösung aufgezeigt werden.

Die *Implementierung* des MBR-Systems erfordert bei ausschliesslich auf Gülle basierenden Anlagen, einen überbetrieblichen Einsatz. Auf bestehenden Covergärungsanlagen stellt der MBR durch Steigerung der Gasproduktion, Einsparung von Nachgärlagervolumen und Erhöhung der Prozessstabilität eine wirtschaftlich interessante Möglichkeit dar. Das MBR-System bietet zusätzlich die Chance Gülle zu einem wertvollen Flüssigdünger weiterzuverarbeiten. Damit kann durch Aufkonzentrieren, beispielsweise mit der Umkehrosmose oder mit der Ammoniakstripping, das Ausbringvolumen stark reduziert werden und der Nährstoffeinsatz effizienter und energiesparender erfolgen.

Laboranlage

Bei Mischdünnungsgülle konnte die HRT auf 4 Tage reduziert werden, wobei ohne Schlammabnahme eine Gasausbeute von rund 400 l/kg OTS erreicht wurde. Gegenüber den Literaturwerten von Rindergülle mit einer Gasausbeute von 370 l/kg OTS bei einer HRT von 21 - 35 Tage lassen sich bei kürzerer HRT (< 10 Tage) vergleichbare Gasausbeuten erzielen.

Im Betrieb mit UF-Retentat konnte eine hohe Raumbelastung von bis zu 8 kg OTS/m³ • d erreicht werden und die technische Grenze der Anlage ermittelt werden. Die Erhöhung der Raumbelastung führte allerdings zu einer verminderten Gasausbeute.

Beim Betrieb mit Mischdünnungsgülle und Rohglycerin als Co-Substrat wurden Gasausbeuten von durchschnittlich 700 l/kg OTS erzielt. Das Optimum an Biogas wurde bei einem Rohglycerinanteil von 7 % bei einer HRT von 16 Tagen und einer SRT von 25 Tagen erreicht. Der Methananteil im Biogas lag im Schnitt bei 67%.

Der MBR eignet sich besonders für flüssige Substrate und verglichen mit herkömmlichen Biogasanlagen ermöglicht das System den Reaktor mit kürzerer HRT bei gleichbleibender Gasausbeute zu fahren. Im Weiteren kann durch das Zurückhalten der Mikroorganismen mittels UF-Membran ein vollständigerer Abbau der Substrate erreicht werden. Unabhängig von der HRT kann die SRT verlängert werden. Das Nachgär-Volumen lässt sich erheblich reduzieren.

Folgerungen und Ausblick

Das MBR-System ist zur Vergärung von wasserreichen, flüssigen Substraten hervorragend geeignet. Meist kann eine markante Steigerung der Abbauleistung des anaeroben Prozesses gegenüber konventionellen Biogasverfahren erzielt werden. Bei Gülle kann mit dem MBR die doppelte Gasausbeute in halb so langer Zeit erzielt werden.

Das innovative MBR-Verfahren erlaubt vielseitige Kombinationen der Prozessführung und damit die Nutzung unterschiedlicher Biomassesortimente. Durch die Auf trennung der Biomasse in verschiedene Fraktionen ist der MBR für die stoffliche Nutzung und damit umweltgerechte Verwendung der Düngeprodukte prädestiniert. Zudem kann das hygienisch einwandfreie UF-Permeat allfällige Kreisläufe von Krankheiten verhindern. Diese Vorteile erhöhen die Chance für eine spätere Implementierung.

Der Energiebedarf für den Betrieb der UF mit keramischen Rohrmodulen ist hoch. Um eine Verbreitung in der Praxis zu erreichen, muss die wirtschaftliche Anlagengröße in Hinblick auf die Erschliessung des vorhandenen Potentials reduziert werden. Neu entwickelte Membransysteme, basierend auf rotierenden, keramischen Membranscheiben, lassen eine erhebliche Verminderung des Energiebedarfs erwarten. Dadurch sinken die Verfahrenskosten und der Nutzen wird gesteigert (geplantes Folgeprojekt MBRplus).

Eine weitere Optimierung des MBR-Systems ist im Bereich einer Vorbehandlung der Feststoff-Faktion zu erkennen. Lässt sich diese Fraktion, insbesondere bei Rindergülle, im MBRplus mitvergären, kann von einer weiteren Leistungssteigerung ausgegangen werden. Zudem könnte der MBRplus gerade im schweizerischen Umfeld aber auch im Ausland zu einer Verbreitung dieses Systems beitragen.

Management Summary

Initial situation

At 53 PJ, farmyard manure, mainly liquid manure, represents the largest biomass potential in Switzerland along with forests (Oettli, 2004). A way of conversion of this manure is the digestion for the production of biogas. Conventional biogas plants (CSTR) have the disadvantage that the substrate is discharged from the reactor whenever fresh material is added. In addition to unfermented substrate, active bacteria are also lost by this way. The efficiency of the gas production is thus reduced.

The new membrane bioreactor (MBR), however, retains the active bacterial mass and organic substances in the reactor by means of an ultrafiltration membrane (UF). Water and salts pass the membrane.

Aim

Efficiency, cost effectiveness and implementation of the MBR system were investigated during three phases of the project. Three different substrates were examined: the liquid phase separated slurry, concentrate from liquid phase (UF retentate) and liquid phase with liquid co-substrate. Tests were performed in two existing plants, a pilot plant and a laboratory facility. *Engineering methods, cost effectiveness and implementation* were investigated in the test plant at half-scale. In the laboratory facility *process technology and biological limits* were tested.

Results

Test plant

By means of anaerobic digestion the gas yield by the MBR system is twice as high as by conventional biogas plants. Compared to raw slurry with 270 l/kg organic matter (OM), the gas yield increased to 610 l/kg OM with a hydraulic retention time (HRT) of 10 days and a sludge retention time (SRT) of 40 days. In contrast to conventional systems based on a HRT of 20 days, the HRT of the MBR can be reduced up to 4 days without any negative effects on the process. Thus it is possible to reduce the fermenter volume up to 80 %. Based on the supplied amount of OM, the energy efficiency of 27 % in a stirred tank reactor can be increased to 65 % in an MBR system. The UF permeate, the membrane-filtered liquid, is perfectly hygienic and can specifically be recycled as nitrogen and potassium fertilizer (Meier et al., 2008).

In practice, biogas plants are often operated as community facilities. Large quantities of manure cause corresponding expenses and transport costs. By means of UF the OM of the slurry will be concentrated to a 5 to 6 times smaller volume prior the digestion. Thus transport costs are reduced. The fermentation of UF retentate of pig manure can reliably take place in the MBR down to 6.5 % dry matter (DM). Higher content of DM reduces the flux of the membranes due to the increasing viscosity. The highest yield of gas (460 l/kg OM) was achieved at an HRT of 20 days and a SRT of 32 days. The fermenter volume can be reduced by more than 80 % compared to conventional reactors. HRT shorter than 10 days reduce the gas yield and lead to an increase of the concentration of DM in the reactor as well as a reduction of the operating conditions of the plant. From the biological

point of view no inhibitions occurred during the fermentation of the UF retentate. Loading rates above $5 \text{ kg OM/m}^3 \cdot \text{d}$ are feasible. Compared with separated slurry the UF retentate is generally more demanding with regard to the fermentation process. An online measurement technology is recommendable to achieve more accurate characterization of the substrate and the reactor contents.

In the third test phase it had originally been intended to examine UF retentate from a mixture of separated slurry and co-substrate. However, due to the substantial logistical effort and labour required to produce separated slurry from dairy cow manure (as demonstrated in the first trial phase), pig slurry and co-substrate were investigated instead, with prior consultation of the senior project management. As a co-substrate whey was used with a volume fraction of 20 %. The gas yield was 560 l/kg OM at 10 days HRT and 25 days SRT. Compared with liquid slurry whey caused a reduction of the methane content in the biogas from 63 % to 52 to 56 %. The digester load at an average of $1.4 \text{ kg OM/m}^3 \cdot \text{d}$ was low.

By using only manure as a substrate the MBR is profitable based on 30,000 tons per year. Conventional systems require even more than 35,000 tons per year to be profitable.

The concept of the digestion of UF retentate from pig slurry is based on the idea to concentrate the OM of the separated slurry of several farms in a UF and to transport the retentate for digestion to a central MBR plant. The MBR is economical at about 70,000 tons per year. With such a system a regional nutrient management is important in addition to sole economical considerations. In intensively farmed regions it is possible to produce phosphorous enriched retentate with the UF. This retentate can be transported to areas with a requirement of phosphor.

From an economic point of view, the implementation of the MBR system in a conventional biogas plant with co-fermentation is an interesting way to reduce the volume of post-fermentation storage as well as to increase gas yield by feeding back the UF retentate to the fermentation process. Based on an existing biogas plant with about 5,000 tons per year, a cost-effective solution can be envisaged.

The *implementation* of the MBR system in plants based exclusively on manure requires several farms. In existing co-fermentation plants, the MBR represents an economically attractive option due to increased gas production, reduction of post fermentation storage and improvement of process stability. The MBR system also offers the opportunity to process manure into a valuable liquid fertilizer. Through concentration, for example by means of reverse osmosis or ammonia stripping, the volume of application can be considerably reduced. The utilisation of nutrients can be made more efficiently and requires less energy.

Laboratory facility

The HRT could be reduced to 4 days with liquid slurry whereas a gas yield of 400 l/ kg OM was achieved without the removal of sludge. Compared with the literature values for cattle manure with a gas yield of 370 l/kg OM at an HRT from 21 to 35 days, similar gas yields can be achieved with a shorter HRT (< 10 days).

In experiments using UF retentate, a high loading rate of up to $8 \text{ kg OM/m}^3 \cdot \text{d}$ was achieved and the technical limit of the system was determined. Increasing the loading rate, however, led to a decreased yield of gas.

In the plant with separated slurry and raw glycerine as a co-substrate, gas yields of 700 l/kg OM on average were achieved. The optimum amount of biogas was achieved with a crude glycerine fraction of 7 % at an HRT of 16 days and an SRT of 25 days. On average the content of methane in the biogas was 67 %.

The MBR system is particularly suitable for liquid substrates and compared with conventional biogas plants, the system allows to operate the reactor with a shorter HRT at constant gas yield. Moreover a higher degradation of the substrates can be achieved through retention of the microorganisms by means of UF membrane. Regardless of the HRT, the SRT can be extended. The fermentation volume can also be considerably reduced.

Conclusions and outlook

The MBR system is suitable for the digestion of water-rich liquid substrates. A marked increase of the degradation capacity of the anaerobic process can usually be achieved in comparison to conventional biogas processes. With slurry, twice the gas yield can be achieved in half the time using the MBR system.

The innovative MBR process allows various combinations of processes and thus the use of different biomass ranges. The MBR is ideally suited for fertilizing purposes due to the separation of biomass into different fractions. Thus the environmentally sound application of fertilizer is possible. In addition, the hygienic UF permeate prevents any disease cycles. These benefits increase the chances of future implementation.

The energy required for the operation of the UF with ceramic tubular modules is high. To achieve dissemination in practice, the plant size must be reduced in order to exploit existing potential. New membrane systems based on rotating ceramic membrane discs can be expected to achieve a substantial reduction in energy requirements. This reduces costs and the benefits are increased (planned follow-up project MBRplus).

The pre-treatment of the solids of the separation will optimize the MBR system. A further increase in performance could be expected, especially by co-fermenting, cattle manure. Additionally, the MBRplus could contribute to a substantial dissemination of this system in Switzerland as well as in other countries.

Teil 1: Versuche an der MBR – Versuchsanlage

**- Vergärung von Dünngülle, UF-Retentat sowie Dünngülle mit
Cosubstrat im Membran-Bio-Reaktor MBR -**

Autoren:

U. Meier, MERITEC GmbH

J.-L. Hersener, Ingenieurbüro HERSENER

April 2013

1 Einleitung

Die Produktion von Milch und Fleisch in der Schweiz erzielte 2008 rund 50 % des gesamten Produktionswerts der Landwirtschaft von 11.3 Mia. Fr. [BLW 2009]. Der Tierbestand ist in den letzten Jahren von rund 1.29 Mio. GVE im Jahr 2000 auf über 1.32 Mio. GVE angestiegen im Jahr 2009 [Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung 2009, SBV 2010]. Jährlich fallen etwa 35 Mio. t in Form von Gülle an. Die Kosten für die Verwertung der Gülle, d.h. von der Lagerung über den Transport bis zur Ausbringung, können bis zu 15 % und mehr des Faktoreinkommens eines landwirtschaftlichen Betriebs ausmachen.

Hofdünger stellen mit rund 53 PJ neben Wald das grösste Biomassepotential in der Schweiz dar [Oettli, 2004], was etwa 27 % des gesamten Biomassepotentials in der Schweiz oder der Hälfte des Holzpotentials entspricht.

Neben der Nahrungsmittelproduktion trägt die Landwirtschaft zu verschiedenen weiteren wichtigen Funktionen wie Landschaftsschutz, Artenvielfalt, Schliessung von Stoffkreisläufen und in Zukunft vermehrt auch zur Bereitstellung von Biomasse-Energie bei. Diese zusätzlichen Aufgaben können jedoch nur erfüllt werden, wenn die Wertschöpfung auf den verbleibenden Betrieben gesteigert wird. Neben der direkten Bereitstellung von Biomasse-Energie ist auch auf die Einsparung grauer Energie (N-Dünger) und den Ressourcen schonenden Einsatz von Nährstoffen (Stickstoff und Phosphor) zu achten.

2 Problemstellung

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 (vgl. Abb. 1). 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 höhere Ammoniakemissionen auftreten.

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 Feststoffe werden nicht vergärt. 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. Dieser Aspekt kann bei der Verwertung des Filtrats zu Düngungszwecken eine Rolle spielen, insbesondere bei der Verwendung als Flüssigdünger in der Paralandwirtschaft.

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 et al. 2007].

Die verfahrens- und prozesstechnischen Anforderungen an das System müssen hingegen noch vertiefter abgeklärt werden.

Die zusätzliche Aufbereitung des UF-Permeats mittels Umkehrosmose (RO) bringt weitere Vorteile betreffend Einsparungen von 50 % und mehr beim Lagervolumen für die Flüssigdünger sowie beim Transport- und Ausbringaufwand. Ausserdem können die Nährstoffe effizienter eingesetzt werden [Meier et al. 2008]. Die aufbereitete Düngerfraktion lässt sich mit der Ammoniakstripping zu einem Handelsdünger weiterbehandeln. Damit kann Abwärme genutzt werden, was den vielfach schlechten Wärmennutzungsgrad auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen steigert.

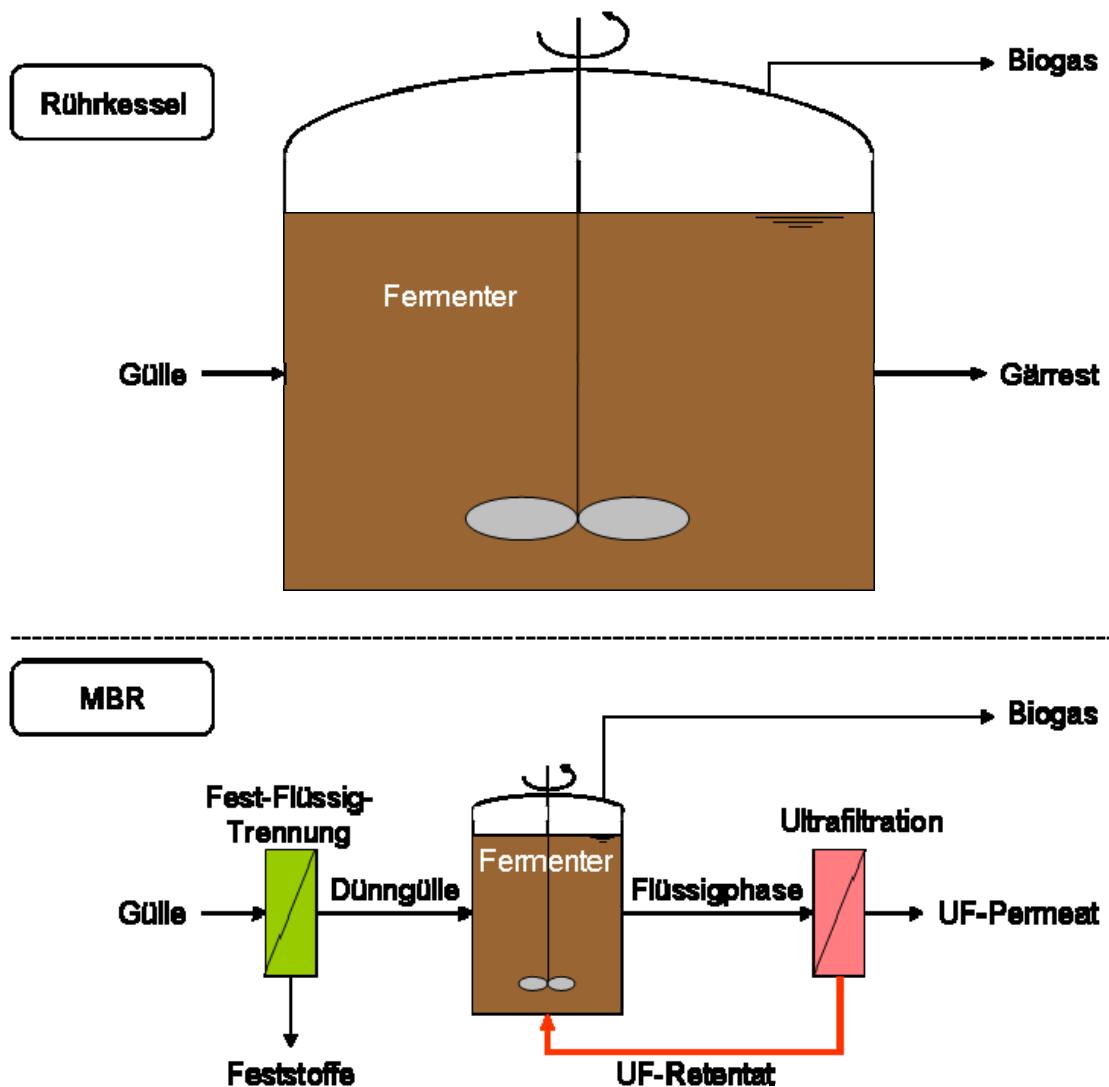


Abbildung 1: Systemvergleich von Rührkesselreaktor (oben) und dem Membran-Bio-Reaktor, MBR (unten).

Im Ausland aber auch in der Schweiz stösst die Bereitstellung erneuerbarer Energie dank politischer Unterstützung vermehrt auf Interesse. Aus wirtschaftlichen Gründen werden immer mehr Biogasanlagen mit Cosubstraten (Abfällen) oder mit grösserer Leistung betrieben. Die Verwertung der Gärsubstrate stösst regional bereits an Grenzen betreffend Flächenbedarf, Düngerqualität und Verwertungsaufwand.

3 Projektbeschrieb und Zielsetzung

3.1 Arbeitsplan

Während des gesamten Projekts über eine Dauer von 4 Jahren konnten die in Abbildung 2 dargestellten Arbeitsschwerpunkte durchgeführt werden.

Phase	2008	2009	2010	2011	2012
1	Vorabklärungen im Labor; Bau Versuchs- u. Laboranlage				
2		Vergärung von Dünngülle			
3			Vergärung von UF-Retentat		
4				Vergärung von Dünngülle und Cosubstrat	
5					Daten- auswertung und Publikation

Abbildung 2: Durchgeführte Arbeiten mit der MBR-Versuchsanlage im Projektverlauf. Die drei eigentlichen Versuchsphasen, Phase 2 bis 4, sind grau hinterlegt.

In der ersten Projektphase wurden die Gülle bzw. die separierte Dünngülle und Feststoffe von Schweinen und Milchvieh im Labor untersucht und deren Gasbildung bestimmt. Gleichzeitig erfolgte der Bau der Versuchs- bzw. Laboranlage. In der zweiten Projektphase ist Dünngülle aus einer Mischung von Milchvieh- und Schweinegülle vergoren worden. Die dritte Phase beinhaltete die Vergärung von Retentat aus der Ultrafiltration. Dabei ist Dünngülle aus der Separierung von Schweinerohrgülle mit Hilfe einer Ultrafiltration aufkonzentriert und im MBR vergoren worden. In der letzten Versuchsphase gelangte Dünngülle von Schweinen in Mischung mit Cosubstrat zur Vergärung. Als Cosubstrat dienten in der Laboranlage Glycerin und in der Versuchsanlage Schotte.

Die Versuche während den Projektphase 3 wurde ursprünglich mit Mischgülle offeriert. Im Verlauf der Phase 2 stellte sich heraus, dass die Vorbehandlung der Milchviehgülle logistisch und arbeitstechnisch zu aufwändig ist. Deshalb ist die nachfolgende Versuchsphase 3 mit Schweinegülle durchgeführt worden. Für die letzte Versuchsphase 4 wurde wieder Mischgülle verwendet.

3.2 Zielsetzung

Für alle drei Versuchsphasen standen folgende Ziele 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 Ammoniakstripping 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 Agroscope 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 Rübenschitzel 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. 3). Die Maschenweite des Spaltsiebes beträgt 0.5 mm. Die Beschickung des Geräts erfolgt mit einer drehzahlgeregelten Tauchpumpe.

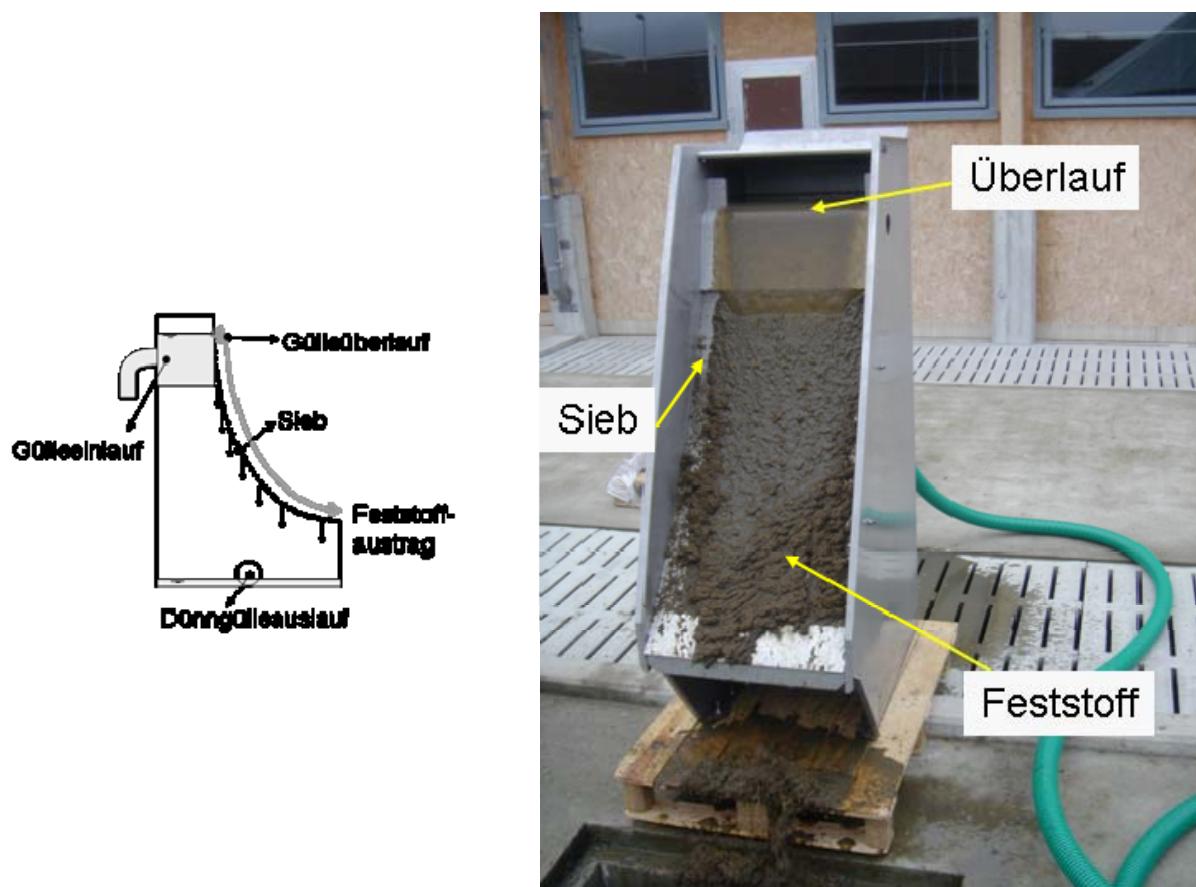


Abbildung 3: Prinzip des Bogenseibs (links) und das für die Separierung der Rohgülle eingesetzte statische Bogensieb (rechts)

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

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

Parameter	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
Einheit										
Durchschnitt	1.9	57.4	7.7	110.2	57.9	26.0	142.7	3'939	13'044	25'633
Minimum	1.1	50.0	7.2	72.5	28.0	19.1	84.7	1251	2'277	18'000
Maximum	2.9	68.4	7.9	161.0	82.9	35.1	206.0	7'800	35'400	35'400

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

Gegen Ende der Projektphase 4, Vergärung von Dünngülle und Cosubstrat, konnte eine fahrbare Separieranlage mit einer Siebpressschnecke eingesetzt werden (Abb. 4).

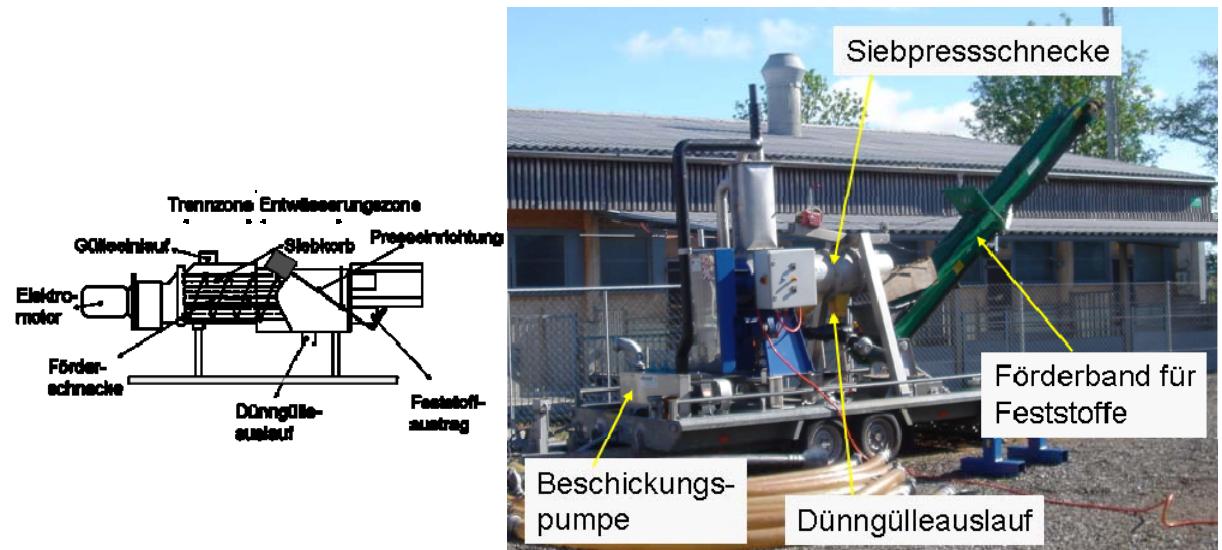


Abbildung 4: Prinzip der Siebpressschnecke (links) und das Gerät im Einsatz (rechts)

Die separierte Milchviehdünngülle (Tab. 3) wurde zusammen mit einem Mengenanteil von 20 % Schotte vergoren.

Tabelle 3: Gehalte in der Dünngülle bei der Separierung von Milchviehgülle mit der Siebpressschnecke

Produkt Milchviehgülle	TS %	OTS in % d. TS	Ntot g/kg TS	NH4 g/kg TS	P2O5 g/kg TS	K2O g/kg TS	Ca g/kg TS	Mg g/kg TS
Dünngülle	2.9	65.5	67.0	31.0	26.0	117.0	28.0	14.0

4.3 MBR-Versuchsanlage

Die Versuchsanlage im halbtechnischen Massstab (Abb. 5) 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 filtriert 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 anderseits 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.

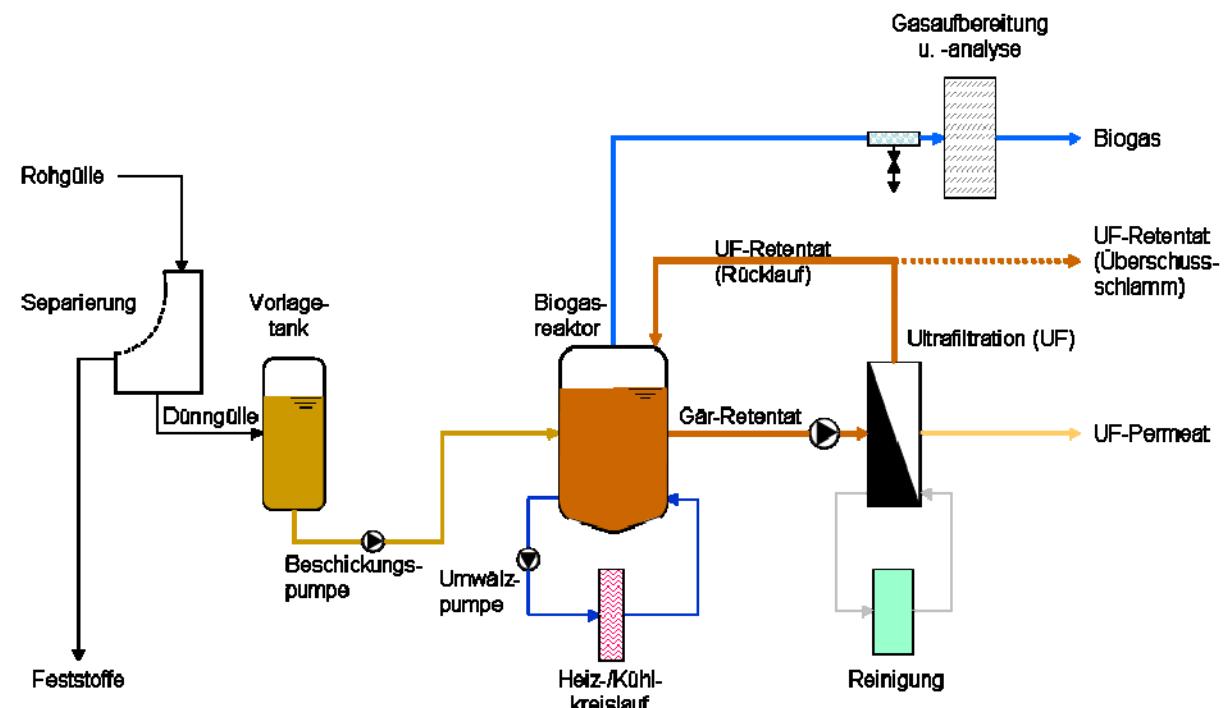


Abbildung 5: Vereinfachtes Schema der halbtechnischen Versuchsanlage. Betrieb mit separierter Dünngülle.

Zur Vergärung von UF-Retentat (Projektphase 3) wurde separierte Schweinedünngülle mit einer UF-Anlage im technischen Massstab aufkonzentriert und das UF-Retentat in der MBR-Versuchsanlage vergoren (Abb. 6).

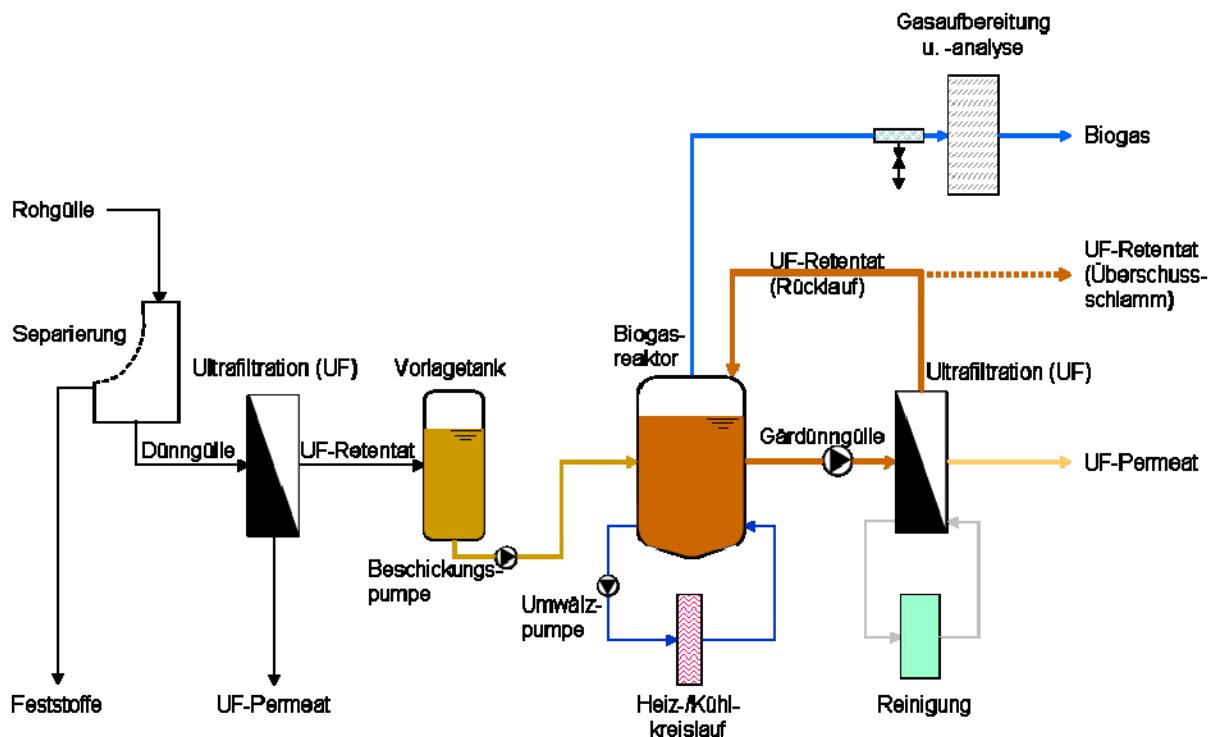


Abbildung 6: Vereinfachtes Schema der halbtechnischen Versuchsanlage. Betrieb mit UF-Retentat.



Abbildung 7: Bild der MBR-Versuchsanlage

Abbildung 7 zeigt ganz links die Beschickungspumpe und den Reaktor (schwarz). Anschliessend ist die UF mit CIP-Behälter und den Membranmodulen sowie der

Steuerkasten zu sehen. Rechts ist das Heiz-Kühlsystem mit dem Wärmetauscher und der Umwälzpumpe (links unten neben dem Kühlaggregat) erkennbar.

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 (vgl. Abb. 8).

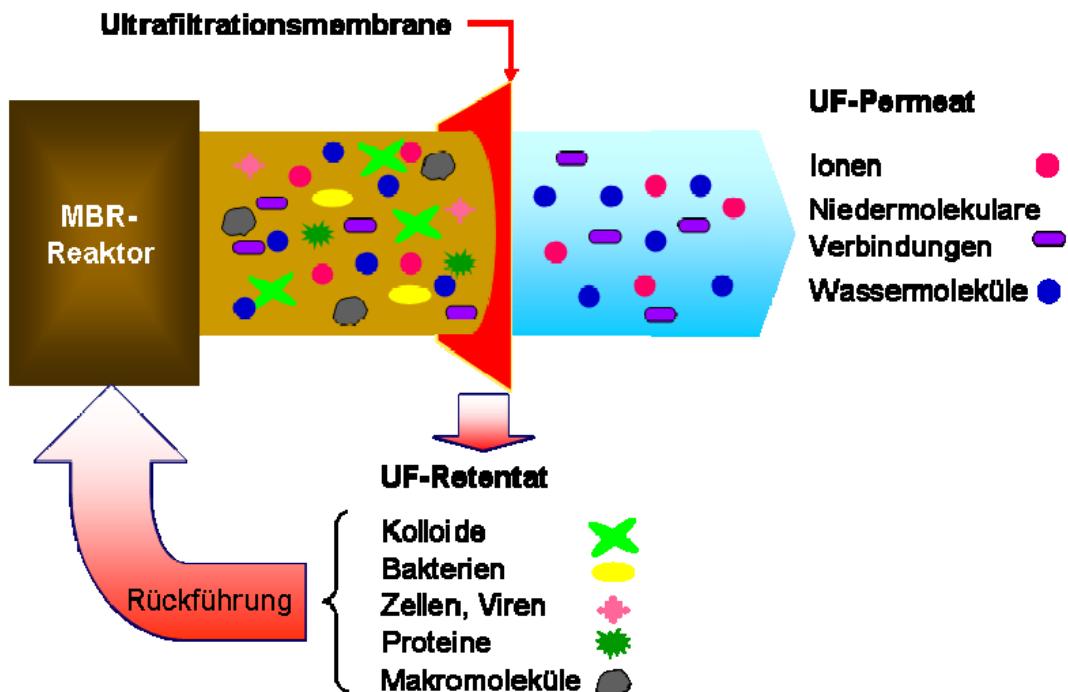


Abbildung 8: Prozessschema der Ultrafiltration

Für die Versuche werden keramische UF-Membranen mit einem Trennschnitt von ca. 0.03 µm eingesetzt (1 µm = 0.001 mm). Es handelt sich um sogenannte Rohrmembranen, wobei 3 unterschiedliche Designvarianten getestet wurden (vgl. Tab. 4).

Tabelle 4: Die verwendeten UF-Membranen

Trennschnitt	µm	~ 0.03	~ 0.03	~ 0.03
Anzahl Kanäle	N	1	7	8
Fläche	m ²	< 0.1	0.15	0.21
Resistenz	pH	0 - 14	0 - 14	0 - 14
Temp.bereich	°C	≤ 80	≤ 80	≤ 80
Trägermaterial		keramisch	keramisch	keramisch

Die Membranfläche konnte an der halbtechnischen MBR-Versuchsanlage zwischen 0.2 und 1.2 m² variiert werden.

4.5 Messtechnik

Die MBR-Versuchsanlage ist mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) ausgestattet. Sämtliche Messwerte werden laufend elektronisch erfasst und archiviert (vgl. Tab. 4). Über einen Bildschirm werden die aktuellen Werte angezeigt. Es können zudem weitere Prozessdaten und Alarmsmeldungen abgefragt werden. Alle wichtigen Parameter lassen sich in einer Parameterliste, spezifisch neuen Versuchsbedingungen angepasst, manuell verändern.

Tabelle 4: Datenerfassung

Prozess	Parameter	Messung
Vorbehandlung		
Separierung	Dünngüllemenge pH, Leitwert, Stoffgehalte in der Roh- u. Dünngülle	manuell manuell
Ultrafiltration UF-Retentat (Phase 3)	Retentatmenge pH, Leitwert, Stoffgehalte in der Dünngülle u. im UF-Retentat	manuell manuell
MBR-Versuchsanlage		
Dünngüllevorlage	Menge	kontinuierlich
Biogasreaktor	Füllstand, Temperatur, Gasmenge u. -qualität pH, Leitwert, Stoffgehalte im UF-Retentat	kontinuierlich manuell
Ultrafiltration	Temperatur, Druck, Flux, Pumpenleistung pH, Leitwert, Stoffgehalte im UF-Permeat	kontinuierlich manuell
Heiz-/Kühlkreislauf	Temperatur, Füllstand (Wasser bzw. Kühlmittel)	kontinuierlich

Einige Daten wie pH-Wert, Leitwert und Stoffgehalte ($N_{tot}, NH_4, P_2O_5, K_2O$, 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 $HRT (d) = \frac{\text{Menge an Gülle zugeführt (m}^3\text{)}}{\text{Fermentervolumen (m}^3\text{)}} \text{ pro Tag}$ 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 (m^3) pro täglicher Schlammabnahmemenge (m^3/d).

Die Raumbelastung (RB) bezeichnet die zugeführte Substratmenge pro Zeit und Fermentervolumen. In diesem Bericht wird die RB als die zugeführte OTS-Menge (kg/d) pro Fermentervolumen (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 Mitte Oktober 2012 sind mit Dünggülle, UF-Retentat sowie Dünggülle zusammen mit Cosubstrat Gärversuche durchgeführt worden (Tab. 5).

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

Tabelle 5: Übersicht über die durchgeführten Versuche in den Projektphasen 2 bis 4

Projektphase	Versuchsphase Vergärung von:	Dauer		HRT	SRT	Input	Anteil	Cosubstrat
		Datum	d	d	d	%	Schotte	
2	Dünggülle	19.6.2009 bis 12.7.2010 13.7.2010 bis 18.11.2010	388 128	4 bis 20 10 bis 15	15 bis 40 20 bis 40	RG/S SG	50 : 50 100	
3	UF-Retentat	19.11.2010 bis 14.12.2011	390	10 bis 20	12 bis 32	SG	100	
4	Dünggülle + Cosubstrat	1.2.2012 bis 16.8.2012 17.8.2012 bis 15.10.2012	197 59	10 bis 16 10	20 bis 28 30	RG/S RG	40 : 40 80	20 20

Legende: RG = Rindergülle, SG = Schweinegülle

5.2 Vergärung von Dünggülle

5.2.1 Vergärungsversuche im MBR

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 Schlammennahme (SRT ∞) 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 anzeigen. Ein entsprechender Umbau der Messinstallation und die Behebung einer nicht detektierbaren Undichtigkeit in der Gasleitung lieferten anschliessend stabile Gasqualitätswerte.

Tabelle 6: Durchgeführte Vergärungsversuche während der Projektphase 2

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.6).

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. 7). Aufgrund einer Undichtigkeit in der Gasleitung lag der CH₄-Gehalt mit 51 % tief, weil Luft angesaugt wurde.

Tabelle 7: Gasqualität, Gasmenge, Gasausbeute, Raumbelastung (RB), Temp. und pH während der Gärversuche von Dünngülle in zeitlicher Reihenfolge

Parameter Einheit	CH ₄ %	CO ₂ %	CH ₄ +CO ₂ %	Gasmenge l/h	Gasausbeute l/kg OTS	RB kg OTS/m ³ •d	Reaktortemp. °C	pH im UF-Retentat
HRT 20 d, SRT 40 d								
Mittelwert	51	30	81	15	281	0.7	36.7	7.8
Min	24	14	39	10	173	0.3	31.8	7.8
Max	62	37	99	22	527	0.7	39.8	7.8
HRT 10 d, SRT 65 d								
Mittelwert	63	33	96	30	447	1.4	36.6	7.7
Min	61	31	92	15	227	0.7	32.3	7.7
Max	66	35	101	47	690	2.0	37.5	7.8
HRT 10 d, SRT 40 d								
Mittelwert	63	32	95	41	617	1.0	37.0	7.7
Min	61	31	91	30	395	0.8	36.4	7.7
Max	65	33	98	50	801	1.4	37.5	7.8
HRT 5 d, SRT 20 d								
Mittelwert	65	32	97	57	346	3.4	37.0	7.7
Min	63	31	93	45	290	1.9	36.5	7.6
Max	66	33	99	64	467	3.8	37.4	7.9
HRT 5 d SRT 15 d								
Mittelwert	60	36	96	43	240	3.5	36.9	7.6
Min	56	33	88	34	154	3.3	36.3	7.4
Max	63	39	102	54	310	4.3	37.4	7.7
HRT 4 d SRT 20 d								
Mittelwert	66	32	97	62	296	4.0	36.8	7.6
Min	64	30	94	46	222	4.0	34.9	7.5
Max	67	33	100	70	335	4.5	37.4	7.6
HRT 7.5 d; SRT 20 d								
Mittelwert	65	32	97	41	407	2.3	37.0	7.6
Min	64	31	94	32	237	1.2	35.8	7.5
Max	67	33	100	49	759	2.9	39.1	7.6
HRT 7.5 d; SRT 40 d								
Mittelwert	65	32	97	42	373	2.2	36.9	7.6
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/m³ • d. Die Gasqualität schwankte zwischen 61 und 66 % CH₄. 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. 9). Die Gasausbeute erreichte 617 l/kg OTS mit einem CH₄-Gehalt von 63 %. Die RB mit 1 kg OTS/m³ • d war tief. Im Vergleich dazu beträgt die Gasausbeute der Mischrohgülle im Batchversuch 266 l/kg OTS.

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

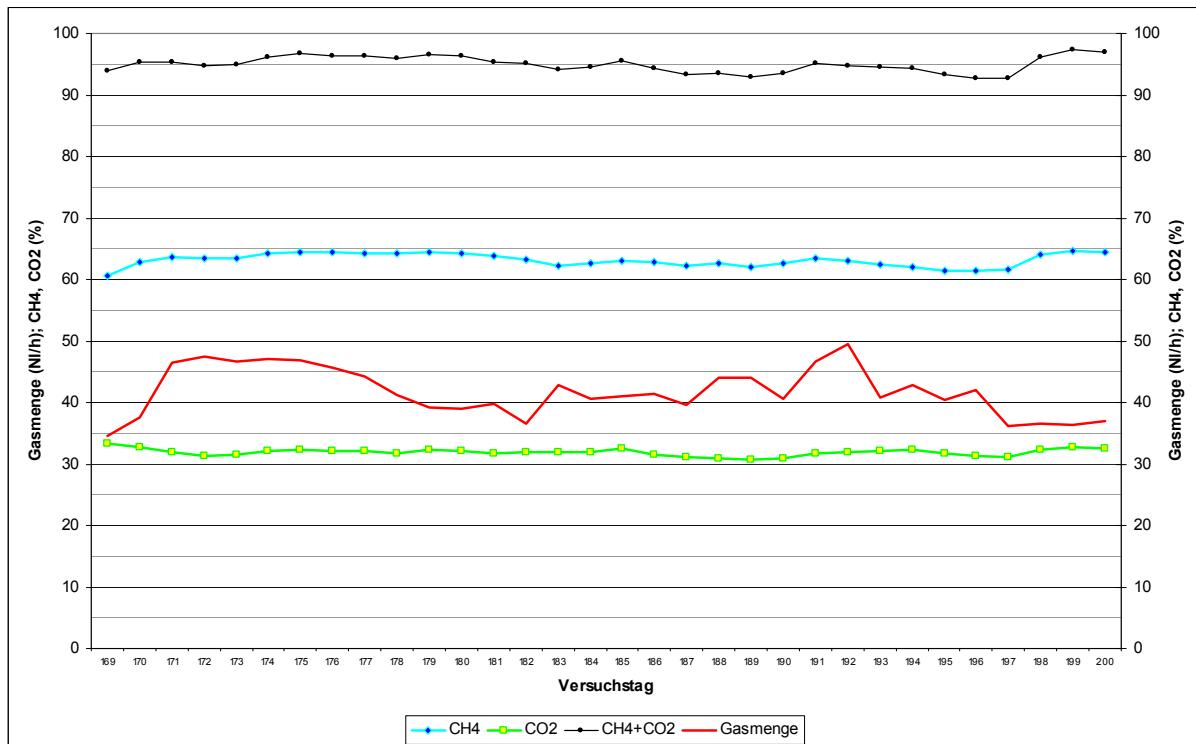


Abbildung 9: Verlauf der Gasmenge und Gasqualität während des Vergärungsversuchs mit HRT 10 d und SRT 40 d

Abbildung 10 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, anderseits sank der CH₄-Gehalt von 63 % auf 55 %. Gleichzeitig erhöhte sich der CO₂-Gehalt im Biogas von 32 % auf 39 %. Zusätzlich zeigte der pH-Wert ebenfalls sinkende Werte und erreichte gegen Ende des Versuchs 7.4 (Tab. 7). 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.

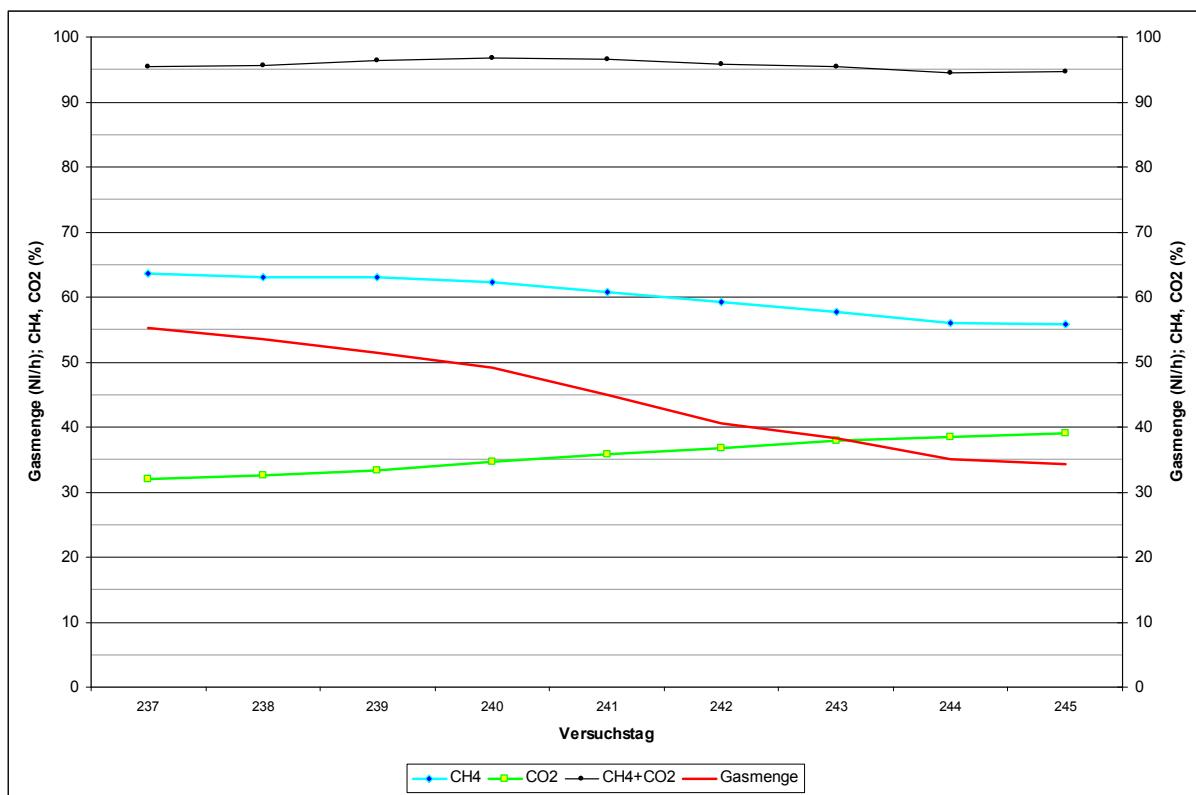


Abbildung 10: Verlauf der Gasmenge und Gasqualität während des Vergärungsversuchs mit HRT 5 d und SRT 15 d

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. 7) und lag damit um etwa 10 % über derjenigen von Rohgülle. Die Gasqualität von mehr als 65 % CH₄ und einem pH-Wert von 7.6 weisen auf stabile Prozessbedingungen hin, obwohl die RB bei 4 kg OTS/m³ • 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.

5.2.2 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_{tot} und vor allem von P₂O₅ 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. 11). Der NH₄- und K₂O-Gehalt bleiben konstant.

Zwischen dem 103. und 126. Versuchstag (23. Okt. bzw. 24. Nov. 2009) nahmen die Gehalte von TS, OTS, P₂O₅, 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 P₂O₅, an. Während des 186. und 207. Versuchstages wurde eine SRT von 40 d gefahren, was zu geringen Gehaltsveränderungen führte.

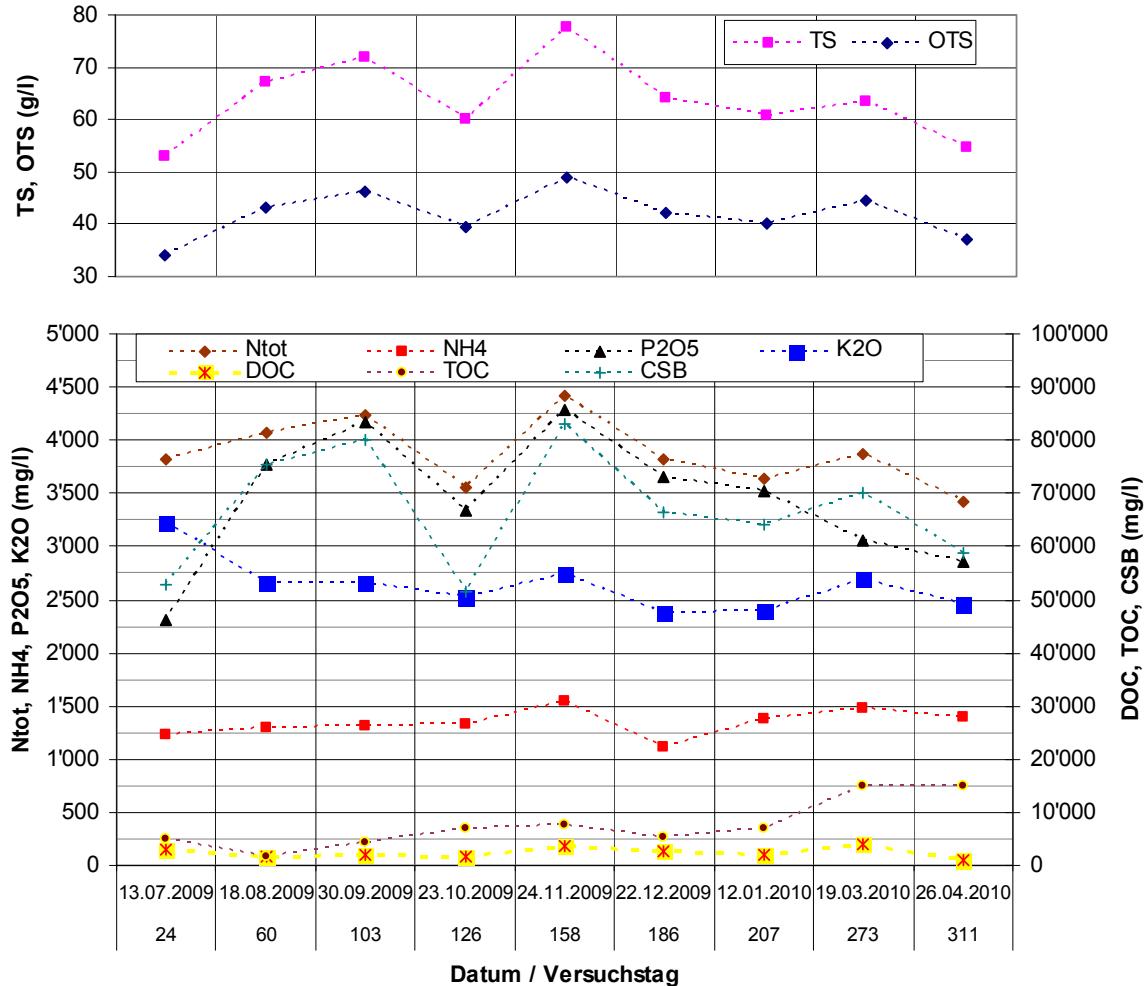


Abbildung 11: Verlauf der Gehalte im UF-Retentat

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 (Gärsubstrat) bzw. bei einer SRT von 20 d 5 Massen-% an.

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

5.2.3 UF-Permeat

Die Gehalte im UF-Permeat zeigen während eines Zeitraums von 9 Monaten (Juli 2009 bis März 2010) konstante Werte (Abb. 12). Es ist ersichtlich, dass hauptsächlich NH_4 - und K_2O -Salze die Membrane passieren, P_2O_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 gleichmässigere Gehalte als Rohgülle. Beispielsweise weist die Rohgülle für N_{tot} Schwankungen zwischen 1'110 und 2'260 mg/l oder auch für K_2O von 1'180 und 2'050 mg/l auf.

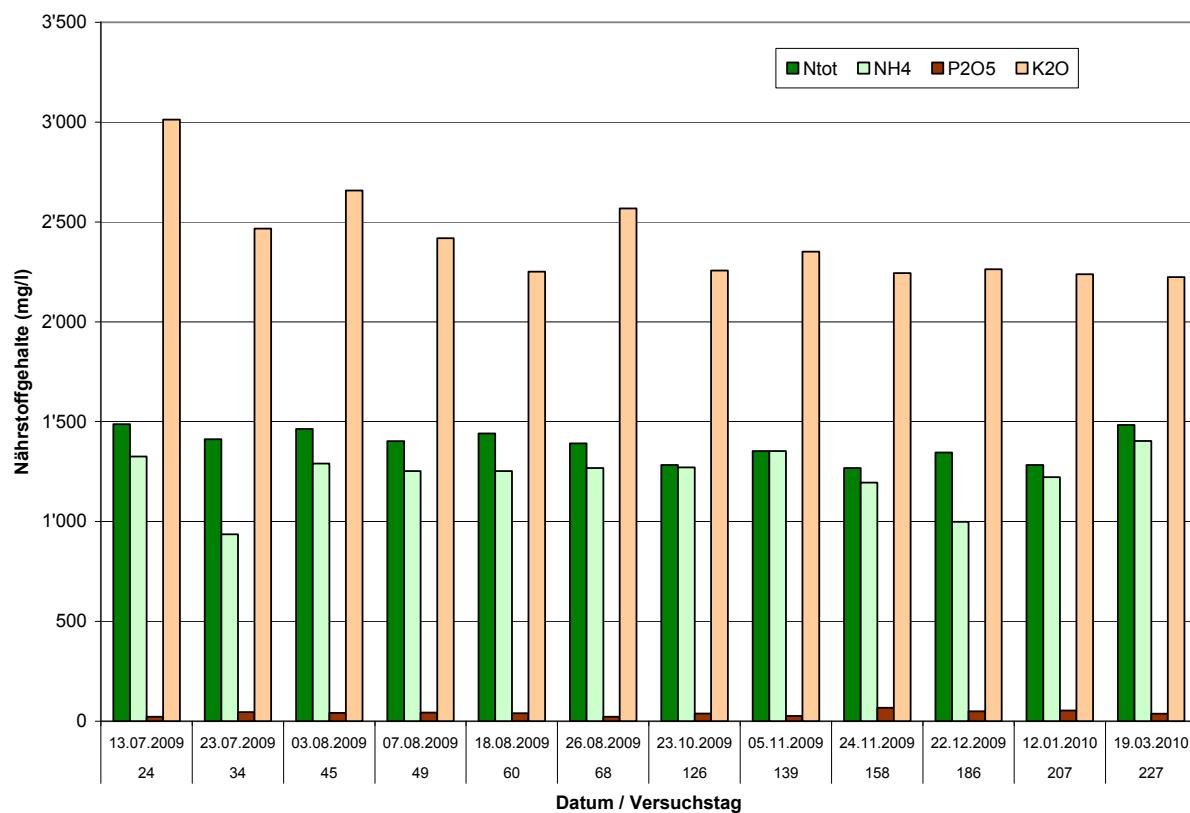


Abbildung 12: Gehalte im UF-Permeat

Tabelle 8 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 entspricht 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 8: 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	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Listeria spp.	ISO 11290-1	in 25 g	positiv	positiv	positiv	n.n.
Listeria monocytogenes	ISO 11290-2	in 25 g	positiv	n.n.	n.n.	n.n.
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; n.n. = nicht nachweisbar

5.3 Vergärung von UF-Retentat

5.3.1 Einleitung

Gemeinschaftlich betriebene Vergärungsanlagen erfordern einen entsprechenden Logistikaufwand. Einerseits muss Gülle nicht nur zur Anlage hin transportiert werden, sondern es sind auch die Gärsubstrate auf die Betriebe zurückzubringen.

Demgegenüber lässt sich die zu transportierende Menge mit einer Vorbehandlung der Gülle in Form einer Separierung und einer Konzentrierung mittels UF, massiv reduzieren. Dieses Konzept basiert auf einer dezentralen Konzentrierung und dem Transport des UF-Retentats in eine zentrale MBR-Anlage (Abb. 13).

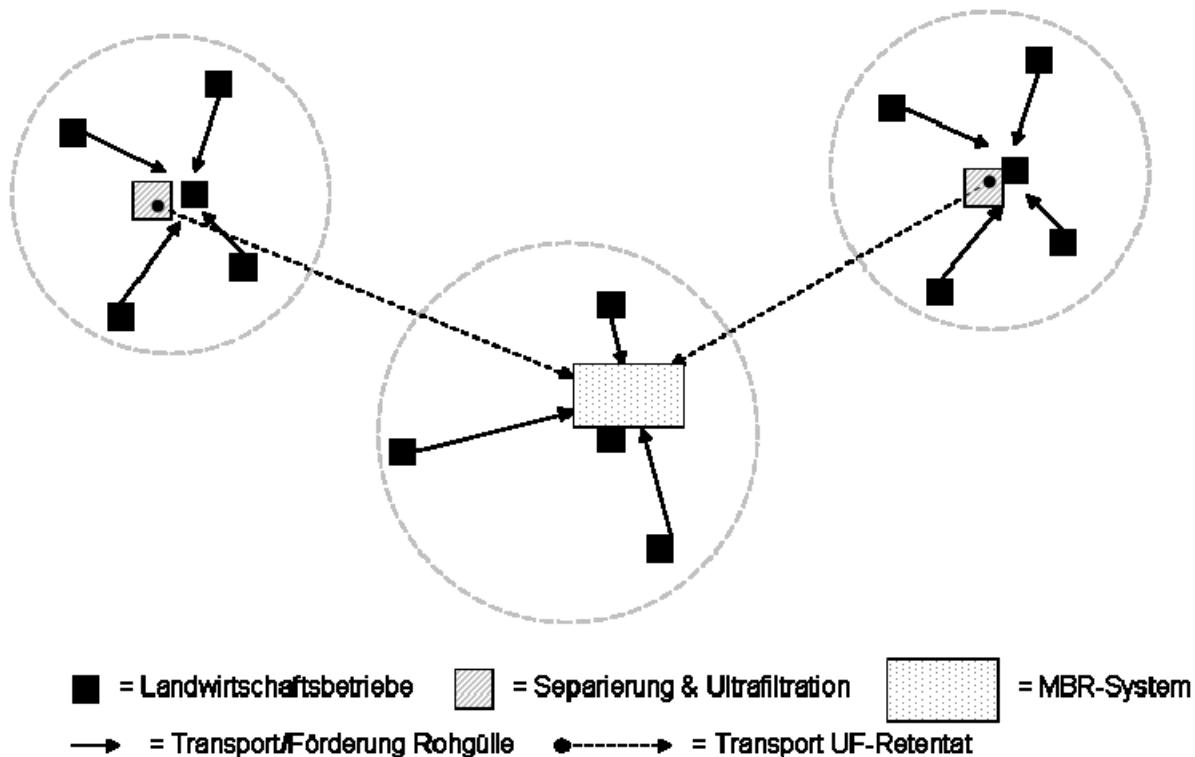


Abbildung 13: Konzept einer dezentralen Konzentrierung der Gülle mit Transport des UF-Retentats in eine zentrale MBR-Anlage

Mit Hilfe der dezentralen Vorbehandlung der Gülle kann der Transportaufwand um den Faktor 5 bis 6 verringert werden. Die Feststoffe aus der Vorbehandlung können bei Bedarf kompostiert bzw. getrocknet werden oder eine Vergärung in einer anderen Biogasanlage wäre denkbar. Das UF-Permeat wird zurückgeführt und dient den beteiligten Betrieben als schnellwirksamer N-Flüssigdünger.

Die zentrale Vergärung im MBR lässt zusätzlich die Möglichkeit zu, das UF-Permeat mittels der Ammoniakstripping zu einem Mineraldünger weiterzubehandeln. Damit kann ausserdem Abwärme genutzt werden.

Eine weitere Variante ist mit der Verwendung des UF-Permeats als Flüssigdünger ausserhalb der Landwirtschaft, beispielsweise im Gemüsebau denkbar.

5.3.2 Vorbehandlung zur Bereitstellung von UF-Retentat

Für die Vergärung von UF-Retentat wurde die Schweinegülle separiert und die Dünngülle mit der UF konzentriert. Dafür wurde eine Ultrafiltrationsanlage im technischen Massstab verwendet (Abb. 14).



Abbildung 14: Ultrafiltrationsanlage zur Konzentrierung von separierter Schweinedünngülle. Die Anlage ist in einem Container untergebracht und weist eine Jahresleistung von ungefähr $4000 \text{ m}^3 \text{ UF-Permeat/a}$ auf (etwa $5000 \text{ m}^3 \text{ Rohgülle/a}$)

Im Durchschnitt wurde die Dünngüllemenge um den Faktor 6.0 aufkonzentriert, entsprechend 16.6 Mengen-%. Tabelle 9 enthält die Durchschnittsgehalte von der Dünngülle und dem UF-Retentat. Die Behandlung mit der UF führt vor allem zu einer Akkumulation der OTS und von Schwermetallen. Bei Cu und Zn werden die Grenzwerte überschritten. Als Konsequenz daraus ist eine schwermetallärmere Fütterung zu achten.

Tabelle 9: Durchschnittliche Gehalte in der Schweinedünngülle und im UF-Retentat

Parameter	Einheit	Dünngülle	UF-Retentat	ChemRRV
TS	%	1.2	5.3	
OTS	% i.d. TS	57.9	73.7	
pH		7.6	7.5	
Ntot	g/kg TS	159.4	84.4	
NH4	g/kg TS	110.8	29.4	
P2O5	g/kg TS	49.8	67.4	
K2O	g/kg TS	137.9	33.8	
DOC	mg/l	1596	4169	
TOC	mg/l	3340	17405	
CSB	mg/l	11588	63600	
Pb	mg/kg TS	<12	<12	120
Cd	mg/kg TS	0.5	0.8	1
Cu	mg/kg TS	136.6	221.0	100
Ni	mg/kg TS	15.8	21.2	30
Zn	mg/kg TS	779.5	1150.5	400

ChemRRV, Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung

Tabelle 10 verdeutlicht die hohe Abtrennleistung der UF bezüglich der OTS. Auch P und TOC, CSB werden weitgehend von der Membran zurückgehalten. Durch die Membran gelangen N und K.

Alle Schwermetalle werden im UF-Retentat konzentriert.

Tabelle 10: Mengen- und Stoffbilanz bei der Ultrafiltration (Durchschnittswerte)

Parameter	Einheit	Dünngülle	UF-Retentat
Menge	kg	1000	166
TS	kg	11.7	8.8
OTS	kg	6.8	6.5
Ntot	g	1862	745
NH4	g	1294	259
P2O5	g	582	595
K2O	g	1610	298
DOC	mg	1596	692
TOC	mg	3340	2889
CSB	mg	11588	10558
Pb	mg	<12	<12
Cd	mg	5	7
Cu	mg	1596	1949
Ni	mg	184	187
Zn	mg	91	101

5.3.3 Vergärungsversuche mit UF-Retentat

Das UF-Retentat wurde bei zwei unterschiedlichen HRT vergoren (Tab. 11). Im Verlauf des Versuchs mit einer HRT von 10 Tagen und einer SRT von 40 Tagen stieg der TS-Gehalt im Fermenter von 4.9 % auf 6.9 %. Aufgrund der zunehmenden Viskosität konnte gegen Ende des Versuchs die Klimatisierung des Fermenterinhals als auch die Fluxleistung an der UF-Membran nicht mehr gewährleistet werden. Der Versuch musste nach 23 Tagen abgebrochen werden. Der folgende Versuch mit einem Schlammlalter von 20 Tagen musste ebenfalls nach 55 Tagen abgebrochen werden. Die beiden Versuche mit noch kürzeren SRT verliefen ohne Probleme. Grundsätzlich sinkt die Gasausbeute mit zunehmender Raumbelastung von 260 l/kg OTS und 3.3 kg OTS/m³ • d auf 140 l bei 5.3 kg.

Tabelle 11: Vergärung von UF-Retentat aus Schweinedünngülle im MBR

	CH ₄ %	CO ₂ %	Gasausbeute l/kg OTS	Gasmenge l/h	RB kg OTS/m ³ • d	Temp. °C	pH
Versuch	HRT 10 d, SRT 40 d						
Mittelwert	60.9	35.8	193.4	28.9	3.7	36.5	7.95
Min	58.4	34.0	48.1	9.0	3.4	35.1	7.90
Max	63.4	36.9	242.0	34.0	4.5	37.4	7.98
Versuch	HRT 10 d, SRT 20 d						
Mittelwert	63.2	35.9	266.1	35.3	3.3	36.5	7.89
Min	61.2	34.6	183.9	27.5	2.2	35.1	7.83
Max	64.8	37.1	434.2	42.7	4.5	37.0	7.94
Versuch	HRT 10 d, SRT 15 d						
Mittelwert	62.4	37.3	225.4	34.3	4.1	36.3	7.13
Min	60.7	34.6	150.8	20.5	2.3	33.8	7.64
Max	63.6	38.9	374.4	39.8	5.5	37.9	7.92
Versuch	HRT 10 d, SRT 12 d						
Mittelwert	61.2	38.2	141.5	30.8	5.3	38.9	7.68
Min	60.0	36.6	109.6	22.0	3.7	37.9	7.55
Max	69.4	39.5	176.8	34.2	6.7	39.8	7.72
Versuch	HRT 20 d, SRT ~ 28 d (25 - 32 d)						
Mittelwert	63.2	33.3	286.4	32.0	2.8	36.6	7.95
Min	27.8	27.1	87.8	11.4	1.8	32.3	7.77
Max	69.4	39.7	699.3	54.6	4.1	40.4	8.07
Versuch	HRT 20 d, SRT 32 d						
Mittelwert	66.5	34.1	462.2	34.8	1.8	36.6	8.01
Min	64.0	31.2	156.1	12.3	1.3	31.4	7.96
Max	69.0	36.3	836.5	74.7	2.5	37.5	8.07

Anschliessend an die Versuche mit einer HRT von 10 d erfolgten zwei Versuchsreihen bei einer HRT mit 20 d. Während dieser Versuche konnte teilweise frische Schweinegülle separiert und ultrafiltriert werden.

Während des ersten Versuchs wurde der Reaktorinhalt bezüglich des TS-Gehalts soweit möglich konstant gehalten. Diese Betriebsweise bedingt eine variable SRT, die zwischen 25 und 32 d schwankte. Mit entsprechendem Analyseaufwand ist es somit möglich trotz Schwankungen im TS- und OTS-Gehalt im Inputmaterial den Reaktorinhalt konstant zu halten.

Der letzte Versuch mit einer HRT von 20 d und einer SRT von 32 d erbrachte die höchste Gasausbeute von 462 l/kg OTS.

Die Versuche mit der Vergärung von UF-Retentat waren gekennzeichnet durch sehr unregelmässige Schwankungen im Gehalt der Rohgülle. Ein Grund lag im Stall- bzw. Gülemanagement aber auch in der Tatsache, dass für die Bereitstellung von UF-Retentat im Durchschnitt das 5,5-fache an Dünngülle notwendig war. Für die Implementierung im überbetrieblichen Einsatz ist auf eine Mischung unterschiedlicher Güllen zu achten, indem ein entsprechend grosses Vorlagevolumen gewählt wird.

5.3.4 Nährstoffgehalte

In Abbildung 15 sind die Nährstoffgehalte im Verlauf der Gärversuche von UF-Retentat dargestellt.

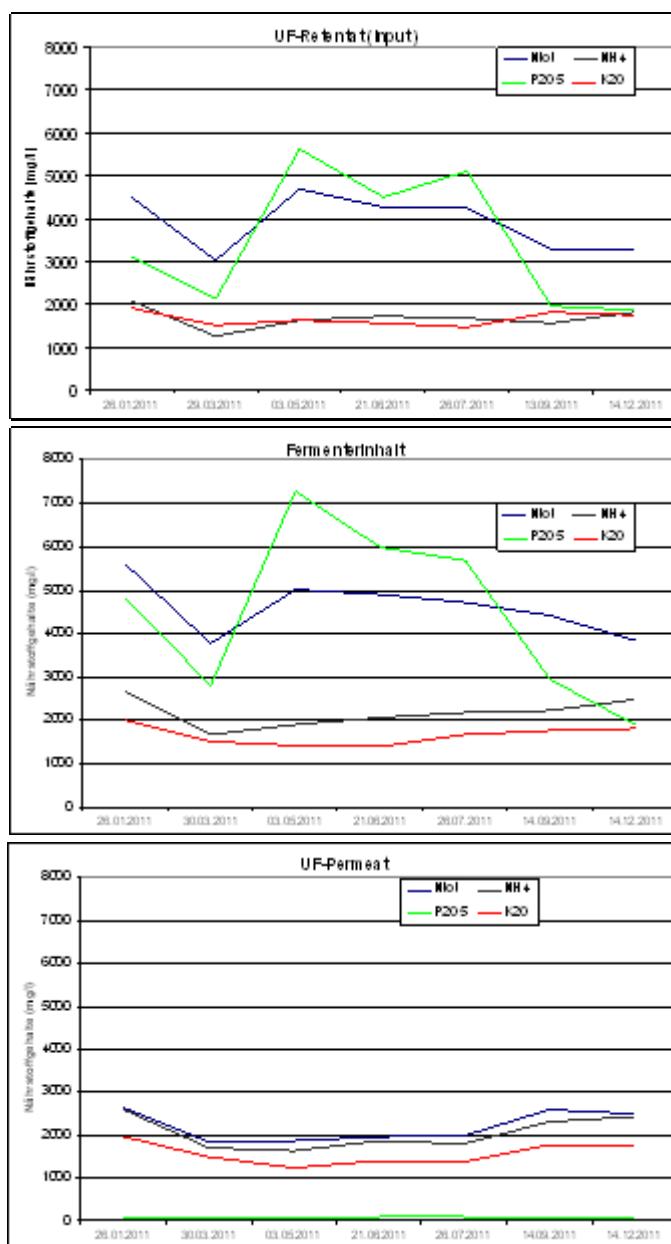


Abbildung 15: Verlauf der Nährstoffgehalte im UF-Retentat (Inputmaterial), im Fermenterinhalt und im UF-Permeat

Der Fermenterinhalt widerspiegelt mehr oder weniger denjenigen im Inputmaterial. Das UF-Permeat weist über den gesamten Zeitraum wesentlich geringere Schwankungen auf.

Der TS-Gehalt der Dünngülle lag im Mittel bei 1.0 % (Min. 0.7 % bzw. Max. 1.5 %).

5.3.5 Restgaspotential von vergorenem UF-Retentat

Zur Bestimmung des Restgaspotentials im UF-Retentat nach der Vergärung im MBR wurden im Labor die entsprechenden Batchansätze durchgeführt (Abb. 16).

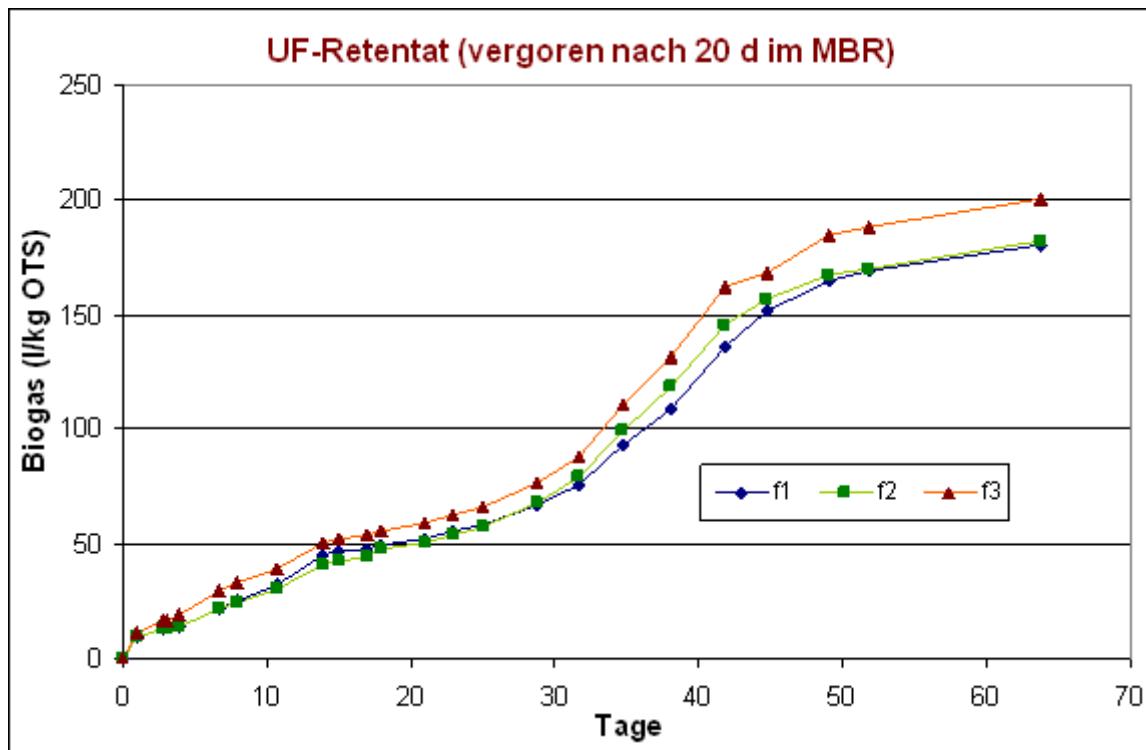


Abbildung 16: Restgaspotential von vergorenem UF-Retentat nach der Vergärung im MBR im Batchansatz

Es ist zu erkennen, dass erst nach rund 30 Tagen ein deutlicher Anstieg der Gasproduktion bis etwa zum 50. Tag eintritt. Für das vergorene UF-Retentat ist eine entsprechende Lagerdauer in einem Nachgärlager erforderlich.

5.4 Vergärung von Dünngülle und Cosubstrat

5.4.1 Einleitung

Allgemein ist bekannt, dass mit Cosubstraten die Wirtschaftlichkeit der Vergärung positiv beeinflusst werden kann.

Speziell beim MBR sind flüssige Substrate mit meist einem hohen Wassergehalt zur Mitvergärung geeignet. Als Beispiele dafür sind Schotte, Glycerin, Blut, Abwasser aus der Getränke- oder aus der Lebensmittelindustrie zu erwähnen.

Weil mit dem MBR-System über die UF Wasser und Salze aus dem Reaktor ausgeschleust werden und damit Fermentervolumen reduziert werden kann, sind gerade auch wasserreiche Substrate grundsätzlich für dieses System geeignet.

In den Vergärungsversuchen mit der halbtechnischen MBR-Versuchsanlage wurde zu separierter Dünngülle aus einer Mischung von etwa 50 % Schweinerohgülle und 50 % Milchviehgülle jeweils 20 % Schotte zudosiert.

5.4.2 Charakterisierung des Inputmaterials

Die Nährstoffgehalte in der Dünngülle (Abb. 17 links) zeigen über den Versuchszeitraum eine Zunahme der Gehalte von N, NH₄ und K₂O und bei P₂O₅ eine leichte Abnahme.

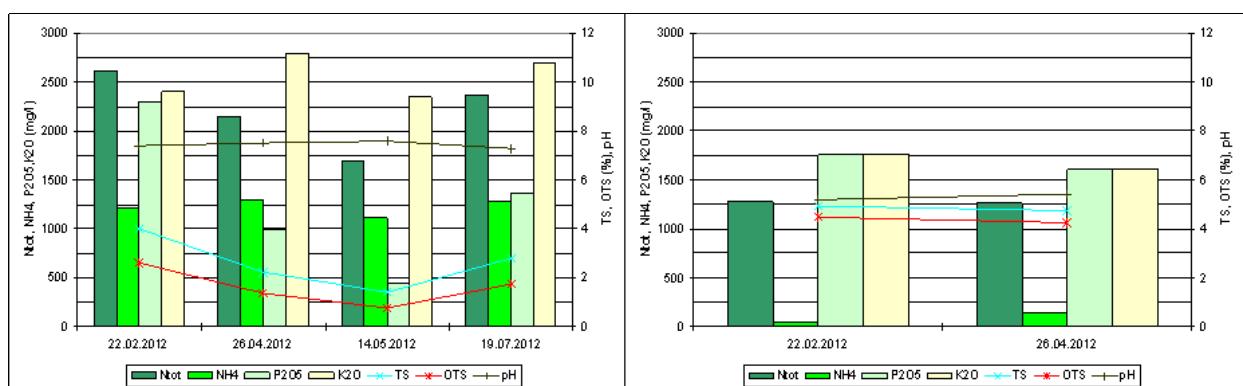


Abbildung 17: Nährstoffgehalte im Inputmaterial; links Dünngülle, rechts Schotte

Die Gehalte in der Dünngülle zeigen Unterschiede über die Zeit. Gut zu erkennen ist der Zusammenhang von TS und P₂O₅. Bei NH₄ und K₂O fallen die Schwankungen geringer aus. Warum die Gehalte an NH₄ und K₂O im Gegensatz dazu deutlich weniger variieren ist unklar. Die Gehalte der Schotte sind konstant (Abb. 17 rechts).

5.4.3 Vergärungsversuche mit Dünngülle und Cosubstrat

Der Wechsel von der UF-Retentatvergärung zu Vergärung von Dünngülle und Cosubstrat erfolgte ab Mitte Dezember 2011 mit der Vergärung von Mischdünngülle (50 % Schweine-/50 % Rindergülle).

Die Versuche mit Cosubstrat sind anfangs Februar 2012 mit einer HRT von 16 d und einer SRT von 28 d gestartet worden. Nach einer Adoptionsphase von 16 d wurden die in Tabelle 13 gezeigten Versuche durchgeführt. In allen Experimenten wurde der Inputmenge an Dünngülle 20 % Schotte zugegeben.

Tabelle 13: Versuche zur Vergärung von Dünngülle mit Cosubstrat (Schotte)

	CH ₄ %	CO ₂ %	CH ₄ + CO ₂ %	Gasausbeute l/kg OTS	Gasmenge l/h	RB kg OTS/m ³ • d	Temp. °C	pH
Versuch	HRT 16 d, SRT 28 d							
Mittelwert	56.2	41.0	97.2	537.7	47.7	1.4	36.8	7.63
Min	54.4	39.7	94.1	395.1	40.3	0.9	34.1	7.59
Max	58.3	43.0	101.3	760.6	56.2	1.8	38.2	7.75
Versuch	HRT 10 d, SRT 22 d							
Mittelwert	53.6	41.5	95.1	341.4	39.7	2.3	36.7	7.59
Min	52.6	40.0	92.6	210.3	28.6	1.9	35.6	7.54
Max	55.3	42.8	98.2	439.8	45.8	3.5	39.3	7.60
Versuch	HRT 10 d, SRT 20 d							
Mittelwert	52.6	42.5	95.1	416.3	40.5	2.0	36.5	7.45
Min	51.5	41.8	93.3	255.3	34.9	1.4	31.0	7.36
Max	53.4	43.1	96.5	559.9	48.1	3.2	39.3	7.52
Versuch	HRT 10 d, SRT 25 d							
Mittelwert	53.4	42.2	95.6	563.0	40.8	1.4	36.8	7.40
Min	45.8	36.3	82.1	315.3	22.5	0.6	35.8	7.34
Max	56.7	43.6	100.3	1188.4	45.0	2.2	38.7	7.48
Versuch	HRT 20 d, SRT 30 d (nur Milchviehgülle)							
Mittelwert	55.6	42.1	97.7	550.2	27.7	1.1	36.7	7.52
Min	42.0	32.5	74.5	365.4	19.8	0.6	25.3	7.39
Max	57.6	44.6	102.2	1019.2	56.7	2.2	37.6	7.58

Die höchste Gasausbeute mit 563 l/kg OTS konnte bei einer HRT von 10 d und einer SRT von 25 d erzielt werden. Die RB lag zwischen maximal 3.5 und 0.6 kg OTS/m³ • d.

Auffallend ist, dass praktisch in allen Versuchen hohe Schwankungen infolge der TS- und OTS-Gehalten in der Dünngülle zu verzeichnen waren (Abb.18).

Die Zudosierung von Schotte führt zu einem geringeren CH₄-Gehalt im Biogas um 55 % gegenüber einem CH₄-Gehalt von mehr als 63 % während der Vergärung von Dünngülle.

Im Juli 2012 stand keine Schweinerohrgülle mehr zur Verfügung, weil der Mastschweinestall wegen Umbau ausgestellt werden musste. Deswegen sind die weiteren Versuche ab Mitte August, HRT 20 d und SRT 30 d, nur noch mit separierter Milchviehdünngülle erfolgt.

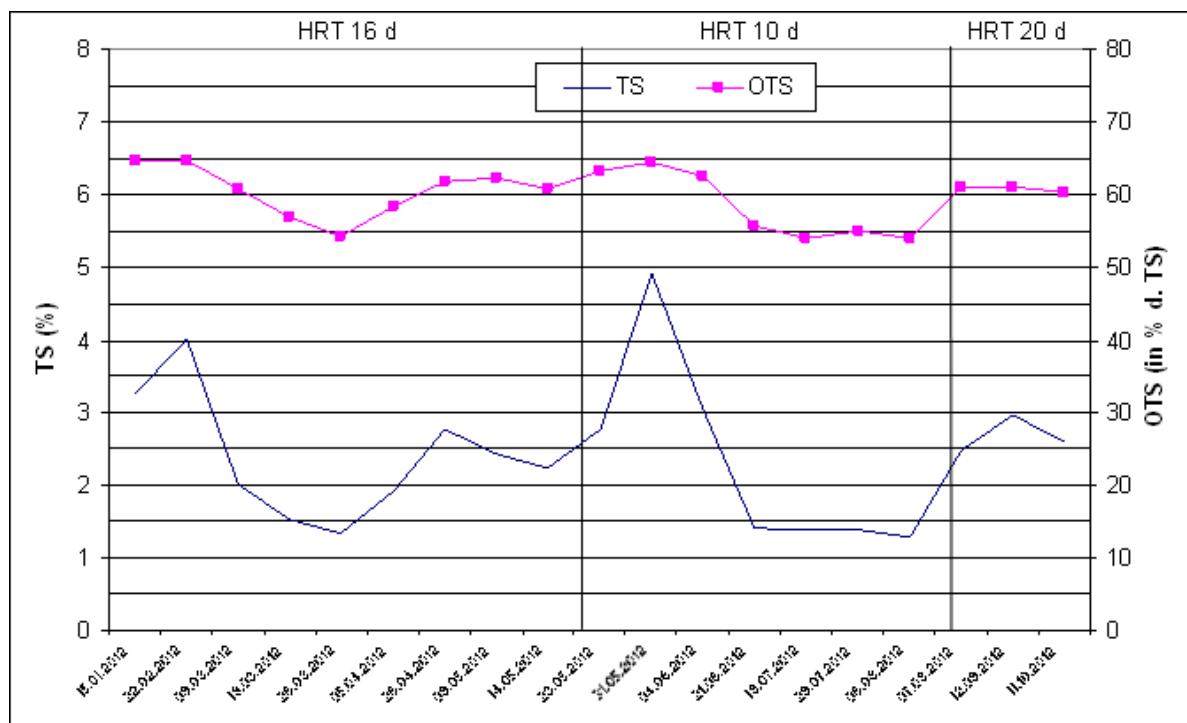


Abbildung 18: Gehalte von TS und OTS in der Dünngülle

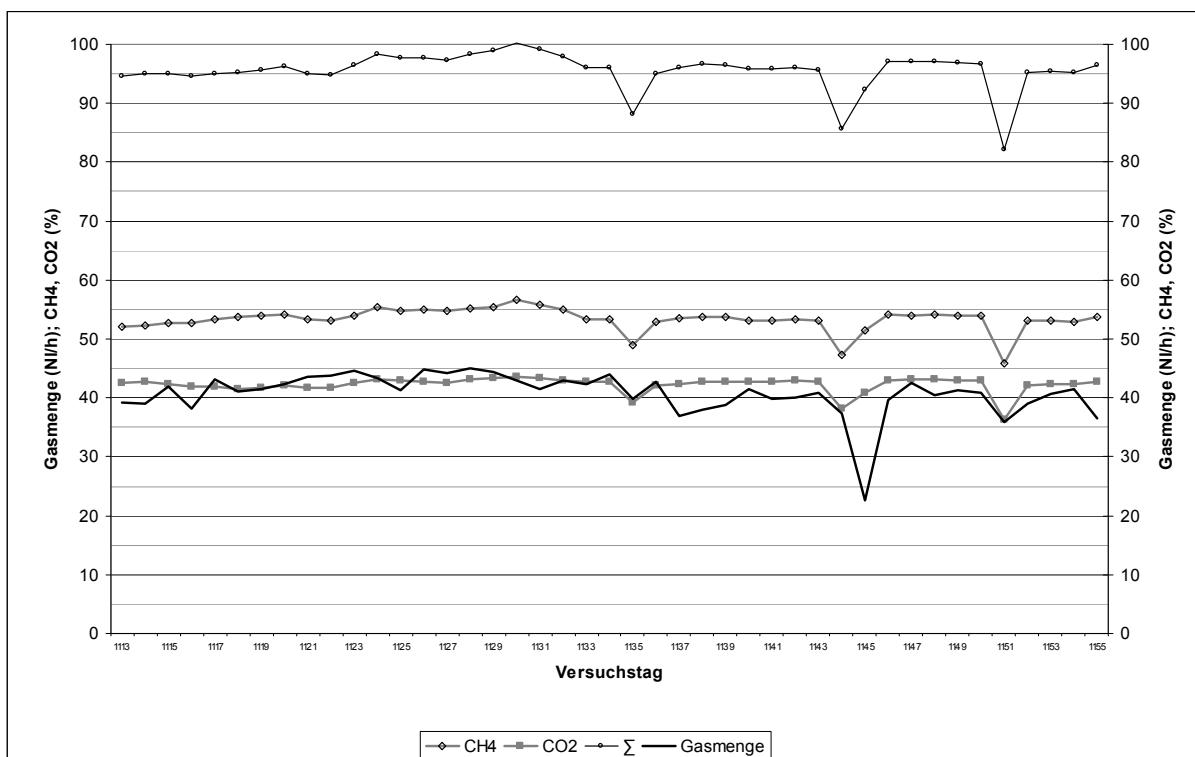


Abbildung 19: Gasverlauf während der Vergärung von Mischdünngülle und Molke (HRT 10 d, SRT 25 d)

Am 1144. Versuchstag (18.Juli 2012) ist das Niveau des Fermenters unterschritten worden, was zur automatischen Abschaltung der UF-Anlage führte und einen Einbruch der Gasproduktion zur Folge hatte (Abb. 19).

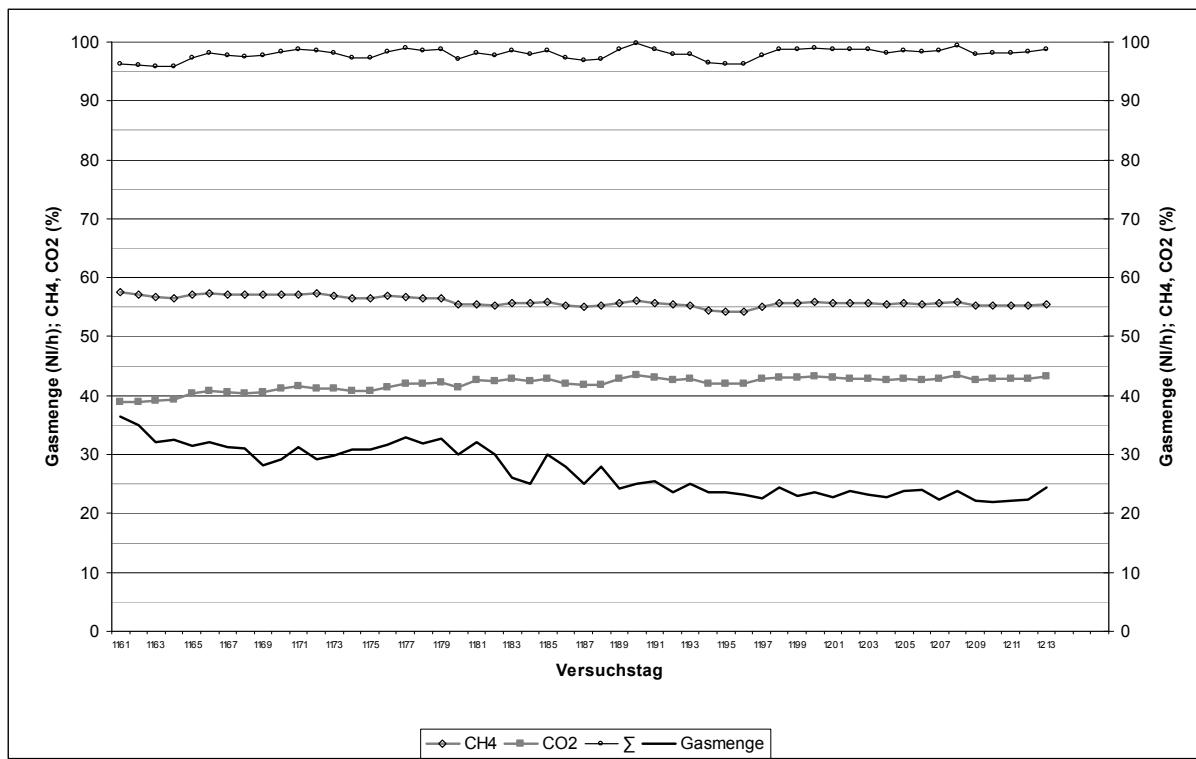


Abbildung 20: Gasverlauf während der Vergärung von Milchviehdünngülle und Molke (HRT 20 d, SRT 30 d)

Der letzte Covergärungsversuch mit Milchviehdünngülle und 20 % Schotte lief bis Ende Oktober 2012 (Abb. 20). Die Dünngülle, die im August separiert wurde, ist während der Versuchsdauer in einem geschlossenen Aussentank zwischengelagert worden. Dies dürfte der Grund dafür sein, dass die Gasproduktion gegen Ende des Versuchs leicht zurückging. Die Gasqualität weist eine relativ konstante Zusammensetzung auf.

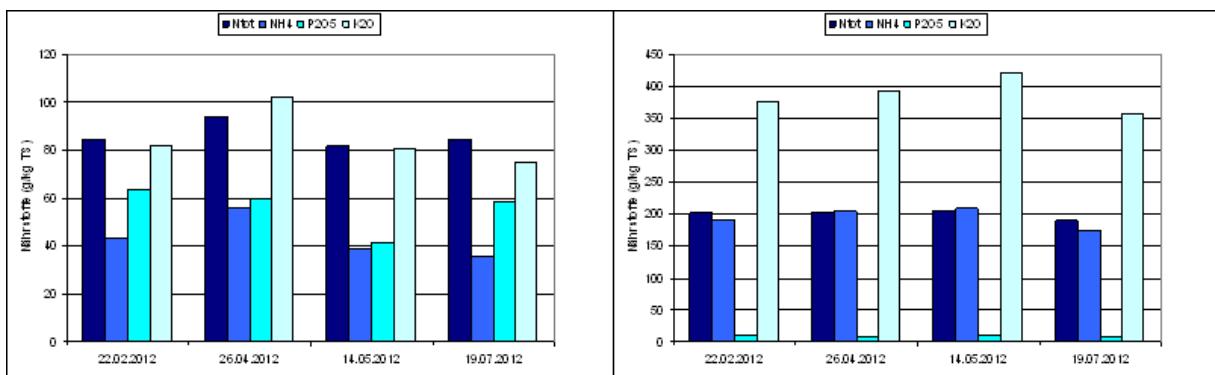


Abbildung 21: Nährstoffgehalte im Outputmaterial; links Fermenterinhalt (UF-Retentat), rechts UF-Permeat

Die Nährstoffgehalte sowohl im Fermenterinhalt als auch im UF-Permeat sind blieben während des Versuchzeitraums relativ konstant (Abb. 21). Bei der UF passieren die Salze, wie Ammonium- und Kalisalze die Membran. Phosphor wird praktisch vollständig zurückgehalten.

5.5 Separierung

5.5.1 Einleitung

Die Separierung ist der erste Prozessschritt beim MBR-System. Es werden zwei divergierende Anforderungen an diesen Schritt gestellt. Einerseits müssen zur Vermeidung von Betriebsproblemen bei der UF alle verstopfungsgefährlichen Partikel eliminiert werden. Andererseits dürfen nicht alle organischen Stoffanteile abgetrennt werden, da dadurch die Biogasmenge reduziert wird.

Mit den meisten Siebverfahren können die entsprechenden Anforderungen erfüllt werden.

5.5.2 Bogensieb

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

In Abbildung 22 ist der Stofffluss bei der Siebung von Mischrohgüle aufgezeigt. Aufgrund der fehlenden Nachentwässerung der Feststoffe verbleiben mehr gelöste Stoffe in der Schlammfraktion. Dies lässt sich am Abtrenngrad von NH_4 und K_2O mit 26 bzw. 28 % erkennen. Die Mengen an P_2O_5 im Feststoff bzw. Düngergüle stimmen mit denjenigen in der Mischrohgüle nicht überein, was vermutlich auf die Probenahme zurückzuführen ist.

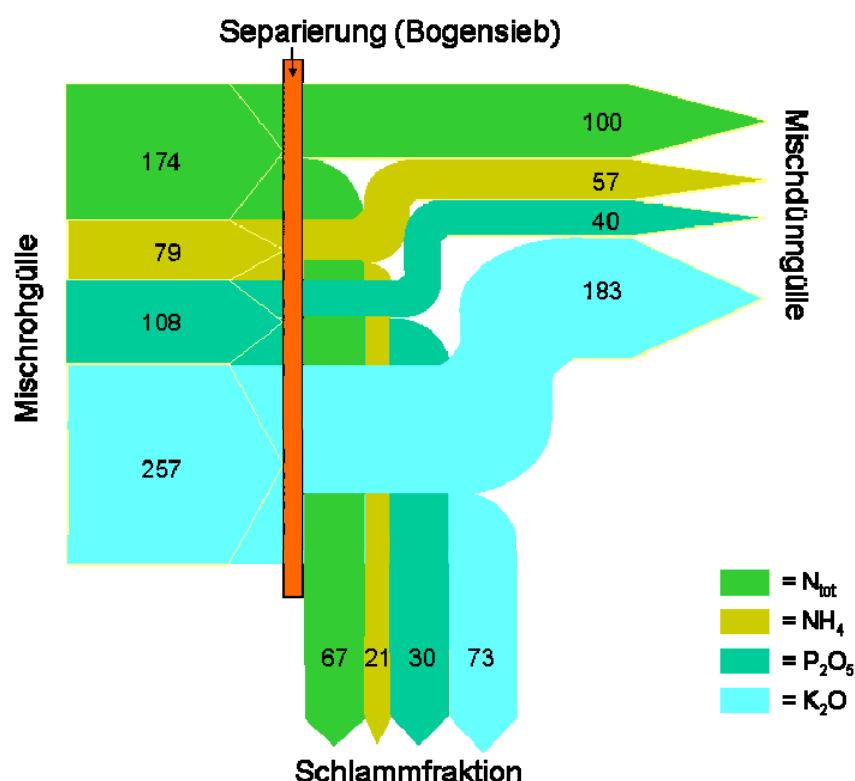


Abbildung 22: Stofffluss bei der Separierung (Basis: 100 kg Mischrohgüle, Nährstoffmengen in g)

5.5.3 Siebpressschnecke

Tabelle 14 enthält die Daten über die Separierung von Milchviehgülle. Der Versuch wurde mit einer fahrbaren Einheit während der Versuchsphase 3, Vergärung von Dünngülle und Cosubstrat, im August 2012 durchgeführt. Da die Rohgülle schon längere Zeit gelagert wurde, ist davon auszugehen, dass bei der Separierung weniger Nährstoffe im Feststoff verbleiben. Auch der TS- und OTS-Abtrenngrad liegt mit 20 bzw. 25 % tief.

Tabelle 14: Stofffluss bei der Separierung von Milchviehgülle mit einer Siebpressschnecke

Massenbilanz	Menge	TS	OTS	Ntot	NH4	P2O5	K2O	Ca	Mg
	kg	kg	kg	g	g	g	g	g	g
Rohgülle	1000	34.7	24.3	2085	902	829	3331	833	416
Feststoff	28	6.7	6.0	89	20	51	80	57	20
Dünngülle	972	28.0	18.3	1876	868	728	3275	784	392
Summe Fest + Flüssig	1000	34.7	24.4	1964	888	779	3355	841	412
Abtrenngrad mit Feststoff	2.8%	19.2%	24.9%	4.3%	2.2%	6.2%	2.4%	6.9%	4.8%

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

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.

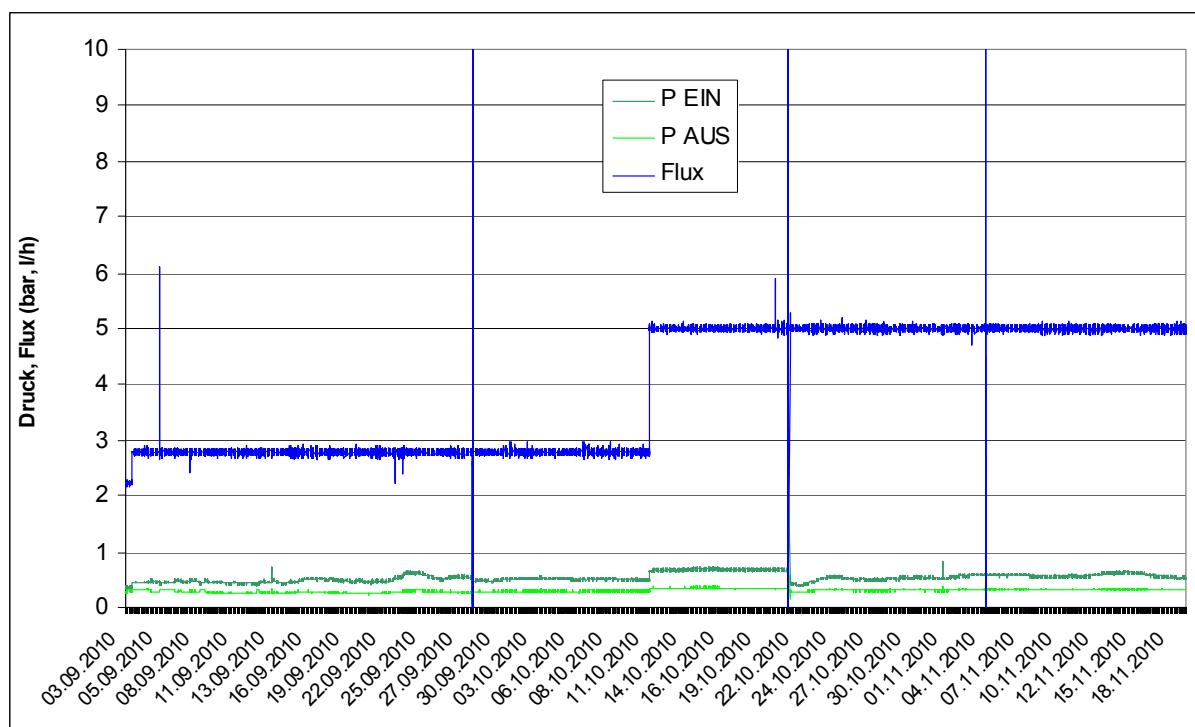


Abbildung 23: Verlauf des Ultrafiltrationsbetriebs zwischen dem 3.9.2010 und dem 18.11.2010

Abbildung 23 verdeutlicht den sehr konstanten Fluxverlauf über die Zeit während den Gärversuchen mit Dünngülle. Die drei vertikalen blauen Linien zeigen die Reinigungen der UF-Membranen. Dabei wurde am 28.9. und am 21.10.2010 eine chemische Reinigung und am 4.11.2010 eine Spülung mit Wasser durchgeführt. Der Flux lag bis zum 11.10.2010 bei etwa 2.8 l/h. Ab dem 11.10.2010 ist eine kürzere Vergärdauer gefahren worden, was eine entsprechend höhere Fluxleistung von knapp 5 l/h bedingte.

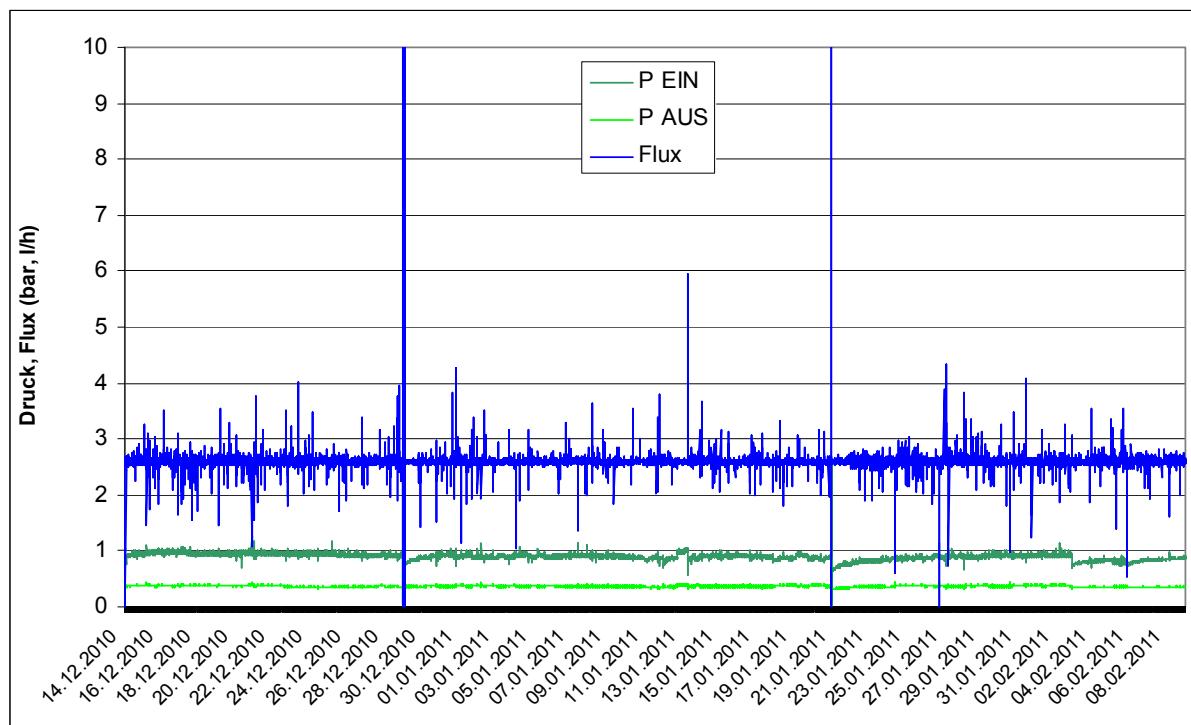


Abbildung 24: Verlauf des Ultrafiltrationsbetriebs zwischen dem 14.12.2010 und dem 9.2.2011

Auch während der Vergärung von UF-Retentat konnte die UF problemlos betrieben werden. Jeweils am 29.12.2010 und am 21.1.2011 erfolgten chemische Reinigungen (Abb. 24).

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

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.

Im Gegensatz zu Gülle erfordern Gärreste aus der Covergärung in der Regel tägliche Reinigungszyklen, da die Inhaltsstoffe schneller eine Verminderung der Fluxleistung der Membran bewirken.

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. 25).

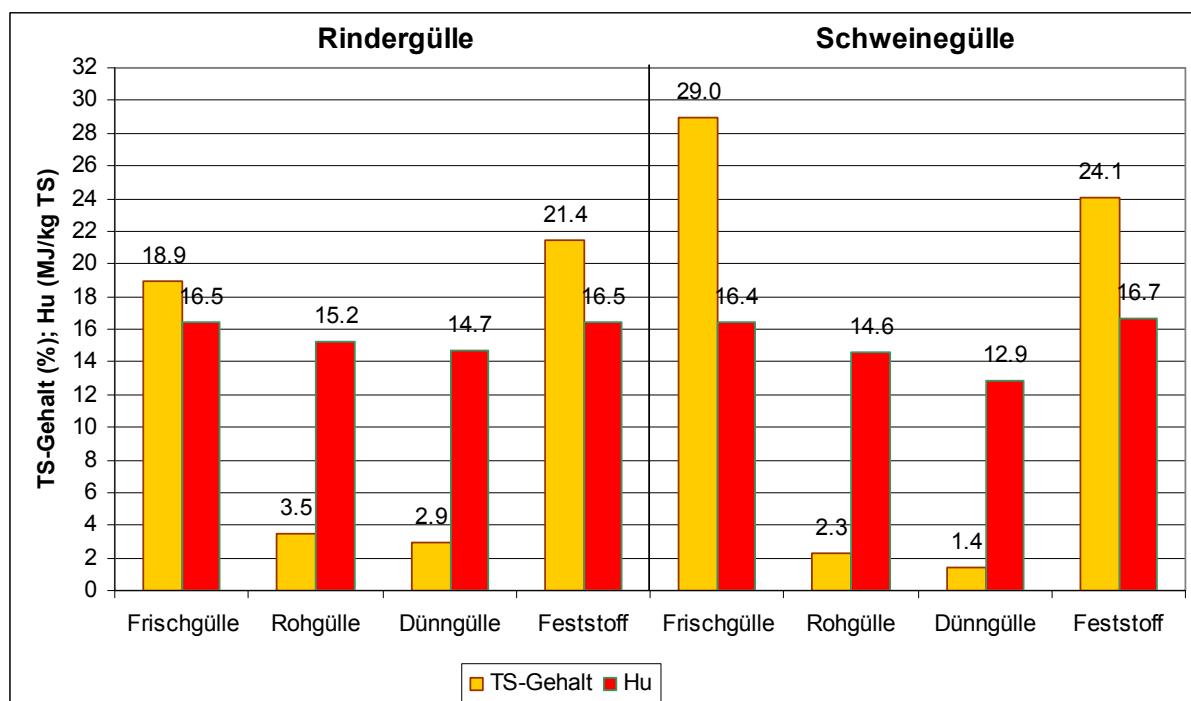


Abbildung 25: TS-Gehalt und unterer Heizwert (Hu) unterschiedlicher Güllefractionen

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. Der Feststoff im Beutelfilter wurde anschliessend von Hand zusätzlich ausgepresst.

Aufgrund der TS- und Heizwertanalyse konnten die Heizwerte der Rohgülle mit den einzelnen Fraktionen aus der Separierung verglichen werden (Abb. 26). 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 Dünngülleanteil 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.

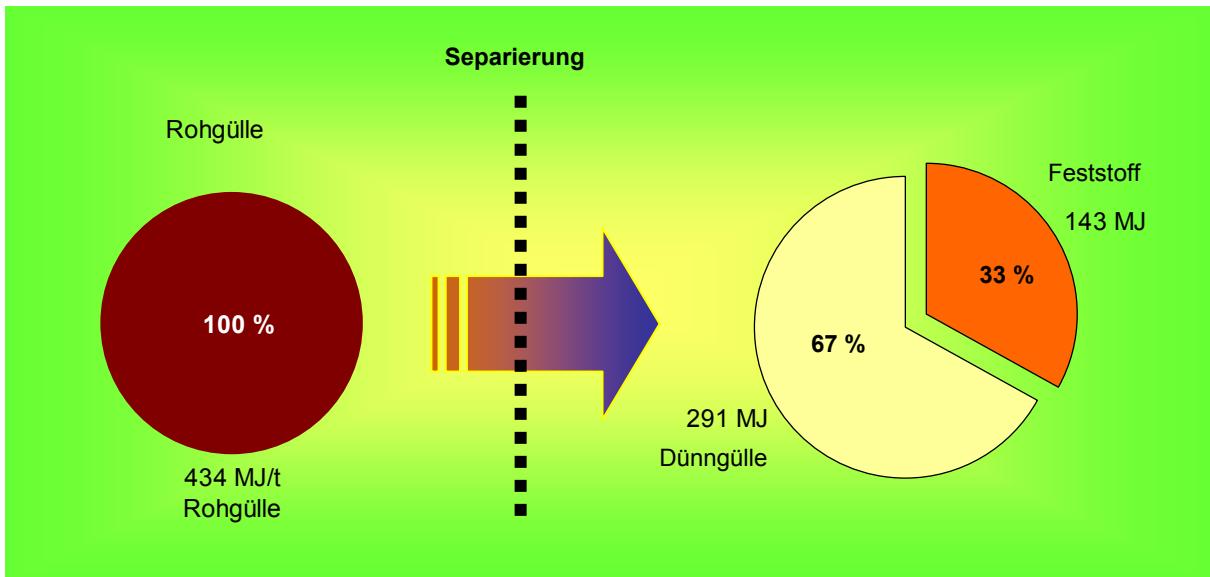


Abbildung 26: Energiegehalt und –anteile von Rohgülle (Mischgülle), Feststoff und Dünngülle; Berechnungsbasis: 1'000 kg Mischorhgülle

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. 15). Die OTS-Menge von knapp 12 kg/m³ 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 K₂O mit anteilmässig 99 % bei den Gehalten der unverdünnten Gülle. Für N_{tot}, NH₄ und P₂O₅ liegen die Werte bei 85 %, 69 % und 72 %. Beim Stickstoff lassen die geringeren Mengen auf entsprechende Verluste schliessen.

Tabelle 15: Gehalte in der Schweine- bzw. Rinderrohgülle im Vergleich mit den GRUDAF-Daten

Parameter Einheit		TS kg/m ³	OTS kg/m ³	N _{tot} g/m ³	NH ₄ g/m ³	P ₂ O ₅ g/m ³	K ₂ O g/m ³
Schwein Rind	Durchschnitt	18.2	11.7	1848	1053	995	1586
	Durchschnitt	43.2	31.7	1986	685	770	3206
Schwein Rind	GRUDAF	50.0	36.0	6000	4200	3800	4400
	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 NH₄ von den Werten gemäss GRUDAF ab. Der geringe NH₄-Gehalt ist nicht erklärbar, da der N_{tot}-Gehalt mit dem Verdünnungsgrad multipliziert praktisch den GRUDAF-Werten entspricht.

Die Rinderviehrohgülle 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 Futteraugebiet 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. 16). Die Schweinegülle hingegen enthält beinahe das Doppelte an Cu und dreimal soviel Zn wie vorgeschrieben!

Tabelle 16: Schwermetallgehalte in der Schweine- bzw. Rinderrohgülle im Vergleich mit den Qualitätsanforderungen (ChemRRV, Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung)

Parameter Einheit	Pb mg/kg TS	Cd mg/kg TS	Cu mg/kg TS	Ni mg/kg TS	Zn mg/kg TS	Hg 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. 27). 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 Biomasserrückhalt im Fermenter wurde beispielsweise ein Schlammbettreaktor als am besten geeignet ermittelt. Die HRT liegt für Schwei nedünngülle 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.

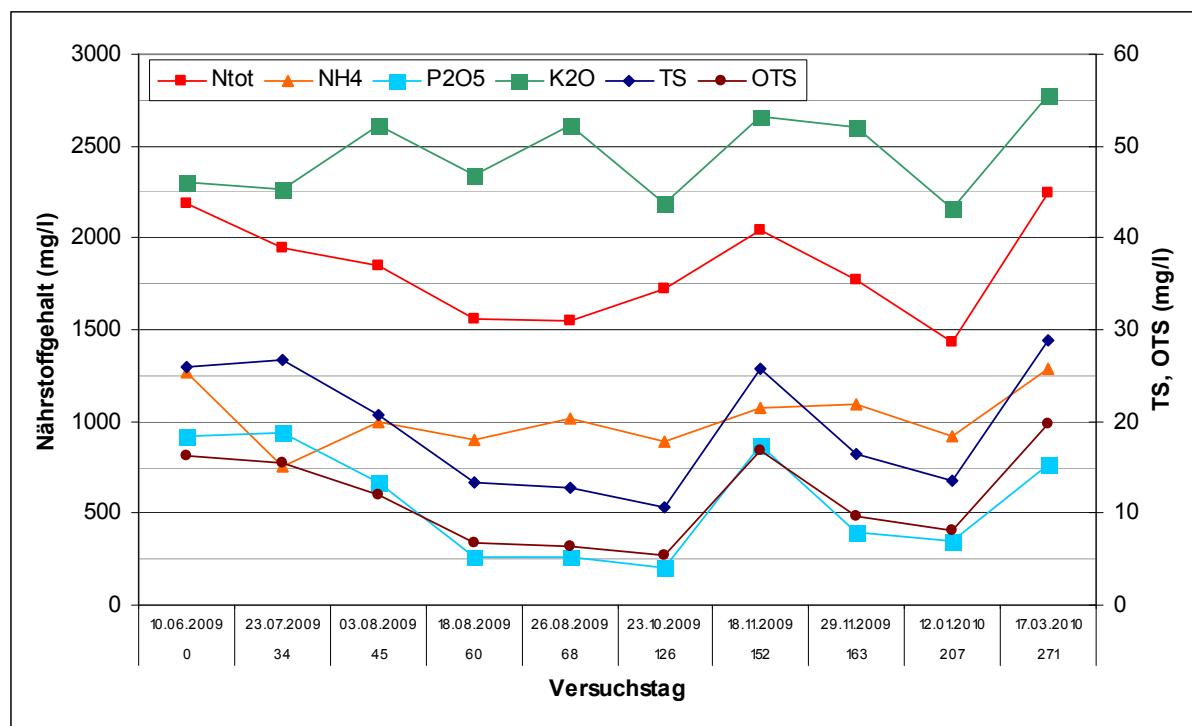


Abbildung 27: Verlauf der Gehalte in der Dünngülle

6.3 Separierung

Die Separierung der Rohgülle ist eine bekannte Massnahme zur Verbesserung der Gülleneigenschaften. In der landwirtschaftlichen Praxis werden hauptsächlich Pressschnekkenseparatorn 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 Impfmaterial 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 [Heperd 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. 17) haben ergeben, dass die separierten Feststoffe wenig zur Biogasproduktion beitragen [Hersener, Meier 2002], aber dennoch über einen beachtlichen Energieinhalt (Heizwert) verfügen..

Tabelle 17: 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 18 mit einem OTS-Abtrenngrad von mehr als 96 %.

Tabelle 18: 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 19 zeigt, dass im UF-Retentat ausser beim Zn wegen der kontinuierlichen Entnahme von Schlamm aus dem Reaktor keine Anreicherung von Schwermetallen erfolgt.

Tabelle 19: 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

6.5.1 Vergärung von Dünngülle

Aus den Ergebnissen der durchgeföhrten 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 CH₄ von 63 bis 66 % bzw. für CO₂ von 32 bis 33 %. Die Gasmenge schwankte aufgrund der unterschiedlichen Konzentrationen in der Dünngülle.

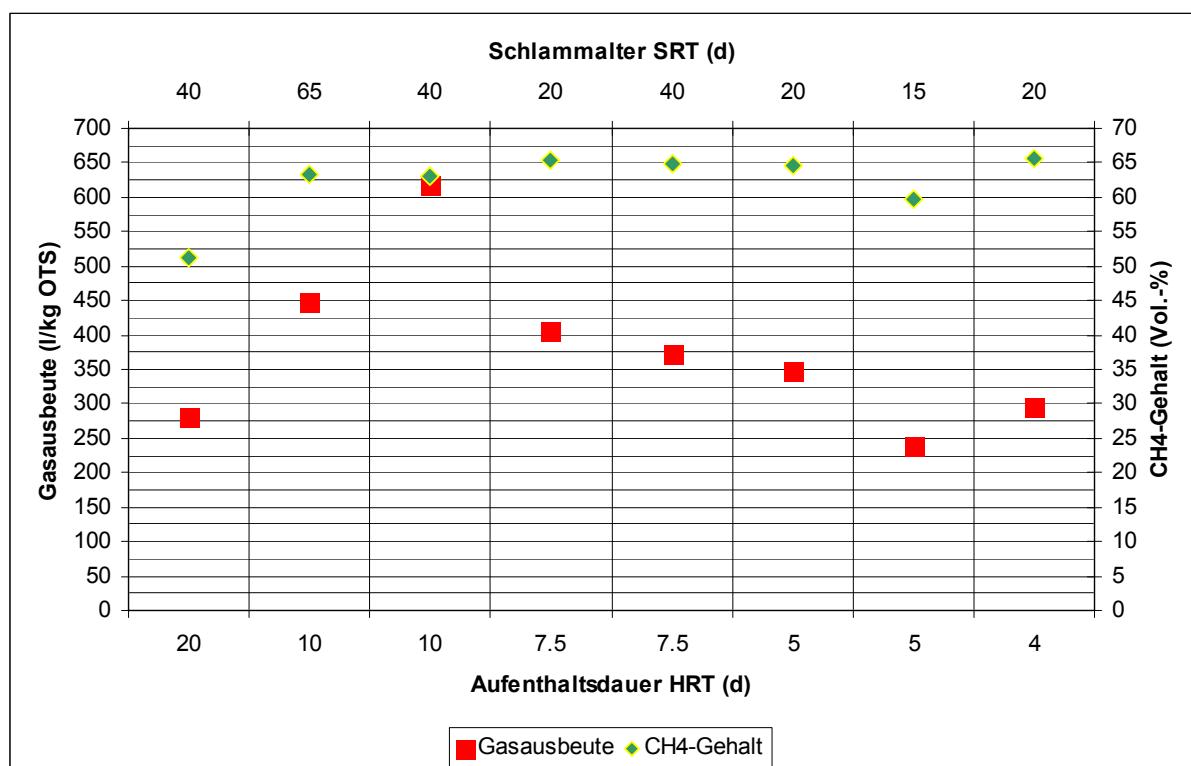


Abbildung 28: Vergärungsversuche mit Mischdünngülle im MBR

Der Versuch mit einer HRT von 5 Tagen und einer SRT von 15 Tagen (vgl. Abb. 28) weist darauf hin, dass das Schlammalter auf die Prozessstabilität einen Einfluss hat. Indizien, wie die Abnahme im CH₄-Gehalt mit gleichzeitigem Anstieg des CO₂-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. 28).

Eine Verringerung der HRT und damit eine Erhöhung der Raumbelastung führen zu einer abnehmenden Gasausbeute. In Reaktoren ohne Biomasserrückhalt 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/ m³ • 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.

6.5.2 Vergärung von UF-Retentat

Zur Vergärung von UF-Retentat sind uns keine Hinweise aus der Literatur bekannt.

Die Versuche haben gezeigt, dass aus verfahrens- und prozesstechnischer Sicht konzentrierte Dünngülle in Form von UF-Retentat aus Schweinedünngülle mit dem MBR-System behandelt werden kann.

Aus Sicht der Verfahrenstechnik muss hingegen der TS-Konzentration im Reaktor besondere Beachtung geschenkt werden. Eine Online-Messung ist bei einem Reaktorbetrieb mit kurzer HRT von 10 d bzw. SRT von > 15 d erforderlich. Bei zunehmendem TS-Gehalt im Reaktor sinkt die Fluxleistung der Membran bzw. steigt der Reinigungsaufwand an und beeinträchtigt somit die Wirtschaftlichkeit des Systems. Als Gegenmassnahme müsste über die Online-Messung die Entnahmemenge an UF-Retentat und damit die SRT flexibel reguliert werden.

Bei einer HRT von 20 d konnte ein konstanter Anlagenbetrieb gewährleistet werden.

Tabelle 20: Vergleich der Gasausbeuten im Labor mit derjenigen im MBR bei der Vergärung von UF-Retentat

Batchansatz Fraktion		GB 9 l/kg OTS	GB 22 l/kg OTS	GB 43 l/kg OTS	GB 47 l/kg OTS
Rohgülle	aus Grube	108	285	385	
Feststoff		61	194	314	328
Dünngülle		121	210	273	
UF-Retentat	frisch	136	235	286	
UF-Permeat	mit Inokulum	0	0	244	
UF-Permeat	o. Inokulum	0	0	0	
Vergärung v. UF-Retentat	HRT 10 d	HRT 20 d			
UF-Retentat	MBR	141 - 266	286 - 462		

In Tabelle 20 sind die Gasausbeuten verschiedener Fraktionen dargestellt. Bei der Rohgülle handelt es sich um Schweinegülle, die aus der Grube entnommen wurde. Die Lagerung führt zu einer entsprechend geringeren Gasausbeute. Trotzdem sind nach 43 d mit 385 l/kg OTS hohe Werte erreicht worden. Separierte Feststoffe erzielen erst nach mehr als 40 Tagen hohe Gasausbeuten. Dünngülle und UF-Retentat aus der Vorbehandlung mit der UF zeigen beide vergleichbare Gasausbeuten, jedoch geringere im Vergleich zu Rohgülle.

6.5.3 Vergärung von Dünngülle und Cosubstrat

Als Cosubstrat diente in den Versuchen Schotte. Der Anteil lag bei 20 % Schotte bzw. 80 % Mischdünngülle. In [Wellinger 1991] wird von Volumenanteilen bis 30 % Schotte zu Gülle berichtet, bei der die Vergärung problemlos ist. Die Gasausbeuten der Schotte werden mit 820 bis 940 l/kg OTS bzw. 450 bis 540 l CH₄/kg OTS angegeben. Dies entspricht einem CH₄-Gehalt im Biogas von ca. 55 bis 57 %.

[Membrez 2004] hat mit einem Anaerobfilter Schotte (6 % TS, 92 % OTS) vergoren und dabei hohe Gasausbeuten von 41 bis 48 m³ Biogas/m³ Schotte mit einem Methangehalt zwischen 51 und 53 % erzielt. Dies entspricht einem Biogasertrag von etwa 840 l/kg OTS bzw. etwa 440 l CH₄/kg OTS.

Nach [Renner et al. 1986] enthalten 100 g Molke 0.2 g Fett, 0.8 g Eiweiss und 4.7 g Kohlenhydrate. Rechnerisch werden etwa 780 l Biogas/kg OTS bzw. rund 420 l CH₄/kg OTS ermittelt.

Abbildung 29 zeigt die Gasausbeuten über die Zeit im Batchversuch mit 100 % Schotte. Der Gasverlauf zeigt eine geringe Entwicklung während den ersten 30 bis 40 Tagen und erreicht erst nach etwa 100 Tagen Gasausbeuten von 650 bis 700 l/kg OTS.

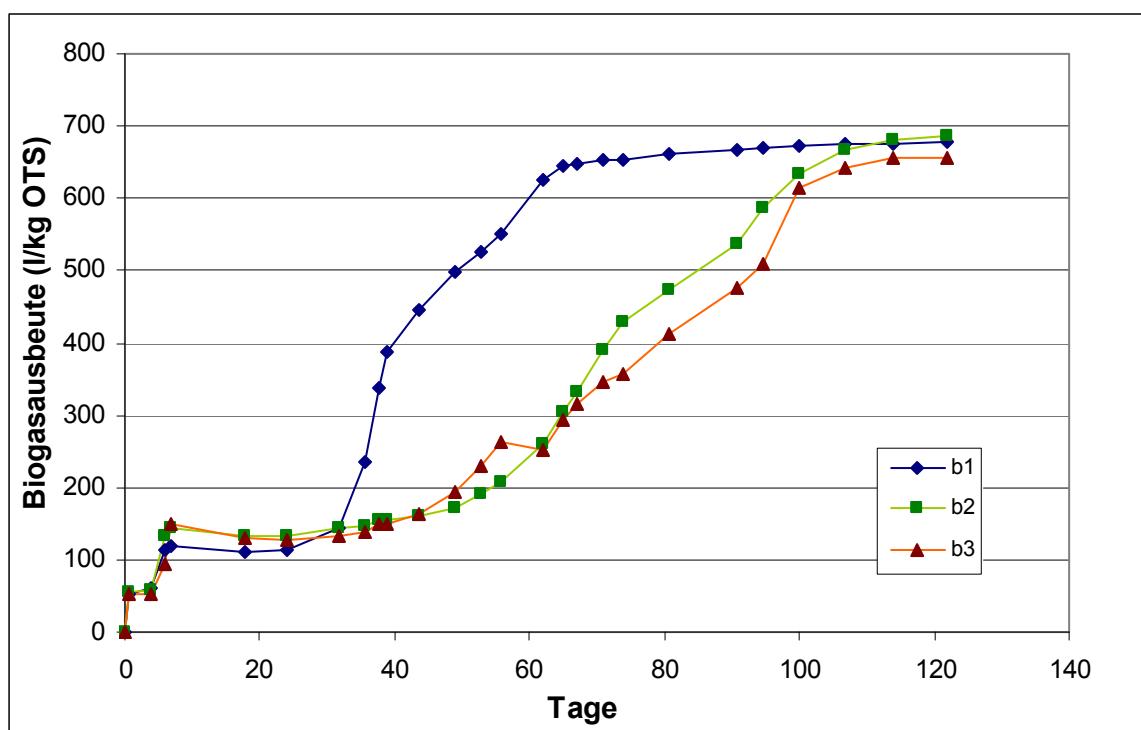


Abbildung 29: Vergärung von Schotte im Batchansatz (Labor)

Die Vergärung von 20 % Schotte und 80 % Mischdünngülle im MBR erbrachte bei einer HRT von 10 d und einer SRT von 25 d rund 560 l/kg OTS bzw. mit Rinderdünngülle 550 l bei einer HRT von 20 d und einer SRT von 30 d.

Die Zugabe von Dünngülle dürfte die Tendenz einer Prozessversauerung verhindern, was auch [Robert et al. 2009] mit der Zugabe von Gülle bzw. Spülmilch und Reinigungslaugen bestätigen.

7 Leistungsvergleich konventioneller Rührkessel mit MBR

7.1 Vergärung von Dünngülle

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 21 verwendeten Daten erzielt das Rührkesselverfahren bei einer Gasausbeute von 266 l/kg OTS 4'190 l CH₄ pro m³ 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_u) 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 21: 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 ₄ /m ³	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.

Zudem muss sowohl beim konventionellen Rührkesselreaktor als auch beim MBR ein Nachgärlager im Einsatz stehen. Insbesondere in isolierten und beheizten Behältern ist in beiden Fällen von einer weiteren Gasproduktion auszugehen, was die Gesamteffizienz noch weiter erhöht.

7.2 Vergärung von UF-Retentat

Die Gasausbeuten der Schweinerohgülle (Tab. 22) verdeutlichen den Einfluss der Lagerdauer. Die frische Gülle, bis ca. 1 d alt, erzielt mit 420 bzw. 470 l/kg OTS bei 22 d bzw. 43 d hohe Ausbeuten. Die gelagerte Rohgülle hingegen deutlich geringere. Die Feststoffe aus der Separierung weisen erst nach mehr als 40 d Werte von mehr als 300 l auf. Die Dünngülle aus der Separierung von gelagerter Rohgülle erzielt bei 9 d 121 l/kg OTS bzw. 273 l bei 43 d gegenüber der Rohgülle mit 108 bzw. 385 l/kg OTS.

Tabelle 22: Gasausbeuten aus den Batchversuchen

Fraktion		GB 9 l/kg OTS	GB 22 l/kg OTS	GB 43 l/kg OTS	GB 47 l/kg OTS
Rohgülle	frisch	142	424	470	
Rohgülle	aus Grube	108	285	385	
Feststoff		61	194	314	328
Dünngülle		121	210	273	
UF-Retentat		136	235	286	
UF-Permeat	mit Inokulum	0	0	244	
UF-Permeat	o. Inokulum	0	0	0	

Die Gasausbeuten des UF-Retentats sind mit denjenigen der Dünngülle vergleichbar. Das UF-Permeat aus dem MBR entwickelt ohne Zugabe von Inokulum kein Gas, da das Permeat auch keine Bakterien enthält.

Die Vergärung von UF-Retentat im MBR mit bis zu 462 l Biogas/kg OTS bei einer HRT von 20 d zeigt im Vergleich zu den Batchversuchen mit bis zu 286 l bei 43 d deutlich höhere Gasausbeuten (Tab. 23).

Tabelle 23: Vergleich von Rohgülle- und UF-Retentat-Vergärung (Schweinerohgülle)

Parameter Einheit	Menge kg	Menge kg OTS	Gasertrag l/kg OTS	Gasmenge l/m ³	Gasqualität % CH ₄	CH ₄ -Menge l CH ₄ /m ³	spez. CH ₄ -Menge l CH ₄ /m ³ • d	Anteil Rohg. frisch	Anteil Rohg. gelag.
Rohgülle frisch	1000	14.4	470	6784	60	4070	94.7	100%	122%
Rohgülle gelagert	1000	14.4	385	5548	60	3329	77.4	82%	100%
Retentat	1000	26.0	462	11994	66.5	7974	398.7	421%	515%

Die Vergärung von UF-Retentat im MBR an Stelle von Rohgülle im konventionellen Rührkesselverfahren erzielt 4 bis 5 mal höhere Methanausbeuten pro m³ Reaktorvolumen.

Abbildung 30 zeigt die erzielten Gasausbeuten in den Batchversuchen und im MBR. Daraus lässt sich erkennen, dass die Vergärung von UF-Retentat im MBR im Vergleich zur Rohgülle oder deren Fraktionen, Dünngülle, Feststoff und UF-Retentat (frisch), schneller erfolgt und höhere Gaserträge erzielt. Zusätzlich weisen die Daten darauf hin, dass Gülle und deren Fraktionen lange Gärzeiten von mehr als 40 d benötigen. Beispielsweise liegt die Gasausbeute für Rohgülle nach 20 d bei 285 und bei 40 d bei 385 l/kg OTS. Unter mesophilen Prozessbedingungen entspricht dies einer 35 % höheren Gasausbeute. Die vor der Vergärung separierte Feststoff-Fraktion weisen eine deutlich längere Verweildauer auf. Die Gasproduktion bei 45 d ist um 70 % grösser als bei 20 d.

Das vergorene UF-Retentat aus dem MBR erzielt nach 65 d noch 188 l Biogas/kg OTS im Batchversuch. Ein Nachgärlager, unter mesophilen Bedingungen betrieben, ist auch für dieses Substrat notwendig.

Das UF-Permeat (aus dem MBR) bildet kein Methangas.

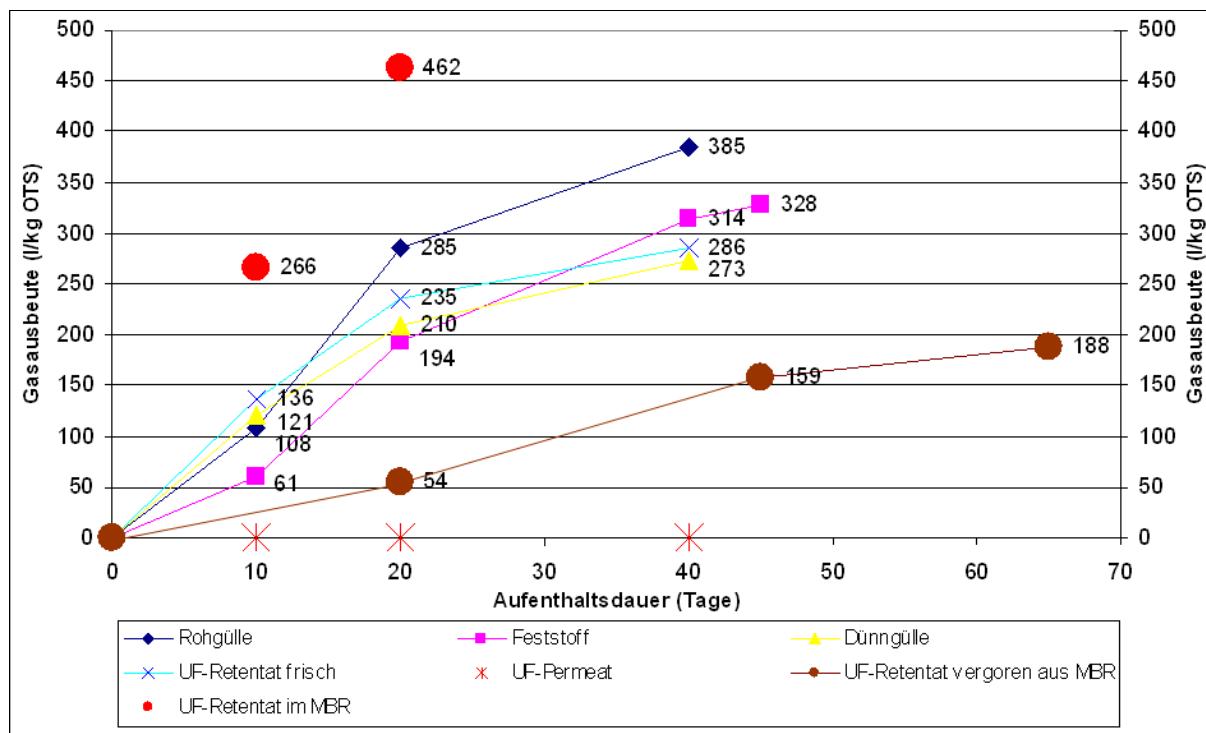


Abbildung 30: Zusammenstellung der Gasausbeuten (Liniensymbole) im Labor und im MBR (Symbole). Gasausbeute von 266 l/kg OTS im MBR bei HRT 10 d und SRT 20 d bzw. 462 l bei HRT 20 d und SRT 32 d. Alle Produkte basieren auf Schweinerohrgülle.

7.3 Vergärung von Dünngülle und Cosubstrat

Der Vergleich von den Gasausbeuten im Labor mit denjenigen im MBR (Tab. 24) macht deutlich, dass im MBR die Mischung von Dünngülle und 20 % Schotte wesentlich schneller vergoren wird als in den Batchversuchen. Die gleich hohe Gasausbeute von 560 l/kg OTS wurde im Batchversuch erst nach 44 d, im MBR hingegen schon nach 10 d erreicht.

Tabelle 24: Vergleich der Gasausbeuten in l/kg OTS von verschiedenen Produkten im Labor mit denjenigen im MBR

Mischgülle		HRT (d)			
Versuch	Produkt	10	21	44	65
Batch	Rohgülle	184	265	336	375
Batch	Dünngülle	201	245	282	304
Batch	Schotte	138	385	450	640
Batch	DG+S (80%/20%)	519	536	562	
MBR	DG+S (80%/20%)	563			

Legende: DG = Dünngülle, S = Schotte

In Abbildung 31 sind die Gasausbeuten der Batchversuche mit zwei Versuchen im MBR dargestellt. Im Batch zeigte die Mischung von Dünngülle und Schotte eine schnelle Gasbildung mit 519 l/kg OTS nach 10 d. Die Gasproduktion ist mit derjenigen im MBR vergleichbar. Die Schotte ohne Gülle benötigt deutlich längere Zeit. Erst nach 65 d werden 640 l erzielt. Die Nachgärung von UF-Retentat aus dem MBR (Mischdünngülle) bringt nach 45 d 306 l, die dem Gasertrag mit 563 l zugerechnet werden kann.

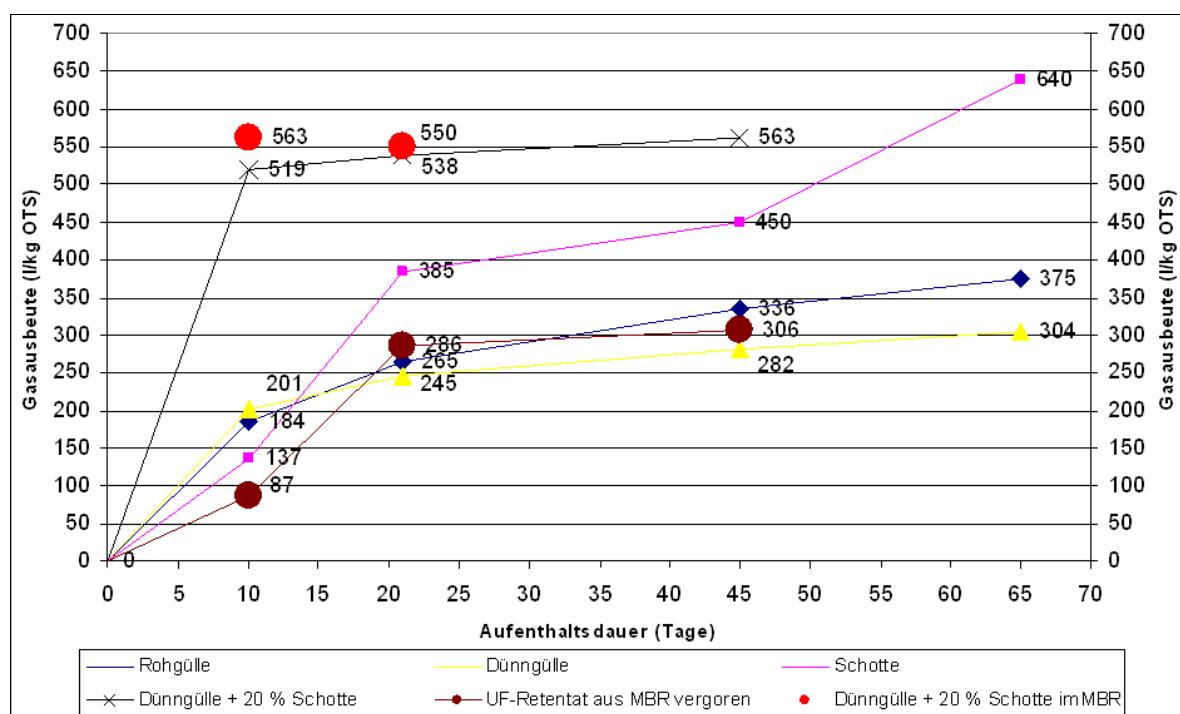


Abbildung 31: Zusammenstellung der Gasausbeuten (Liniensymbole) im Labor und im MBR (Symbole). Gasausbeute von 563 l/kg OTS im MBR bei HRT 10 d und SRT 25 d. Alle Produkte basieren auf Mischorhgülle ausser der Versuch im MBR mit 550 l bei HRT 20 d und SRT 32 d der mit Rinderdüngungülle lief.

8 Wirtschaftlichkeit

8.1 Vergärung von Dünngülle im MBR

8.1.1 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 m³/Jahr, entsprechend etwa 400, 800 bzw. 900 GVE, verglichen worden (Tab. 25).

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 m³ 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 25 % der Rohgüllemenge Lagerraum zur Verfügung gestellt werden muss. Das UF-Permeat benötigt kein Nachgärlager.

Tabelle 25: 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 Membranlebensdauer	Organisch 3	- -	Material Jahre
Vergütung für Stromeinspeisung	39	39	Rp./kWh
Vergütung für Wärmeverwertung (Wärmebonus)	2	2	Rp./kWh
Rohgülleverdünnung OTS-Gehalt in der Rohgülle OTS-Gehalt in der Dünngülle	1 : 1 - 18.2	1 : 1 26 -	Faktor kg/m ³ kg/m ³
HRT SRT	10 40	20 20	d d

konv. RK = konventioneller Rührkessel

8.1.2 Investitionsbedarf und Betriebskosten

Bei einer Güllemenge von 15'000 m³ 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. 32). Werden 35'000 m³ 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 m³ 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.

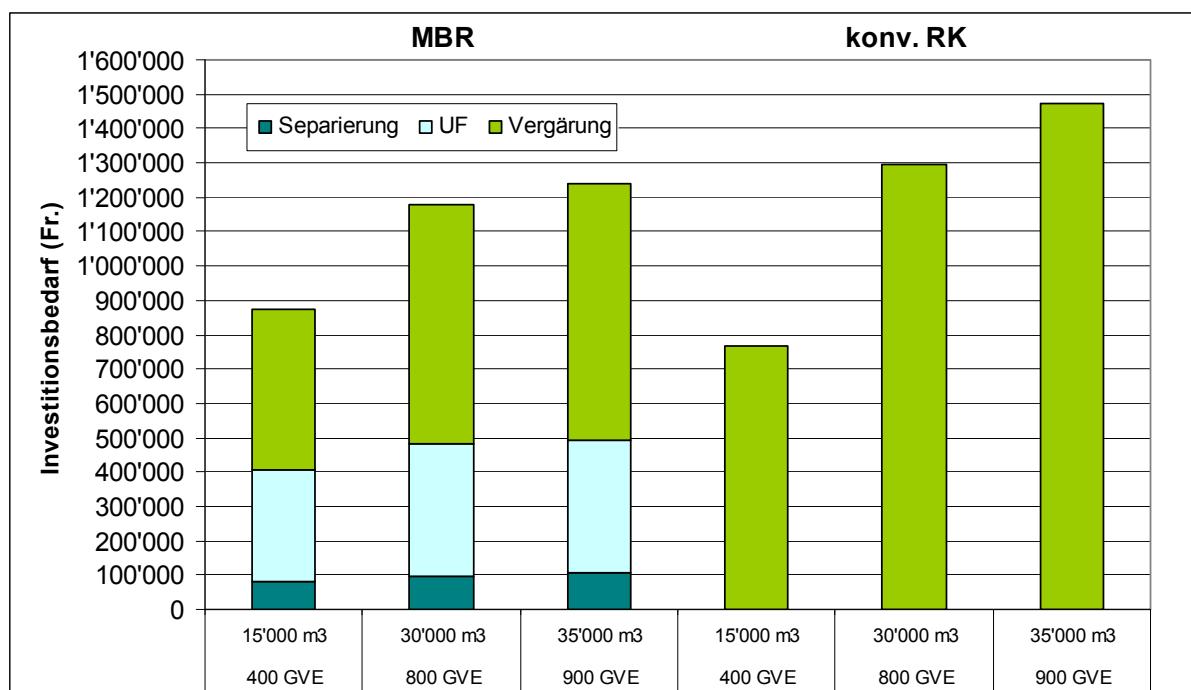


Abbildung 32: Investitionsbedarf des MBR-Verfahrens im Vergleich zum konventionellen Rührkesselverfahren

Die Betriebskosten des MBR liegen um gut Fr. 100'000.- pro Jahr über denjenigen des Rührkessels (Abb. 33).

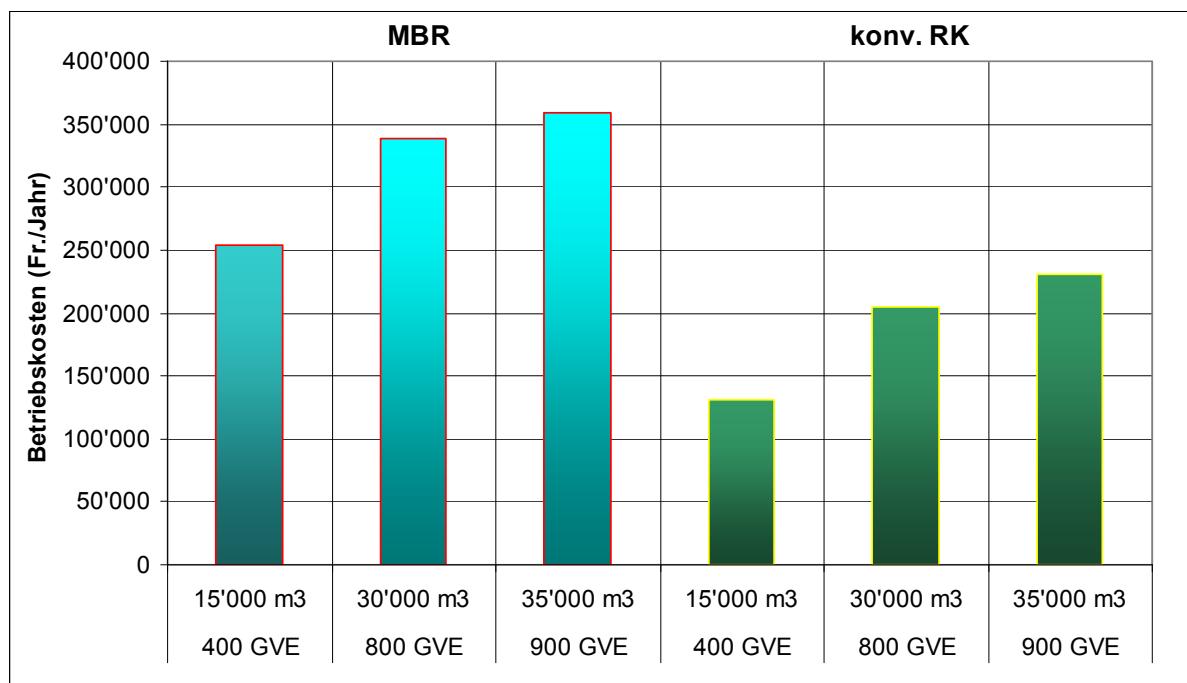


Abbildung 33: Betriebskosten des MBR-Verfahrens im Vergleich zum konventionellen Rührkesselverfahren

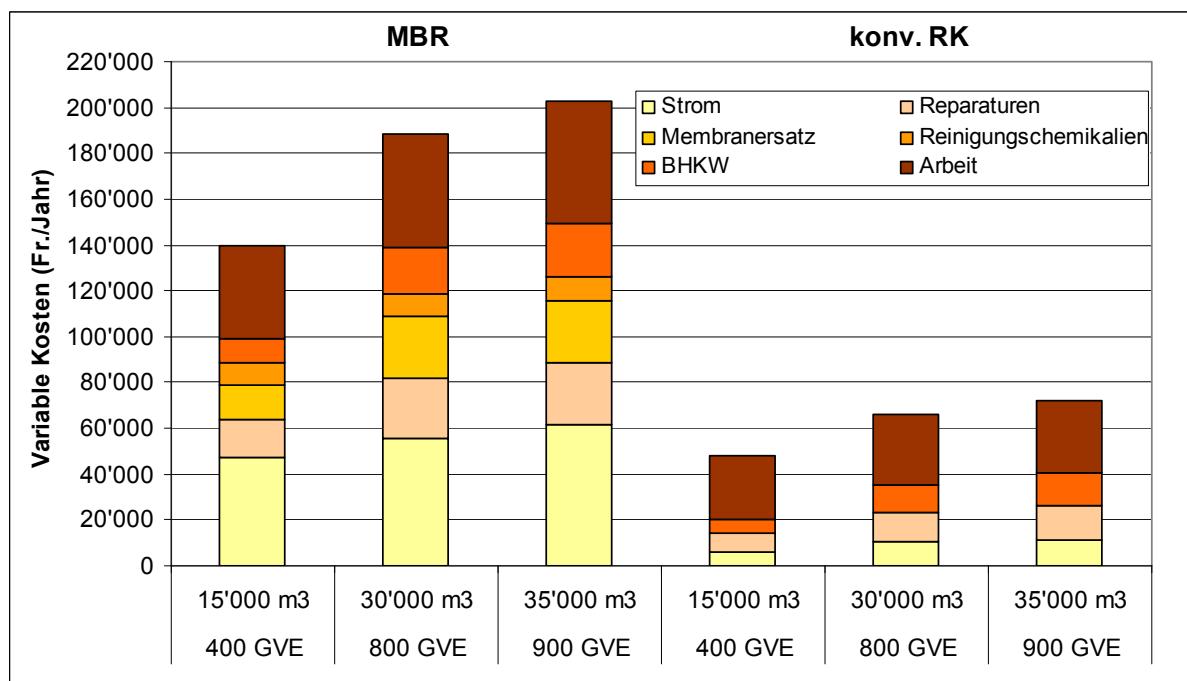


Abbildung 34: Variable Kosten des MBR-Verfahrens im Vergleich zum konventionellen Rührkesselverfahren

Die variablen Kosten ohne die fixen Kosten in Abbildung 34 belaufen sich bei 15'000 m³ 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 Göllemenge von 35'000 m³ 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.

Eine weitere Ausgasung im Nachgärlager wurde sowohl für das konventionelle Rührkesselsystem als auch für den MBR nicht Berücksichtigt. Eine deutliche Steigerung der produzierten Gasmenge von 30 % und mehr bedingt ein isoliertes Nachgärlager mit Beheizung.

8.1.3 Kosten-Nutzenvergleich MBR mit konventioneller Vergärung

In Abbildung 35 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 m³ Gülle im Jahr einen Verlust von je rund Fr. 25'000.- pro Jahr. Bei zusätzlichem Erlös aus der Wärmeeverwertung (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 m³ 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.

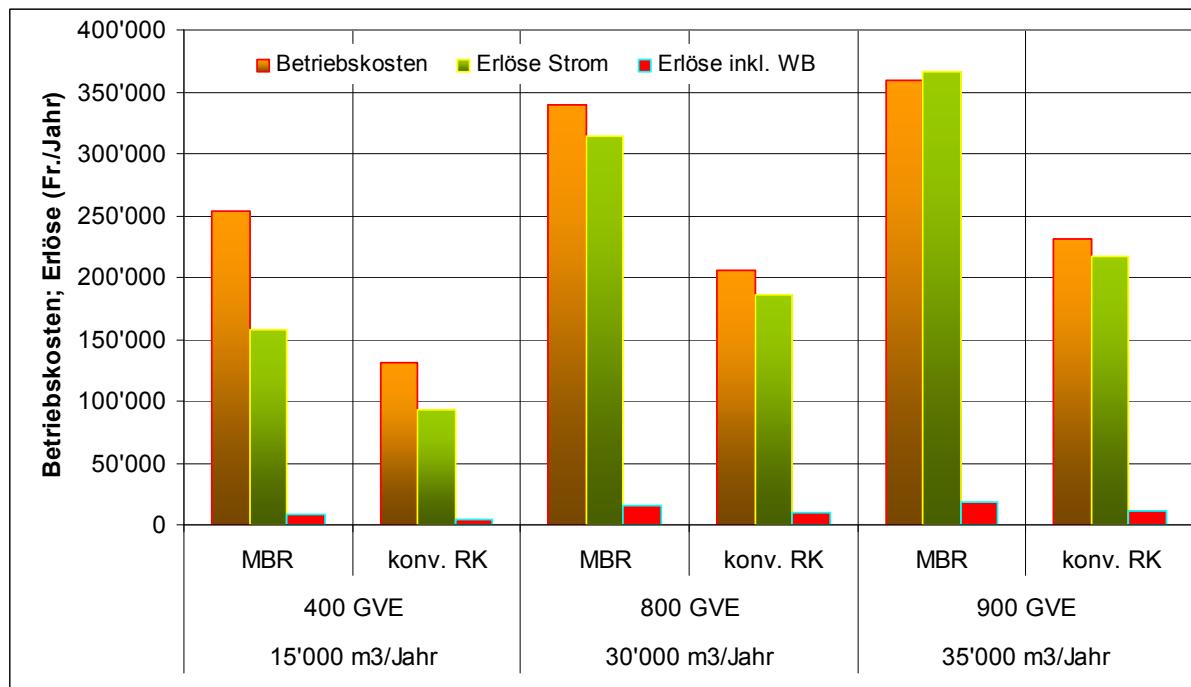


Abbildung 35: Vergleich Kosten und Erlöse

8.2 Vergärung von UF-Retentat im MBR

8.2.1 Konzeptidee

Die Idee der Vergärung von UF-Retentat basiert auf der Möglichkeit, via Transporte aus Gebieten mit viel Phosphor Flächen mit wenig Hofdünger-Phosphor zu düngen. Dafür könnte das UF-Retentat, das etwa 80 % des P aus der Rohgülle enthält an Stelle von Rohgülle vergoren und transportiert werden.

Das Konzept besteht darauf, dass Rohgülle von den Betrieben an zwei zentrale UF-Anlagen mit je einer Separierung geliefert wird (Abb. 36 rechts). Das UF-Retentat wird anschliessend an eine zentrale MBR-Anlage weitertransportiert, das UF-Permeat gelangt zurück zu den Betrieben. Dadurch können die beiden Regionen von P entlastet und eine andere Region mit P aus Hofdünger gedüngt werden.

Bei der zentralen Vergärung der Rohgülle werden 20 % der Gärreste zu den Lieferbetrieben zurücktransportiert. 80 % der Gärreste werden in eine mit P unversorgte Region geliefert (Abb. 36 links).

Beide Varianten weisen eine Vergärung auf, weil davon ausgegangen wird, dass vergorene Produkte, Gärgülle bzw. UF-Retentat, auf Fremdbetrieben eine höhere Akzeptanz haben als unbehandelte Gülle.

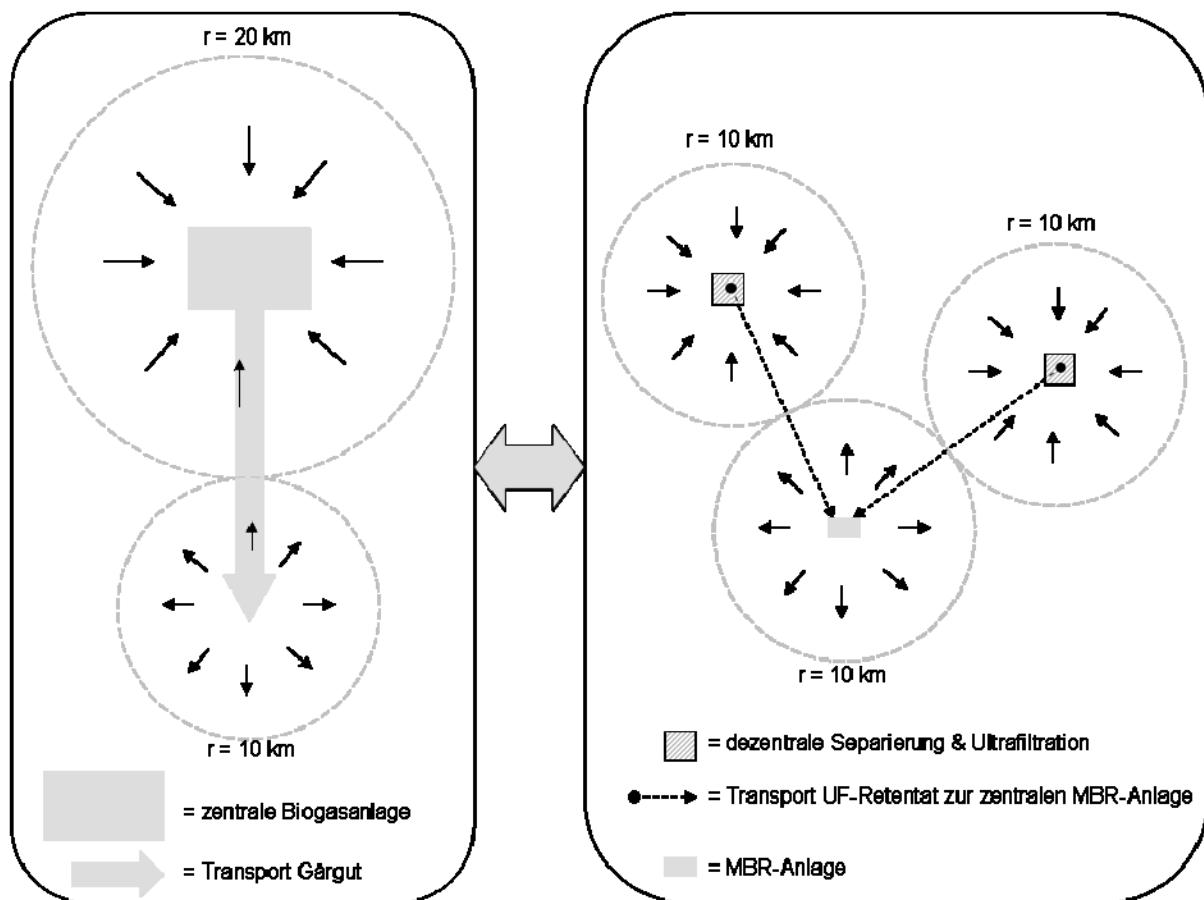


Abbildung 36: Konzept P-Dislozierung. Links: Rohgülle in einer zentralen Biogasanlage vergären und Gärrest transportieren. Rechts: Dezentrale Vorbehandlung der Rohgülle mit Transport des UF-Retentats und Vergärung in zentraler MBR-Anlage.

8.2.2 Annahmen

Die Kalkulationen zur Wirtschaftlichkeit der UF-Retentatvergärung beinhalten nur Schweinegülle, weil die entsprechenden Versuche im MBR mit Schweinegülle durchgeführt wurden. Aus 70 000 t Schweinerohgülle im Jahr fallen rund 2 100 t Feststoffe und 67 900 t Dünngülle an (Tab. 26). Mit der UF wird 13 580 t/a UF-Retentat produziert, das zur zentralen MBR-Anlage transportiert wird. Tabelle 27 zeigt die Annahmen für die Transportkostenkalkulation.

Tabelle 26: Angenommene Massenverteilung bei der Aufbereitung (Angaben in t/a)

Rohgülle	Feststoffe	Dünngülle	UF-Retentat	MBR
70000	2100	67900	13580	13580

Tabelle 27: Annahmen zu den Kostenkalkulationen

LKW	18	m ³ /Ladung
Dieselverbrauch	35	l/100 km
Energieinhalt	9.94	kWh/l
Ø Geschwindigkeit	30	km/h
Arbeitskosten	49	Fr./h
LKW	100	Fr./h

Annahmen für die Kostenberechnungen der konventionellen Rohgüllevergärung als auch der Separierung, UF und Vergärung im MBR basieren auf denjenigen im Kapitel 8.1.

8.2.3 Investitionsbedarf und Betriebskosten

In Tabelle 28 sind die Kosten der beiden Konzeptvarianten dargestellt. Der Investitionsbedarf bei der Vergärung von UF-Retentat im MBR beläuft sich auf rund Fr. 1.5 Mio.. Davon entfallen mehr als Fr. 0.63 Mio. auf die dezentrale Vorbehandlung.

Die Variante konventionelle Vergärung kostet etwa Fr. 2.9 Mio..

Tabelle 28: Investitionsbedarf und Betriebskosten (Basis: 70 000 t Schweinerohgülle/a)

Parameter	Einheit	konv. RK	MBR
Güllemenge	m ³ /a	70'000	70'000
Investitionsbedarf	Fr.	2'949'945	1'502'425
Betriebskosten	Fr./a	468'315	649'481
Methanertrag Fermenter	m ³ /a	263'255	240'311
Methanertrag Nachgärtner	m ³ /a	105'665	97'584
Methanertrag gesamt	m ³ /a	368'920	337'895
Strombedarf	kWh/a	115'632	710'033
Stromerlöse netto	Fr./a	500'003	222'346
Transporte	Fr./a	788'185	480'914
Energiebedarf Transporte	kWh/a	502'522	306'616
Betriebskosten	Fr./a	756'497	908'050
Betriebskosten	Fr./m ³	10.81	12.97

Die Betriebskosten der UF-Retentatvergärung im MBR liegen mit Fr. 650 000.- um beinahe Fr. 200 000.- über den Kosten der konventionellen Vergärung. Einen wesentlichen Beitrag

an die Betriebskosten leistet der Energiebedarf der UF. Zudem stehen 3 UF-Anlagen in Betrieb, zwei dezentrale UF-Anlagen zur Konzentrierung der separierten Dünngülle und eine UF bei der zentralen Vergärung im MBR.

Kostenvorteile der MBR-Variante ergeben sich durch den Transport von UF-Retentat an Stelle von Gängüle.

Gesamthaft betrachtet stellt die Vergärung von UF-Retentat mit dem Ziel einer Phosphordislokation aus überversorgten Regionen in eine unversorgte Region eine Möglichkeit dar. Mit den in der Kalkulation eingerechneten UF-Membranen ist der Strombedarf hingegen hoch und damit nicht wirtschaftlich. Mit einer neuen UF-Membrantrenntechnik, die wesentlich weniger Strom für den Betrieb benötigt, könnte eine wirtschaftliche Variante in Frage kommen.

Eine wirtschaftlich interessante Möglichkeit könnte die Vergärung von UF-Retentat in einer konventionellen Biogasanlage bieten. Die geringere Menge an UF-Retentat würde zu einer Reduktion des Fermentervolumens und des Nachgärlager führen und gleichzeitig die Mitvergärung von feststoffhaltigen Cosubstraten erlauben.

8.3 Vergärung von Dünngülle und Cosubstrat im MBR

Aufgrund einer Anfrage aus der Praxis konnte für eine bestehende Biogasanlage eine Grobschätzung für eine MBR-Anlage vorgenommen werden.

Bei dem Konzept soll das Ziel verfolgt werden, mit der UF das Gärsubstrat aus dem Fermenter aufzubereiten und der Nachgärung bzw. dem Fermenter zurückzuführen. Damit wird eine schnellere und erhöhte Gasproduktion erwartet. Zusätzlich soll mit einer Umkehrosmose die Gärrestmenge zur Ausbringung um mindestens 50 % reduziert werden.

Für die Kostenschätzung (Tab. 29) wurde mit einer neuen UF-Membrantrenntechnik mit wesentlich geringerem Energiebedarf sowie mit einer standardmässigen Umkehrosmoseanlage kalkuliert.

Tabelle 29: Kostenschätzung einer MBR-Anlage zur Aufbereitung von separierten Flüssiggärssubstrat auf einer bestehenden Covergärungsanlage.

bestehende Biogasanlage		
Input	t/a	5'061
TS	t/a	768
OTS	t/a	640
Biogas	m3/a	370'527
Methan	m3/a	229'727
Strom	kWh/a	804'044
"erweiterter" MBR		
Investitionsbedarf	Fr.	250'000
Betriebskosten	Fr./a	60'983
Strombedarf	kWh/a	55'203
erwartete Gasproduktion	m3/a	36'913
erwartete Methanmenge	m3/a	22'886
erwartete Strommenge	kWh/a	80'100
erwarteter Stromerlös	Fr./a	58'571
Betriebskosten	Fr./a	2'412
Einsparung Ausbringung	Fr./a	17'714
Gewinn	Fr./a	15'302

Für die Abschätzung der Kosten wurde eine Gasmehrproduktion der Hofdüngeranteile, Gülle und Mist, von 30 % gerechnet. Dies ergibt knapp 37 000 m³ Biogas im Jahr. Der Betrieb der Umkehrosmose reduziert die Ausbringkosten um schätzungsweise Fr. 3.50 pro m³. Es resultiert ein Gewinn von Fr. 15 000.- im Jahr.

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 m³ und mehr im Jahr kommen nur überbetrieblich genutzte Anlagen in Betracht.

In Abbildung 37 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 37 umfasst eine konventionelle Vergärung der gesamten Gülle. Nach der Vergärung wird das Gärsubstrat separiert und die Gärabwüsse 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.

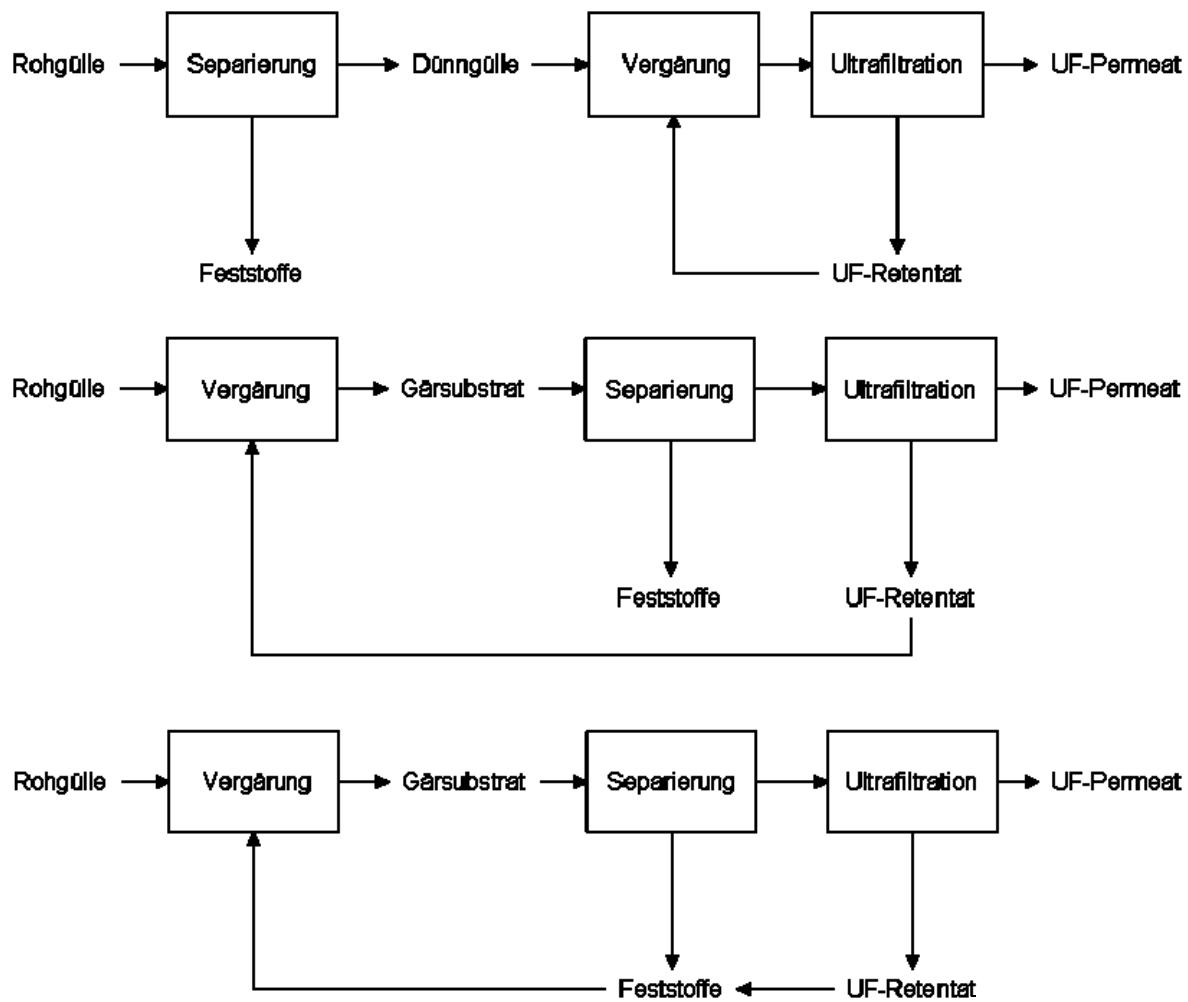


Abbildung 37: Konzepte zur Implementierung des MBR-Systems

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. 37 oben) nur bei flüssigen Cosubstraten umgesetzt werden. Sonst führen Grobpartikel zu einer Verstopfung der UF-Membranen. Die beiden anderen Verfahrenskombinationen hingegen lassen sich in der Praxis auch mit Cosubstraten umsetzen.

Die Möglichkeiten einer Covergärung mit dem MBR-Verfahren konnten anhand einer bestehenden Covergärungsanlage mit einer Kapazität von 5 000 t/Jahr grob geprüft werden. Eine Kostenabschätzung auf der Basis einer neuen UF-Membrantrenntechnik mit geringerem Energiebedarf ergibt Hinweise, dass ein wirtschaftlicher Anlagenbetrieb realisiert werden kann (vgl. Kapitel 8.3.).

Die Implementierung des MBR-Systems mit energieoptimaler Membrantrenntechnik lässt auch auf wesentlich kleineren Anlagen einen wirtschaftlichen Betrieb erwarten.

10 Folgerungen

10.1 Vergärung von Mischdünngülle im MBR

- 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 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.

10.2 Vergärung von UF-Retentat im MBR

- Mit Schweinedünngülle konnten mit dem MBR-System höhere Gasausbeuten im Vergleich zu den Batchversuchen erzielt werden.
- Die Vergärung von UF-Retentat aus Schweinegülle ist mit dem MBR-System grundsätzlich möglich.
- Aus biologischer Sicht konnten keine Beeinträchtigungen des Prozesses festgestellt werden.
- Die Vergärung von UF-Retentat stellt an die Prozesstechnik deutlich höhere Anforderungen als die Vergärung von Dünngülle. Eine online Messtechnik zur präziseren Charakterisierung des Substrates und des Reaktorinhalts ist unerlässlich.
- Die Gasausbeuten mit UF-Retentat, die im MBR erzielt wurden, liegen geringfügig über denjenigen aus den Batchversuchen.
- Der MBR kann mit für Gülle vergleichsweise hohen Raumbelastungen von mehr als 5 kg OTS/m³ • d gefahren werden.
- Die Konzentrierung der Gülle mittels UF lässt die Umsetzung eines Konzepts auf der Basis einer dezentralen Vorbehandlung und einer zentralen Vergärung zu. Damit kann Phosphor aus einer überversorgten Region in eine mit Phosphor unversorgte Region kostengünstiger disloziert werden.

10.3 Vergärung von Mischdünngülle und Cosubstrat im MBR

- Bei der Covergärung von 20 % Schotte mit 80 % Mischdünngülle konnten mit dem MBR-System in 10 Tagen hohe Gasausbeuten von 560 l/kg OTS im Vergleich zu den Batchversuchen mit ähnlichen Gasausbeuten nach mehr als 50 Tagen erzielt werden.
- Die Vergärung von Schotte zeigte im MBR-System keine Beeinträchtigungen im Abbauprozess. Die CH₄-Gehalte sind mit 52 bis 56 % tief.
- Bei der UF konnte der Betrieb sicher aufrechterhalten werden.
- Die Covergärung von Schotte und Dünngülle ist eine interessante Variante auf Käsereibetrieben. Insbesondere liesse sich die Wärme im Betrieb noch besser nutzen als auf einem Landwirtschaftsbetrieb.
- Für einen Praxisbetrieb mit einer Covergärungsanlage für etwa 5 000 t/Jahr konnte eine Erstabschätzung eine wirtschaftlich interessante Lösungsvariante angedacht werden.

11 Kommunikation

Der Standort der Versuchsanlage an der Agroscope 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 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
- Projektpräsentation/Interview in ENERGEIA, der Zeitschrift des Bundesamtes für Energie – Ausgabe1, Januar 2011.
- Separation of hydraulic and biomass retention time in high rate membrane biodigesters. 5th Czech-Swiss Biotechnology Symposium, June 15.-17.2011, Prague, CZ, Baier et al. 2011.
-

- Biomasse soll besser genutzt werden. Fachbericht in Schweizer Bauer, 29.12.2011; Autor: Jürg Wellstein
- Mehr Biogas dank besserer Vergärung, Fachbericht, in Aqua & Gas Nr. 4, 2012; Autor: Jürg Wellstein
- Mehr Biogas dank besserer Vergärung, Fachbericht in Energie Rundschau, Nr 1, 2012. Autor: Jürg Wellstein

12 Ausblick und Handlungsbedarf

Das MBR-Verfahren ermöglicht eine sehr schnelle und prozessstabile Vergärung von vorbehandelter Dünngülle. Die Trennung von HRT (hydraulischer Verweildauer) und SRT (Schlammaufenthaltsdauer) sowie die komplette Abtrennung und Rückführung aktiver Bakterien in den Fermenter fördert neuartige Ansätze zur Betriebsführung und Optimierung der Biogasgewinnung.

In der Praxis stehen Vorteile wie eine erhöhte Gasproduktion, geringeres Fermentervolumen oder kleineres Nachgärlager im Zentrum des Interesses. Weitere Vorteile, wie das hygienisch einwandfreie UF-Permeat, die Covergärung von flüssigen, wasserreichen Substraten wie Schotte oder der Einsatz der Düngerkomponenten ausserhalb der Landwirtschaft sind weniger gefragt, aber für eine Umsetzung nicht unwichtig.

Die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten der stofflichen und energetischen Nutzung von Hofdünger und Cosubstrat mit dem MBR-System bietet eine auf den Betrieb angepasste Lösung. Eine „standardmässige“ Variante ist zu unspezifisch. Eine angepasste Lösung ist hingegen die schwieriger umzusetzende Alternative in der Praxis.

Im Verlauf des Projekts zeichnete sich ab, dass der grösste Nachteil des MBR-Verfahrens zur Vergärung von Gülle die Kosten und vor allem der Energiebedarf für die Membrantrennung mit der UF ist. Trotz erheblich gesteigerter Gasproduktion können die Mehrkosten gegenüber der konventionellen Vergärung zwar gedeckt werden, doch sind dazu grosse Göllemengen erforderlich. Intensive Recherchen und Verhandlungen mit Anlagenlieferanten erbrachten neue Ansätze um die Kosten zu reduzieren. Mittlerweile ist ein UF-Membransystem vorhanden, das drastische Einsparungen beim Strombedarf erhoffen lässt. Erste Vorversuche deuten daraufhin. Dies eröffnet eine neue Perspektive, das MBR-Verfahren auch auf Betrieben mit geringen Hofdüngermengen wirtschaftlich einzusetzen. Allerdings gilt auch hier, wie bei der konventionellen Vergärung, dass Cosubstrate mitvergoren werden. Das Beispiel aus der Praxis mit moderat kalkulierter Mehrgasproduktion durch den Betrieb eines „erweiterten“ MBR könnte eine wirtschaftlich interessante Lösung aufzeigen.

Ein weiterer Punkt, der beim MBR zu beachten ist, ist die Abtrennung der Feststoffe aus der Rohgülle vor der Vergärung. Insbesondere bei frischer Rindergülle können die Feststoffe zur Gasgewinnung beitragen. Eine Vorbehandlung dieser Fraktion mit dem Ziel diese Energie dem MBR zur Verfügung zu stellen, könnte die Wirtschaftlichkeit von reinen Gölleanlagen erhöhen.

Die Membrantrenntechnik, Ultrafiltration und Umkehrosmose, stösst vor allem im EU-Raum aber auch in der Schweiz auf zunehmendes Interesse. Meist steht die blosse Gärrestaufbereitung zur Verminderung des Gärrestmengen und damit des Verwertungsaufwandes an erster Stelle. Eine Kombination der Membrantechnik mit der Vergärung zur Erhöhung der Effizienz des Prozesses ist meist unbekannt.

Abwasser aus Industrie und Gewerbe, das für eine Vergärung geeignet ist, ist oftmals auch für das MBR-System einsetzbar. Hier trägt die Membrantrennung zu einer massgeblichen Reduktion des CSB und weitere relevanter Parameter bei. Eine Rückführung des Permeats

zur Einsparung von Wasser ist je nach betrieblichen Bedingungen denkbar. Das Einleiten in eine ARA ist mit weniger Kosten verbunden. Interessant sind Monovergärungen im MBR, beispielsweise von Schotte, Glycerin oder Blut. Ein möglicher Ansatz im Rahmen einer Monovergärung könnte die Zugabe von spezifisch adaptierten Mikroorganismen sein, die eine Vergärung von schwierig zu behandelnden Substraten zulässt. Die Membranstufe würde auch hier eine Rückführung der aktiven Biomasse zulassen und somit zu einem stabilen Gärprozess führen.

Die Hydrolyse als Vorbehandlung gewinnt auch in der Praxis an Bedeutung. Vor allem für die Vergärung von feststoffhaltigem Material zeigen Flüssigsubstratreaktoren gewichtige Nachteile. Hier kann die Hydrolyse zu einer schnelleren und vollständigeren Gasbildung führen. Die nachfolgende Stufe, der Methanreaktor, könnte als MBR betrieben, die Bakterien zurückhalten und die Restbelastung im Ablauf des Reaktors vermindern.

Das MBR-Verfahren bedarf einer Prozesssteuerung. Die entsprechende Mess-, Steuer- und Regeltechnik (MSR) für die Ultrafiltration zur Gewährleistung eines sicheren Anlagenbetriebs ist vorhanden. Der biologische Prozess kann hingegen mit einer optimierten MSR weiter verbessert werden. Zur Messung wichtiger Parameter kann die Umsetzung der Naheninfrarotspektroskopie-Messtechnik (NIRS) dienen. Insbesondere der MBR wäre für diese Technik geeignet, da mit der vorhandenen externen Umwälzung eine optimale Messwerterfassung möglich ist.

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.

Membrez Y., Fruteau de Laclos H., Energie à partir de petit-lait: comparaison des filières biogaz et bioéthanol, im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BfE), 2004.

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

Meier U. et al. : Abklärung zu den Eigenschaften von Düngeprodukten aus der Gülleaufbereitung, Schlussbericht der ARGE MBR-FD, 2008

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.

Renner A., Renz-Schauen A., Nährwerttabellen für Milch und Milchprodukte, Verlag B. Renner, Giessen, 557 S., 1986.

Robert J., Böning T., Entwicklung eines kombinierten Verfahrens zur energetischen Verwertung von organikreichen Abwässern und Reststoffen aus Molkereibetrieben, Schlussbericht AiF „Reststoffvergärung“, INFA-ISM e. V. und Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik UMSICHT, 71 S., 2009.

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.

Teil 2: Versuche an der MBR – Laboranlage

- Vergärung von Dünngülle, UF – Retentat und Dünngülle mit Rohglycerin als Co-Substrat -**

Autoren:

Samuel Künzli, Florian Rüsch, Urs Baier, Martin Kühni

Fachgruppe Umweltbiotechnologie

ZHAW Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften

April 2013

13 Zielsetzung

Während des Projektverlaufs werden drei unterschiedliche Substrate untersucht. Separierte Mischdüngölle, UF-Retentat aus Schweinedüngölle und Mischdüngölle mit Cosubstrat.

Für die drei Substrate sind folgende Zielsetzungen festegelegt:

- Darlegen der verfahrenstechnischen Leistungsfähigkeit des MBR-Systems im Vergleich mit der konventionellen Vergärung.
- Aufdecken der verfahrenstechnischen Grenzen der Vergärung im MBR.
- Verifizieren der Trennleistung der Ultrafiltration in Bezug auf abbaubare organische Stoffe und Mikroorganismen.

Ein Ziel der Versuche an der Laboranlage ist es, die aktive Biomasse mit Hilfe der Ultrafiltration zurückzuhalten und damit die hydraulische Aufenthaltszeit (HRT) zu reduzieren, um so auf kleinerem Volumen den gleichen oder allenfalls einen höheren Biogasertrag gegenüber einer Anlage ohne Biomasserrückführung zu erzielen.

In wie weit die Aufenthaltsdauer verkürzt werden kann, ohne dass Prozesshemmungen auftreten, stellt eine weitere Fragestellung dar.

Der Rückhalt an Biomasse (Mikroorganismen) und organischer Substanz (OTS) soll nachgewiesen werden. Zusätzlich ist abzuklären, ob ohne Entnahme von Schlamm aus dem Reaktor und damit eine theoretisch unendlich lange Schlammaufenthaltsdauer (SRT) zu einem weitergehenden Abbau an organischer Substanz führt.

Soweit möglich sollen die biologischen Grenzen des Systems aufgezeigt werden.

14 Laboranlage, Versuchsablauf, Material und Methoden

14.1 Laboranlage

An der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaft (ZHAW) am Standort Wädenswil wird ein Labor-MBR betrieben (Abb.1).



Abbildung 1: MBR-Laboranlage mit 20 L Nutzvolumen an der ZHAW in Wädenswil.

Die Abbildung 2 zeigt die schematische Darstellung der Labor – Versuchsanlage. Eingesetzt wird ein Bioreaktor mit einem Nutzvolumen von 20 Litern, 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. Die Betriebstemperatur des Reaktors liegt im mesophilen Bereich bei rund 37°C.

Die Laboranlage besteht aus folgenden Hauptkomponenten:

- Laborreaktor mit 20 L Nutzvolumen
- Zwei-stufige Ultrafiltration extern, mit Schneckenpumpe
- Beschickungssystem Grundsubstrat (Vorlagebehälter, Doppelmembran-Pumpe)
- Beschickungssystem Co-Substrat (Vorlagebehälter, Schlauchquetschpumpe)
- Entnahmesystem Retentat (manuelle und automatisierte Entnahme)
- Entnahmesystem Permeat (automatisierte Entnahme)
- Biogasentnahme inkl. Lagerung in Gassäcken
- Messtechnik (Temperatursonden, Druckmessung, Gasdurchflussmessung, Gewichtsmessung, Permeatflussmessung, etc.)
- Steuerungs- und Regelungstechnik (SPS, Bedieneroberfläche)
- Wärmemantel

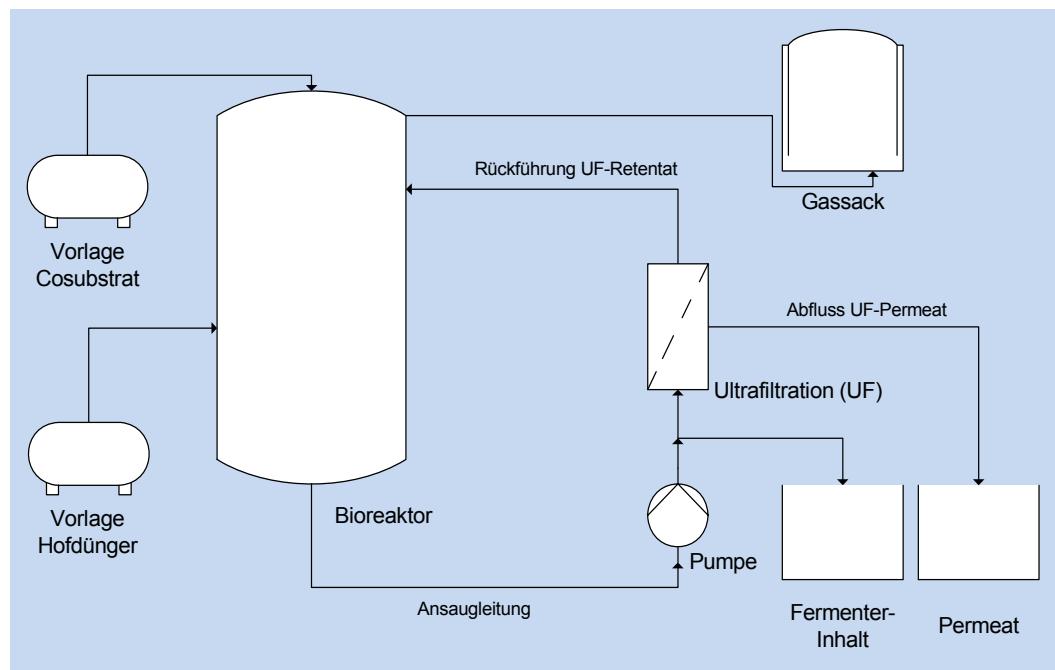


Abbildung 2: Schema der MBR-Laboranlage an der ZHAW in Wädenswil gemäss [1] mit eigener Anpassung.

14.2 Versuchsablauf

Während der Vorversuche wird das Biogasbildungspotential (GB 21) unterschiedlicher Güllefractionen ermittelt. Nebst der später verwendeten Mischdünnungsgülle wurden folgende Substrate untersucht:

- Rohgülle: unbehandelt wie sie an der Forschungsanstalt anfällt
- Düngüle: aus der Separierung mit Bogensieb (Spaltsieb mit 0.5 mm)
- Feststoff: aus der Separierung mit Bogensieb
- Feststoff gepresst: nach der Siebung zusätzlich gepresst worden; um eine weitere Entwässerung wie sie in der Praxis mittels Pressschnecke erzielt wird, zu simulieren
- Restflüssigkeit: Flüssigkeit, welche beim pressen anfällt

Die eingesetzte Mischdünnungsgülle ist ein Gemisch aus gesiebter Schweine- und Rindergülle (1:1) und stammt aus der Forschungsanstalt in Tänikon (ART). Während der Versuchsdauer ändert sich die Zusammensetzung der Mischdünnungsgülle entscheidend. In der Tabelle 1 werden die Ergebnisse der Analysen zusammenfassend aufgeführt. Anhand der Maximal- und Minimalwerte kann die grosse Schwankungsbreite der Ergebnisse aufgezeigt werden.

Tabelle 1: Analysewerte der eingesetzten Mischdünnungsgülle

Düngüle	TOC [mg/l]	CSB [mg/l]	N (total) [mg/l]	NH4-N [mg/l]	P (total) [mg/l]	pH-Wert [-]	TS [%]	OTS [% d. TS]
Minimum	2710	10500	1295	874	78.5	7.2	1.09	52
Maximum	9950	38700	2930	1430	700	7.7	2.89	69
Durchschnitt	6085	21615	1928	1129	300	7.4	2.05	64.4

Der Reaktor wurde mit 6 l vergorenem Material aus den GB 21 Vorversuchen als Inokulum und 14 l frischer Mischdünnungsgülle 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.

Während des Betriebes des Bioreaktors werden weitere GB 21 Versuche mit unterschiedlichen Güllefractionen, mit UF–Retentat und UF–Permeat durchgeführt.

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die einzelnen Versuche aufgeführt. Diese wurden in 4 Projektphasen eingeteilt:

Tabelle 2: Durchgeführte Versuche mit der MBR-Laboranlage unterteilt in vier Projektphasen

Versuchstage	Versuchsbedingungen	Bemerkungen
Projektphase 1: Vorversuche GB 21		
Vorversuch	Gasbildungsversuche GB 21	Rohgülle, Mischdünggülle, Feststoff, Feststoff gepresst, Restflüssigkeit
Projektphase 2: Vergärung von Dünggülle		
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	-
455 bis 512	HRT 2.5 d, SRT 30 d	
513 bis 547	HRT 3 d, SRT 30 d	
548 bis 581	Batchbetrieb	
Projektphase 3: Vergärung von UF-Retentat		
582 bis 698	HRT 10d SRT 60d	Start mit UF-Retentat Schwein
699 bis 778	HRT 5d /SRT 40d	UF-Retentat Schwein
779 bis 865	HRT 20d/SRT 40d	UF-Retentat Schwein
866 bis 977	HRT 20d/SRT 25d	UF-Retentat Schwein
Projektphase 4: Vergärung von Dünggülle und Co-Substrat		
978 bis 1021	HRT 16d/SRT 25d	DG 1:1
1022 bis 1189	HRT 16d/SRT 25d	DG 1:1 + 5% Glycerin
1190 bis 1279	HRT 16d/SRT 25d	DG 1:1 + 6-10% Glycerin

14.3 Material und Methoden

14.3.1 Material und Methode der Gasbildungsversuche

Die Gasbildungsversuche wurden mittels klimatisiertem Schüttler-System Infors ECO der Firma Infors AG durchgeführt.

Folgende Parameter wurden gemessen:

- **Temperatur:**
Die Testflaschen wurden bei 37°C inkubiert.
- **Schüttelfrequenz:**
Die Schüttelfrequenz betrug während des gesamten Versuchs 100 rpm.
- **TS und OTS:**
Vom Inokulum und der eingesetzten Substrate wurde die TS und OTS bestimmt.
- **pH-Wert:**
Die pH-Werte wurden in den Gemischen der fertig gefüllten Testflaschen vor Versuchsbeginn gemessen und diejenigen der Substrate mit 2 N Natronlauge auf einen pH-Bereich nahe dem von Hintergrund und Referenz eingestellt. Während des Versuchs und zu Versuchsende wurden die pH-Werte nachgemessen, um sicherzustellen, dass keine Hemmung der Biogas-Entwicklung durch zu tiefe pH-Werte verursacht würde.
- **Gasmenge:**
Die Gasmenge wurde über den Druck gemessen und in Normlitern pro Kilogramm organischer Trockensubstanz (NL/kg OTS) umgerechnet.
- **Gaszusammensetzung:**
Das Biogas der jeweils gleich gefüllten Flaschen wurde von Zeit zu Zeit in Gassäcken vereinigt und mit dem Gerät XAM-7000 von Dräger gemessen.

14.3.2 Material und Methode der Analyse

Die eingesetzte Gülle, der Fermenterinhalt und das Permeat wurden auf folgende Parameter untersucht:

- **Trockensubstanz (TS):**
Die Probe wird bei einer Temperatur von 105°C in einem Infrarottrockner bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Der verbleibende Anteil ist die Trockensubstanz und wird in Prozenten zur Frischsubstanz angegeben.
- **Organische Trockensubstanz (OTS):**
Für diese Messung wird die Probe bei 550°C über 1h in einem Muffelofen verascht. Die organische Trockensubstanz ist der Anteil, der im Muffelofen verflüchtigt ist und wird im Verhältnis zur TS errechnet. Dieses Verhältnis wird in Prozenten angegeben.
- **Chemischer Sauerstoff Bedarf (CSB), gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), gelöster organischer Kohlenstoff (DOC), Gesamtstickstoff (N-total), Ammonium ($\text{NH}_4\text{-N}$) und Gesamtphosphat (P-total)** werden mit Schnelltests von der Firma Hach-Lange, welche in der Tabelle 3 aufgeführt sind, durchgeführt. Für den DOC wurde die Probe

bei 9000 rpm während 10 min. zentrifugiert und der Überstand über einen Faltenfilter und anschliessend über 0.45 µm filtriert. Vom klaren Filtrat wurde der DOC gemessen.

- Säureanalyse:

Die Konzentration an Essigsäure und Propionsäure wurde durch das Analyselabor des Institutes für Biotechnologie an der ZHAW bestimmt. Die Proben wurden bei 9000rpm während 10 min. zentrifugiert und der Überstand über einen Faltenfilter und dann über 0.45 µm filtriert. Das Filtrat wurde mit 1N HCl angesäuert. Ausgefallenes Material wird durch zentrifugieren bei 9000 rpm für 10 min. abgesetzt. Vom Überstand werden 1.5 mL für die Analyse in Vials abgefüllt.

- pH-Wert und Leitfähigkeit werden direkt mittels pH-Meter bzw. mit einem mobilen Leitfähigkeitsmesser gemessen.

Tabelle 3: Für die Analysen werden die aufgelisteten Hach-Lange-Tests verwendet.

Parameter	Nummer des Testes	Messbereich
Ammonium	LCK303	2-47 mg/L NH ₄ -N
CSB	LCK114	150-1000 mg/L O ₂
Gesamtstickstoff	LCK238	5-40 mg/L TN _b
Gesamtphosphat	LCK348	0.5-5 mg/L PO ₄ -P
	LCK350	2-20 mg/L PO ₄ -P
TOC und DOC	LCK386	30-300 mg/L C

Die Gaszusammensetzung des im Laborreaktor entstandenen Biogases wird mit dem Gerät XAM-7000 von Dräger gemessen. Gemessen werden Methan (CH₄), Kohlendioxid (CO₂), Sauerstoff (O₂) und Schwefelwasserstoff (H₂S).

15 Resultate

15.1 Projektphase 1: Vorversuche

Um das Gaspotential des Substrates zu ermitteln, wurden Gasbildungsversuche über jeweils 21 Tage, kurz GB21, durchgeführt. In Abbildung 3 ist ein Gasbildungsversuch zu sehen. Neben der Dünngülle (1:1 Rinder- und Schweinegülle) wurden auch Batchversuche mit einzelnen Güllefractionen 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. Tabelle 4). Diese wurden ausgepresst (Feststoff gepresst) um weitere Flüssigkeit (Restflüssigkeit) abzutrennen. So ergab es aus der Rohgülle fünf Fraktionen, die auf ihr Gaspotential untersucht wurden. Jede Fraktion wurde dreifach angesetzt. Für die spezifische Gasausbeute wurden auch drei Flaschen mit Inokulum als Nullprobe laufen gelassen. Die Gasausbeuten der einzelnen Fraktionen sind in Tabelle 4 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.



Abbildung 3: Inkubationsschüttler im geöffneten Zustand für die Gasbildungsversuche mit verschiedenen Güllefractionen.

Tabelle 4: Gasausbeuten aus den GB 21 Versuchen der Güllefaktionen [NI/kg OTS].

	Rohgülle	Dünngülle	Feststoff	Feststoff gepresst	Restflüssigkeit
Schwein	134	127	195	199	129
Rind	272	222	275	260	237

In den Gasbildungsversuchen für die in der MBR-Laboranlage eingesetzte Dünngülle (Schweine : Rind 1:1) wurde in 21 Tagen eine spezifische Gasausbeute von 320 Normlitern (NI) pro kg OTS erzielt.

Auch das Gaspotential vom UF-Permeat wurde mittels GB 21 bestimmt. Die Gasausbeute von mit Inokulum angeimpftem UF-Permeat erreichte bis zu 750 NI/kg OTS, was einer praktisch vollständigen Umsetzung der OTS entspricht. Anhand der Abbildung 4 ist zu erkennen, dass der Abbau im UF-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: $2.53 \text{ l/d} \times 0.15 \% \text{ OTS} \times 750 \text{ l} = 2.8 \text{ l Gas/d}$

Theoretischer Gasverlust = 18 %

Der Versuch ohne Inokulum ergab beim UF-Permeat noch knapp 50 NI/kg OTS (Abbildung 5). Da durch die UF-Membran die Mikroorganismen zurückgehalten werden, ist davon auszugehen, dass im Permeat kein Gas mehr entsteht. Die gemessene Gasausbeute könnte darauf zurückzuführen sein, dass von aussen Mikroorganismen in den offenen Permeatbehälter gelangten. Ebenfalls kann das Permeat noch etwas Biogas enthalten, welches in gelöster Form durch die UF-Membran diffundiert und schliesslich beim BG 21-Versuch freigesetzt wurde.

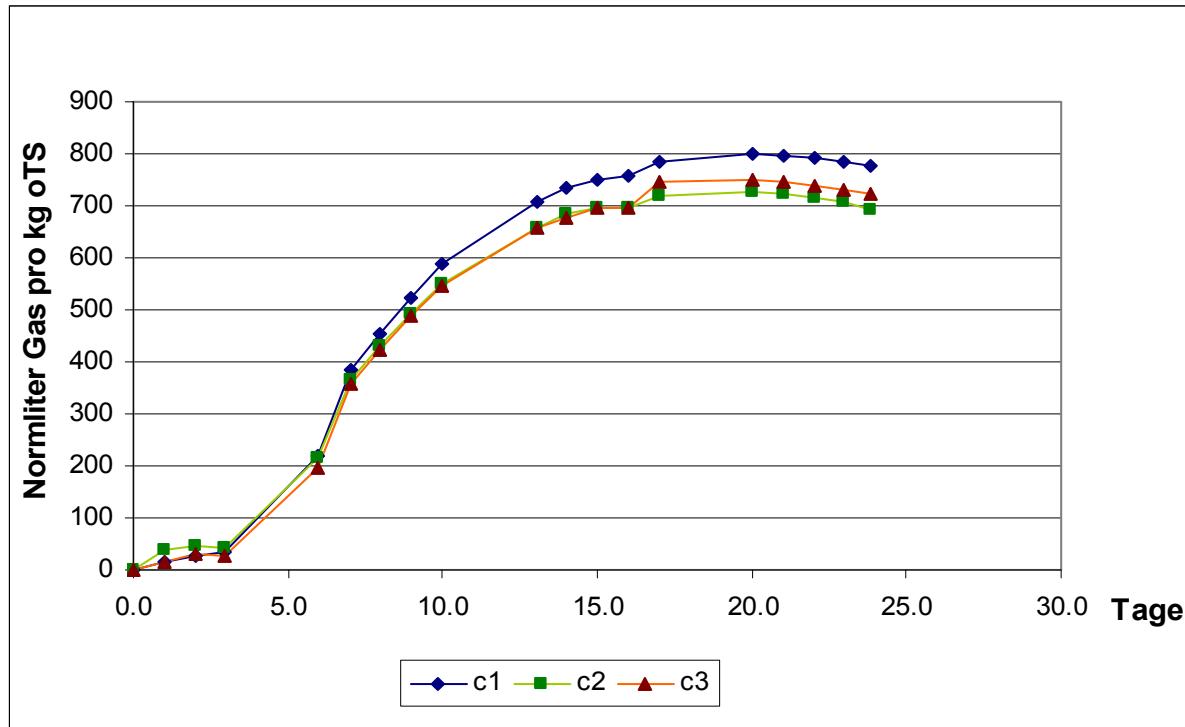


Abbildung 4: Verlauf des GB 21 Versuches mit dem UF-Permeat aus dem Laborreaktor bei HRT 7 d SRT 60 d. Drei Ansätze mit UF-Permeat und Inokulum (c1, c2 und c3).

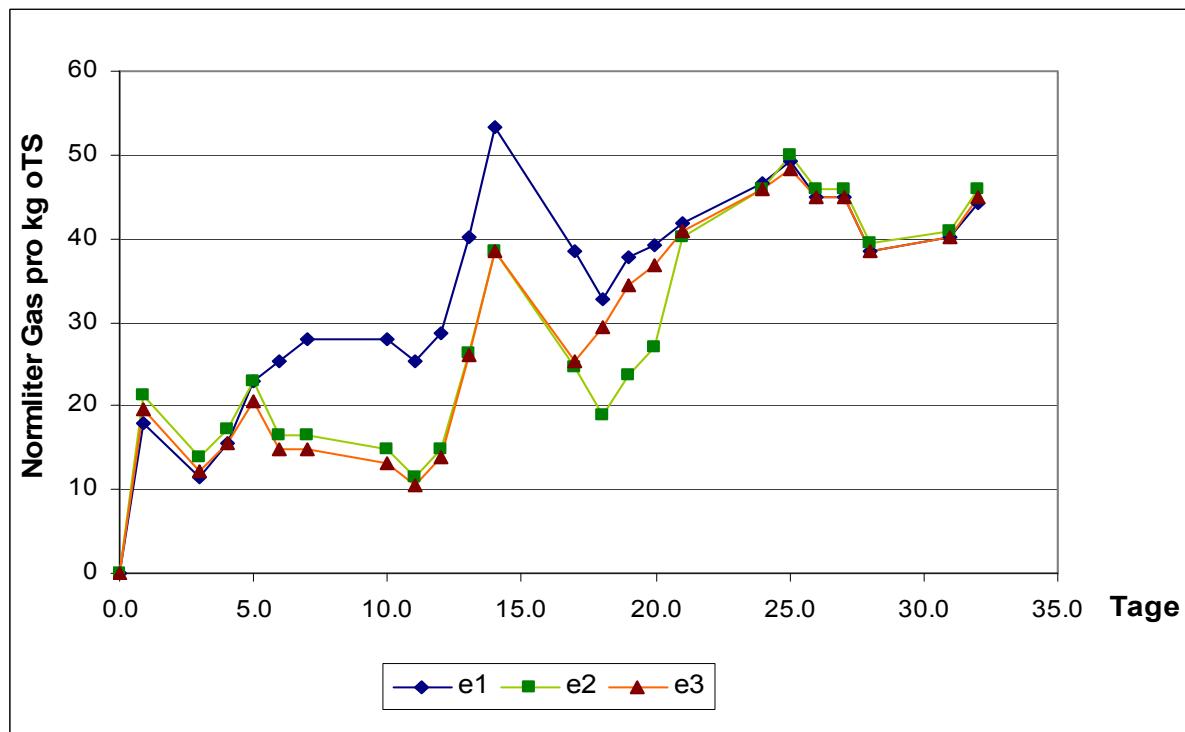


Abbildung 5: Verlauf der Gasbildung des UF-Permeats ohne Inokulum (e1,e2 und e3)

15.2 Projektphase 2: Vergärung von Mischdünngülle

In der Projektphase 2 wurden Vergärungsversuche mit Mischdünngülle aus Rinder- und Schweinegülle im Mischverhältnis 1:1 durchgeführt. Die Versuche wurden bei verschiedener HRT und SRT gefahren.

15.2.1 Versuchsbeginn mit HRT 20 d und SRT ∞ (Tag 0 bis 60)

Am 14.5.2009 wurde der Laborreaktor mit einer HRT von 20 Tagen in Betrieb genommen. Erfahrungsgemäss werden drei Zyklen gefahren, bis ein stabiler Zustand, der sogenannte „steady state“ erreicht ist. In den ersten 60 Tagen werden die Mikroorganismen an die Gülle adaptiert und die Biomasse im Reaktor wird aufgebaut.

15.2.2 Vergärungsversuch mit HRT 4 d und SRT ∞ (Tag 60 bis 134)

Die zweite Versuchphase 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 Nl/kg OTS erreicht. Dieser Wert liegt über der Gasmenge aus dem Vorversuch und konnte während der weiteren Versuchszeit nicht mehr erreicht werden.

15.2.3 Batchbetrieb (Tag 134 bis 148)

Aufgrund weiterer Unterbrüche wurde die Impellerpumpe durch eine Exzenterorschneckenpumpe ersetzt. Bis dahin verlief der Versuch als Batch weiter. Weitere Batchphasen gab es von Tag 245-266 und 343-353. In den verschiedenen Batchphasen ist jeweils eine Abnahme der Nährstoffkonzentrationen im Reaktorinhalt (UF-Retentat) zu erkennen (siehe Abbildung 6). Dies entspricht den Erwartungen, da keine weiteren Substrate zugeführt wurden. Interessanterweise nimmt die Gasmenge zu Beginn einer Batchphase sprunghaft zu und nachfolgend stetig ab (siehe Abbildung 7 und Abbildung 11). Anschliessend wurde der Reaktor erneut mit einer HRT von 4 d und ohne Schlammabnahme betrieben (SRT ∞).

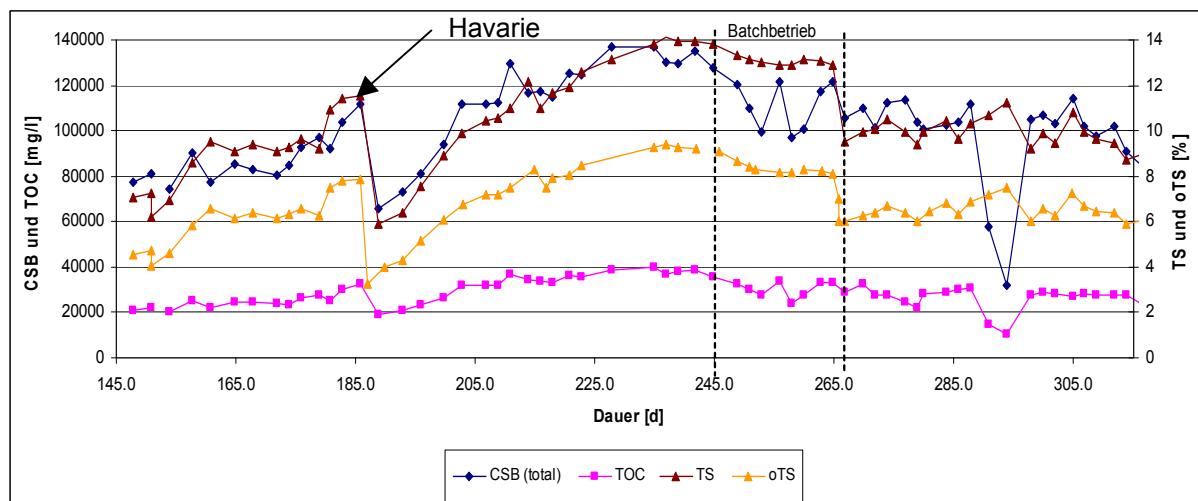


Abbildung 6: Verlauf der Gehalte im UF-Retentat (Reaktorinhalt) von Tag 145 bis 313.

15.2.4 Vergärungsversuch mit HRT 4 d und SRT ∞ (Tag 148 bis 313)

Über 7 Monate wurde der Laborreaktor bei einer HRT von 4 d betrieben. In dieser Zeit schwankte die Menge an produziertem Biogas stark, die Gaszusammensetzung hingegen blieb über längere Zeit relativ gleichmässig (Abbildung 8).

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 Nl/kg OTS erreicht. Die höhere Gasausbeute kommt einerseits aus der zusätzlichen Zugabe von frischem Substrat, andererseits aufgrund der Abnahme der Raumbelastung durch die Havarie. Es wird angenommen, dass eine höhere Zuführung an OTS (hohe Raumbelastung) die Umsetzung der Biomasse beeinträchtigt. Auch ist eine Kumulierung von nichtabbaubarer Substanz möglich, welche den Abbau hemmen könnte. Durch die Havarie wurde dem ungewollt entgegengewirkt. Im weiteren Verlauf ist eine stetige Zunahme der Inhaltsstoffe zu erkennen (Abbildung 6). Gleichzeitig nimmt die produzierte Gasmenge wieder ab (Abbildung 7).

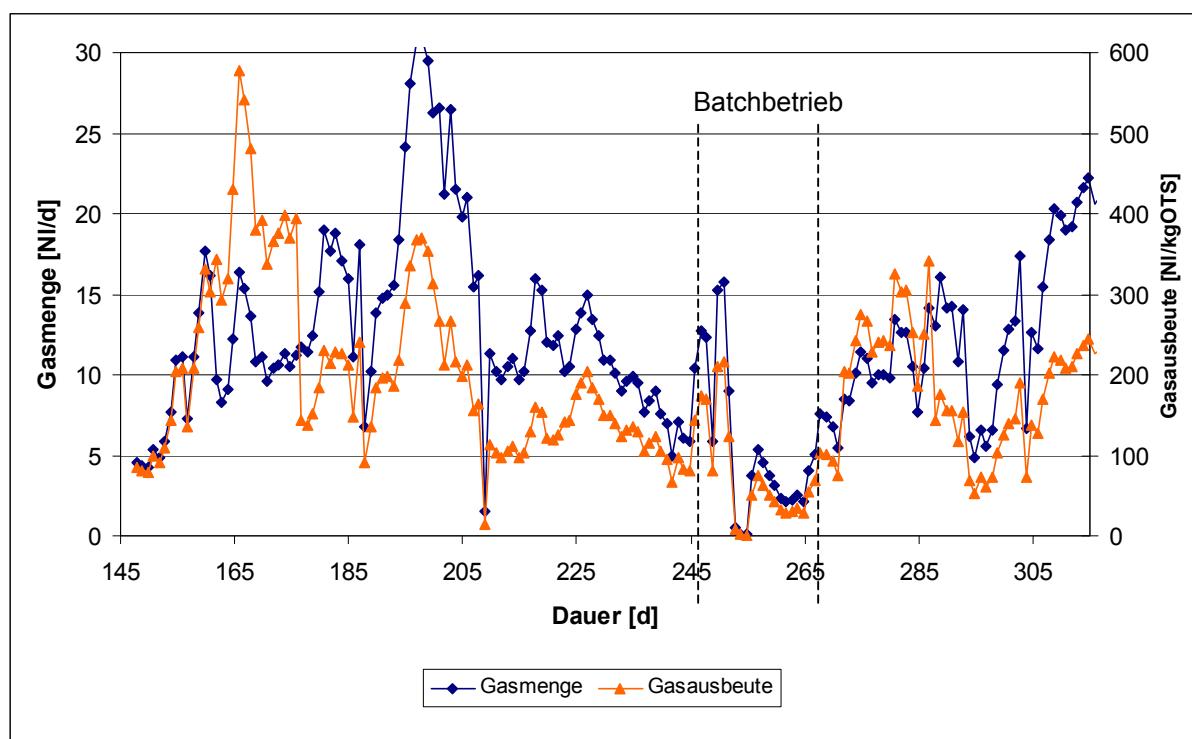


Abbildung 7: Gasmenge und spezifische Gasausbeute bei HRT 4 d, SRT ∞ (Tag 147 bis 313).

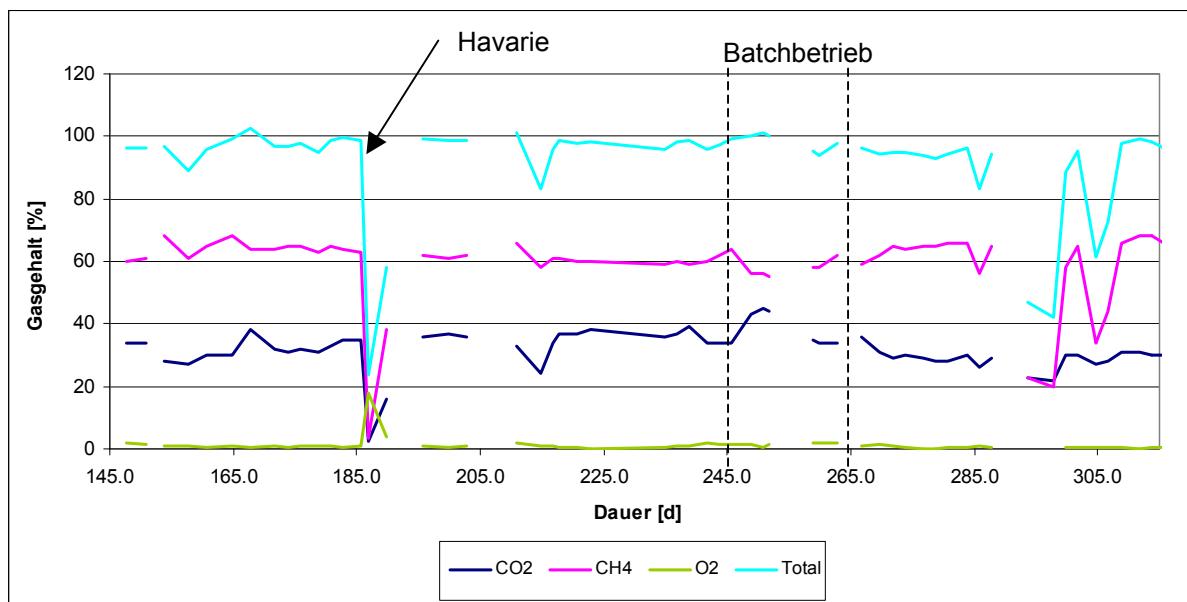


Abbildung 8: Biogaszusammensetzung (Versuch mit HRT 4 d, SRT ∞).

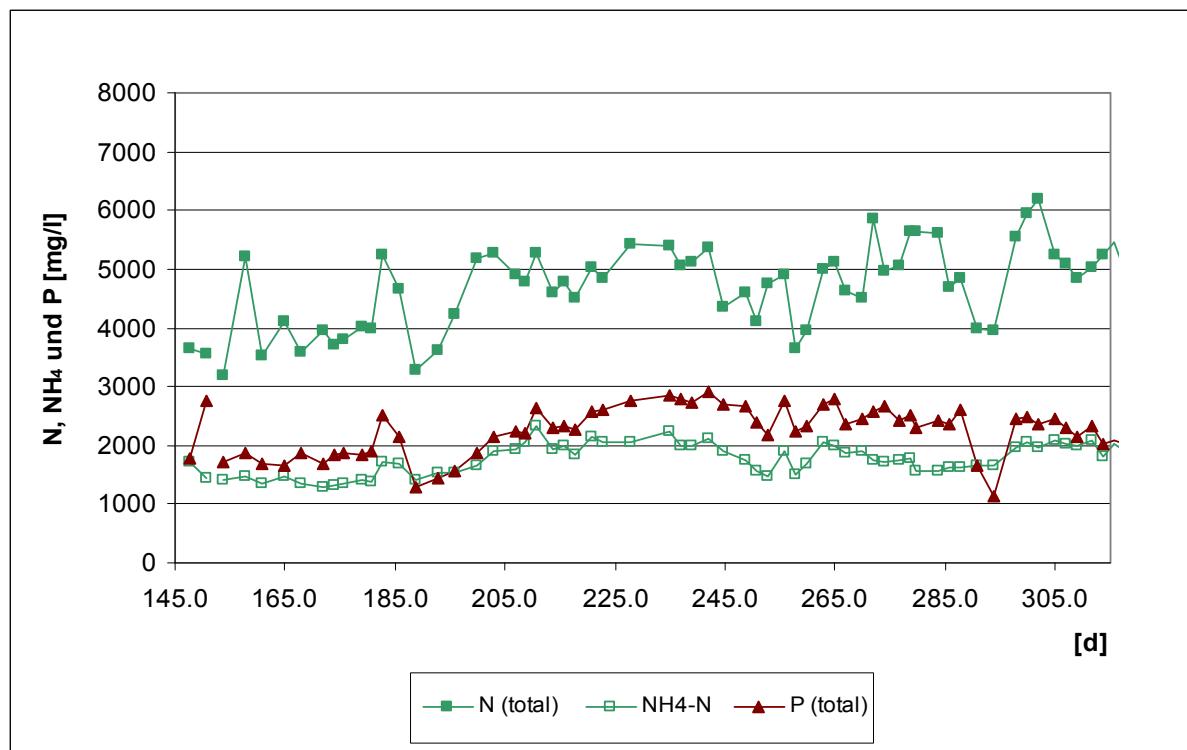


Abbildung 9: Verlauf der Nährstoffkonzentrationen im Reaktor (Versuch mit HRT 4 d, SRT ∞).

15.2.5 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 11) 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 Gölle zugeführt wurde (Batchbetrieb). Im weiteren Verlauf werden wieder Gasmengen von knapp 300 Nl/kg OTS erreicht. Diese liegen zwar unter den Werten von über 400 Nl/kg OTS, weisen jedoch eine höhere Gleichmässigkeit sowohl in der Gasmenge wie auch in deren Zusammensetzung an CO₂ (32%) und CH₄ (68 %) auf (vgl. Abbildung 12) auf.

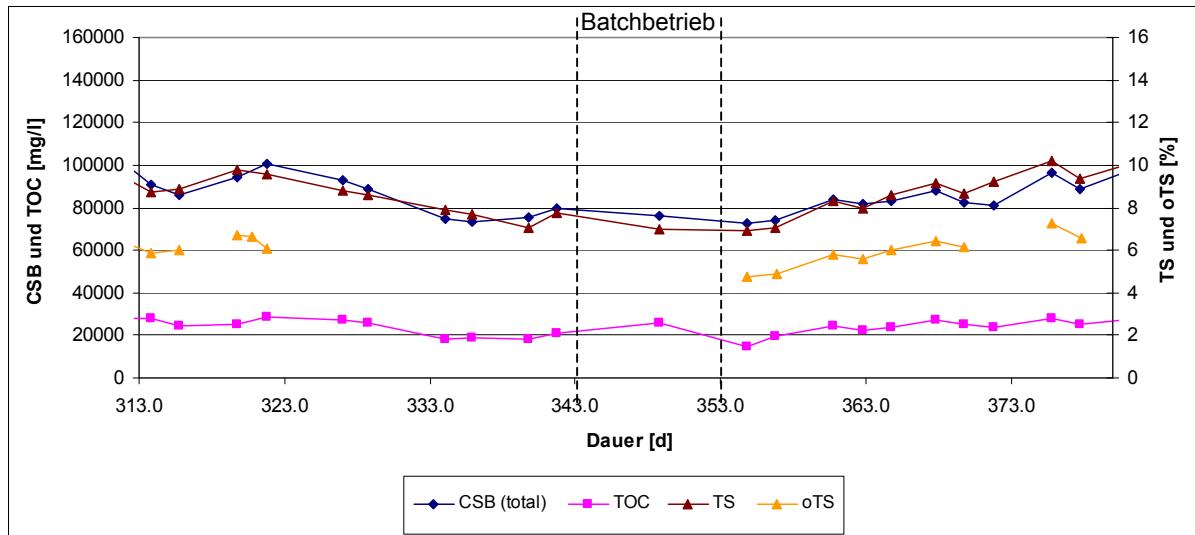


Abbildung 10: Verlauf der Konzentrationen an CSB, TOC, TS und OTS in der MBR-Laboranlage bei HRT 4 d und SRT 60 d (Tag 313 bis 378).

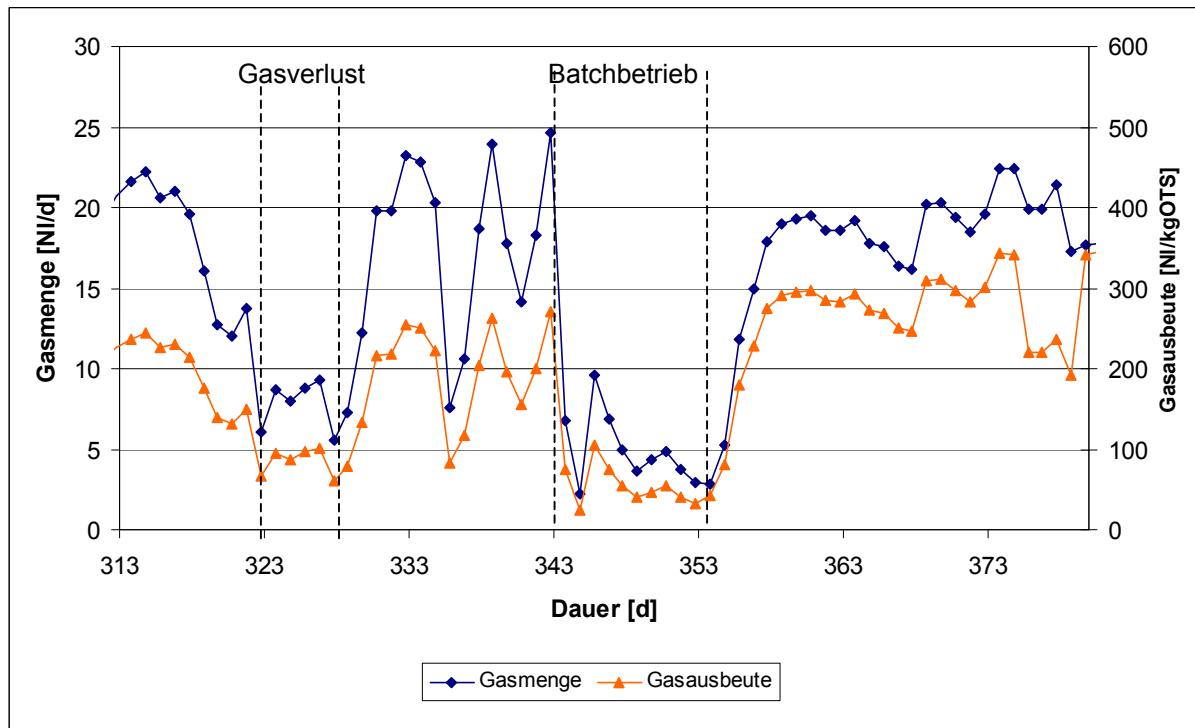


Abbildung 11: Gasmenge und spezifische Gasausbeute bei HRT 4 d und SRT 60 d (Tag 313 bis 378). Gasverluste von Tag 323-328, Batchbetrieb von Tag 343-353.

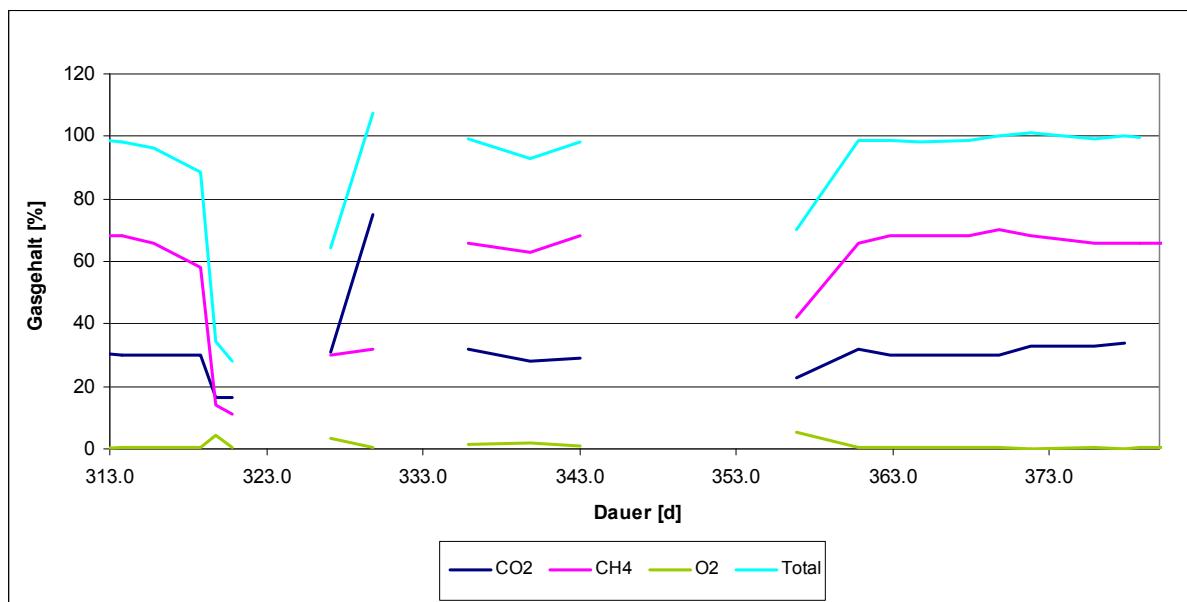


Abbildung 12: Biogaszusammensetzung in Vol.-% (Versuch mit HRT 4 d, SRT 60 d).

15.2.6 Vergärungsversuch mit HRT 7 d und SRT 60 d (Tag 379 bis 429)

Durch die Erhöhung der HRT von 4 auf 7 d wurde die Raumbelastung wieder reduziert. Aufgrund der geringeren Güllezufuhr nahm auch die produzierte Gasmenge 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 15.

Der Versuch mit HRT 7 d und SRT 60 d zeigt den stabilsten Verlauf sowohl in der Biogaszusammensetzung als auch im Verlauf der Gehalte im Reaktor (Tabell 5). Dies ist auch in der Abbildung 13 zu sehen, wo die Inhaltstoffe weniger schwanken, als in den darauffolgenden Phasen.

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

15.2.7 Vergärungsversuch mit HRT 2.5 d und SRT 60 d (Tag 429 bis 455)

In einer weiteren Versuchsphase wurde die HRT noch weiter auf 2.5 d verkürzt. Dabei ist die Raumbelastung im Reaktor wieder stark angestiegen. Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, nahm die Konzentration der gemessenen Werte 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).

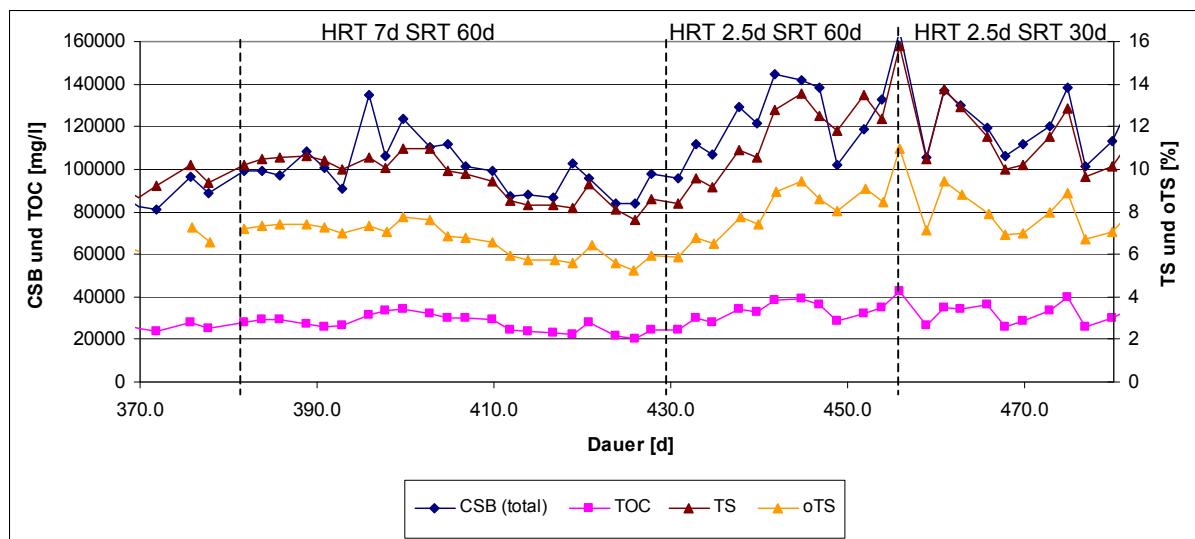


Abbildung 13: Verlauf von CSB, TOC, TS und OTS im UF-Retentat. Aufgeführt sind die drei Versuchsphasen HRT 7 d SRT 60 d, HRT 2.5 d SRT 60 d und HRT 2.5 d SRT 30 d.

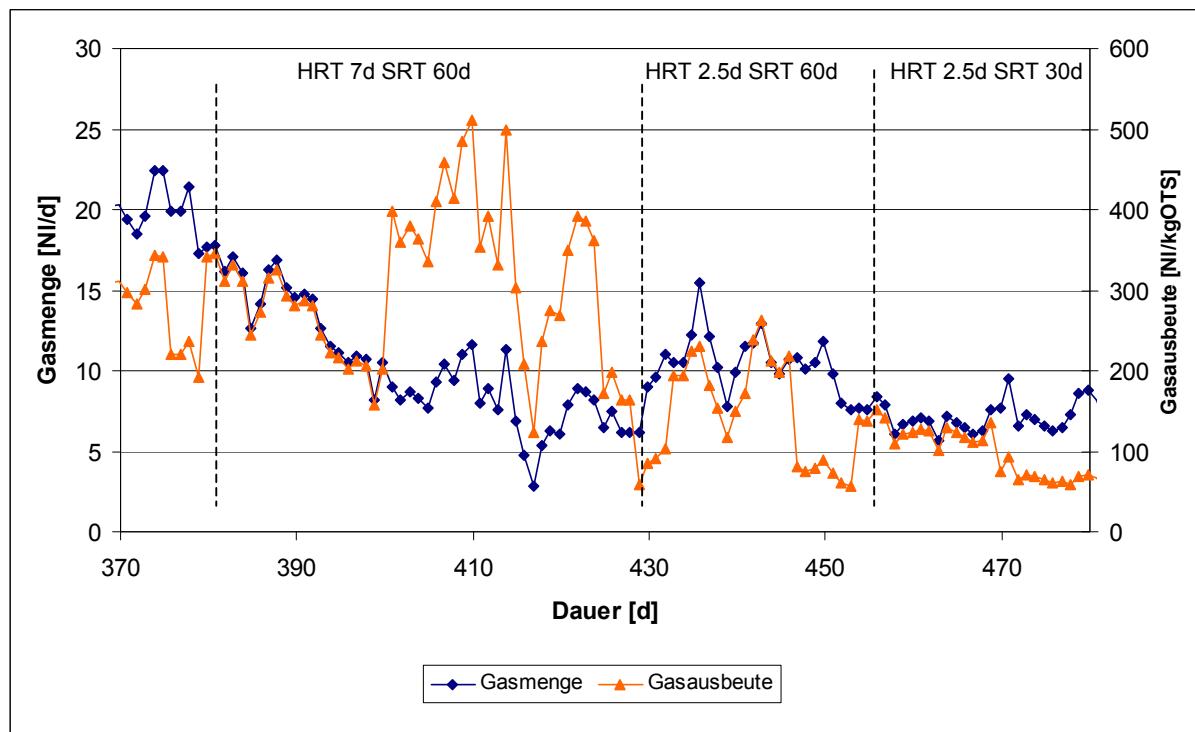


Abbildung 14: Gasmenge und spezifische Gasausbeute bei HRT 7 d SRT 60 d, HRT 2.5 d SRT 60 d und HRT 2.5 d SRT 30 d.

15.2.8 Vergärungsversuch mit HRT 2.5 d und SRT 30 d (Tag 455 bis 548)

Da noch kein „steady state“-Zustand erreicht wurde, wurde die Anlage weiterhin bei einer HRT von 2.5 d betrieben. Um den starken Anstieg der Gehalte im UF-Retentat zu stabilisieren, wurde die SRT von 60 d auf 30 d reduziert.

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

Die HRT wurde auf 3 d gesetzt, die SRT bei 30 d beibehalten. Sowohl die Gaswerte wie auch die Feststoffe im weiteren Betrieb waren schwankend. Die Gasmenge stieg während rund 6 Wochen wieder bis auf 10 NL/d an, sank dann aber wieder auf etwa 5 NL/d. Die Gasausbeute blieb im Schnitt unter 100 NL/kg OTS (siehe Abbildung 17).

15.2.9 Vergleich der stationären Phasen

Beim Vergleich der verschiedenen Versuchsphasen ist zu erkennen, dass mit der Zunahme der TS im Reaktor die spezifische Gasausbeute abnimmt (Abbildung 15). Mit der Verringerung der SRT nimmt die spezifische Gasausbeute wieder zu. Um die Gasausbeute zu optimieren, wird in einer anschliessenden 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 15).

Berechnung der Werte aus den verschiedenen stationären Phasen:

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

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

Die spezifische Gasausbeute wurde wie folgt berechnet:

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

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

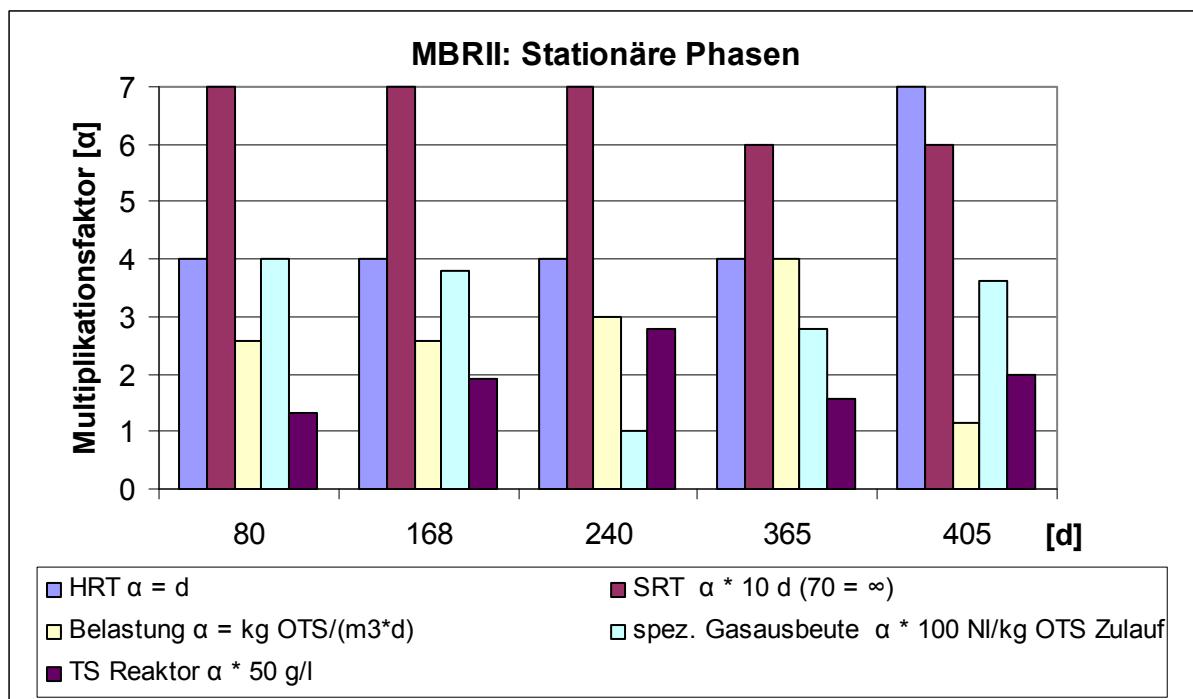


Abbildung 15: Vergleich der stationären Phasen der einzelnen Versuchsphasen (Einzelne Tageswerte).

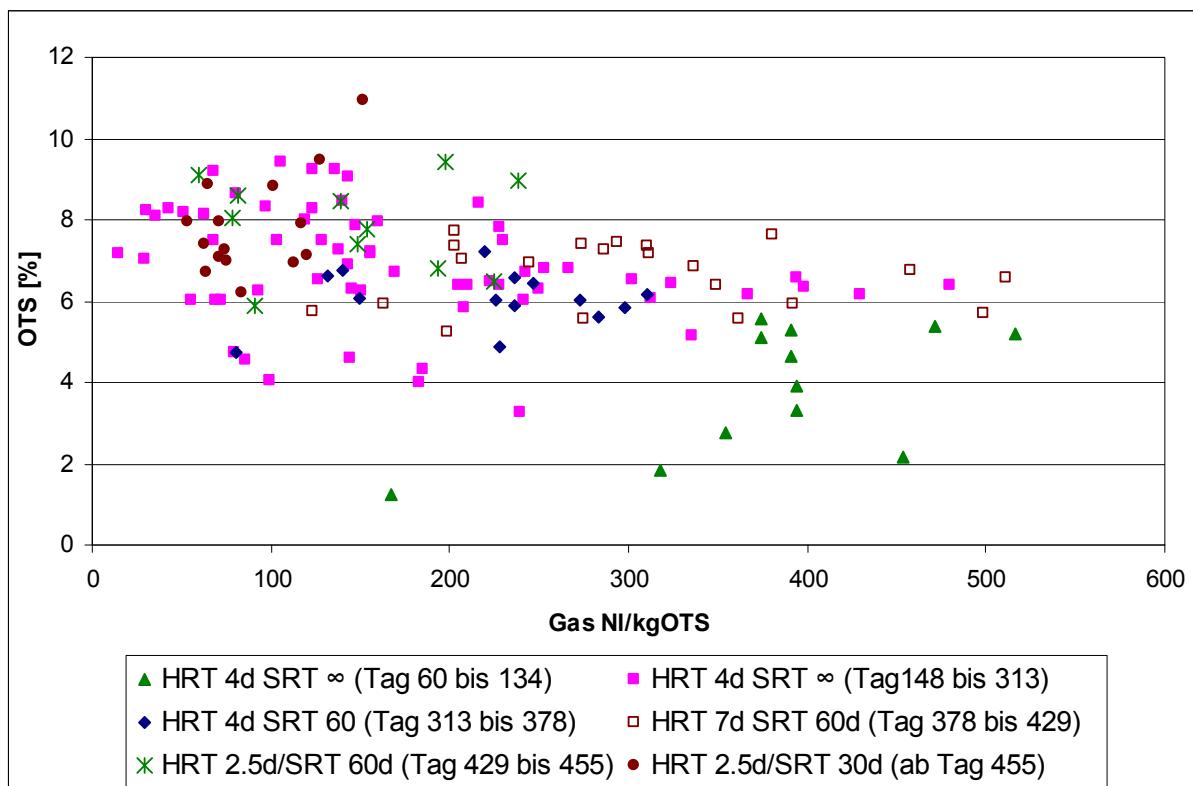


Abbildung 16: Darstellung der spezifischen Gasausbeute (NI/kg OTS) gegenüber der organischen Trockensubstanz (OTS in % d. FS) im Reaktor während den verschiedenen Verqärungsphasen.

Ein weiterer Vergleich der Vergärungsphasen zeigt eine Tendenz in der die spezifische Gasausbeute mit der Zunahme an OTS im Reaktor zurückgeht (Abbildung 16). Dabei ist zu

beachten, dass diese Tendenz ab einem OTS-Gehalt von 5 % zu erkennen ist. In der ersten Versuchsphase (HRT 4 d SRT \approx Tag 60 bis 134) liegen die Werte stark auseinander. Der Reaktor wurde mit einem tiefen OTS-Gehalt gestartet, welcher danach stetig zunahm, wobei auch die Gasmenge anstieg. Es wird davon ausgegangen, dass bei höherem Feststoffanteil die Gasproduktion aufgrund zu hoher Raumbelastung ($> 3 \text{ kg OTS/m}^3 \cdot \text{d}$) zurückgeht. Auch können sich hemmende Stoffe ansammeln, die die Umsetzung von OTS in Biogas beeinflussen. Indem die Schlammaufenthaltszeit 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.

15.2.10 Batchbetrieb Tag 548 bis 581, Umstellung auf Schweinegülle

Während gut einem Monat wurde die Substratzufuhr unterbrochen. In dieser Zeit ging die Gasmenge deutlich zurück wie auch die übrigen Werte wie CSB, TOC, TS und OTS. Nach diesem Unterbruch der Zufuhr wurde der Reaktor auf das Substrat UF-Retentat von Schweinegülle (Aufkonzentrieren vor der Vergärung) umgestellt.

15.3 Projektphase 3: Vergärung von UF-Retentat aus Schweinegülle

Während des Jahres 2011 wurde die Laboranlage mit aufkonzentrierter Schweinegülle (UF-Retentat) betrieben. Dabei wurden verschiedene Betriebsbedingungen untersucht. Des Weiteren wurden Batchversuche (GB 21) durchgeführt, um das Gasbildungspotential von UF-Retentat zu ermitteln und mit dem von Roh- und Dünngülle zu vergleichen.

Die Ergebnisse zu den verschiedenen Betriebsbedingungen werden nachfolgend aufgeführt.

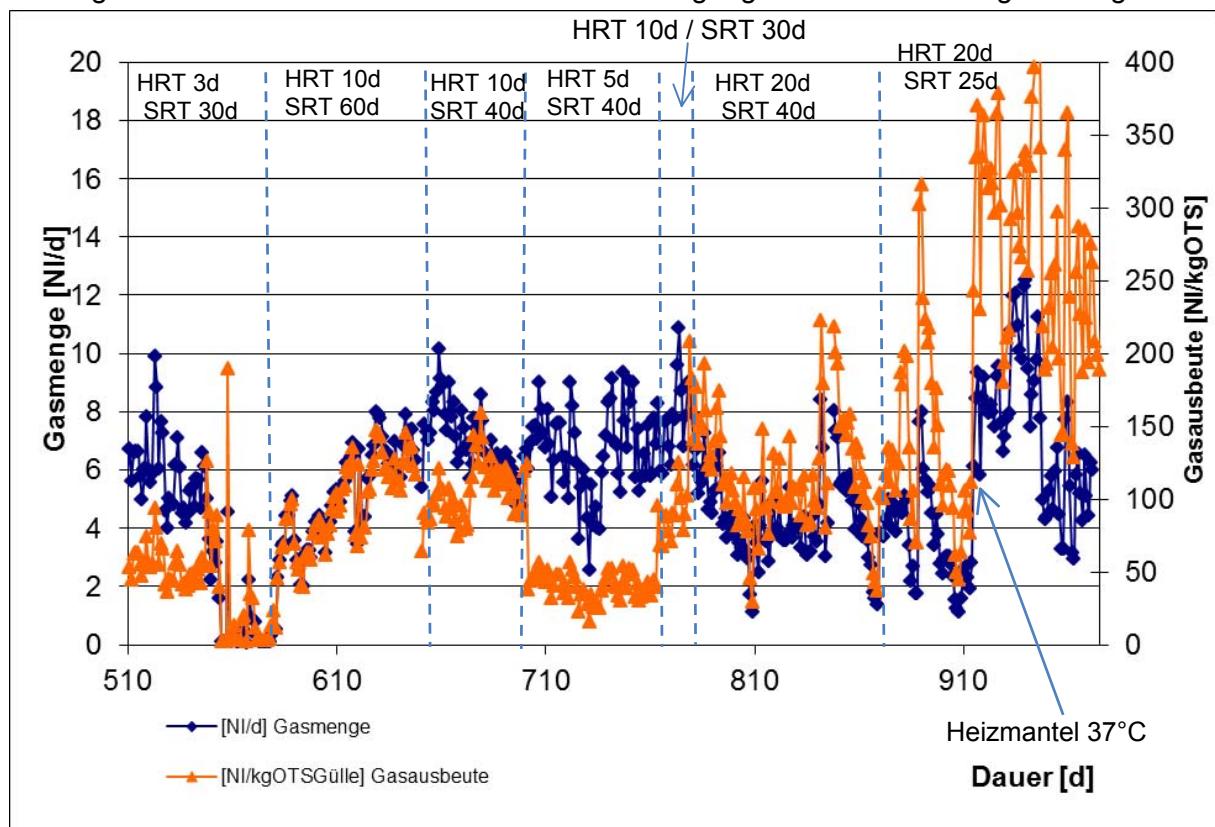


Abbildung 17: Verlauf der Gasmenge und der spezifischen Gasausbeute während des Betriebs mit UF-Retentat

Mit dem Einsetzen von UF-Retentat wurde erhofft, dass mit einem stofflich gleichmässigeren Substrat ein stabilerer Reaktorbetrieb und somit konstantere Werte erreicht werden könnten. Doch auch das UF-Retentat, das unter Praxisbedingungen produziert wurde, fiel mit unterschiedlichem OTS, im Bereich von 2.5 % bis 4.2 % an. Trotzdem gab es konnte ein etwas gleichmässiger Reaktorebetrieb gewährleistet werden.

15.3.1 Vergärungsversuch mit HRT 10 d und SRT 60 d (Tag 582 - 698)

Während des Versuchs stieg die Gasmenge leicht an, blieb jedoch weiterhin unter 10 Nl/d. Die Gasausbeute erreichte einen durchschnittlichen Wert von 110 Nl/kg OTS. Ebenso erhöhte sich der Feststoffanteil wieder. Der TS-Gehalt stieg von 2.8 % auf rund 11 %.

15.3.2 Vergärungsversuch mit HRT 5 d und SRT 40 d (Tag 699 – 778)

Mit dem Halbieren der HRT von 10 auf 5 d stieg der Feststoffanteil stark an. Der TS erreichte in dieser Versuchsphase mit 18.5 % den höchsten Wert der gesamten Versuchsdauer und schränkte den Betrieb des MBR ein. Die Folge war eine Verblockung der Membran und daurch zu geringer Permatfluss sowie häufigere Reinigung. In dieser Phase ging die Gasmenge geringfügig zurück, die Gasausbeute nahm jedoch stark ab und lag im Schnitt bei 40 Nl/kg OTS. Durch den Betrieb des MBR mit konzentrierter Schweinegülle (UF-Retentat) und kurzen Verweilzeiten von 5 Tagen wurden die verfahrenstechnischen Grenzen der Anlage erreicht. Dadurch wird deutlich, dass mit UF-Retentat der MBR-Reaktor bei höherer Verweilzeit (HRT) gefahren werden muss. Nachfolgend wurde der Reaktor mit einer HRT 20 Tagen betrieben.

15.3.3 Vergärungsversuch mit HRT 20 d und SRT 40 d (Tag 779-865)

Mit längerer HRT ging die Raumbelastung zurück und so nahm die Gasausbeute etwas zu, jedoch blieb die Gasmenge mit durchschnittlich 6.6 Nl im gleichen Bereich wie in den beiden vorangehenden Versuchen. In dieser Phase von fast drei Monaten blieb der OTS recht stabil, wodurch die Raumbelastung kaum verändert wurde. Es konnte festgestellt werden, dass bei Unterbrüchen der Güllezufuhr (technische Ausfälle), der TS-Gehalt im Reaktor zurückging. Entsprechend sank auch die Gasmenge. Sobald wieder frisches Substrat zugeführt wurde, stieg die Gasmenge sofort an und pendelte sich nach ein paar Tagen wieder auf den vorherigen Wert ein. Die Lagerung der Gülle vermindert das Biogaspotential. Eine Lagerung sollte daher vermieden oder möglichst kurz gehalten werden. Aus logistischen und versuchstechnischen Gründen konnte nur mit wenigen Ausnahmen frische Gülle für die Versuche zur Verfügung gestellt werden.

15.3.4 Vergärungsversuch mit HRT 20 d und SRT 25 d (Tag 866-977)

In diesem Versuchsabschnitt wurde das Schlammalter reduziert. Dadurch reduzierte sich auch der TS, CSB und TOC im Reaktor. Erwartet wurde auch eine Zunahme der Gasmenge und der Gasausbeute, was allerdings nur zeitweise eintraf. Wegen tieferen Umgebungstemperaturen (November 2011) sank die Reaktortemperatur auf 25°C. Die Abwärme der Pumpe und die Eigenwärme des Reaktors reichten nicht aus, die Temperatur von 37°C einzuhalten. Es wurde ein Heizmantel installiert, welcher sofortige Wirkung zeigte. Die Gasmenge und Gasausbeute stiegen an und erreichten für den restlichen Verlauf dieser Versuchsphase durchschnittlich 9.2 Nl/d und 317 Nl/kg OTS. Auch der Methananteil stieg von rund 65 % auf 68 % an.

15.4 Projektphase 4: Vergärung mit Mischdünngülle und Co-Substrat Rohglycerin

Nach den Versuchen mit der Vergärung von UF-Retentat wurde der Labor-MBR wieder mit Mischdünngülle betrieben. Verwendet wurde eine 1:1 Mischung aus filtrierter (0.5 mm Maschengrösse) Rindergülle und Schweinegülle. Nach etwa 7 Wochen wurde zur Mischdünngülle Rohglycerin als Co-Substrat zugeführt. Gemäss den Untersuchungen der Universität für Bodenkultur Wien, ergibt die Mischung aus Gülle und Rohglycerin mehr Gas als die Addition der Gaserträge der einzelnen Komponenten [2]. Das Rohglycerin fällt als Nebenprodukt bei der Biodieselherstellung an und stammt von der Biodieselhersteller-Firma Tommy C. Halter GmbH in Wollerau. In den folgenden Vergärungsversuchen wurde die Laboranlage mit unterschiedlichem Volumenanteilen an Rohglycerin betrieben. Die verwendete Mischdünngülle stammte während der gesamten Versuchsphase aus demselben Separierversuch an der ART. Während der Lagerung nahm der leicht abbaubare organische Anteil stetig ab, was auch einen Einfluss auf den Gasertrag hatte.

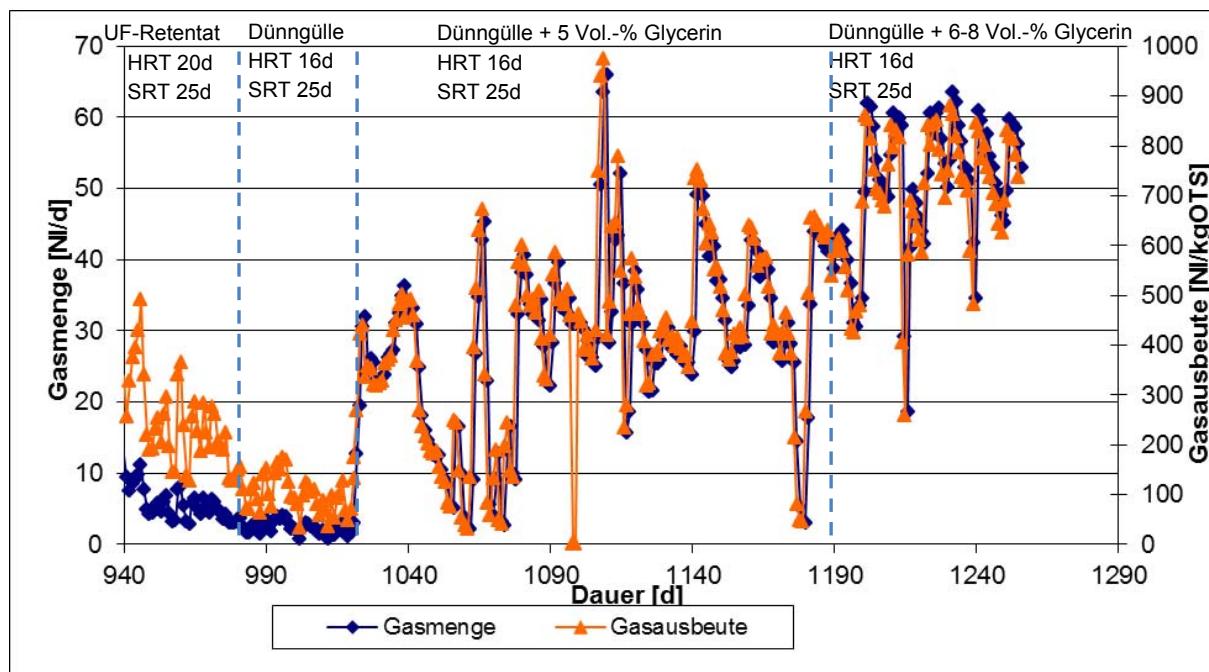


Abbildung 18: Verlauf der Gasmenge und der spezifischen Gasausbeute während des Betriebs mit Mischdünngülle und Rohglycerin als Co-Substrat.

15.4.1 Vergärungsversuch bei HRT 16 d und SRT 25 d mit Mischdünngülle (Tag 978 - 1021)

Die Mischdünngülle ergab aufgrund des geringeren OTS-Gehalts kleinere Gasmengen, als das UF-Retentat. Die Gasausbeute lag im Schnitt noch bei 101 Nl/kg OTS bei einer Gasmenge von 2.4 Nl/d. Die Adaption während 7 Wochen an die neue Dünngülle zeigte keine Verbesserung im Gasertrag. Auch der Methananteil ging wieder leicht zurück.

15.4.2 Vergärungsversuch bei HRT 16 d und SRT 25 d mit Mischdünngülle und 5 Vol.-% Rohglycerin (Tag 1022 - 1189)

Neben der täglichen Zuführung von Dünngülle wurden 5 Vol.-% Rohglycerin zugeführt. Das Rohglycerin wurde auf 6 Portionen pro Tag verteilt. Zu Beginn der Versuchsphase sank der pH-Wert im Reaktor auf 7.0 und stieg dann aber wieder auf pH 7.5 an. Die Gasmenge und Gasausbeute stiegen sofort an. Mit zwischenzeitlichem Unterbruch der Glycerin-Zugabe nahm die Gasmenge rasch ab. Die durchschnittliche Gasausbeute lag bei 490 Nl/kg OTS. Der Methangehalt lag über lange Zeit bei rund 65 %.

15.4.3 Vergärungsversuch bei HRT 16 d und SRT 25 d mit Mischdünngülle und 6-10 Vol.-% Rohglycerin (Tag 1190-1279)

In diesem Versuchsabschnitt wird die HRT und SRT beibehalten und der Anteil an Rohglycerin erhöht. Beim Erhöhen auf 6 Vol.-% des Glycerins sank der pH-Wert auf 7.3, stabilisierte sich in wenigen Tagen auf 7.5. Die Gasmenge und Ausbeute stieg nochmals etwas an auf 50 Nl/d respektive knapp 700 Nl/kg OTS.

Bei etwa 7 Vol.-% Glycerin stiegen die Gasmenge und die Gasausbeute nochmals an. Der Methangehalt liegt im Schnitt bei 67%.

Nachdem Erhöhen des Glycerinanteils auf 10 Vol.-% sank der pH-Wert innerhalb von 4 d auf 6.3 und nach weiteren 4 d auf pH 5.3. CSB- und TOC-Gehalte steigern um etwa das doppelte an. Gleichzeitig ging die Gasproduktion markant zurück. Der pH-Wert wurde mit NaOH auf 8.0 eingestellt und die Dosierung beibehalten. Nach 4 Tagen sank der pH erneut auf 6.3. Die Glycerinzufuhr wurde auf 5 Vol.-% reduziert. Da keine Stabilisierung des pH-Werts zu Verzeichnen war, wurde die Glycerinzufuhr abgebrochen und der pH stieg über darauffolgenden 10 Tage wieder auf 7.4 an.

15.5 Übersicht der Resultate der verschiedenen Versuche

Die Ergebnisse der verschiedenen Versuche wurden zur besseren Übersicht tabellarisch zusammengefasst. Nachfolgend die Tabelle 5 mit der Gaszusammensetzung, der Gasmenge, spezifischer Gasausbeute, Raumbelastung sowie der Temperatur und dem pH-Wert der Projektphase 2, Vergärung von Mischdünngülle. Die Ergebnisse der Projektphasen 3, Vergärung von UF-Retentat und Phase 4, Vergärung von Mischdünngülle und Cosubstrat sind in Tabelle 6 respektive Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 5: Übersicht von Gasqualität, Gasmenge, spezifische Gasausbeute, Raumbelastung, Temperatur und pH-Wert während der Gärversuche der Projektphase 2, Vergärung von Mischdünngülle, in zeitlicher Reihenfolge. Die Werte beziehen sich jeweils auf die gesamte Versuchsphase und umfassen auch Aufbauphasen und Unterbrüche.

Parameter Einheit	CO ₂ [%]	CH ₄ [%]	CO ₂ +CH ₄ [%]	Gasmenge [NI]	Gasausbeute [NI/kg OTS]	Raumbelastung [kg OTS/m ³ *d]	Reaktortemp. [°C]	pH-Wert Retentat
Mischdünngülle 1:1 HRT 20 d, SRT ∞								
Min	5.6	12.2	17.8			0.5	24.1	7.1
Max	30.0	72.0	96.5			0.5	36.3	8.0
Mittelwert	17.4	55.6	73.0			0.5	32.7	7.5
Mischdünngülle HRT 4 d, SRT ∞ (Tag 60 bis 134)								
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
Mittelwert	30.1	62.7	92.8	10.8	273.7	2.0	32.6	7.6
Mischdünngülle HRT 4 d, SRT ∞ (Tag 148 bis 313)								
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
Mittelwert	31.8	58.5	90.3	11.6	179.9	3.6	34.9	7.6
Mischdünngülle HRT 4 d, SRT 60 d								
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
Mittelwert	31.2	56.0	87.2	14.7	186.3	3.9	35.2	7.5
Mischdünngülle HRT 7 d, SRT 60 d								
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
Mittelwert	30.9	66.1	97.5	12.8	287.3	1.3	38.6	7.6
Mischdünngülle HRT 2.5 d, SRT 60 d								
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
Mittelwert	29.3	68.6	98.9	10.2	146.6	4.0	33.7	7.5
Mischdünngülle HRT 2.5 d, SRT 30 d								
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
Mittelwert	30.1	65.6	96.1	6.9	106.2	5.7	33.4	7.4

Tabelle 6: Übersicht von Gasqualität, Gasmenge, spezifische Gasausbeute, Raumbelastung, Temperatur und pH während den Gärversuchen der Projektphasen 3, Vergärung von UF-Retentat, in zeitlicher Reihenfolge.

Parameter Einheit	CO ₂ [%]	CH ₄ [%]	CO ₂ +CH ₄ [%]	Gasmenge [NI]	Gasausbeute [NI/kg OTS]	Raumbelastung [kg OTS/m ³ *d]	Reaktortemp. [°C]	pH-Wert Retentat
UF-Retentat HRT 10 d, SRT 60 d								
Min	32.0	64.0	96	4.8	74.5	2.71	31.4	7.1
Max	35.0	66.0	101	8.6	159.0	4.20	35.9	7.5
Mittelwert	34.1	65.1	99.2	6.5	108.9	3.07	34.4	7.3
UF-Retentat HRT 5 d, SRT 40 d								
Min	30	57	87	2.6	16.1	7.93	23.6	7.1
Max	39	66	105	9.3	56.9	8.72	38.97	7.7
Mittelwert	35	62	97	6.6	40.2	8.23	32.2	7.3
UF-Retentat HRT 20 d, SRT 40 d								
Min	29.0	62.0	91	2.5	65.7	1.84	24.74	7.4
Max	30.0	64.0	94	5.6	148.4	2.18	34.11	7.6
Mittelwert	29.3	62.7	92	3.9	104.1	1.91	30.25	7.5
UF-Retentat HRT 20 d, SRT 25 d								
Min	21.0	66.0	87	6.6	179.9	1.50	36.7	7.5
Max	28.0	70.0	98	12.5	492.7	1.14	37.6	7.7
Mittelwert	25.6	68.7	94.3	9.2	317.0	1.85	37.2	7.6

Tabelle 7: Übersicht von Gasqualität, Gasmenge, spezifische Gasausbeute, Raumbelastung, Temperatur und pH während den Gärversuchen der Projektphasen 4, Vergärung von Mischedünngülle und Cosubstrat, in zeitlicher Reihenfolge.

Parameter Einheit	CO ₂ [%]	CH ₄ [%]	CO ₂ +CH ₄ [%]	Gasmenge [NI]	Gasausbeute [NI/kg OTS]	Raumbelast. [kg OTS/m ³ *d]	Reaktortemp. [°C]	pH-Wert Retentat
Mischedünngülle HRT 16d, SRT 25d								
Min	25.0	60.0	85	0.8	34.0	1.17	36.2	7.5
Max	28.0	65.0	93	4.1	173.6	1.17	37.5	7.7
Mittelwert	26.6	63.4	90	2.4	101.6	1.17	37.0	7.5
Mischedünngülle HRT 16d, SRT 25d +5 vol.% Glycerin								
Min	28.5	62.0	90.5	15.7	234.0	3.35	35.9	7.0
Max	34.0	68.0	102	66.0	976.0	3.38	38.0	7.9
Mittelwert	30.9	65.0	95.9	33.0	490.7	3.36	37.1	7.5
Mischedünngülle HRT 16d, SRT 25d +7 vol.% Glycerin								
Min	30.0	63.0	93	18.6	258.5	3.60	31.8	7.3
Max	34.0	69.0	103	63.5	881.7	3.60	37.6	7.6
Mittelwert	32.0	67.0	99	50.2	697.6	3.60	36.7	7.4
Mischedünngülle HRT 16d, SRT 25d +10 vol.% Glycerin								
Min	37.0	54.0	91	7.1	65.7	5.38	36.0	5.3
Max	43.5	58.0	101.5	48.4	450.0	5.38	37.7	6.3
Mittelwert	40.1	56.5	96.6	23.7	220.1	5.38	37.0	5.8

15.6 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 [3] 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 verschiedene Substrate, wie Natriumacetat, Glucose, Glycerol und Zellulose untersucht worden.

Entgegen den Erwartungen zeigte das Acetat gegenüber den anderen Substraten die langsamste Abbaugeschwindigkeit. Am schnellsten abgebaut wurde die Glucose gefolgt von Glycerol, Zellulose 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 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 [4].

Der Auslastungsgrad bei der Vergärung von Mischdüngülle (Projektphase 2) wurde auch in den Versuchphasen 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 substrat-limitiert bis ausgelastet war und die Werte für HRT 2.5 d als stark belastet bis stark überlastet zu deuten waren.

16 Diskussion

16.1 Gasbildungsversuche GB21 mit dem UF-Permeat

Die Gasbildungsversuche mit dem UF-Permeat, aus dem Versuch mit HRT 7 d und SRT 60 d; zeigten das Restgaspotential des vergorenen Materials auf. Es wird angenommen, dass der Hauptanteil der OTS im Permeat kurzkettige organische Säuren sind. Diese sind gut abbaubar und können bei erhöhter Verweilzeit zu Biogas umgesetzt werden. Im Laborversuch konnten bis zu 20 % der OTS der zugeführten Dünngülle noch zu Biogas umgewandelt werden. Dazu wäre jedoch eine grössere Verweilzeit nötig. Für eine Nachgärung ist das UF-Permeat nur bedingt geeignet, da es aufgrund der Abtrennung an der UF-Membrane keine Mikroorganismen enthält und daher mit Inokulum angeimpft werden müsste. Während des Batchansatzes von UF-Permeat ohne Inokulum konnte praktisch kein Biogas nachgewiesen werden.

16.2 Vergärungsversuche mit Mischdünngülle

Die in den Vorversuchen (GB21) erzielte Gasausbeute von 320 Nl/kg OTS kann in den Versuchen im Membranbioreaktor (MBR) phasenweise bestätigt werden. In der Versuchsphase mit der HRT 4 d und SRT ∞ wird zeitweise sogar eine deutlich höhere Gasausbeute von gut 400 Nl/kg OTS erreicht. Gefundene Literaturwerte liegen für Rindergülle bei 370 l/kg OTS [5] und für Schweinegülle bei ca. 200 ml CH₄/g TS (entspricht 310 l/kg TS), erreicht nach 21-23 Tagen [6]. Mit dem MBR ist es demnach möglich, vergleichbare Gasausbeuten bei deutlich kürzeren Verweilzeiten zu erzielen, wie in herkömmlichen Reaktoren. Es kann gezeigt werden, dass die HRT bei gleichbleibender Gasausbeute auf 4 d reduziert werden kann. Dies deutet auf eine höhere Aktivität der Biozönose hin, die durch den Rückhalt der Mikroorganismen an der UF-Membran erreicht wird.

Es gibt keine klaren Indizien, dass sich aufgrund der Filtration und Rückführung von UF-Retentat im Reaktor Hemmstoffe ansammeln. Der Anstieg der TS in den Versuchsphasen ohne Schlammentnahmen (SRT ∞) deutet darauf hin, dass sich inerte Feststoffe im Reaktor ansammeln, die nicht oder nur langsam abgebaut werden können (anorganisches Material, schwer abbaubares, organisches Material). Dadurch verringert sich das eigentliche Nutzvolumen im Reaktor kontinuierlich und die Raumbelastung steigt. Durch das Herabsetzen des Schlammatalters konnte dem entgegengewirkt werden.

Mit dem Erhöhen der HRT von 4 d auf 7 d stieg die Gasausbeute stark an, die Raumbelastung war noch halb so gross. Des Weiteren wurde festgestellt, dass mit höherer Raumbelastung die Gasausbeute zurückging. Daraus kann gefolgt werden, dass die Raumbelastung einen Einfluss auf die Gasausbeute hat.

Bei der kurzen HRT von 2.5 d nehmen die Konzentrationen an CSB und TOC, sowie der TS im Reaktor stärker zu. Es könnte sich hier neben einer Akkumulierung von inerten Feststoffen auch um wachsende Biomasse handeln. Mit der FOS/TAC – Bestimmung konnte gezeigt werden, dass in dieser Phase die Mikroorganismen stark belastet bis überfüttert waren und daher nicht alles abbauen konnten. Mit der Annahme, dass sich die aktive Biomasse noch im Aufbau befindet, wird die Versuchsphase bei HRT 2.5 d weiter betrieben.

In dieser Zeit stieg die Gasmenge kurzzeitig von etwa 7 Nl/d auf 13 Nl/d an und sank wieder auf etwa 6 Nl/d. Die Gasausbeute blieb allerdings unter 100 Nl/kg OTS. So wird angenommen, dass mit einer HRT von 2.5 d die Belastungsgrenze des Systems erreicht wurde.

16.3 Vergärungsversuche mit UF-Retentat

Beim Vergären des UF-Rtentats wird der Reaktor stärker belastet (HRT 10 d, SRT 60 d) als beim Betrieb mit Dünngülle. Die höhere Raumbelastung führt zwar anfänglich zu einem höheren täglichen Gasertrag, doch zeigt die spezifische Gasausbeute von durchschnittlich 110 Nl/kg OTS, dass auch mit UF-Rtentat die Werte aus dem Vorversuch von 135 Nl/kg OTS bei 21 d nicht erreicht werden können. Zu berücksichtigen ist dabei, dass bei diesem Reaktorbetrieb eine HRT von 10 d gewählt wurde. Im Vergleich dazu ergaben die GB 21 Vorversuche nach zehn Tagen rund 59 Nl/kg OTS. Der Betrieb bei deutlich verkürzter Verweilzeit ist also ein klarer Vorteil des MBR. Eine weitere Verkürzen der HRT auf 5 d und einer Reduktion der SRT auf 40 d steigen TS, TOC und CSB im Reaktor deutlich an. Die tägliche Gasproduktion bleibt in etwa konstant, die Gasausbeute geht stark zurück (ca. 40 Nl/kg OTS). Die TS im Reaktor steigt auf einen Wert von 18 %, was einen zu hohen Reinigungsaufwand der UF erfordert, um den Reaktor weiter betreiben zu können. Die technischen und biologischen Grenzen des MBR bezüglich HRT sind mit einer HRT von 5 d erreicht.

Die HRT wird anschliessend auf 20 d gesetzt und die SRT bei 40 d beibehalten. Als Folge davon nimmt die Raumbelastung ab, was zu einem Anstieg der täglichen Gasausbeute und einem Rückgang des Feststoffanteils im Reaktor führt. Die Gasausbeute erreicht im Mittel 137 Nl/kg OTS, was dem Wert im Vorversuch bei 21 d entspricht.

Bei geringerer SRT von 25 d, sinken die Gehalte (TS, TOC, CSB) im Reaktor weiter. Auch die spezifische Gasausbeute geht zurück. Dies ist vor allem auf die tieferen Temperatur im Reaktor zurückzuführen, welche zeitweise auf unter 25°C sinkt und nicht mehr einem mesophilen Betrieb von 37°C entspricht. Nach Installation eines Heizmantels stiegen die Gasmenge und die Gasausbeute sofort an. Im Mittel liegt die Gasausbeute bei 317 Nl/kg OTS (HRT 10 d, SRT 25 d).

Die erwartete Gasausbeute aus den Vorversuchen (GB 21 von 137 Nl/kg OTS bei UF-Rtentat mit einer OTS von 2.6 % bzw. 235 Nl/kg OTS bei UF-Rtentat mit einer OTS von 4.2 %) konnte im MBR übertrroffen werden.

16.4 Vergärungsversuche mit Mischedünngülle 1:1 und Rohglycerin als Co-Substrat

Diese Versuchsreihe mit Mischedünngülle zeigt, dass dieses Grundsubstrat im Vergleich zu UF-Rtentat und Mischedünngülle, nicht nur dünnflüssiger ist, sondern auch weniger abbaubares Material enthält. Es wird daher angenommen, dass bereits beim gekühlten Zwischenlagern der Gülle bei 4°C leicht abbaubares Material zu Biogas umgesetzt wird.

Durch den Einsatz von Rohglycerin als Co-Substrat wird die Gasausbeute erheblich gesteigert. Bei einem Anteil von 5 bis 7 Vol.-% Rohglycerin bleibt der pH-Wert recht stabil und eine durchschnittliche Ausbeute von 700 Nl/kg OTS bei einer HRT von 16 d und einem Schlammalter von 25 d ist erreichbar.

Der Versuch mit 10 Vol.-% Rohglycerin zeigte nach wenigen Tagen eine Versäuerung des Fermenterinhalts. Durch das Einstellen der Rohglycerinzufuhr stabilisierte sich der pH-Wert nach 10 Tagen wieder bei 7.4,

Im Vergleich der verschiedenen Versuchsphasen wurde festgestellt, dass die Raumbelastung im Reaktor einen Einfluss auf die Gasausbeute hat. Mit höherer Raumbelastung nahm die Gasausbeute in der Regel ab, was aus konventionellen Anlagen bekannt ist [7].

16.5 Schwankungen der Zusammensetzung des Güttesubstrates

Die eingesetzte Gülle schwankt sehr stark in ihrer Zusammensetzung. Die minimal- und maximal-Werte, wie auch die Mittelwerte der Güttleanalysen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Mit jedem Wechsel der Gülle (Chargenwechsel) ändert sich auch die OTS. Diese hat einen direkten Einfluss auf die Gasausbeute und erschwert den direkten Vergleich zwischen den Vergärungsversuchen.

Um repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wäre es idealer, wenn die Zusammensetzung der Gülle auf die gesamte Versuchsdauer einheitlich wäre. So können starke OTS-Schwankungen in der Beschickung und dadurch entsprechende Auswirkungen auf die Resultate vermieden werden.

16.6 Temperaturschwankungen

Während der Versuchsphase mit der HRT 20 d SRT 25 d sank die Temperatur auf 25°C bis 30°C. Die tiefere Temperatur zeigt einen deutlichen Einfluss auf den Abbauprozess. Nachdem die Temperatur wieder auf 37°C eingestellt wurde, stiegen die Gasmenge und die spezifische Gasausbeute sofort an. Auch der Methananteil stieg von rund 65 % auf 68 %. Dies zeigt, dass die Temperatur einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Biogasproduktion hat.

17 Schlussfolgerung

Aus den Gasbildungsversuchen und dem Betrieb des MBR-Laborreaktors können folgende Hauptaussagen gemacht werden:

Grundsubstrat Dünngülle bzw. UF-Retentat

- Eine zeitliche Konstanz der Zusammensetzung der Mischedünngülle über die Versuchszeit konnte aus logistischen und technischen Gründen nicht gewährleistet werden. Die jahreszeitlichen und stallbetriebsabhängigen Schwankungen in der Rohgülle widerspiegeln die Verhältnisse in der Praxis.
- Der Wechsel des Grundsubstrats von Mischedünngülle auf UF-Retentat zeigte lediglich eine geringe Verbesserung dieses Problems.
- Mit UF-Retentat als Grundsubstrat konnte eine höhere Raumbelastung als mit Mischedünngülle gefahren werden,. Ebenfalls konnte damit eine Volumenreduktion um einen Faktor 5 bis 6 erzielt werden.
- Auch während der Lagerung von Mischedünngülle bei 4°C reduziert sich das Gaspotential merklich.

Die Herkunft, Qualität, Lagerung und zeitliche Konstanz des Grundsubstrats der Vergärung haben einen entscheidenden Einfluss auf die Versuche im Labormassstab.

Anlagenbetrieb und Biogasproduktion

- Temperaturschwankungen haben einen starken Einfluss auf den Vergärungsprozess bzw. die Biogasproduktion. Bei tiefen Temperaturen von ca. 25 bis 30°C wurde eine signifikant tiefere Gasproduktion beobachtet.
- Dem Durchtritt organischer Säuren durch die UF-Membran ins UF-Permeat ist bei kurzer HRT und hohen Substratkonzentrationen im Fermenter Beachtung zu schenken und in weiteren Versuchen genauer abzuklären.
- Das ermittelte Biogaspotential mittels GB 21-Versuchen liegt bei der eingesetzten Mischedünngülle mit ca. 320 Nl/kg OTS weit höher, als bei reiner Schweine- oder Rinderdünngülle (ca. 130 bzw. 220 Nl/kg OTS).
- Beim Reaktorbetrieb mit Mischedünngülle konnten bei einer HRT von 4 d und einer SRT ∞ hohe spezifische Gasausbeuten erzielt werden (400 Nl/kg OTS).
- Die Versuche mit einer SRT ∞ zeigten jedoch mit der Zeit eine abnehmende Gasproduktion, was vermutlich auf eine Hemmung durch nicht abgebauten Feststoffe zurückzuführen ist.
- Ein einigermassen gleichmässiger Reaktorbetrieb konnte bei einer HRT von 7 d und SRT von 60 d erreicht werden.
- Bei einer HRT unter 7 d konnte kein stabiler, effizienter Reaktorbetrieb aufrechterhalten werden. Der Reaktorbetrieb kam bei HRT von 2.5 d bei Mischedünngülle und 5 d bei UF-Retentat sowohl an seine biologischen, als auch mechanischen Grenzen.

Entscheidende Parameter für den Betrieb des MBR und für die Biogasproduktion sind die hydraulische Verweilzeit (HRT), die Schlammaufenthaltsdauer (SRT), und die Temperatur. Praktikable Betriebseinstellungen sowie mechanische und biologische Systemgrenzen konnten im Laborbetrieb ermittelt werden.

Co-Substrat Rohglycerin

- Beim Reaktorbetrieb (HRT 16 d, SRT 25 d) mit Mischdüngülle und einem Rohglycerin-Volumenanteil von ca. 7 % konnte die höchste spezifische Gasausbeute von fast 900 Nl/kg OTS gemessen werden (durchschnittlich ca. 700 Nl/kg OTS).
- Bei einem Rohglycerin-Volumenanteil von ca. 10 % fand eine Versauerung im Reaktor statt, die Biogasproduktion brach ein.

Eine stufenweise Zugabe des Rohglycerins zeigte bei 7 Vol.-% die höchste spezifische Gasausbeute. Bei einer weiteren Erhöhung von 7 auf 10 Vol.-% konnte kein stabiler Betrieb mehr erreicht werden.

18 Ausblick

Ergänzende und weiterführende Versuche für weitere Projekte im Labormassstab werden in den folgenden Punkten vorgeschlagen:

Methodische Fragestellungen

- Eine Erhöhung der Zuverlässigkeit von Erkenntnissen und Interpretationen aus den Versuchen im Labormassstab kann durch die Verkleinerung der Qualitätsschwankungen des Grundsubstrats (Gülle) erreicht werden.
- Die Erarbeitung einer Methode zur Quantifizierung der Biomasseaktivität, d.h. des Anteils der aktiven Biomasse ermöglicht Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit des Biogas-Reaktorsystems (MBR).

Untersuchungen des MBR-Systems im Labormassstab sind geeignet, um weitere Fragestellungen zu untersuchen und bieten noch Raum für methodische Weiterentwicklungen.

Vorbehandlungsmöglichkeiten der Güllefaktionen (Grundsubstrat)

- Auswirkungen einer vorgeschalteten Feststoffabtrennung aus der Güllefaktion auf den Betrieb des Membranbioreaktors sind im Labormassstab gut feststellbar. Eine optimale Vorbehandlung bzw. das ideale Grundsubstrat für die vorliegende Anlagentechnik kann mittels spezifischer Testreihen ermittelt werden.
- Durch Trocknung der separierten Güllefeststoffe und anschliessendem mechanischem Aufschluss (Zerkleinern und Mahlen) kann der Feststoff für eine Vergärung im MBR vorkonditioniert werden.
- Als alternative Vorkonditionierung zur Trocknung und Zerkleinerung kann eine Hydrolyse- oder Pasteurisierungsstufe (thermischer Aufschluss) dienen.
- Eine Kombination der oben genannten Vorbehandlungsmöglichkeiten ist denkbar.

Eine geeignete Vorbehandlung der Güllefaktionen (Separation) kann das optimale Grundsubstrat für den MBR bereitstellen.

Eine Konditionierung des separierten Feststoffs ermöglicht eine störungsfreie Vergärung im MBR.

Zugabe von Co-Substraten

- Ein höherer Rohglycerin-Anteil kann durch Konzentrationserhöhung in kleineren Schritten erreicht werden. Das Restgaspotential des UF-Retentats aus der Co-Vergärung mit Rohglycerin gibt Aufschluss über die Qualität des Abbaus.
- Versuche mit weiteren flüssigen Co-Substraten und Substraten zur Monovergärung (z.B. Molke oder Blut) erweitern die Kenntnis über mögliche Anwendungsgebiete und die Eignung des Reaktorsystems.

Versuche im Labormassstab zur Vergärung von Mono- und Co-Substraten geben weiteren Aufschluss über die Eignung, Grenzen und Anwendungsmöglichkeiten des MBR-Systems.

Abwasserbehandlung und Wasserrecycling

- Das MBR-Verfahren trägt zu einem massgeblichen Abbau u.a. von CSB und TOC bei. In der Industrie und im Gewerbe könnte das Verfahren bei entsprechender Eignung des Rohabwassers nicht nur eine wirtschaftlich interessante Lösung darstellen, sondern auch zum innerbetrieblichen Wasserrecycling beitragen.

Die Reduktion der Belastung im Abwasser kombiniert mit der Gewinnung erneuerbarer Energie durch das MBR-System ist für die Industrie und das Gewerbe eine interessante Perspektive.

Modifikation der Anlagentechnik bzw. Betriebsweise

- Eine Analyse und spezifische Anpassungen der Membrandurchlässigkeit z.B. durch die Zugabe von Adsorbentien birgt ein grosses Optimierungspotential und eröffnet allenfalls Möglichkeiten zur besseren Handhabung von problematischen Stoffen wie z.B. Ammonium, gelöster Kohlenstoff, Antibiotika, Medikamentenrückstände bzw. Spurenstoffe, Schwermetalle, Krankheitserreger etc.
- Durch die Modifikation der Filtrationstechnik (Scheibenmembranen anstatt Rohrmodulen) kann eine höhere Durchsatzleistung bei geringerem Energieeinsatz erzielt werden.
- Die Umstellung vom mesophilen auf einen thermophilen Betrieb eröffnet weitere Anwendungsgebiete des MBR-Systems.
- Eine 2-stufige Vergärung mit vorgeschalteter Hydrolyse kann die notwendige Vorbehandlung der Güllefaktionen vereinfachen.

Die Anlagentechnik und Betriebsweise des MBR hat Optimierungspotential. Weiterführende Untersuchungen im Labormassstab sind geeignet und bieten sich an.

Literaturverzeichnis

- [1] Beltrametti T. (2009): Untersuchungen zur anaeroben Behandlung von Gülle im Membranbioreaktor, Bachelorarbeit, IBT Institut für Biotechnologie, ZHAW Wädenswil, unveröffentlicht.
- [2] Amon T.; Kryvoruchko V.; Amon B.; Schreiner M. (2004): Untersuchungen zur Wirkung von Rohglycerin aus der Biodieselerzeugung als leistungssteigerndes Zusatzmittel zur Biogaserzeugung aus Silomais, Körnermais, Rapspresskuchen und Schweinegülle, Endbericht, Departement für Nachhaltige Agrarsysteme, Universität für Bodenkultur Wien.
- [3] Lossie U. und Pütz P. (2008): Gezielte Steuerung von Biogasanlagen mittels FOS/TAC, Praxisbericht HACH LANGE, Art. Nr. DOC042.72.20011.Mar08.
- [4] Schmutz S. (2010): Vergärung von Gülle in einem anaeroben Membranbioreaktor, Bachelorarbeit, IBT Institut für Biotechnologie, ZHAW Wädenswil, unveröffentlicht.
- [5] Linke B. (2005): Biogasgewinnung - Versuche für die Praxis, VDL-Journal 55 (6): 4-5.
- [6] 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.
- [7] 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.