



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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



MONOVERGÄRUNG VON GLYCERIN

VERGÄRUNG VON EINEM SUBSTRAT IN DOMINIERENDER MENGE

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Erb David, Genesys Biogas AG

Balierestrasse 29, 8500 Frauenfeld, erb@genesys.ch, www.genesys.ch

Büeler Elmar, Genesys Biogas AG

Balierestrasse 29, 8500 Frauenfeld, bueeler@genesys.ch, www.genesys.ch

Spicher Mathias, Genesys Biogas AG

Balierestrasse 29, 8500 Frauenfeld, spicher@genesys.ch, www.genesys.ch

Impressum

Datum: 28. Februar 2008

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Biomasse

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Bereichsleiter, bruno.guggisberg@bfe.admin.ch

Projektnummer: 152384

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage.....	2
1.1	Einleitung.....	2
1.2	Nährstoffbedarf eines anaeroben Prozesses	2
1.2.1	Stickstoff und Phosphor	2
1.2.2	Schwefel.....	3
1.2.3	Kalium	3
1.2.4	Spurenelemente.....	3
1.3	Bestehende Systeme und andere Projekte.....	3
2	Ziel der Arbeit	5
2.1	Grundidee und Motivation	5
2.2	Erwartete Ergebnisse	6
3	Phase 1 - Analysen und Versuchsplanung.....	7
3.1	Lösungsweg – Methode	7
3.1.1	Versuchsplanung	7
3.1.2	Datenerfassung	8
3.1.3	Aufbau der Pilotanlage (Rührkessel)	8
3.1.4	Substrat- und Endproduktanalysen.....	8
3.1.5	Nährstoffzugabe.....	8
3.2	Ergebnisse	8
3.2.1	Schema der Pilotanlage (Rührkessel).....	8
3.2.2	Analytikresultate der Ausgangssubstrate	8
3.2.3	Notwendiger Nährstoffbedarf (Lösungen)	8
3.3	Diskussion.....	8
4	Phase 2 - Durchführung der Pilotversuche	8
4.1	Lösungsweg – Methode	8
4.1.1	Betrieb der Pilotanlage	8
4.1.2	Fed-Batch-Versuche im Labormassstab.....	8
4.1.3	Ultrafiltration- und Umkehrosmoseversuch	8
4.2	Ergebnisse und Auswertung.....	8
4.2.1	Betrieb der Pilotanlage	8
4.2.2	Fed-Batch-Versuche im Labormassstab.....	8
4.2.3	Ultrafiltration und Umkehrosmoseversuch	8
4.3	Diskussion.....	8
5	Phase 3 - Umsetzung eines konkreten Bauprojekts.....	8
5.1	Lösungsweg – Methode	8
5.1.1	Definition der Rahmenbedingen zur Nährstoffberechnung.....	8
5.1.2	Berechnung der notwendigen Gülle- und Mineralstoffmengen (inkl. Kosten).....	8
5.1.3	Berechnung des Flächenbedarfs für die Ausbringung des Endproduktes.....	8
5.1.4	Berechnung der notwendigen Gülle- und Mineralstoffmengen beim Einsatz UF/UO.....	8
5.1.5	Beschrieb der Varianten und Auslegung der Anlage.....	8
5.2	Ergebnisse	8
5.2.1	Anlagenkomponenten und Funktion	8
5.2.2	Technische Anforderungen.....	8
5.2.3	Kosten Gülle-Zufuhr und -wegfuhr	8

5.2.4	Wirtschaftlichkeit	8
5.3	Diskussion.....	8
6	Schlussfolgerungen.....	8
7	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	8
8	Referenzen.....	8
9	Anhang	8

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht die Machbarkeit einer Monovergärung von Rohglycerin aus der Biodiesel-Produktion.

Ein Teil der Gärversuche wurde in einem einstufigen, kontinuierlichen System mit 700 l Nutzvolumen durchgeführt.

Der maximale Biogasertrag von Rohglycerin beträgt im kontinuierlichen Betrieb 1100 l/l Glycerin, bzw. 870 l/kg Glycerin. Der mittlere Methangehalt liegt bei 70 %. Die Adaptionsgeschwindigkeit der Biologie an das Substrat Rohglycerin ist hoch. Zwei bis drei Tage nach dem Start der Rohglycerinzugabe werden 100 %-ige Abbauraten erreicht.

Die einstufige, kontinuierliche Vergärung von Rohglycerin bei 40 °C läuft nur bei sehr geringer Raumbelastung ($0.65 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$) stabil und ist deswegen gegenwärtig nicht wirtschaftlich. Bei höheren Raumbelastungen ($1.5 \text{ bis } 3.0 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$) erliegt die adaptierte Biologie nach rund 20 Tagen an massiven Prozessstörungen. Ein zweistufiges System mit separater Hydrolyse-Stufe könnte vermutlich die stabile Vergärung ermöglichen, wie Recherchen zeigen.

Fed-Batch-Versuche im Labor der *Hochschule Wädenswil* (ZHAW) zeigten, dass Rohglycerin leicht besser abgebaut wird als Reinglycerin. Die Prozessstörungen entstehen aufgrund von Hemmungen der Zwischenprodukte, die aus dem Abbau von Glycerin entstehen. Bei höheren Konzentrationen von 1.2-Propandiol und 2.3-Butandiol wurden diese nicht vollständig abgebaut.

Weitere Hemmstoffe können nicht ausgeschlossen werden. Die Prozessstabilität scheiterte nicht am Mangel von Haupt- und Spurennährelementen.

Abstract

The present study investigated the feasibility of a mono fermentation of the glycerine-fraction from biodiesel production.

Part of the experiments took place in a single-stage, continuous system with 700 l usable volume.

The maximum yield of biogas of the glycerine-fraction is in continuous operation 1100 l/l of glycerine, or 870 l/kg of glycerine. The average methane content is 70 %. The adaptation rate of the biomass at the substrate of glycerine-fraction is high. Two or three days after starting the feed 100 % degradation rates will be achieved.

The single-stage, continuous fermentation of the glycerine-fraction at 40 °C runs only stable at very low organic loading rate ($0.65 \text{ kg oDM}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$) and is therefore not currently economically. At higher organic loading rates ($1.5 \text{ to } 3.0 \text{ kg oDM}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$) the adapted biomass collapsed after about 20 days due to massive instability of the process. A two-stage system with separate hydrolysis stage could probably allow a stable fermentation as research of literature has shown.

Fed-batch experiments in the laboratory of the *University of Wädenswil* (ZHAW) demonstrated that the glycerine-fraction from biodiesel production is slightly better degradable than pure glycerine. The process dysfunctions arise because of the inhibition of intermediates resulting from the degradation of glycerine. At higher concentrations of 1.2-propanediol and 2.3-butanediol the degradation was incomplete.

Further inhibitors can not be excluded. The failed stability of the process is not due to the lack of main nutrients or trace elements.

1 Ausgangslage

1.1 Einleitung

Biogas entsteht bei der Vergärung von organischem Material. Ausgangssubstrate für die Biogasproduktion sind mannigfaltig. Diese können neben Rohglycerin auch agroindustrielle Reststoffe, Speisereste, Hofdünger (Gülle, Mist) oder gezielt angebaute Energiepflanzen, auch NaWaRo (Nachwachsende Rohstoffe) genannt, sein.

Der erneuerbare Energieträger Biogas wird heute vor allem als Brennstoff für Blockheizkraftwerke zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt. Grosse Fortschritte wurden in den letzten Jahren auch im Bereich der Aufbereitung zu Erdgasqualität mit anschliessender Einspeisung ins Gasnetz gemacht. So kann dieser erneuerbare Energieträger sogar in speziellen Gasfahrzeugen als Treibstoff genutzt werden.

Die Vergärung von organischen Reststoffen in Biogasanlagen nach dem Prinzip der Co-Vergärung wird vielfach in der Schweiz und Deutschland praktiziert und funktioniert gut und stabil.

Immer grösser ist die Nachfrage nach Biogasanlagen, die in der Lage sind, einzelne Substrate in grossen Mengen zu vergären, bis hin zur Monovergärung. Diese Systeme haben einige wichtige Vorteile, aber auch den Nachteil, dass sie die stabile und puffernde Eigenschaft von landwirtschaftlichen Co-Vergärungsanlagen verlieren.

Der wichtige Vorteil der Monovergärung ist, dass dieser Prozess an das Substrat optimal angepasst und somit hoch effizient betrieben werden kann. Dadurch ergeben sich sehr kompakte und hoch wirtschaftliche Systeme. Durch eine optimale Substratvorbereitung wird das Substrat viel schneller im Fermenter umgesetzt. Dadurch ergeben sich allenfalls sogar Systeme mit der Möglichkeit, die Anlagen so zu betreiben, dass der Gas- und dadurch der Stromertrag dann anfällt, wenn er gebraucht wird. Das ganze System könnte so eventuell innert Stunden zur Spitzenstromproduktion hochgefahren werden.

Weltweit findet ein Boom beim Bau von Biodiesel-Anlagen statt. Diese produzieren als Nebenprodukt Rohglycerin, für welches die Entsorgungsvarianten sehr beschränkt sind. Dafür bietet Biogas eine ideale Lösung.

Mit Hilfe dieser Studie soll geklärt werden, ob und bei welchen Bedingungen die Monovergärung von Rohglycerin in einem kontinuierlichen, einstufigen System möglich ist.

1.2 Nährstoffbedarf eines anaeroben Prozesses

Wegen der geringen Wachstumsgeschwindigkeit der anaeroben Bakterien ist der Bedarf an Nährstoffen und Spurenelementen relativ gering. Der Nährstoffbedarf ist artspezifisch und hängt von der Menge der Biomasse ab, die pro Masseinheit an abgebautem CSB neu gebildet wird. Er ist somit von der täglichen Beschickung des Rohglycerins bzw. von der CSB-Beschickung abhängig. Stickstoff und Phosphor sind für die Bildung von neuen Organismen essentiell. Der N- und P-Bedarf der verschiedenen Bakterien richtet sich nach den Ertragskoeffizienten der Bakterien und dem Schlammalter im System. Bei hohem Schlammalter ist der Nettobedarf aufgrund des verhältnismässig intensiveren Absterbens der Bakterien geringer [5].

1.2.1 Stickstoff und Phosphor

Das N:P-Verhältnis im Fermenter sollte etwa 5:1 betragen. Dementsprechend beträgt der Stickstoffbedarf 6 kg N/t CSB und der Phosphorbedarf 1.2 kg P/t CSB. Bei Fettsäuren und Proteinen liegt bei einem CSB:N:P-Verhältnis von etwa 800:5:1 ein ausgewogenes Nährstoffverhältnis vor [5].

1.2.2 Schwefel

Schwefel ist für den Abbau der Bakterienzellen ebenfalls ein essentieller Mineralstoff. Der Schwefelgehalt soll dem Phosphorbedarf entsprechen, so dass sich ein Nährstoffbedarf von CSB:N:P:S von 800:5:1:1 ergibt.

Da der Schwefel von den Methanbakterien nur in reduzierter Form aufgenommen werden kann, ergibt sich eine optimale H_2S -Konzentration von ca. 10 mg/l gelöstem H_2S [5].

1.2.3 Kalium

Kalium ist der einzige Nährstoff, welcher im Rohglycerin in relativ hohen Konzentrationen vorhanden ist. Durch die Zugabe von grossen Rohglycerinmengen wird die Kaliumkonzentration bzw. der Salzgehalt im Fermenter zu hoch (max. 3 kg/t FS) und die Bakterien werden gehemmt. Deshalb ist es notwendig, dass das Rohglycerin mit Wasser oder Hofdüngern verdünnt wird. Damit die Kaliumkonzentration im Fermenter nicht ansteigt wird das Rohglycerin im Verhältnis 1:10 mit Wasser verdünnt. Weitere, laufende Versuche sollen zeigen, ob die Biomasse auch bei höheren Kaliumkonzentrationen "arbeiten" kann. Dadurch könnte die Verdünnung herabgesetzt und Wasser eingespart werden.

Kalium ist für den Mensch ein essentieller Mineralstoff, wobei der tägliche Bedarf bei ungefähr 2 g liegt. Kaliumreiche Lebensmittel sind u.a. Pilze, Bananen, Bohnen, Käse, Spinat und Kartoffeln, in denen es mit bis zu 5 g Kalium/100 g Lebensmittel vorkommt.

Wasserlösliche Kaliumsalze werden überwiegend als **Düngemittel** verwendet, da Pflanzen die im Boden vorkommenden Kaliumsilicate schlecht aufschliessen können.

Kalium erhöht die Wasseraufnahme der Pflanzenzellen und ist Gegenspieler von Calcium. Beide Nährelemente müssen also in einem richtigen Verhältnis zueinander in der Pflanze und im Boden vorhanden sein.

In der **Industrie** wird Kalium hauptsächlich in schnellen Brütern in Form einer Na-K-Legierung als Kühlfähigkeit eingesetzt. Ansonsten hat metallisches Kalium nur geringe technische Bedeutung, da es durch das billigere Natrium ersetzt werden kann. Ein Brutreaktor ist ein Kernreaktor, der nicht nur zur Energiegewinnung, sondern gleichzeitig zur Erzeugung von weiterem spaltbarem Material dient.

Im **Forschungslabor** wird Kalium gelegentlich zur Trocknung von Lösungsmitteln eingesetzt, besonders, wenn der Siedepunkt des Lösungsmittels über dem Schmelzpunkt des Kaliums, aber unter dem Schmelzpunkt von Natrium liegt. Dann liegt das Kalium im siedenden Lösungsmittel geschmolzen vor und seine Oberfläche verkrustet nicht. Man benötigt somit deutlich weniger Alkalimetall und es kann fast völlig beim Trocknungsprozess verbraucht werden, so dass nur sehr kleine Reste entsorgt werden müssen [Wikipedia, 2007].

1.2.4 Spurenelemente

Als essentielle Spurenelemente für Methan bildende Bakterien sind Nickel, Kobalt, Molybdän, Eisen, Selen und Wolfram nachgewiesen worden. Grundsätzlich sind diese Spurenelemente nur in gelöster und nicht in komplexierter Form biologisch verfügbar. Die Spurenelemente können in einer angefertigten Mischung bezogen und zugegeben werden.

1.3 Bestehende Systeme und andere Projekte

Ein Schweizer Vorhaben, das ähnliche Ziele verfolgt, gibt es zurzeit nicht. Es wurden in der Vergangenheit Versuche mit UASB-Fermentern zur Vergärung von Molke und Enteisungsmittel (Alkohol-Derivat) durchgeführt. Diese Untersuchungen gehören aber mehr in die Abwassertechnik, wo geringe organische Konzentrationen und ein grosser Volumenstrom vorhanden sind. Hemmungen treten in diesen Systemen kaum auf, aber auch da sind Limitationen ein wichtiges Thema. Untersuchungen mit Substraten wie sie in dieser Studie vorgesehen sind, wurden nach Wissen der *Genesys Biogas AG* und Literatur- und Internetrecherche noch nicht durchgeführt.

In Wien wurden Versuche durchgeführt, die die Möglichkeiten der Co-Vergärung von Rohglycerin zur Gassteigerung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen abklärte. Diese helfen aber für die Monovergärung kaum weiter, da bereits seit zwei Jahren in Luzern und mittlerweile auf vier verschiedenen Genesys-Biogasanlagen Rohglycerin erfolgreich als Co-Substrat eingesetzt wird. Bis rund 5 Gew.-% Zugabe von Rohglycerin in einen Biogasprozess sind kaum Probleme zu erwarten. Diese Studie/Versuche sollen Probleme aufzeigen, die jenseits dieser 5 % liegen.

Ein kritischer Punkt welcher bei der Monovergärung bzw. bei der Vergärung allgemein auftaucht ist, dass durch eine Biologie immer Energie durch die Atmung verloren geht. Es ist also zu erwarten, dass andere Rohglycerin-Nutzungs-Systeme in Zukunft wirtschaftlicher betrieben werden könnten. Der Vorteil der Vergärung liegt eindeutig darin, dass diese wirtschaftlich ist und eine solche Biogasanlage kostengünstig auch andere organische Abfälle verwerten kann. Biogas ist zudem ein vielseitig einsetzbarer Energieträger aus welchem Strom, Wärme, Ethanol aber auch Treibstoff für Fahrzeuge erzeugt werden kann. Die nachfolgende Aufstellung in Tabelle 1 soll helfen die Gedanken zu den einzelnen Systemen zu bündeln.

Tabelle 1: Systemvergleich zwischen Vergärung, Direktverstromung, Verbrennung und Pyrolyisierung

	Bemerkung	Bewertung
Vergärung zu Biogas		Total: 12x
1. Kosten	Substratlager, Fermenter, BHKW	☺☺
2. Betrieb und Unterhalt	Biologie und BHKW, keine Vorbehandlung des Glycerins	☺☺☺
3. Endprodukt	Nährstoffreiche(r) Gärgülle/Dünger, Biogas	☺☺☺
4. Rampenbetrieb für Spitzen	Ist voraussichtlich möglich, grosse Einsatzbreite	☺☺
5. Einsatzbereit	Ja, Pilotversuch am laufen	☺☺
Direktverstromung in einer Turbine		Total: 9x
1. Kosten	Turbine, Lagertanks	☺☺
2. Betrieb und Unterhalt	Technischer Unterhalt und Wartung der Turbine, Glycerin-vorbehandlung ist voraussichtlich sehr aufwändig	☺
3. Endprodukt	Strom und Wärme	☺☺
4. Rampenbetrieb für Spitzen	Gut möglich	☺☺☺
5. Einsatzbereit	Ev. in 4-5 Jahren	☺
Verbrennung zur Wärmenutzung		Total: 11x
1. Kosten	Brennkessel	☺☺☺
2. Betrieb und Unterhalt	Technischer Unterhalt und Wartung	☺☺
3. Endprodukt	Wärme	☺
4. Rampenbetrieb für Spitzen	Gut möglich	☺☺☺
5. Einsatzbereit	Ev. in 2-3 Jahren	☺☺
Pyrolyisierung zu Pyrolysegas		Total: 8x
1. Kosten	Pyrolyse Fermenter anstelle normalem Fermenter	☺☺
2. Betrieb und Unterhalt	Technischer Unterhalt und Wartung der Turbine, Glycerin-vorbehandlung ist voraussichtlich sehr aufwändig	☺
3. Endprodukt	Wenig Asche, Strom und Wärme	☺☺
4. Rampenbetrieb für Spitzen	Eher gut möglich	☺☺
5. Einsatzbereit	Ev. in 8-10 Jahren	☺

2 Ziel der Arbeit

2.1 Grundidee und Motivation

Die gesamte Arbeit wird in drei Phasen eingeteilt. In der ersten Phase werden alle relevanten Parameter des Versuchssubstrates Rohglycerin mittels Laboranalytik untersucht. Anschliessend werden anhand dieser Analysenresultate die möglichen Prozessprobleme mit Spezialisten diskutiert und in der Literatur recherchiert. Aufgrund dieser Informationen wird der ganze Versuchsablauf definiert und der Pilotfermenter mit einem Gesamtvolumen von 900 Liter aufgebaut und entsprechend ausgerüstet.

Während der 2. Phase werden die Gärversuche so gefahren, dass möglichst aussagekräftige Resultate entstehen. Diese werden ausgewertet und fliessen in die weitere Versuchsführung und in die Phase 3 mit ein.

In Phase 3 werden die Erkenntnisse der Phase 1 und 2 zur Auslegung eines konkreten Projektes verwendet. Von verschiedenen Varianten wird die Wirtschaftlichkeit berechnet und falls realistisch und sinnvoll soll das Projekt umgesetzt werden.

Unter "Monovergärung" wird die Vergärung von ausschliesslich einem Substrat, oder zumindest in stark dominierender Menge, verstanden. Dabei wird dem Grundsubstrat (z.B. Gülle) fortlaufend eine maximale Menge eines Co-Substrats zugegeben, ohne dass der biologische Prozess zum Erliegen kommt. Im Extremfall wird sogar das Grundsubstrat weggelassen. Die Verwertung der organischen Substrate, insbesondere Rohglycerin, in der Vergärung, bringt gegenüber der Verbrennung und der Kompostierung folgende Vorteile:

- Durch die Möglichkeit der Monovergärung können die anfallenden Substrate vor Ort vergärt werden und müssen nicht auf mehrere Anlagen verteilt werden. Dadurch können Fahrten eingespart werden.
- Durch Monovergärung können Anlagen kleiner und effizienter gebaut und betrieben werden, da energiereiche Substrate nicht mit Substraten mit geringer Biogasausbeute vermischt werden.
- In der Vergärung kann, gegenüber der Verbrennung, die Energie effizienter genutzt werden, da kein Wasser verdunstet werden muss. Das Endprodukt ist dann auch ein Flüssigdünger und nicht Asche.
- Die Aufreinigung von Rohglycerin zur anschliessenden Verwertung in der Kosmetik ist aufwendig und teuer. Zudem ist der Bedarf der Industrie heute schon gedeckt.
- Die meisten Substrate, welche für die Vergärung sehr gut geeignet sind, können aus geruchlichen und prozesstechnischen Gründen nicht in einer Kompostierung verwertet werden.

2.2 Erwartete Ergebnisse

Dank den Erkenntnissen aus dieser Studie respektive diesen hier beschriebenen Versuchen, wird es der Genesys Biogas AG möglich sein, Biogasanlagen in Zukunft auch vom Substrat her am Limit zu betreiben. Diese Studie wird Hinweise liefern, inwiefern dass Monosubstratanlagen überhaupt realistisch sind und wie sie betrieben und gebaut werden müssen.

Ziel ist die Realisierung eines konkreten Biogasprojektes (ev. sogar mit Spitzenstromproduktion), sofern dies aufgrund der Resultate auch möglich und sinnvoll erscheint.

Am Ende dieser Pilotversuche sollen folgende Fragen geklärt sein:

- Maximaler Gasertrag von Rohglycerin
- Adaptionsgeschwindigkeit der Biologie an das Substrat Rohglycerin.
- Praxisgasertrag und -gaszusammensetzung von Rohglycerin.
- Maximal mögliche Raumbelastung bei mesophilen Betriebsbedingungen.
- Technische Massnahmen zur Erhöhung der maximalen Raumbelastung.
- Hemmungen und Limitationen des Prozesses aufdecken und Lösungen suchen.
- Wie rasch reagiert die Biologie auf Futtermengenveränderungen.

Die in dieser Studie gesammelten Erkenntnisse werden einen grossen Nutzen bringen in der Auslegung von Biogasanlagen mit Spezialsubstraten. Eventuell werden nachfolgend auf der gleichen Pilotanlage weitere Versuch mit Speise-, Schlacht- oder Gemüseabfällen gefahren.

3 Phase 1 - Analysen und Versuchsplanung

3.1 Lösungsweg – Methode

3.1.1 Versuchsplanung

Beim durchgeführten Versuch soll Rohglycerin mittels einer Monovergärung verwertet werden. Dabei soll der Prozess auf unbestimmte Zeit stabil gefahren werden können.

Bei der Planung des Versuchs werden deshalb die aus der Literatur und Erfahrung stammenden Erkenntnisse eingesetzt, damit möglichst schnell Resultate vorliegen.

Bei der Wahl der verschiedenen Rahmenbedingungen und Komponenten wurden folgende Überlegungen gemacht.

- In der Schweiz existieren bereits Biodieselanlagen, welche hauptsächlich Altfrittieröl verwerten und bei welchen als Abprodukt Rohglycerin anfällt. Das Rohglycerin für diesen Versuch kann deshalb leicht von einer solchen Anlage bezogen werden.
- Der Pilotfermenter war bereits im Besitz der *Genesys Biogas AG*, stammt aus einem Käsereibetrieb und wurde bereits für Biogasversuche verwendet. Der Pilotfermenter soll bei einer Biogasanlage situiert werden, damit die Abwärme eines BHKWs für diese Versuche genutzt werden kann.
- Als Standort erwies sich die Biogasanlage Burgdorfer in Frauenfeld aus den 90er Jahren als geeignet. Diese ist nahe dem Sitz der *Genesys Biogas AG* und der Standort ermöglicht so eine einfache Überwachung und Betrieb der Anlage.
- Die notwendigen Nährstoffe werden bei diesem Pilotversuch idealerweise in Form einer Nährstofflösung zugegeben.

3.1.1.1 Anfahren und Animpfung des Fermenters

Zum **Anfahren des Fermenters** stehen in erster Linie zwei Varianten zur Diskussion.

- Der Fermenter kann mit einem Schlamm aus einer industriellen Zuckervergärung angefahren werden. Dies macht Sinn, da auch das Rohglycerin ein Kohlenwasserstoff ist. Der Nachteil: der Schlamm hat kaum puffernde Eigenschaften.
- Der Fermenter könnte mit Biogasgülle (Dünngülle) angefahren werden. Dies ist realitätsnaher und hat den Vorteil, dass in einer ersten Phase kaum Limitationen auftreten. Diese Variante wird für die folgenden Versuchen gewählt.

Die Beschickung soll nur langsam gesteigert werden, damit sich die Biologie an das Substrat Rohglycerin adaptieren kann.

3.1.1.2 Stabiler Betrieb

Bei einer Raumbelastung zwischen 3.0 und 3.5 kg oTS/(d·m³) sollen über eine bestimmte Zeit ein stabiler Prozess und Biogasproduktion erreicht werden. Der stabile Prozess dient dann als Ausgangslage für die weiteren Untersuchungen und Veränderungen.

3.1.1.3 Bestimmung von Grenzen

Liegt ein stabiler Prozess vor, soll die Verdünnung des Rohglycerins gesenkt und somit der Salzgehalt im Fermenter erhöht werden. Die Erhöhung des Salzgehalts (vor allem Kalium) soll so bis zu einem instabilen Prozess vorangetrieben werden. Dadurch lässt sich der maximale Salzgehalt evaluieren.

Ein weiterer Versuch soll die Möglichkeit zur Spitzenstromproduktion untersuchen. Dabei soll die Rohglycerinmenge kurzfristig gesteigert und beobachtet werden, wie schnell die Biologie reagiert.

3.1.2 Datenerfassung

Damit die Stabilität eines Prozesses kontrolliert werden kann, müssen einige Parameter, wie zum Beispiel Temperatur, Beschickungs- und Biogasmenge, täglich kontrolliert und aufgeschrieben werden. Einen gut laufenden Prozess erkennt man an hohen Gaserträgen mit geringen täglichen Schwankungen.

Nebst den genannten Parameter und der Analytik werden zur Prozesskontrolle zudem noch Gasuntersuchungen durchgeführt. Dabei wird Methan, Schwefelwasserstoff und Sauerstoffgehalt gemessen und in einem Journal erfasst.

3.1.3 Aufbau der Pilotanlage (Rührkessel)

Damit ein störungsfreier Betrieb möglich ist, muss der Pilotfermenter wie folgt ausgerüstet werden und folgende Eigenschaften aufweisen:

- Heizungsinstallationen für einen mesophilen Betrieb (ca. 42°C), Temperaturmessung und deren Regelung
- Rührwerk zur Durchmischung des Inhalts (inkl. Intervallregelung)
- Probe- und Endproduktentnahme (Überlauf, Probenahmeventil)
- Dichtigkeit (Luft und Flüssigkeit)
- Rohglycerindosiereinheit (Pumpe, Lagergefäss, Schläuche etc.) inkl. Beschickungsstutzen
- Gasmengennmessgerät inkl. Gasentnahme mit Kondensierung

Der Pilotfermenter hat ein Nutzvolumen von 700 L und wird idealerweise in erster Line über die Abwärme des BHKWs der am Standort bestehenden Biogasanlage geheizt. Bei einem Ausfall dieses BHKWs muss die Heizung anderweitig garantiert werden. Dazu eignet sich ein Tauchsieder oder ein Durchlauferhitzer. Bei diesem Versuch wird ein Tauchsieder eingesetzt.

3.1.4 Substrat- und Endproduktanalysen

In Zusammenarbeit mit einem professionellen Labor wird wie bei grossen Biogasanlagen eine umfangreiche und regelmässige Analytik durchgeführt, um den Prozess zu kontrollieren. Untersucht werden einmalig die Ausgangsprodukte (Rohglycerin, Dünngülle) und wöchentlich das Endprodukt (Gärgut). Dabei werden die zur Prozesskontrolle und auch zur Auslegung notwendigen Analysen durchgeführt und die folgenden Parameter gemessen.

- TS- und oTS-Gehalt (Aschegehalt / Glühverlust / Glührückstand)
- Leitfähigkeit (Salzgehalt)
- pH Wert
- Nährstoffe N / P / K (mindestens jede 2. Woche)
- Fettsäuren
- CSB (beim Rohglycerin und falls notwendig)

Schadstoffe werden nicht gemessen, da diese schon anderweitig durchgeführt wurden und keine nennenswerte Ergebnisse zeigte.

3.1.5 Nährstoffzugabe

Aus der Literatur und der Rohglycerinanalyse kann der notwendige Nährstoffbedarf der Rohglycerinmonovergärung berechnet werden.

Um den Nährstoffbedarf an Stickstoff, Phosphor und Schwefel zu decken, kann gemäss Literatur davon ausgegangen werden, dass 6 kg N/t CSB, 1.2 kg P/t CSB und ebenfalls 1.2 kg S/t CSB benötigt werden. Auf

die Rohglycerinbeschickung umgerechnet macht dies somit ca. 12 g N/kg Rohglycerin sowie 2.5 g P und S/kg Rohglycerin.

Schwefel kann in Form von Sulfat (z.B. Ammonsulfat) zugegeben werden. Es gibt auch Möglichkeiten dieses in Form von Cystein (schwefelhaltige Aminosäure) beizufügen. Diese wird jedoch nur in Laborversuchen praktiziert und ist für einen Pilotversuch zu teuer. Theoretisch können auch Sulfide zugegeben werden. [2]

Phosphor wird idealerweise als Salz (Phosphatsalz) zugegeben. [2]

Stickstoff kann in Form einer Harnstofflösung zugegeben werden. [2]

Für die Zugabe der Nährstoffe wurden folgende beiden Stoffe in der **Tabelle 2** gewählt. Zur Herstellung der Lösungen wurden 200 g in einem Liter Wasser angemischt (200 g/L).

Tabelle 2: N/P/S-Gehalte der Chemikalien

	Nährstoffgehalt [Gew-%]		
	Stickstoff	Phosphor	Schwefel
$(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$	12	26	0
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	21	0	24
Harnstoff	46.6	0	0

Dementsprechend befinden sich in einem Liter Phosphat-Lösung 52 g Phosphor und 24 g Stickstoff sowie in der Sulfat-Lösung 48 g Schwefel und 42 g Stickstoff. In einem Liter Harnstofflösung sind es 93.2 g Stickstoff.

Spurenelemente: Zur Zugabe der Spurenelemente steht eine Lösung der Firma *Schmack AG* zur Verfügung. In dieser Lösung sind die notwendigen Spurenelemente in ausgewogenem Verhältnis vorhanden.

3.2 Ergebnisse

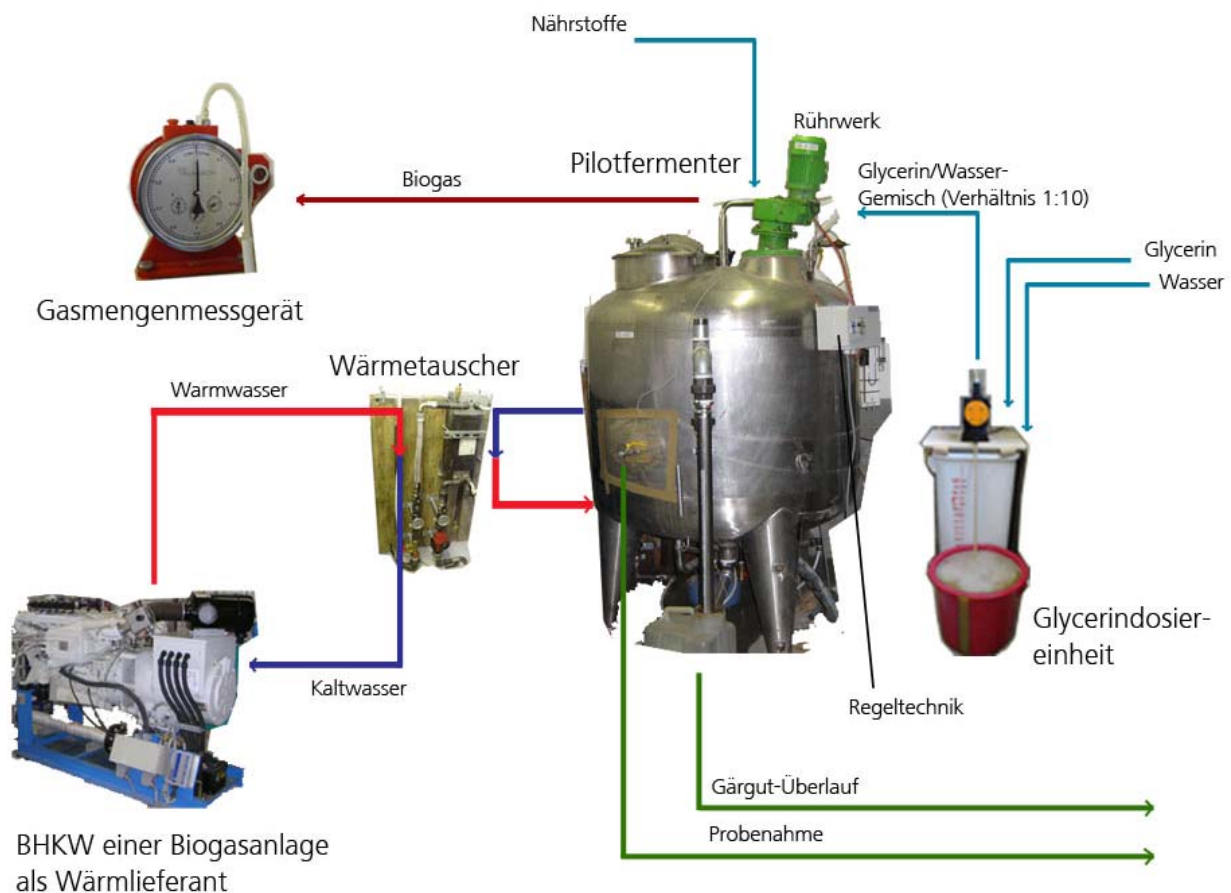
3.2.1 Schema der Pilotanlage (Rührkessel)

Der Pilotfermenter hat ein Nutzvolumen von 700 L. Das Rohglycerin wird zuerst in einem Eimer mit Wasser im Verhältnis 1:10 angemischt und kann über eine Pumpe dem Fermenter kontinuierlich zudosiert werden. Eine weitere Armatur, ebenfalls am Deckel, ermöglicht die Zugabe von Nährstoffen und Spurenelementen.

Der Fermenter wird mit einem Rührwerk, dessen Intervall über eine Steuerung eingestellt werden kann durchmischt. Ebenfalls wird der Heizkreislauf über diese Regeleinheit, welche mit einem Temperatursensor ausgerüstet ist, gesteuert. Dabei wird Warmwasser (80°C) vom BHKW der Biogasanlage zu einem Wärmetauscher geführt. Der Pilotfermenter selber ist mit einem Doppelmantel ausgestattet, durch welchen, mittels einer Pumpe, Wasser über den Wärmetauscher im Kreis geführt wird. Dabei erwärmt sich das Wasser beim Wärmetauscher und der Fermenter wird geheizt. Im Notfall, wenn das BHKW nicht läuft, schaltet ein Tauchsieder ein, damit die Temperatur konstant gehalten werden kann.

Das produzierte Biogas verlässt den Fermenter über eine Leitung und gelangt zum Gasmessgerät. Dieses erfasst die täglich produzierte Menge Biogas.

Über ein Probenahmeventil kann die wöchentliche Probe gezogen werden. Der Überlauf soll den Füllstand immer auf dem gleichen Niveau halten.



Figur 1: Schema des Pilotfermenters mit Stofffluss

3.2.2 Analytikresultate der Ausgangsubstrate

Rohglycerin: Eine Analyse des Rohglycerins hat folgende Resultate ergeben. Aus der Analyse wird ersichtlich, dass Rohglycerin kaum Stickstoff und Phosphor, jedoch einen hohen Kaliumgehalt aufweist. Rohglycerin hat eine CSB-Konzentration von 2'000 kg/t FS (Analysewert).

Probennummer: 406-0921/1

Rohglycerin, 3.10.06

Elektrische Leitfähigkeit (25 °C)	576 µS/cm	EN 27888
pH-Wert	9.8	DIN 38404-C 5
Trockenrückstand (105 °C)	97.2 %	SAV M 118
Glührückstand (550 °C)	6.4 % TS	DIN 38409-H 1
Glühverlust (550 °C)	93.6 % TS	DIN 38409-H 1
Wasser (Karl Fischer)	2.8 %	SAV M 293
Calcium Ca	230 mg/kg	ISO 11885
Magnesium Mg	50 mg/kg	ISO 11885
Kalium K	33000 mg/kg	ISO 11885
Natrium Na	510 mg/kg	ISO 11885
Stickstoff (nach Kjeldahl)	270 mg/kg	EN 25663
Phosphor	27 mg/kg	ISO 11885
Schwefel	46 mg/kg	ISO 11885
Fingerprint	*	SAV M 245
Methanol	120 g/l	SAV M 267
Verseifungszahl (VZ)	48 mg KOH/g	SLMB

Probennummer: 407-0011/1

Piloformenter Nullprobe, 9..1.07

Elektrische Leitfähigkeit (25 °C)	29000 µS/cm	EN 27888
pH-Wert	8.2	DIN 38404-C 5
Trockensubstanz (105 °C)	6.89 %	SAV M 118
Organische Substanz (GV 500 °C)	59.0 % TS	DIN 38409-H 1
Kalium K	5100 mg/kg	SAV M 110
Ammonium NH ₄ -N	3870 mg/kg	SAV M 287
Phosphat PO ₄ -P	510 mg/kg	EN 1189
Gesamtschwefel S	600 mg/kg	EN 1189
Essigsäure	1100 mg/kg	SAV M 242
Propionsäure	90 mg/kg	SAV M 242
Isobuttersäure	15 mg/kg	SAV M 242
Buttersäure	92 mg/kg	SAV M 242
Isovaleriansäure	30 mg/kg	SAV M 242
Valeriansäure	8 mg/kg	SAV M 242
Summe org. Säuren als Buttersäure	1900 mg/kg	berechnet

Figur 2: Resultate der Rohglycerinanalytik

Figur 3: Resultate der Gülleanalytik (Versuch 1)

Dünngülle (Nullprobe): Der Versuch wird mit Dünngülle (fällt bei der Separation von Gärgut an) einer bestehenden Biogasanlage gestartet. In **Figur 3** sind die Analytikresultat der Dünngülle ersichtlich. Durch die Dünngülle werden dem Prozess die Biologie und zu Beginn auch Nährstoffe zur Verfügung gestellt.

3.2.3 Notwendiger Nährstoffbedarf (Lösungen)

Der Phosphor wird in Form einer Lösung von Ammonium-Dihydrogenphosphat (NH₄)H₂PO₄ und der Schwefel in Form einer Ammonium-Sulfat-Lösung (NH₄)₂SO₄ zugegeben. Der Stickstoff ist in den beiden Lösungen vorhanden und kann zusätzlich auch in Form einer Harnstofflösung zugegeben werden. Je nach Menge der Rohglycerinbeschickung wird der Nährstoffbedarf beeinflusst.

Pro Liter Rohglycerin müssen somit, gemäss Nährstoffbedarf [5],

- 48 mL Ammonium-Hydrogenphosphat-Lösung (200 g/L) und
- 51 mL Ammonium-Sulfat-Lösung (200 g/L)

zugegeben werden, um den Nährstoffbedarf zu decken. Dabei wird davon ausgegangen dass nebst dem Rohglycerin keine weitere Zugabe von Nährstoffen (via Gülle) erfolgt.

Spurenelemente: Bei der Zugabe der Spurenelementlösung wird darauf geachtet, dass die Spurenelemente dem Prozess in ausreichender Menge zur Verfügung stehen.

3.3 Diskussion

Der gewählte Aufbau des Pilotfermenters ist für die vorgesehene Vergärung und Biogasproduktion geeignet. Durch die eingeplanten Komponenten kann der Prozess kontrolliert, die Beschickung mit Rohglycerin eingestellt, die Temperatur konstant und die Gasproduktion gemessen werden. Der Aufbau bietet weitere Möglichkeiten zur Optimierung des Prozesses und der Komponenten. Wie die Phase 2 zeigen wird, waren für einen störungsfreien Betrieb noch Verbesserungen notwendig. So wird der Tauchsieder erst nachträglich eingebaut. Ebenfalls können Probleme mit dem Überlauf festgestellt werden, weshalb auch diesbezüglich im Verlaufe des Versuchs noch Änderungen vorgenommen werden. Die Pumpenleistung nimmt aufgrund des "schmierigen" Substrats (Rohglycerin-Wasser-Gemisch) während der Versuche ab, wodurch die Beschickung nicht immer genau eingestellt werden kann. Dies wurde während der Versuche erkannt und in der Folge wurde die Pumpe regelmässig mit Wasser gespült.

Durch die tägliche Datenerfassung und die wöchentliche Analytik kann die Stabilität des Prozesses kontrolliert und beurteilt werden. Dadurch können bei einem Fehlschlag Rückschlüsse auf die Ursachen gemacht werden.

Angesicht der durchgeführten Versuchsplanung und Recherchen sollte es somit möglich sein, wissenschaftliche Versuche durchzuführen, welche eine qualitative und quantitative Aussage ermöglichen. Mit Hilfe der Versuchsergebnisse sollte somit auch abgeschätzt werden können, ob die Monovergärung von Rohglycerin auch in der Praxis realisierbar bzw. realistisch ist.

4 Phase 2 - Durchführung der Pilotversuche

4.1 Lösungsweg – Methode

4.1.1 Betrieb der Pilotanlage

Da Rohglycerin kaum Nährstoffe (hauptsächlich Kalium) enthält, werden der Biologie im Fermenter durch die tägliche Beschickung nicht genügend Stickstoff, Phosphor und Schwefel zur Verfügung gestellt. Es ist deshalb notwendig diese Nährstoffe zusätzlich beizufügen. Ebenfalls müssen genügend Spurenelemente vorhanden sein.

Die Biologie kann auch durch Scherkräfte, bedingt durch den Rührprozess, beeinträchtigt werden. Eine gute aber auch eine schonende Durchmischung ist deshalb anzustreben. Dies kann von besonderer Bedeutung sein, da im Fermenter auf das Substrat spezialisierte Bakterienkulturen vorliegen, welche gegebenenfalls sensitiv auf Scherkräfte reagieren.

4.1.1.1 Prozessüberwachung

Damit eine Auswertung der Versuche möglich ist, werden täglich folgende Parameter in einem Journal erfasst:

	Bemerkung
• Datum und Uhrzeit des Journaleintrags	
• Temperatur	pt100-Sonde
• Beschickung seit dem letzten Protokolleintrag (seit dem vorherigen Tag)	
• Pumpeneinstellungen (Hub und Impuls)	Regulation der Beschickung
• Methan- und Sauerstoffgehalt	Gasanalyse mittels Dräger Multiwarn
• Schwefelwasserstoffkonzentration im Biogas	Gasanalyse mittels Dräger Multiwarn
• Zugabe von $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$ und $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	
• Zugabe von Spurenelementen	
• Volumen Überlauf bzw. Auslauf	Überlaufvolumen bei den ersten beiden Versuchen nicht immer konstant, da dieser verstopfte
• Besonderheiten	spezielle Beobachtungen, Pannen werden notiert

Die Temperatur des Fermenters wird über eine Temperatursonde kontinuierlich gemessen und bei der Steuerzentrale angezeigt. Die tägliche Beschickungsmenge kann beim Vorlagegefäß abgelesen werden. Das Rohglycerin wird aufgrund des hohen Kaliumgehalts im Verhältnis 1:10 mit Wasser verdünnt. Bei der Dosierpumpe (**Figur 5**) kann der Hub und der Impuls eingestellt werden. Je höher der Impuls, desto häufiger die Pumpstösse. Je höher der Hub, desto mehr Volumen pro Pumpstoss wird befördert.

Bei der Gasuhr (**Figur 4**) kann die produzierte Menge Biogas abgelesen werden. Maximal 1'000 L können auf der Uhr angezeigt werden. Danach beginnt der Zähler wieder bei Null. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass der Gasertrag jeden Tag abgelesen und notiert wird.



Figur 4 und Figur 5: Gasuhr (Gasmengenmessung) und Pumpe zur Rohglycerinbeschickung

Das Gärgut aus dem Überlauf wird in einem Eimer gesammelt und deren Menge erfasst.

4.1.1.2 Versuch 1

Nährstoffe: Beim ersten Versuch werden dem Prozess keine zusätzlichen Nährstoffe zugeführt, da davon ausgegangen wird, dass diese in der Gülle in ausreichendem Masse vorhanden sind. Eine Auswaschung dieser Nährstoffe über den Überlauf und über das Biogas wird nicht berücksichtigt.

Um einen Phosphormangel vorzubeugen, wird am 63. Tag 85 %-ige Phosphorsäure in das 40 L-Vorlagegefäss gegeben.

Rührwerkeinstellungen: Das Rührintervall wird so eingestellt, dass alle 3 Minuten das Rührwerk für 30 Sekunden einschaltet. Die oberen Flügel sind so eingestellt, dass der Inhalt mit relativ intensiver Turbulenz durchmischt wird.

Spurenelemente: Spurenelemente wurden zweimal in einer Lösung (1:100 verdünnt) zugeben.

- 2 ml am 27. Tag
- 10 ml am 42. Tag.

Rohglycerinverdünnung: Da bis zum 60. Tag die Ammonium und Kaliumkonzentration genügend verdünnt wurde und die Konzentrationen ab da stabil gehalten werden sollen, wird die Verdünnung des Rohglycerins auf 1.5:10 erhöht.

4.1.1.3 Versuch 2

Nährstoffe: Da beim ersten Versuch der Schwefel- und Ammoniakgehalt im Biogas stetig gesunken ist und daraus geschlossen wird, dass nicht genügend Nährstoffe vorlagen, wird bei diesem Versuch darauf geachtet, dass dem Prozess täglich Nährstoffe gemäss Nährstoffbedarf zugeführt werden. Ein Absinken des Schwefel- und Ammoniakgehalts soll möglichst verhindert werden. Aus diesem Grund wird auch der Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas kontinuierlich und bereits von Versuchsbeginn erfasst. Eine Konzentration von 200 ppm im Biogas soll nicht unterschritten werden.

Die Literatur [5] besagt einen höheren Nährstoffbedarf bei höherer CSB-Belastung. Deshalb wird die Nährstoffzugabe ab dem 42. Tag verdoppelt.

Rührwerkeinstellungen: Um die Scherkräfte auf die Biologie zu verringern und somit ein möglicher negativer Effekt des ersten Versuchs auszuschliessen wird das Rührwerk neu eingestellt. Das Rührintervall wird so eingestellt, dass jede Minute das Rührwerk für 15 Sekunden einschaltet. Die oberen Flügel werden neu möglichst flach eingestellt, so dass der Inhalt mit wenig Turbulenz durchmischt wurde. Eine gute Durchmischung wird dabei durch das häufige Intervall garantiert.

Spurenelemente: Spurenelemente werden wöchentlich in einer Lösung (1:100 verdünnt) zugeben.

- 10 ml jede Woche

Rohglycerinverdünnung: Die Verdünnung des Rohglycerins wird nicht verändert.

Aufbau Pilotfermenter: Während des Versuchs wird festgestellt, dass das BHKW aufgrund eines Ausfalls die notwendige Wärme nicht zur Verfügung stellen kann. Aus diesem Grund wird beim Tag 63 ein Tauchsieder fix in den Fermenter eingebaut.

4.1.1.4 Versuch 3

Nährstoffe: Die Nährstoffzugabe von Versuch 2 (doppelte Menge) wird beibehalten. Im Versuch 2 konnte der Prozess mit genügend Nährstoffen versorgt werden. Eine Verdoppelung der Nährstoffzugabe wird vorgenommen, da von einer hohen CSB-Belastung ausgegangen wird und eine ausreichende Nährstoffzufuhr garantiert werden soll. Da während des Versuchs ein Rückgang des Ammoniumgehalts ersichtlich ist, wird ab Tag 42 zusätzlich noch Harnstofflösung zugegeben.

Rührwerkeinstellungen: Die Rührwerkeinstellungen von Versuch 2 haben sich als geeignet erwiesen. Die Einstellungen werden nicht verändert.

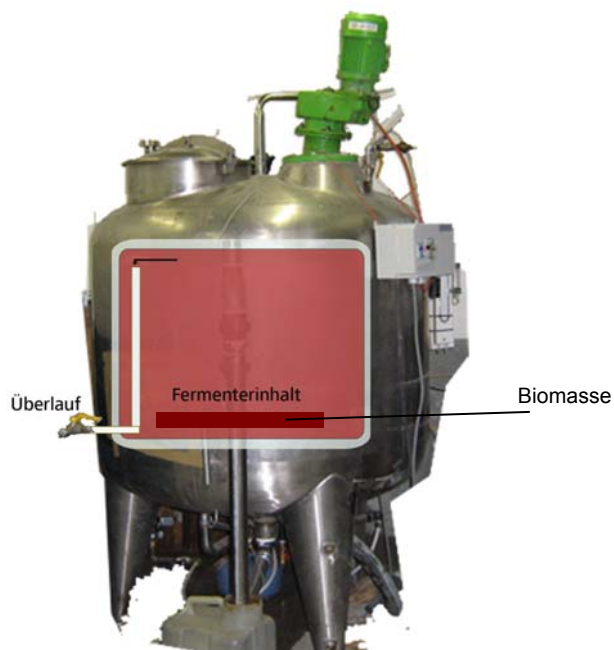
Spurenelemente: Spurenelemente werden wöchentlich in einer Lösung (1:100 verdünnt) zugeben. Die Menge wird verringert.

- 5 ml jede Woche

Rohglycerinverdünnung: Die Verdünnung des Rohglycerins wird nicht verändert. Eine Verdünnung von 1:10 wird beibehalten.

Aufbau Pilotfermenter - Biomasserückhalt: Die beiden ersten Versuche haben gezeigt, dass der TS-Gehalt im Verlaufe des Versuchs ständig abgenommen hat. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die Biomasse ausgewaschen wird und der Prozess somit bei steigender Rohglycerinzugabe instabil wird und sogar unmöglich ist. Aus diesem Grund wird die Biomasse bei diesem Versuch zurückgehalten. Der Fermenter wird umgebaut. Dabei wird bei einem Ventil im Fermenterinnern ein senkrechtes Rohr angeschweisst. Die obere Rohröffnung bestimmt somit den Füllstand (**Figur 6**).

Während jeweils einer Woche wird der Fermenter nur beschickt und kein Gärgut entnommen. Danach wird das Rührwerk für mind. 1 Stunde ausgeschaltet. Dadurch kann sich die schwerere Biomasse absetzen. Anschliessend wird der Hahn beim Überlauf geöffnet und das Gärgut wird von oben bis zur Rohröffnung und somit zum gewünschten Füllstand abgelassen. Die Biomasse verbleibt im Fermenter.

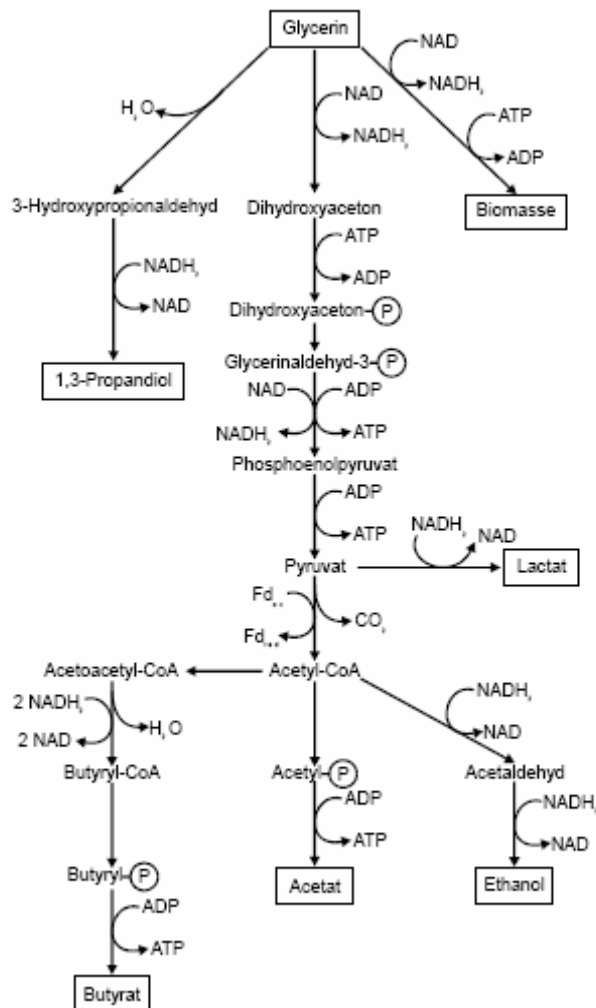


Figur 6: Schematische Darstellung des neuen Überlaufs im Fermenter

Güllezugabe: Zur besseren Stabilität des Prozesses wird entschieden, dem Fermenter wöchentlich 20 L Gülle beizugeben. Die Rindergülle (Munimast) stammt vom Standort-Betrieb Burgdorfer in Frauenfeld. Somit werden wöchentlich 20 L Gülle zusätzlich verwertet. Bei einer Raumbelastung von $3.1 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ und somit einer Beschickung von 14 L/Woche liegt der Faktor zwischen Rohglycerin und Gülle bei 1.4.

4.1.2 Fed-Batch-Versuche im Labormassstab

In der Literatur wird an mehreren Stellen darauf verwiesen, dass beim Stoffwechsel von Glycerin durch Clostridien (*Clostridium butyricum*) das Abbauprodukt 1,3-Propandiol entsteht [3,4]. Clostridien sind anaerobe Bakterien und sind am anaeroben Abbauprozess im Fermenter beteiligt. In **Figur 7** ist der Glycerinstoffwechsel von *Clostridium butyricum* dargestellt. Weiter Organismen wie zum Beispiel die Enterobakterien bilden teilweise als Abbauprodukt von Glycerin den Stoff 2,3-Butandiol [4]. Aus den vorliegenden Literaturdaten stellt sich die Frage, ob diese beiden Abbauprodukte im Gärprozess eine hemmende Wirkung auf weitere anaerobe Bakteriengruppen auswirken könnten.



Figur 7: Glycerinstoffwechsel von *Clostridium butyricum* nach Biebl 1999 [3,4]

Falls die gebildeten Produkte nicht fortlaufend durch den Gärprozess weiterverarbeitet werden, so könnte eine Hemmung dieser Stoffe auf die empfindlichen methanbildenden Bakterien stattfinden. Um diese Frage zu klären, wurden im Labor an der *Hochschule Wädenswil* (ZHAW) verschiedene Fed-Batch-Versuche angesetzt. Fed-Batch-Versuche eignen sich sehr gut, um gleichzeitig mehrere Ansätze parallel zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. So können innerhalb kurzer Versuchszeit mehrere Substrate und Konzentrationen untersucht werden.

Die Fed-Batch-Versuche wird mit vier verschiedenen Ausgangssubstraten durchgeführt. Es handelt sich dabei um Rohglycerin aus der RME-Produktion, Reinglycerin (Pharmaqualität), 1,3-Propandiol (Qualität zur Synthese 98%) und 2,3-Butandiol (Qualität zur Synthese 98%).

Der Abbau von Rohglycerin und Reinglycerin wird miteinander verglichen, um abzuklären, ob eine allfällige Hemmung bei beiden Stoffen vorkommt. Dies hätte zur Folge, dass das Problem beim Abbau von Glycerin liegt. Falls nur bei einem Stoff eine Hemmung auftreten würde, so läge die Ursache bei den zusätzlichen Komponenten im Rohglycerin.

Die Substrate 1,3-Propandiol und 2,3-Butandiol werden angesetzt, um zu sehen, ob diese Stoffe einzeln abgebaut werden oder eine Hemmung verursachen.

Alle Ansätze werden in drei verschiedenen Feed-Konzentrationen, sowie 3 Parallelansätzen durchgeführt. Als Negativprobe werden vier Ansätze ohne jegliches Substrat, nur mit aktiver Biomasse angesetzt. Die Biomasse für die Versuche wird aus einer bestehenden landwirtschaftlichen Biogasanlage (Wipf, Marthalen) genommen. Um die Aktivität der Biomasse nachzuweisen, werden drei Positivkontrollen angesetzt, wobei als Substrat je 1 Gramm Cellulose zugegeben wird.

Die Biomasse wird 1:1 mit Wasser verdünnt. Von dieser Mischung wird jede Flasche mit 200 ml angeimpft. Entsprechend den Ansätzen werden die Substrate dazugeben. Die Flaschen werden gasdicht verschlossen, mit Stickstoff gespült und anschliessend während rund 63 Tagen bei 40 °C im Schüttelschrank inkubiert. Die produzierten Gasvolumina werden alle 3-4 Tage gemessen. Das heisst, es wird der gebildete Überdruck am Gasventil mittels Manometer abgelesen. Daraus kann das Gasvolumen berechnet werden. Die detaillierte Methodenbeschreibung (SOP Anaerobe Biogasbildung (GB21)) ist im Anhang abgelegt.

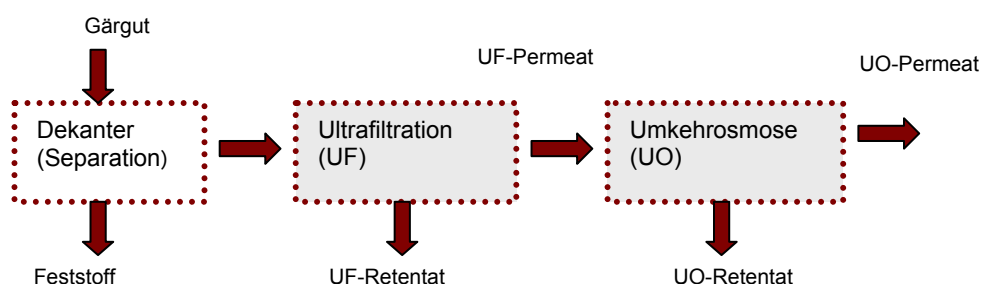
4.1.3 Ultrafiltration- und Umkehrosmoseversuch

Im Februar 2007 wurden mit 60 L Gärgut des 2. Pilotversuches eine Ultrafiltrations- und Umkehrosmoseanlage getestet. Der Versuch soll Aufschluss darüber geben, ob und wie eine solche Anlage mit der Monovergärung kombiniert werden könnte. Die Untersuchungen werden von Urs Meier der Firma *MERITEC GmbH* aus Guntershausen durchgeführt.

4.1.3.1 Funktionsprinzip

Ein **Dekanter** trennt das Gärgut in eine flüssige und eine feste Fraktion auf. Bei der **Ultrafiltration** bleibt das **UF-Retentat** zurück, welches sämtliche organischen Schwebeteilchen enthält. Darin enthalten ist auch die gesamte mikrobielle Biomasse. Da Phosphor in der Regel in organischer Form vorliegt oder an organische Partikel gebunden ist, enthält das **UF-Retentat** einen Grossteil des im Gärgut vorliegenden Phosphors. Daher kann diese Phase als phosphorreicher Dünger betrachtet werden, welcher einen hohen Anteil an organischer Substanz aufweist. Das **UF-Permeat** gelangt in die Umkehrosmose und wird dort weiter aufgetrennt (**Figur 8**).

Für die **Umkehrosmose** kommt eine bedeutend feinere Membran zum Einsatz als bei der Ultrafiltration. Dadurch werden auch Salze aus der Lösung entfernt. Als Endprodukt (**UO-Permeat**) entsteht daher ein Brauchwasser, welches nur noch Spuren von gelösten Salzen enthält und zu Reinigungszwecken oder zur Verdünnung des Rohglycerins genutzt werden kann. Zurück bleibt das sogenannte **UO-Retentat**. Dieses enthält sämtliche gelöste Salze. Aus landwirtschaftlicher Sicht bedeutend sind dabei vor allem die hohen Gehalte an Stickstoff und Kalium. Das UO-Retentat kann insofern als N/K-Dünger betrachtet werden.



Figur 8: Stoffflussschema der Ultrafiltration/Umkehrosmose

4.1.3.2 Durchführung

Ausgangssubstrat: Gärgut (Gemisch von separierter Gülle und Rohglycerin). Es wurde beobachtet, dass sich während der Lagerung Schlamm abgesetzt hatte.

Verwendete Membranen: Bei der Ultrafiltration sowie bei der Umkehrosmose wurde mit organischen Membranen gearbeitet.

Probenahme: Jeweils zweimal ca. 250 mL von Rohmaterial, UF-Retentat, UF-Permeat, UO-Retentat, UO-Permeat.

Betrieb: Die Ultrafiltration wurde bei 3 bar und die Umkehrosmose bei 40 bar durchgeführt. Bei der Membrantrennung traten keine Probleme (Verstopfungen oder dgl.) auf.

Analytik: Dienstleistungslabor *Labor Veritas*, Zürich

4.2 Ergebnisse und Auswertung

4.2.1 Betrieb der Pilotanlage

4.2.1.1 Versuch 1

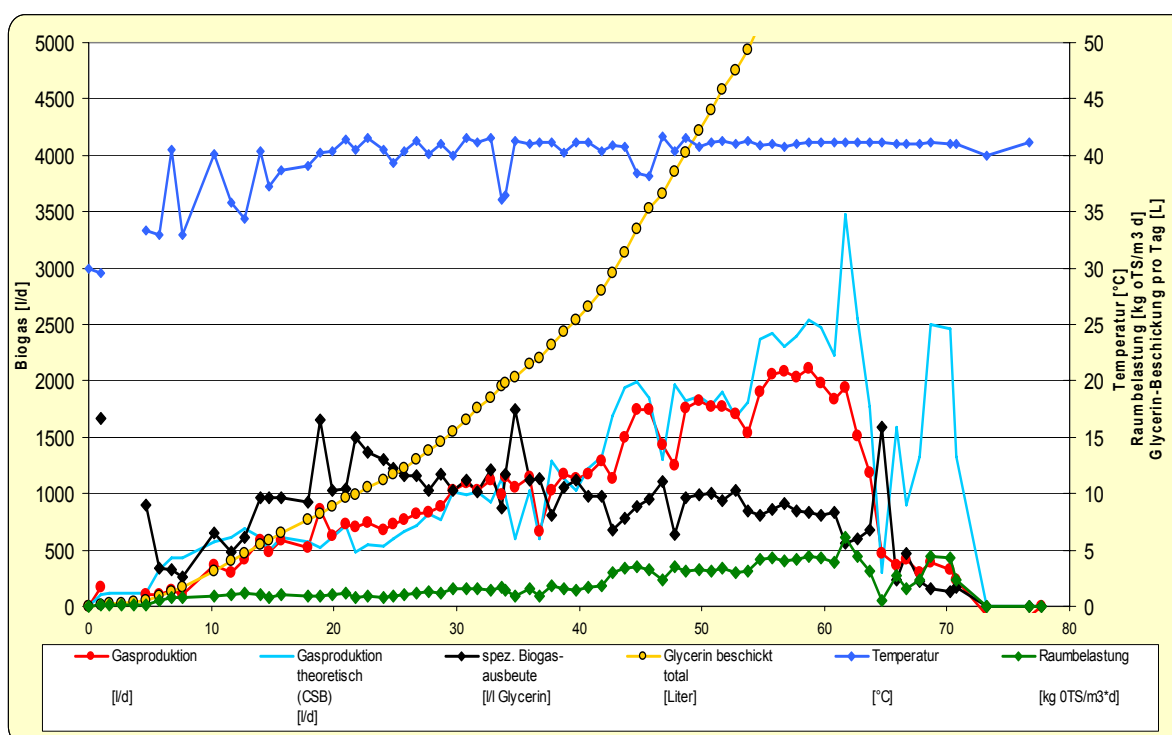
Die **Raumbelastung** wird laufend und nur langsam gesteigert, wie folgende **Figur 9** zeigt. Auch die Gesamtmenge an Rohglycerin, welches beschickt wird, nimmt stetig zu.

Am 62. Tag wird die Beschickungspumpe nochmals etwas höher gestellt. Da die Dosierung nicht exakt eingestellt werden kann, ist die Beschickung an diesem Tag zu hoch, d.h. es wird eine Raumbelastung von $6.0 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ erreicht. Am 63. Tag wird die Beschickung sofort wieder zurückgefahren ($4.4 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$) und am 64. Tag auf $3.1 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$. Dies auch aus dem Grund, dass die **organischen Fettsäuren** schon am 61. Tage bedeutend angestiegen sind. Am 54. Tag befinden sich die Säuren noch vollständig im gewohnten Bereich. Die organischen Säuren sind somit während der Phase mit der Raumbelastung von $4.2 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ angestiegen, worauf auch der Rückgang der Gasproduktion zurückzuführen ist.

Bei der Raumbelastung von 1 bis $1.4 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ während den Tagen 11 bis 42 ist die **Gasausbeute** am besten mit rund 100 % von der theoretischen Gasausbeute. Anschliessend nimmt die Gasproduktion laufend leicht ab. Bei der Raumbelastung von $1.7 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ kann dies noch im Rahmen der Schwankung liegen, aber ab Tag 43 wird die theoretische Gasausbeute definitiv nicht mehr erreicht. Wie oben bereits beschrieben, wirkt sich dies vorerst (bis Tag 54) nicht auf die organischen Säuren aus.

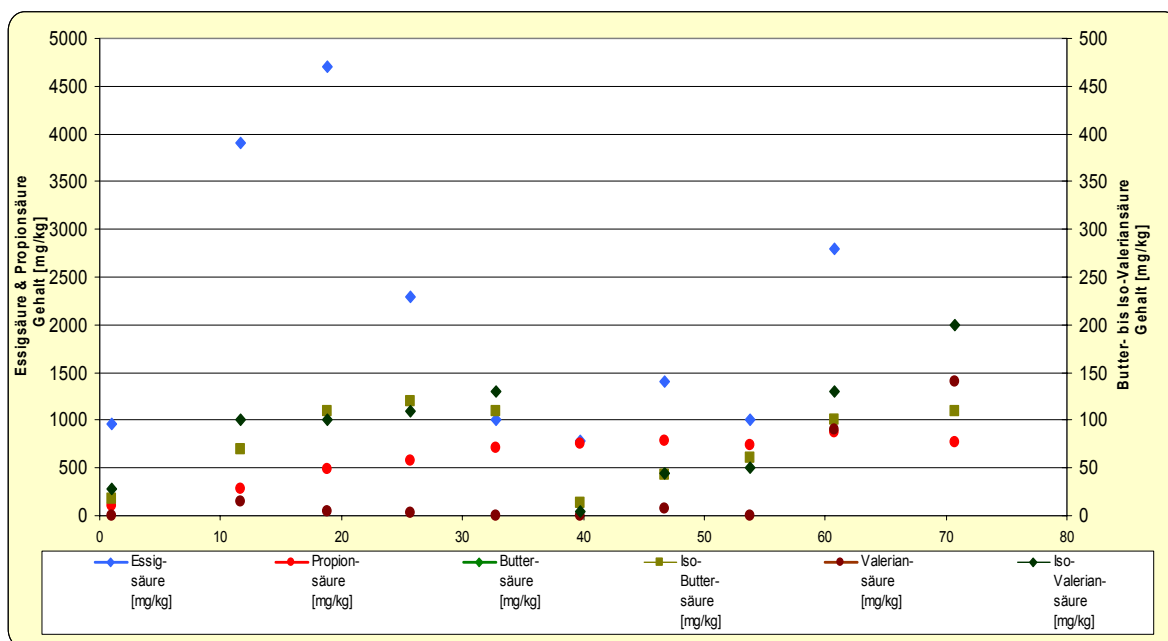
Sobald die Säuren angestiegen sind, geht die Gasproduktion rasant zurück (ab Tag 61). Auch ein Rückgang der Beschickung kann die Gasausbeute nicht stabilisieren. Ab Tag 64 geht die Gasproduktion massiv zurück, wobei gleichzeitig der Methangehalt von 66 % auf 52 % sinkt. Am 72. Tag wird die Beschickung ganz eingestellt, was auch die Gasproduktion sofort komplett stoppt, da auch keine Hydrolyse mehr stattfindet.

Die **spezifische Gasausbeute** steigt zwischen Tag 5 und 20 laufend an, während sie anschliessend wieder zu sinken beginnt. Die hohen spezifischen Gasausbeuten zeigen, dass zu Beginn noch Gas aus der "Startgülle" produziert wird. Ab Tag 20 ist dieses Potenzial ausgeschöpft, weshalb die spezifische Gasausbeute zu sinken begann und sich theoretisch auf konstanter Höhe einpendeln sollte. Abweichungen lassen sich durch den instabilen Prozess erklären.



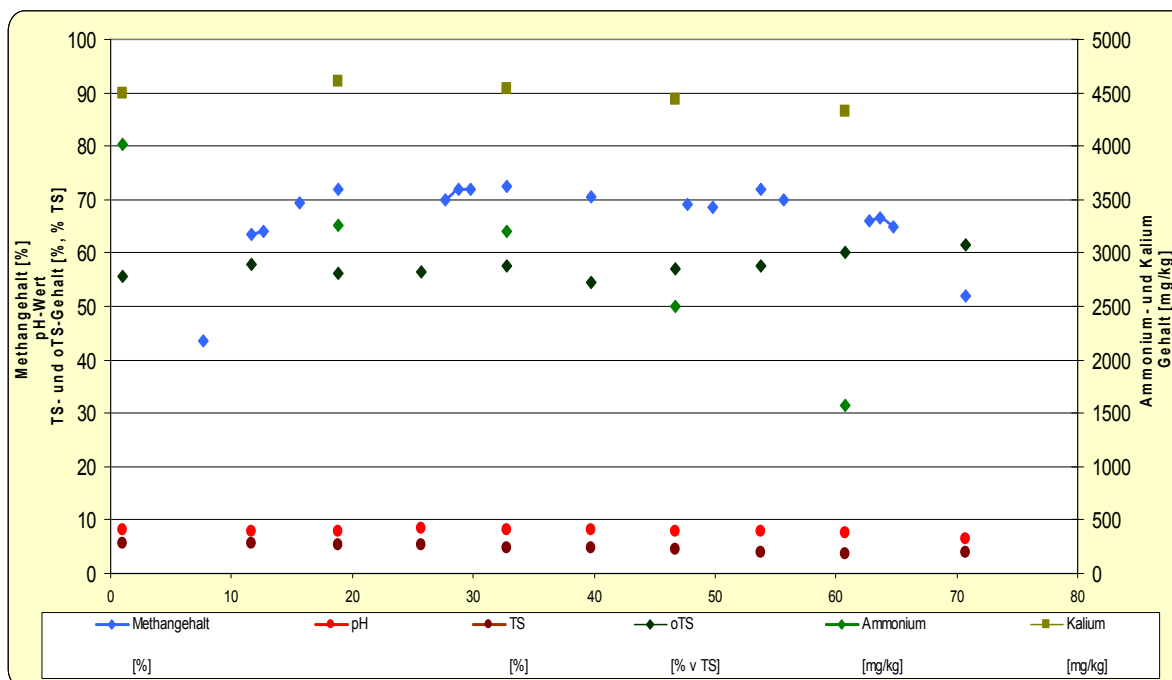
Figur 9: Zeitlicher Verlauf der verschiedenen Parameter bei der Durchführung des ersten Versuchs

Die **Temperatur** schwankt vor allem beim Start des Versuches deutlich zwischen 33 und 40°C, wodurch auch der tiefere Gasertrag, gegenüber der theoretisch erwarteten Gasproduktion, erklärt werden kann. Die Temperaturunterschiede sind auf die Einstellungen der BHKW-Betriebszeiten zurückzuführen. Der Fermenter wird nur mit der Abwärme des BHKWs der Biogasanlage geheizt. Wenn das BHKW nicht den ganzen Tag oder nur während einer bestimmten Zeit läuft, kühlt der Pilotfermenter ab, da während der Standzeit nicht genügend Wärme geliefert wird. Im Verlauf des Versuches kann das BHKW so betrieben werden, dass die Wärme drei- bis viermal pro Tag geliefert wird. Einzelne anschliessende Temperatureinbrüche sind auf ein Ausfall des BHKWs zurückzuführen. Ab Tag 50 kann das BHKW kontinuierlich betrieben und somit gleichmässig Wärme geliefert werden.



Figur 10: Zeitlicher Verlauf der verschiedenen Säuren beim ersten Versuch

Die **Figur 10** zeigt die wöchentlichen Analysenresultate der Proben. Dabei wird ersichtlich, dass die Propionsäure-Konzentration steigende Tendenzen aufweist. Die Analyse zwischen Tag 60 und 70 zeigt deutlich hohe Konzentrationen aller gemessenen Säuren. Dies wirkt sich direkt auf die Gasproduktion aus.



Figur 11: Messungen von Methan, pH, TS, oTS, Ammonium und Kalium während dem ersten Versuch

Während dieses Versuches wird das **Kalium** nicht aufkonzentriert, sondern eher verdünnt. Dies wird an der Abnahme des Kaliumgehalts ersichtlich.

Der **Methangehalt** ist während der Anfahrphase noch tief und erreicht beim stabilen Betrieb Maximalwerte über 70 %. Beim unstabilen Prozess nimmt auch der Methangehalt wieder ab.

TS-Gehalt und Ammonium-Konzentration zeigen sinkende Tendenzen, was auf eine Verdünnung und Auswaschung hinweist. In **Figur 11** sind die Messungen dieser Parameter ersichtlich. Mit zunehmender Versäuerung des Prozesses sinkt auch der pH-Wert.

Schwefelwasserstoff: Der Schwefelwasserstoff-Gehalt (H_2S) im Biogas nimmt während der Versuchsdauer laufend ab. Wenn kein H_2S im Biogas messbar ist, kann angenommen werden, dass die H_2S -Konzentration im Fermenter auch gesunken ist. Dies könnte darauf hinweisen, dass der Schwefel limitierend wirkt. Die Gesamt-Schwefelkonzentration am Tag 60 beträgt 230 mg/kg. Da der Schwefel von den Methanbakterien nur in reduzierter Form aufgenommen werden kann, ergibt sich eine optimale H_2S -Konzentration von ca. 10 mg/L gelöstem H_2S . [5]

In der Phase der Beschickung mit $1.7 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ werden nur noch 119 ppm H_2S gemessen. Dies könnte zur These führen, dass ab diesem Zeitpunkt der Schwefel bereits beginnt, limitierend zu wirken, da ab diesem Zeitpunkt auch die Gasausbeute zurück geht.

Phosphor: Der Phosphatgehalt im Fermenter wird zweimal gemessen.

- Am 54. Tag: 330 mg/kg
- Am 71. Tag: 300 mg/kg

Spurenelemente: Die Spurenelemente sind zumindest nach der zweiten Gabe eher überdosiert und somit sicher nicht limitierend. Allenfalls könnte eine Hemmung durch gewisse Spurenelemente ausgelöst worden sein. Die zweite Gabe findet zu diesem Zeitraum statt, als auch die rückläufige Gasausbeute begonnen hat.

Sauerstoff: Am 42. Tag ist der Fermenter während etwa einer Stunde geöffnet, weil überflüssiger Inhalt abgepumpt werden muss. Die Biomasse an der Oberfläche ist somit während längerer Zeit mit Sauerstoff in Kontakt getreten. Ein negativer Einfluss auf die stabile Methanproduktion ist nicht auszuschliessen, wird aber vernachlässigbar sein.

Rührverhalten / Einmischung von Rohglycerin: Das Rührintervall ist so eingestellt, dass alle 3 Minuten das Rührwerk für 30 Sekunden einschaltet. Während den 3 Minuten Stillstand des Rührwerks läuft die Masse im Fermenter jeweils noch nach und kommt nicht ganz zum Stehen. Daher ist ein lokales Versäuern

durch die Beschickung eher auszuschliessen. Bei jedem Rührabschnitt kann vorübergehend eine höhere Gasproduktion festgestellt werden.

4.2.1.2 Versuch 2

Die **Raumbelastung** wird wie beim ersten Versuch, jedoch etwas schneller, laufend gesteigert, wie folgende **Figur 12** zeigt.

Am 31. Tag wird die Beschickung für einen Tag abgestellt. Das BHKW der Biogasanlage kann an diesem Tag nicht betrieben werden, weshalb mit einem Temperaturabfall im Pilotfermenter zu rechnen ist (tiefe Temperaturen verringern den Abbau von Rohglycerin). Ab dem Tag 60 wird die angestrebte Raumbelastung von $3.1 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ erreicht. Der tatsächliche Gasertrag folgt jedoch nicht dem theoretischen Wert. Aus der Analyse wird ersichtlich, dass die organischen Fettsäuren zu diesem Zeitpunkt bedeutend angestiegen sind, womit sich der reduzierte Gasertrag erklären lässt.

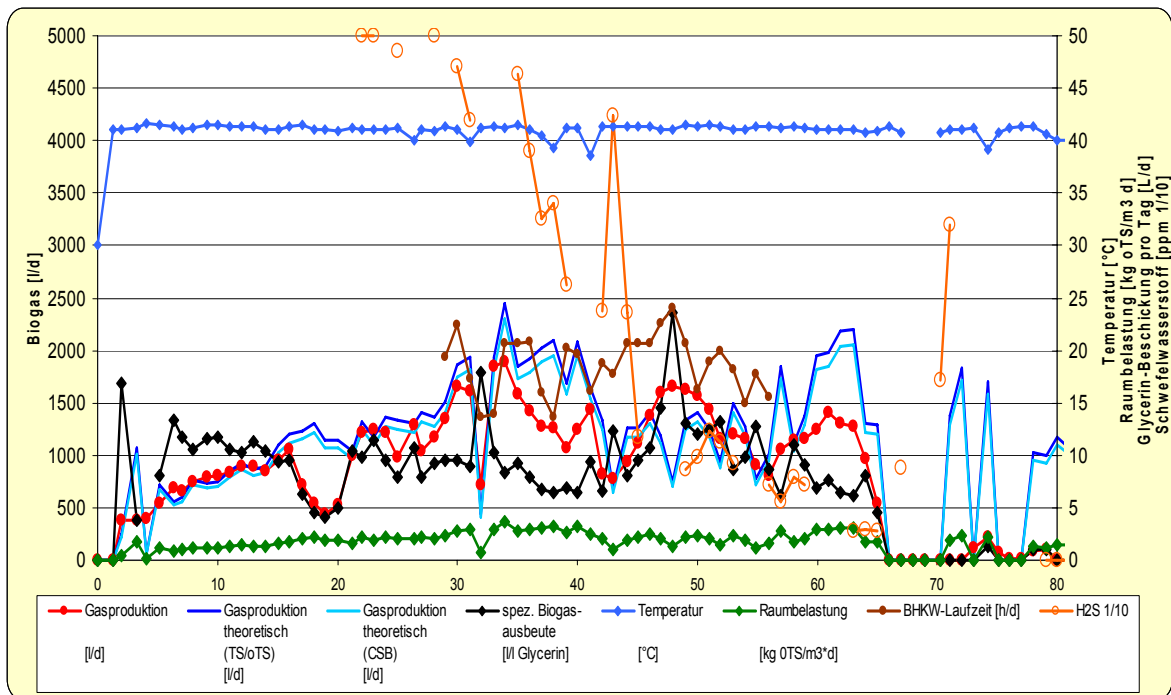
Aus diesem Grund wird die Beschickung am 65. Tag abgeschaltet. Ein Tag später werden 200 L des Fermenterinhalt mit 200 L Rindergülle ausgetauscht um der Versäuerung entgegen zu wirken. Der Gasertrag sank auf Null. Am 70. Tag wird die Beschickung wieder eingestellt, um eine Reaktion bei der Biogasproduktion zu prüfen. Wie am Tag 72 festgestellt werden kann, ist die Dichtung beim Deckel, nach der Güllezufuhr nicht mehr richtig aufgesetzt, wodurch Biogas entweicht und Sauerstoff in den Prozess gelangt.

Dies wird am 72. Tag bemerkt und behoben, wodurch wieder ein Gasertrag, jedoch ein tiefer, gemessen werden kann. Der Prozess reagiert jedoch nicht mehr auf die steigende Zugabe von Rohglycerin und versäuert ab dem 80. Tag vollkommen. Dazu könnte auch die schnelle Erhöhung der Beschickung auf eine Raumbelastung von $2.4 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ in der Krisenphase beigetragen haben. Zudem ist derzeit der Sauerstoffgehalt im Fermenter über 15 %.

Zu Beginn des Versuchs verhält sich der **Gasertrag** wie theoretisch berechnet. Der Rückgang am Tag 19 ist auf eine technische Störung zurückzuführen, bei welcher Gas entweichen konnte. Es ist deshalb anzunehmen, dass der tatsächliche Ertrag der theoretischen Gasproduktion folgt. Einzelne Schwankungen sind auf die Temperatur zurückzuführen und werden bei der reduzierten Beschickung teilweise wieder kompensiert. Ab dem 50. Tag wird die theoretische Gasproduktion definitiv nicht mehr erreicht.

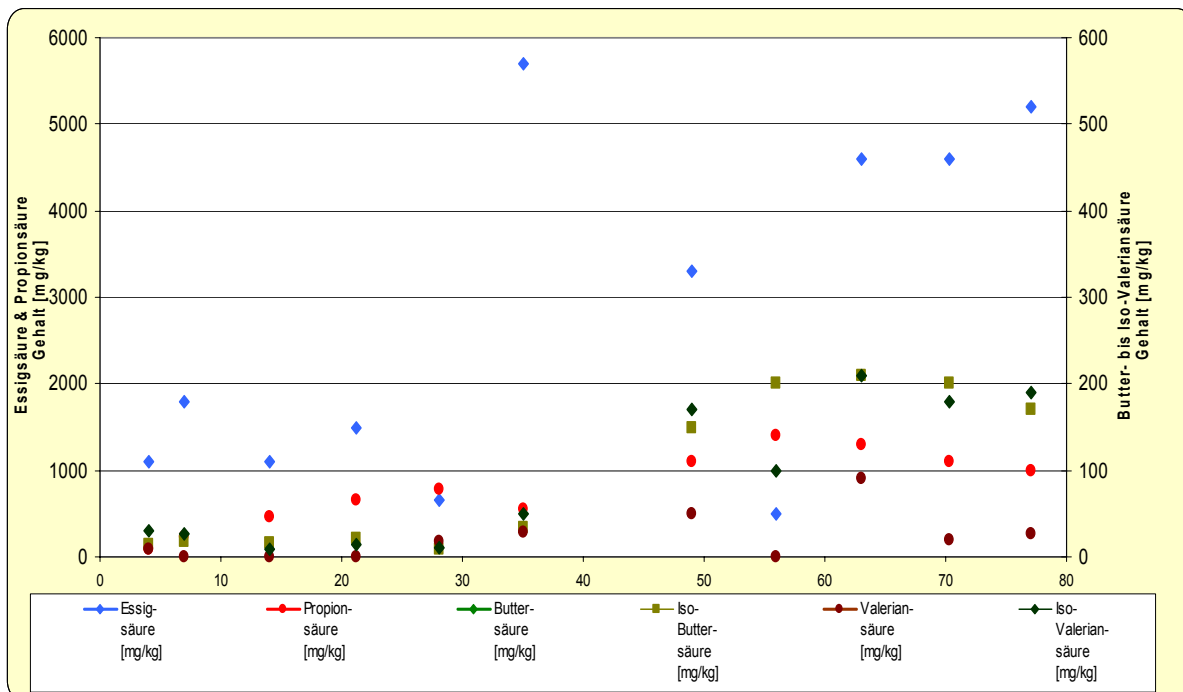
Sobald die Säuren angestiegen sind, geht die Gasproduktion rasant zurück (ab Tag 62). Zudem geht Gas durch die undichte Stelle am Deckel des Fermenters verloren. Der Methangehalt sinkt bis gegen 3 % und der Sauerstoffgehalt steigt bis auf 18.5 %, wodurch der anaerobe Prozess stark beeinträchtigt wird. Die zugegebene Menge Rohglycerin kann nicht mehr verwertet werden, wodurch der Fermenter versäuert.

Die **spezifische Gasausbeute** steigt zu Beginn sehr schnell über 1'000 L/L Rohglycerin. Eine deutliche Tendenz kann aufgrund der folgenden Schwankungen nicht erkannt werden.



Figur 12: Zeitlicher Verlauf der verschiedenen Parameter bei der Durchführung des zweiten Versuches

Aufgrund technischer Störungen beim BHKW (Wärmlieferant) und der Biogasanlage weist der Temperaturverlauf Ausreisser auf. Diese wirken sich direkt auf den Gasertrag aus. Erst durch den Einbau eines Tauchsieders am 64. Tag kann die **Temperatur** unabhängig der BHKW-Laufzeit garantiert werden.

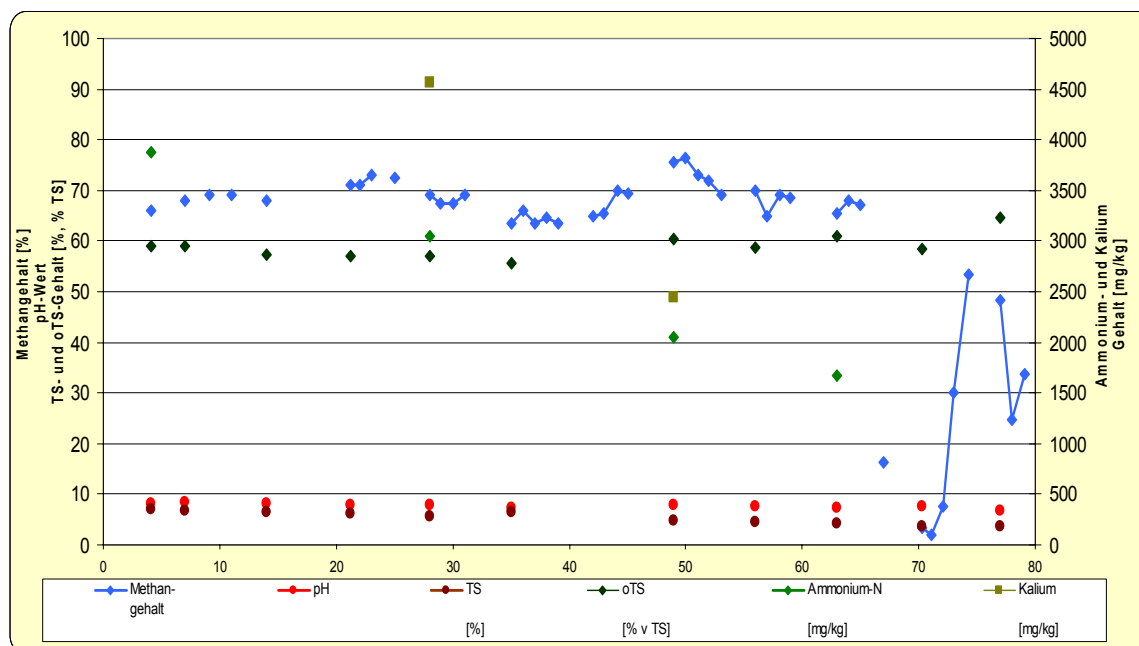


Figur 13: Zeitlicher Verlauf der verschiedenen Säuren beim zweiten Versuch

Die **Figur 13** zeigt die wöchentlichen Analysenresultate der Proben. Dabei wird ersichtlich, dass die organischen Säuren mit Ausnahme der Essigsäure bis zu Tag 35 tief gehalten werden können.

Die Analyse am 65 zeigt die deutlich zu hohen Konzentrationen aller gemessenen Säuren. Dies wirkt sich direkt auf die Gasproduktion aus, weshalb auch der Fermenterinhalt mit Gülle ausgetauscht wird, um die Säurewerte zu verbessern und den Prozess zu stabilisieren. Die nächste Analyse am 70. Tag zeigt den

Rückgang der Säuren, bedingt durch die Verdünnung mit Gülle. Die Säurekonzentration nehmen nicht mehr weiter ab.



Figur 14: Messungen von Methan, pH, TS, oTS, Ammonium und Kalium während dem zweiten Versuch

Auch während des zweiten Versuches wird das **Kalium** nicht aufkonzentriert, sondern eher verdünnt. Dies wird an der Abnahme des Kaliumgehalts ersichtlich.

Der **Methangehalt** schwankt durchschnittlich in einem relativ hohen Bereich zwischen 60 und 70 %. Ein Maximalwert von 76 % Methan (Tag 50) wird erreicht. Der Methangehalt sinkt drastisch als der Prozess übersäuert und der Deckel nicht dicht ist. Er beginnt aber wieder anzusteigen, als die Dichtigkeit wieder hergestellt ist. Am Ende des Versuchs ist der Prozess wieder übersäuert und der Methangehalt sinkt erneut.

Wie beim Versuch 1 zeigen **TS-Gehalt** und **Ammonium-Konzentration** sinkende Tendenzen, woraus geschlossen werden kann, dass der Fermenterinhalt verdünnt wird. In **Figur 134** sind die Messungen dieser Parameter ersichtlich. Bei Abbruch des Versuchs liegt ein tiefer pH-Wert von 6.8 vor.

Schwefelwasserstoff: Der Schwefelwasserstoff-Gehalt (H_2S) im Biogas hat während der Versuchsdauer, wie beim ersten Versuch laufend abgenommen. Dies trotz der täglichen Zugabe von Ammoniumsulfat. Ab dem 42. Tag wird die Sulfatzugabe verdoppelt, da der Schwefelwasserstoffgehalt auf 238 ppm gesunken ist. Der Gehalt im Biogas steigt nach der Zugabe der Gülle deutlich an. Da der Schwefel in ausreichendem Masse zugegeben wird, kann davon ausgegangen werden, dass dieser nicht limitierend wirkt.

Phosphor: Der Phosphatgehalt im Fermenter wird einmal gemessen.

- Am 49. Tag: 610 mg/kg

Durch die tägliche Zugabe von Ammoniumphosphat kann davon ausgegangen werden, dass genügend Phosphor vorhanden war und dieser nicht limitierend wirkt.

Spurenelemente: Die Spurenelemente werden gemäss Lösungshersteller *Schmack AG* zugegeben. Eine Überdosierung und ein Mangel sind deshalb auszuschliessen.

Sauerstoff: Ab dem Tag 65 ist der Deckel nicht mehr dicht und der Sauerstoffgehalt im Biogas steigt kontinuierlich an. Zuerst wird angenommen, dass der Gasertrag aufgrund der Versäuerung ausfällt und somit wird die Leckage erst am 72. Tag behoben. Während dieser Zeit ist die Biomasse an der Oberfläche somit über mehrere Tage mit Sauerstoff in Kontakt. Dadurch ist die Methanproduktion gehemmt. Das zugeführte Rohglycerin wird somit nicht mehr abgebaut und es kommt nach der Güllezugabe erneut zu einer Übersäuerung.

Rührverhalten / Einmischung von Rohglycerin: Das Rührintervall ist so eingestellt, dass ein negativer Einfluss auf den Prozess auszuschliessen ist.

4.2.1.3 Versuch 3

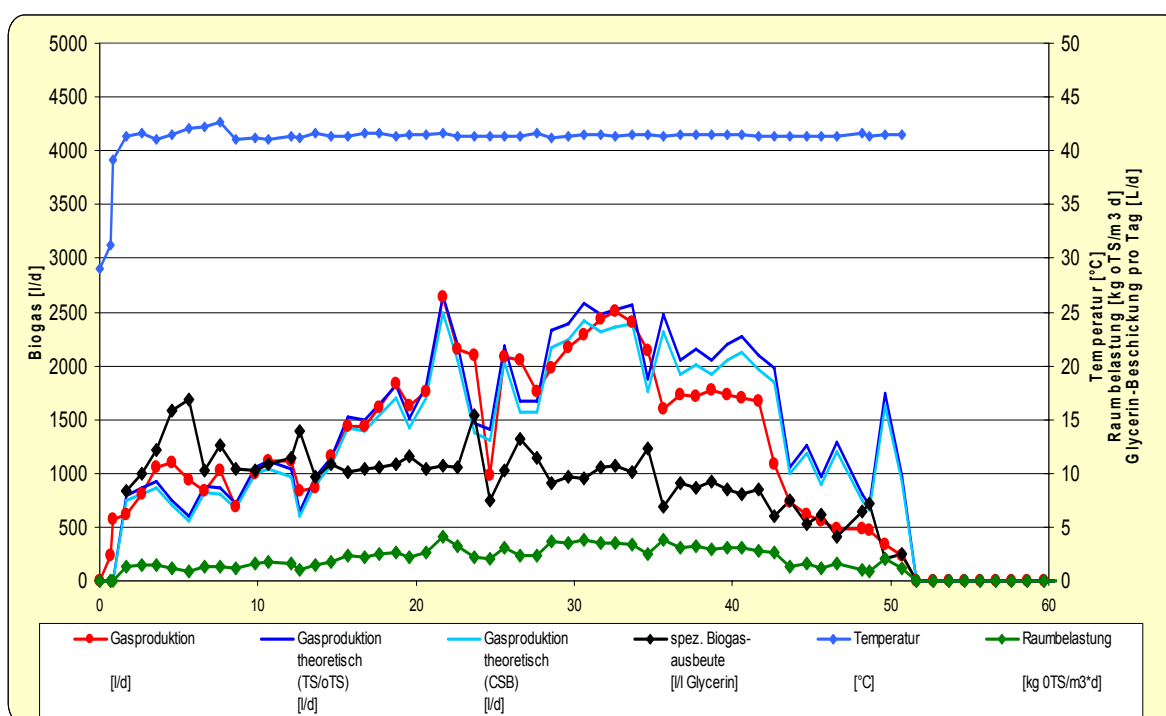
Da eine Verdünnung der Biomasse im Pilotfermenter beobachtet wird, ist das System technisch so weiter entwickelt, dass nun die Biomasse im Fermenter zurück gehalten wird. Somit ist die Auswaschung der Biomasse geringer und der Abbau von Rohglycerin sollte sich stabiler zeigen.

Mit der technischen Optimierung und einer geringen wöchentlichen Zugabe von Rindergülle erfolgt in den ersten Wochen ein stabiler Abbauprozess. Die theoretisch erwartete Gasproduktion wird täglich relativ genau produziert. Der Methangehalt im Biogas verhält sich bis auf wenige Ausnahmen sehr konstant.

Da die Rohglycerinbeschickung noch etwas schneller als bei den ersten beiden Versuchen gesteigert wird, ist die **Raumbelastung** von über $3.0 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ bereits am 26. Tag erreicht. Aufgrund einer Störung bei der Beschickungspumpe wird am 22. Tag etwas zuviel beschickt, weshalb die Beschickung in den nächsten Tagen etwas reduziert wird. Dementsprechend verhält sich auch der **tatsächliche Gasertrag**. Die theoretisch erwartete Gasproduktion wird, bis zu einer total beschickten Rohglycerinmenge von 50 L, täglich relativ genau produziert und beginnt am 35. Tag zu sinken. Eine Überfütterung des Prozess kann ausgeschlossen werden, da das zugeführte Rohglycerin zu diesem Zeitpunkt alles verwertet worden ist. Somit wird eine Raumbelastung von ca. $3.0 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ beibehalten. Der Gasertrag sinkt jedoch, trotz gleich bleibender Beschickung weiter ab, weshalb die Beschickung am 43. Tag halbiert wird und somit bei einer Raumbelastung von $1.5 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ gefahren wird (**Figur 15**).

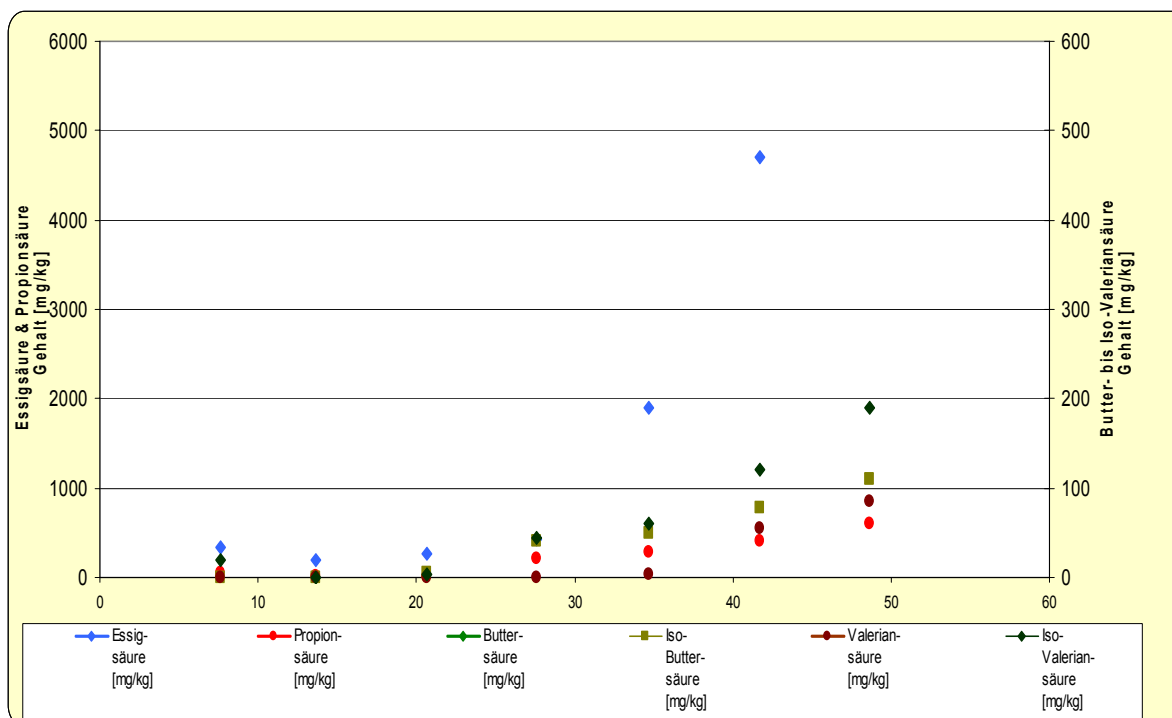
Trotzdem sinkt der Gasertrag und auch die spezifische Gasausbeute weiter bis die Gasproduktion am Tag 50 zum Erliegen kommt. Zu diesem Zeitpunkt sind auch die organischen Säuren stark angestiegen, was darauf hinweist, dass das Rohglycerin nicht mehr abgebaut werden kann. Dementsprechend müssen die Bakterien durch einen unbekannten Faktor gehemmt werden.

Die **spezifische Gasausbeute** steigt zu Beginn schnell über $1'000 \text{ L/L Rohglycerin}$, da zu Beginn noch Gas aus der "Startgülle" produziert wird. Ab dem 10. Tag pendelt sich die spezifische Gasausbeute bis zum 35. Tag auf dem Niveau von ca. $1'000 \text{ L/L Rohglycerin}$ ein. Da der Prozess ab Tag 35 und einer beschickten Rohglycerinmenge von 50 L unstabil wird, kann nicht alles Rohglycerin abgebaut werden, wodurch auch die Gasausbeute zu sinken beginnt.



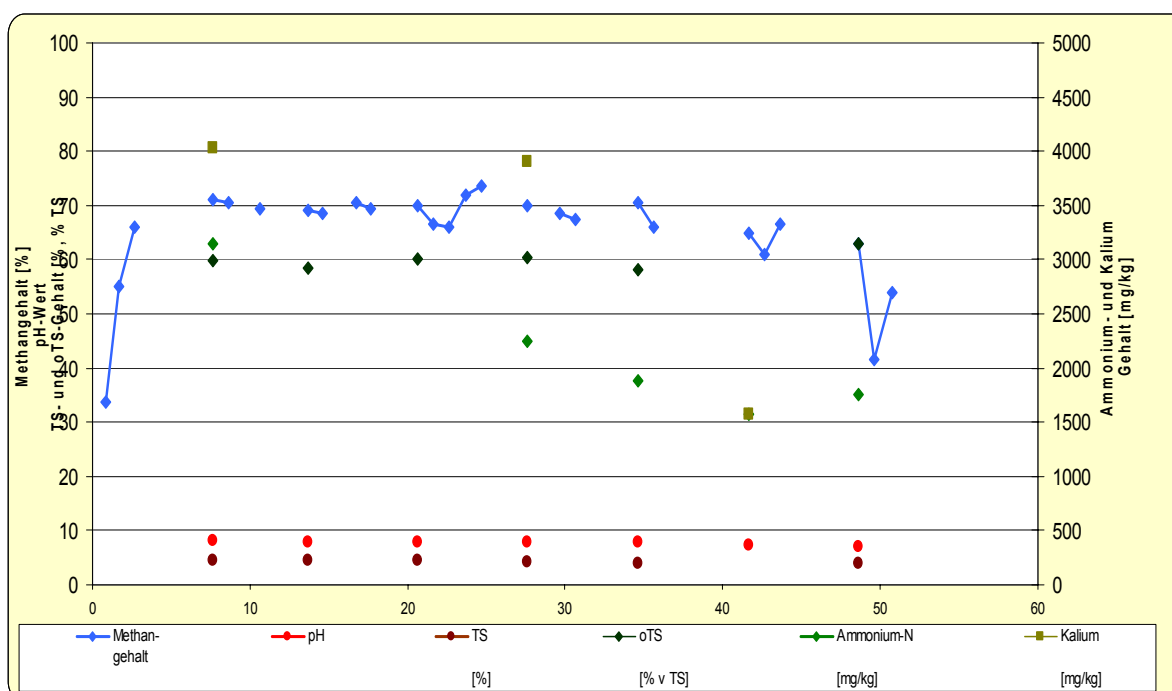
Figur 15: Zeitlicher Verlauf der verschiedenen Parameter bei der Durchführung des dritten Versuches

Durch den Einbau des Tauchsieders im zweiten Versuch verläuft die **Temperatur** über den ganzen Versuch hinweg konstant. Einen negativen Einfluss der Temperatur auf den Prozess ist somit unmöglich.



Figur 16: Zeitlicher Verlauf der verschiedenen Säuren beim dritten Versuch

Die **Figur 16** zeigt die wöchentlichen Analysenergebnisse der Proben. Die **organischen Fettsäuregehalte** befinden sich bei allen bis zum 42. Tag durchgeführten Analysen im tolerierbaren Bereich. Eine Überfütterung des Prozesses ist deshalb auszuschliessen.



Figur 17: Messungen von Methan, pH, TS, oTS, Ammonium und Kalium während dem dritten Versuch

Auch während des dritten Versuchs wird das **Kalium** nicht aufkonzentriert, sondern eher verdünnt. Dies wird an der Abnahme des Kaliumgehalts ersichtlich. Eine Hemmung durch das Kalium ist auszuschliessen.

Der **Methangehalt** pendelt sich mit wenigen Ausnahmen bei ca. 70 % ein. Vereinzelt werden auch höhere Messungen gemacht. Der hohe, beständige Methangehalt weist auf einen stabilen Abbau des Rohglycerins und somit auf einen stabilen Prozess hin. Erst ab dem 35. Tag, als nicht mehr alles Rohglycerin abgebaut werden kann, beginnt auch der Methangehalt im Biogas zu sinken.

TS-Gehalt und Ammonium-Konzentration sinken wie bei den anderen beiden Versuchen, trotz dem neuen Biomasserückhalt. Eine Verweilzeit von 35 d sollte für eine Verdoppelung der Biomasse jedoch ausreichen, wodurch diese eigentlich eher zunehmen sollte. Es sei denn, die Biomasse hat eine sehr hohe Absterberate oder wird im Wachstum ab einer bestimmten Zeit und Rohglycerinmenge gehemmt. In **Figur 17** sind die Messungen dieser Parameter ersichtlich. Da auch die Ammonium-Konzentration ständig abnimmt, wird ab Tag 42 mittels Harnstofflösung nebst den anderen Nährstoffen auch noch zusätzlich Stickstoff zugeführt. Dadurch kann eine Stickstofflimitation ausgeschlossen werden.

Schwefelwasserstoff: Der Schwefelwasserstoff-Gehalt (H_2S) kann während des ganzen Versuchs über 500 ppm gehalten werden, weshalb eine Schwefellimitation ausgeschlossen werden kann. Schwefel wird nebst den Lösungen auch durch die wöchentliche Güllezugabe zugeführt.

Phosphor: Der Phosphatgehalt im Fermenter wurde zweimal gemessen.

- Am 8. Tag: 340 mg/kg
- Am 28. Tag: 460 mg/kg

Durch die tägliche Zugabe von Ammoniumphosphat und aufgrund des Phosphatanstiegs kann davon ausgegangen werden, dass genügend Phosphor vorhanden war und dieser nicht limitierend wirkt.

Spurenelemente: Die Spurenelemente werden gemäss Lösungshersteller *Schmack AG* zugegeben. Eine Überdosierung und ein Mangel sind deshalb auszuschliessen. Zudem werden Spurenelemente über die Gülle zugeführt.

Sauerstoff: Hemmungen durch Sauerstoff können ausgeschlossen werden, da im Biogas keine hohe Sauerstoffgehalte gemessen werden können und der Fermenter dicht ist.

Rührverhalten / Einmischung von Rohglycerin: Das Rührintervall ist so eingestellt, dass ein negativer Einfluss auf den Prozess auszuschliessen ist.

Güllezugabe: Die Güllezufuhr stabilisiert den Prozess, da neue Biomasse, Nährstoffe und Spurenelemente zugeführt werden. Ein negativer Einfluss auf den Prozess durch die Güllezufuhr ist auszuschliessen.

Auswaschung der Biomasse: Die Verweilzeit beträgt bei 650 L Nutzvolumen und einer Beschickung von 20 L Rohglycerin-Wasser-Gemisch 32.5 Tage, was für die Verdoppelung der Biomasse klar ausreichen sollte, damit die Biomasse nicht ausgewaschen wird. Zudem wird die Biomasse bei diesem Versuch vor dem überlaufen zuerst abgesetzt. Zur Kontrolle, ob das Absetzen etwas nützt sind der TS-Gehalt des durchmischten Fermenterinhalt und der TS-Gehalt des verworfenen Gärguts bestimmt worden:

- Durchmischter Fermenterinhalt: 3.95 %
- Verworfenes Gärgut: 3.41 %

Dementsprechend sollte keine Biomasse ausgewaschen werden.

Methanol: Zu Beginn des Versuches und auch am Tag 35 (beim Start der verminderten Gasproduktion) wurden im Fermenter beide Male Methanolkonzentrationen von weniger als 10 mg/l gemessen. Somit zeigt sich, dass der Methanolanteil im Rohglycerin (120 g/l) gut abgebaut wird und keine Ursache für eine Hemmung sein kann.

Folgerung aus den drei kontinuierlichen Versuchen

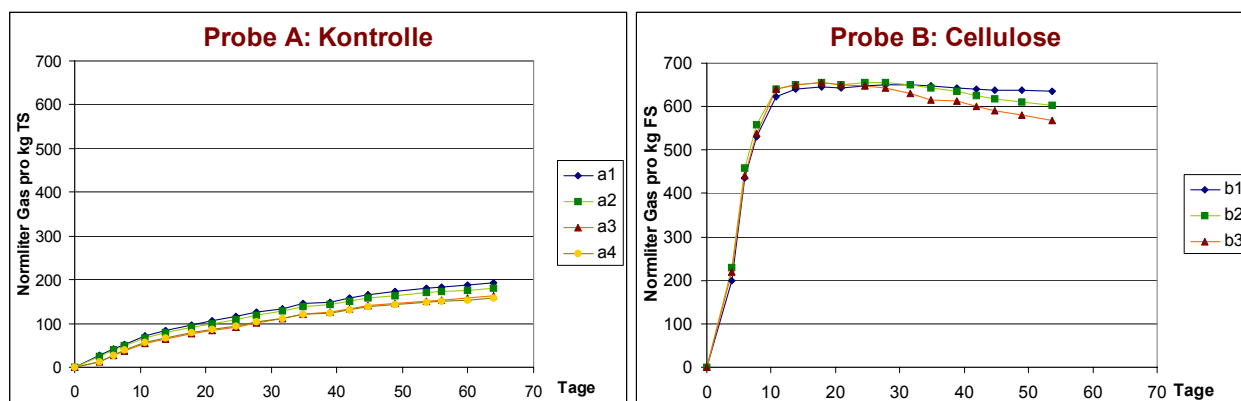
Die drei kontinuierlichen Versuche im Pilotfermenter erlagen nach 45 bis 65 Tagen an massiven Prozessstörungen, obwohl alle kontrollierbaren Parameter den Sollwerten entsprachen. Dies führt zur Folgerung, dass a) im Rohglycerin gewisse Stoffe vorhanden sind, die zu Substrathemmungen führen oder b) während dem Abbauprozess Zwischenprodukte entstehen, die zu einer Produktehemmung führen [5, 6]. Aus diesem Grund wurden in Fed-Batch-Versuchen an der *Hochschule Wädenswil* (ZHAW) der Abbau von Rohglycerin aus der RME-Produktion mit Reinglycerin, sowie mit Zwischenprodukten verglichen.

4.2.2 Fed-Batch-Versuche im Labormassstab

Kontrollen

Für die Fed-Batch-Versuche wurden zwei Kontrollen angesetzt. In Probe A wurde nur Impfschlamm mit Wasser im Verhältnis 1:1 angesetzt (**Figur 18**). Das produzierte Biogas von Probe A kommt alleine vom Impfschlamm und wurde für die Auswertung der Versuchdaten bei allen anderen Ansätzen subtrahiert.

In Probe B wurde jeweils 1 Gramm Cellulose in Pulverform zugegeben (**Figur 18**). Diese Probe soll zeigen, dass der verwendete Impfschlamm aktiv ist.



Figur 18: Biogasbildung von Impfschlamm (Kontrolle) und Cellulose

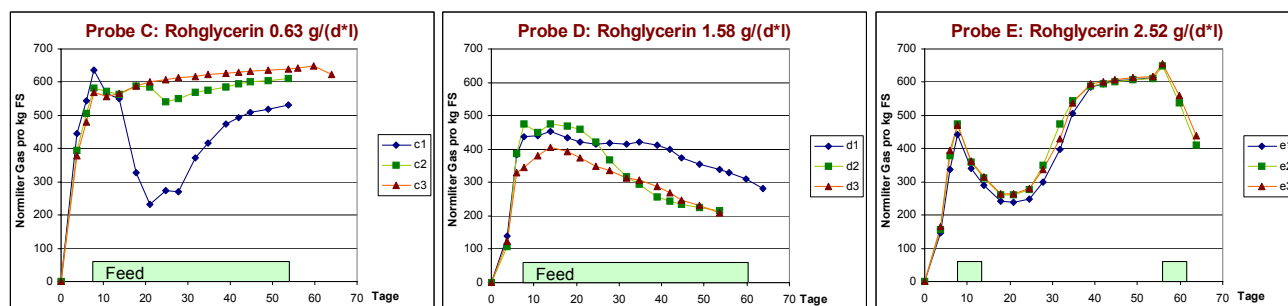
Der TS-Gehalt beim Impfschlamm beträgt 6.67 % und der oTS-Gehalt 66.5 % der TS. Der pH-Wert liegt beim Start der Versuche bei allen Ansätzen zwischen 7.9 bis 8.1.

Über die gesamte Versuchszeit von 64 Tagen produziert der Impfschlamm im Mittelwert 174 NI/kg TS ($\pm 10\%$), respektive 261 NI/kg oTS. Somit war der Impfschlamm relativ gut ausgegast.

Nach rund 20 Tagen ist aus der Cellulose ein Netto-Biogasvolumen (abzüglich Biogas aus dem Impfschlamm) von 648 NI/kg Cellulose ($\pm 1.2\%$) gebildet worden. Dies entspricht einem Abbau der Cellulose von 78 %. Die SOP schreibt vor, dass für einen gültigen Test das Nettonormvolumen der Referenz grösser als 400 NI/kg Cellulose sein soll (48 % Abbau). Diese Vorgabe wurde erfüllt.

Rohglycerin

In der Folge werden die Resultate aus den verschiedenen Substrat-Ansätzen dargestellt und beschrieben. In **Figur 19** wird die Biogasbildung von Rohglycerin in drei verschiedenen Feed-Konzentrationen dargestellt. Der grüne Balken markiert die Periode, in welcher den jeweiligen Ansätzen Substrat zugefüttert wurde. Die Feed-Menge wurde alle 3 bis 4 Tage jeweils unmittelbar nach Ablesen des Druckes mit einer Spritze zugegeben. Aus der Feed-Menge kann die durchschnittliche tägliche Raumbelastung ausgerechnet werden. Die Raumbelastung sowie die Biogasbildung beziehen sich auf die Frischmasse.



Figur 19: Biogasbildung von Rohglycerin bei 3 verschiedenen Feed-Konzentrationen

Zu Beginn der Versuche wurde den Ansätzen folgende Menge Rohglycerin zugegeben:

	<u>Startkonzentration</u>	<u>mittlere Raumbelastung beim Feeden</u>
Probe C:	1.26 g/l	0.63 g/(d·l)
Probe D:	3.15 g/l	1.58 g/(d·l)
Probe E:	5.04 g/l	2.52 g/(d·l)

Bei stabilem Abbau der Substrate muss die Biogasbildung pro kg Frischmasse nach einer Adaptionsphase immer konstant bleiben. Aus den kontinuierlichen Gärversuchen im Pilotfermenter kann festgestellt werden, dass pro Kilo Rohglycerin 870 Liter Biogas produziert wird. Dies wird in keinem der vorliegenden Versuche erreicht. Nach 7.7 Tagen wird bei der geringsten Konzentration (Probe C) rund 600 NI/kg Rohglycerin produziert. Ab diesem Zeitpunkt werden die Ansätze regelmässig gefüttert. Mit Ausnahme der Probe C1 (Ausreisser, da der Flaschenverschluss undicht war) wird konstant 600 NI/kg Rohglycerin gebildet mit einer leichten Tendenz zur Steigerung.

Mit der Fütterung wurde somit leicht zu früh begonnen, die Biologie kann aber die Feedmengen trotzdem laufend stabil abbauen.

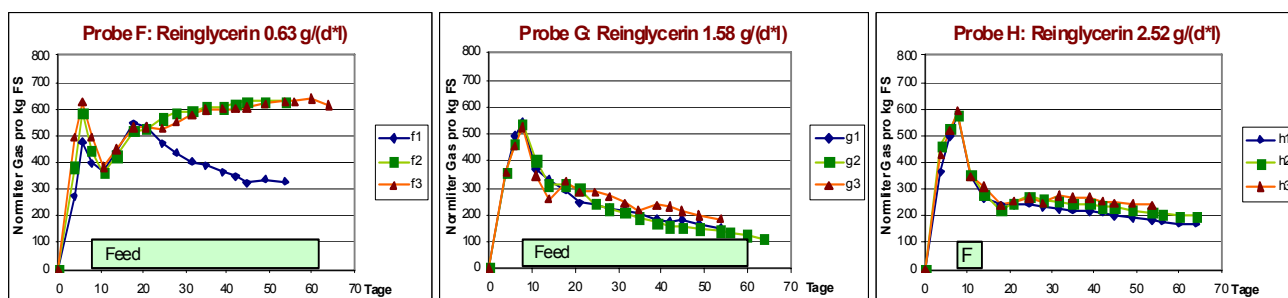
Bei der Probe D mit einer Raumbelastung von 1.58 g/(d·l) werden beim Start des Fütterns nur rund 450 NI/kg Rohglycerin erreicht. Der Abbau durch die Biologie ist zu diesem Zeitpunkt noch zu gering. Es wird in der Folge zwar noch einige Tage eine konstante spezifische Biogasbildung gemessen. Diese bricht aber zwischen Tag 17 und 38 bei allen drei Parallelansätzen ein. Dieses Verhalten deutet klar darauf hin, dass der Abbau an Rohglycerin zu gering war und sich somit das Substrat und/oder Zwischenabbauprodukte akkumuliert haben, welche den Prozess zur Versäuerung führten. Der pH-Werte in den Proben D1 und D3 liegen bei Versuchende bei 5.6, was als stark versäuert zu bezeichnen ist.

Bei der Probe E mit einer Raumbelastung von 2.52 g/(d·l) wird eindeutig ersichtlich, dass die spezifische Biogasbildung sofort sinkt, sobald mit dem Feeden begonnen wird. Daher wird die Fütterung nach 6 Tagen bereits gestoppt. Der Abbau von Rohglycerin erholt sich anschliessend wieder und steigt bis auf 600 NI/kg Rohglycerin. Eine weitere Zugabe von Rohglycerin nach 55 Tagen zeigt erneut, dass die Biologie mit dem Abbau dieser Konzentration nicht zu recht kommt. Die spezifische Biogasbildung sinkt sehr rasch. Eine Weiterführung dieser Fütterung hätte mit sehr grosser Wahrscheinlichkeit zu einer Versäuerung geführt. Beim Versuchsabbruch liegen die pH-Werte zwischen 7.7 bis 7.9.

Fazit: Nur bei einer Raumbelastung von 0.63 g/(d·l) konnte im Fed-Batch-Versuch einen stabilen Abbauprozess von Rohglycerin aufgezeigt werden.

Reinglycerin

In **Figur 20** sind die Versuchsansätze mit Reinglycerin dargestellt. Nach stöchiometrischer Berechnung wird bei einem vollständigen Abbau von Reinglycerin ein Biogasvolumen von 730 NI/kg Reinglycerin gebildet.



Figur 20: Biogasbildung von Reinglycerin bei 3 verschiedenen Feed-Konzentrationen

Zu Beginn der Versuche wurde den Ansätzen folgende Menge Reinglycerin zugegeben (analog wie bei Rohglycerin-Ansätzen):

	<u>Startkonzentration</u>	<u>mittlere Raumbelastung beim Feeden</u>
Probe F:	1.26 g/l	0.63 g/(d·l)
Probe G:	3.15 g/l	1.58 g/(d·l)
Probe H:	5.04 g/l	2.52 g/(d·l)

Bei fast allen Ansätzen dieser Serie steigt die spezifische Biogasbildung nach der Adaptionsphase auf etwa 600 NI/kg Reinglycerin (Probe G nur ca. 500 NI/kg). Nach dem Start mit den Feed-Intervallen geht die Biogasbildung vorerst bei allen Proben zurück. Nur die Proben F mit der tiefsten Konzentrationen erholen sich rasch und bauen in der Folge das Reinglycerin kontinuierlich ab, bei einer Biogasbildung von ca. 600 NI/kg Reinglycerin. Die Tendenz ist leicht steigend. Die Probe F1 gilt als Ausreisser, da der Verschluss undicht war. Bei den Proben G mit einer mittleren Raumbelastung von 1.58 g/(d·l) sinkt die spezifische Biogasbildung stetig bis gegen Ende des Versuches Gaserträge unter 200 NI/kg Reinglycerin erreicht werden. Die pH-Werte sinken auf 5.6 bis 5.8 bis zum Versuchende.

Die Proben H erholen sich selbst nach dem Einstellen der Fütterung nicht mehr. Die Gasbildung aus dem Rohglycerin stellt sich etwa ab dem Tag 20 komplett ein. Die pH-Werte sinken auf 5.4 bis 5.6 zum Versuchende.

Fazit: Nur bei einer Raumbelastung von 0.63 g/(d·l) konnte im Fed-Batch-Versuch einen stabilen Abbauprozess von Reinglycerin aufgezeigt werden.

Vergleich des Abbaus von Rohglycerin und Reinglycerin

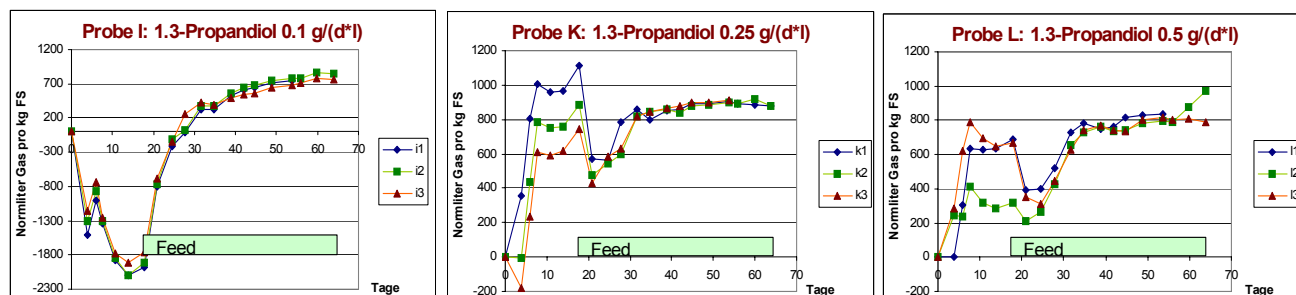
Wenn jeweils die Ansätze mit den gleichen Raumbelastungen miteinander verglichen werden, so kann festgehalten werden, dass sich die Adaptionsphasen (die ersten 7 Tage) kaum unterscheiden. Bei der geringsten Raumbelastung (0.63 g/(d·l)) scheint es, als würde das Reinglycerin beim Start mit der Fütterung eine Hemmung des Prozesses verursachen. Dies könnte aber ebenso gut in der Ungenauigkeit der Handhabung des Versuches liegen, da gerade die Startzugabe des Substrates sehr klein war und daher Messfehler stärker ins Gewicht fallen. Es wäre daher falsch, eindeutig auf eine Hemmung des Reinglycerins zu schliessen. Ab dem Tag 27 verhalten sich dann auch die verglichenen Proben (C und F) nahezu identisch. Dies zeigt sich auch, wenn das total produzierte Biogasvolumen bis zum Versuchende (Tag 54) betrachtet wird. Beim Rohglycerin (C2 und C3) wird im Mittel total 3.71 NI Biogas gebildet, beim Reinglycerin (F2 und F3) im Schnitt 3.73 NI.

Anders sieht es bei den höheren Raumbelastungen aus. Bei der Raumbelastung von 1.58 g/(d·l) sinkt die spezifische Biogasbildung Reinglycerin viel schneller als beim Rohglycerin. Bei der höchsten Raumbelastung erholt sich die Biologie beim Abbau von Reinglycerin nicht mehr, während sich die Biogasbildung beim Rohglycerin bei gleicher Feed-Strategie relativ rasch wieder erholt und auf die 600 NI/kg ansteigt.

Fazit: Bei höheren Raumbelastungen scheint die Biologie das Rohglycerin besser abbauen zu können als das Reinglycerin.

1.3-Propandiol

In **Figur 21** sind die Versuchsansätze mit 1.3-Propandiol dargestellt. Nach stöchiometrischer Berechnung wird bei einem vollständigen Abbau von 1.3-Propandiol ein Biogasvolumen von 884 NI/kg 1.3-Propandiol gebildet.



Figur 21: Biogasbildung von 1.3-Propandiol bei 3 verschiedenen Feed-Konzentrationen

Zu Beginn der Versuche wurde den Ansätzen folgende Menge 1.3-Propandiol zugegeben:

	<u>Startkonzentration</u>	<u>mittlere Raumbelastung beim Feeden</u>
Probe I:	0.2 g/l	0.1 g/(d·l)
Probe K:	0.5 g/l	0.25 g/(d·l)
Probe L:	1.0 g/l	0.5 g/(d·l)

Bei der Probe I tritt bei allen drei Parallelansätzen vorerst eine Hemmung ein. Es wird weniger Biogas gebildet als in den Kontrollen. Daher kommen die negativen Werte, die bezogen auf die Frischmasse sehr hoch ausfallen, da die angesetzte Menge an 1.3-Propandiol mit 0.2 g/l sehr gering ist. Es kann nicht bestätigt werden, dass diese Hemmung durch 1.3-Propandiol verursacht wird, denn die Ansätze mit höheren Konzentrationen zeigten nach einer kurzen Adaptionsphase eine hohe Biogasbildung (Probe K rund 800 NI/kg FS und Probe L rund 700 NI/kg FS).

Sobald ab dem Tag 17 mit dem Feeden begonnen wird, steigt in allen Proben die spezifische Biogasbildung rasch an. Bei der Probe I mit einer Raumbelastung von 0.1 g/(d·l) wird im Schnitt 780 NI/kg FS produziert, bei Probe K ist die Biogasbildung mit durchschnittlich 890 NI/kg FS am höchsten und bei der Probe L bei 810 NI/kg FS. Dies bei einer theoretisch möglichen Biogasproduktion von 884 NI/kg 1.3-Propandiol.

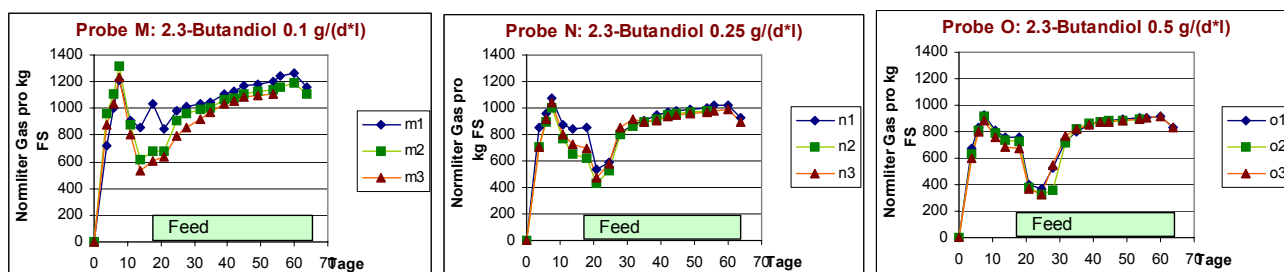
Bei der Probe I wird über die ganze Versuchsdauer rund 95 % vom gesamthaft zugegebenen 1.3-Propandiol abgebaut, bei Probe K sind es 100 % und bei Probe L rund 91 %.

Am Schluss wird in allen Flaschen pH-Werte von 7.3 bis 7.7 gemessen.

Fazit: Bei einer leicht erhöhten 1.3-Propandiol-Fütterung (0.25 g/(d·l)) wird der Abbau verbessert und führt zu einem vollständigen Abbau. Wird die Beschickung verdoppelt, so nimmt der Abbau etwas ab, wobei im vorliegenden Fall immer noch über 90 % abgebaut wurde.

2.3-Butandiol

In **Figur 22** sind die Versuchsansätze mit 2.3-Butandiol dargestellt. Nach stöchiometrischer Berechnung wird bei einem vollständigen Abbau von 2.3-Butandiol ein Biogasvolumen von 995 NI/kg 2.3-Butandiol gebildet.



Figur 22: Biogasbildung von 2.3-Butandiol bei 3 verschiedenen Feed-Konzentrationen

Zu Beginn der Versuche wurde den Ansätzen folgende Menge 2.3-Butandiol zugegeben (analog zu den 1.3-Propandiol-Ansätzen):

	<u>Startkonzentration</u>	<u>mittlere Raumbelastung beim Feeden</u>
Probe M:	0.2 g/l	0.1 g/(d·l)
Probe N:	0.5 g/l	0.25 g/(d·l)
Probe O:	1.0 g/l	0.5 g/(d·l)

Die spezifische Biogasbildung nimmt während der Adaptionphase bei allen Ansätzen sehr rasch zu. Allerdings ist ersichtlich, dass bei steigender Startkonzentration an 2.3-Butandiol eine geringere Biogasbildung erreicht wird. Bei der Probe M werden nach 7 Tagen eine mittlere spezifische Biogasbildung von 1250 NI/kg FS erreicht, bei Probe N sind es 1040 NI/kg FS und bei der höchsten Konzentration (Probe O mit 1.0 g/l Startkonzentration) noch 911 NI/kg FS.

Ab Tag 17 wird mit dem Feeden begonnen und zwar mit denselben Raumbelastungen wie bei den Ansätzen mit 1.3-Propandiol. Auffällig ist, dass nach einem kurzen, starken Anstieg der spezifischen Biogasbildung, diese auch nach dem Tag 30 bei allen Ansätzen leicht zunimmt. Es scheint, dass sich die Biologie kontinuierlich besser an das Substrat anpasst und den Abbau verbessern kann. Bis zum Schluss des Versuches werden in allen Ansätzen wieder die spezifischen Biogasbildungen erreicht, wie schon nach der ersten Adaptionphase beim Start des Versuches.

Bei der geringsten Raumbelastung von 0.1 g/(d·l) (Probe M) wird über die gesamte Versuchsdauer der beste Abbau nachgewiesen. Mit einem Abbau von 144 % wird mehr Biogas produziert als theoretisch erwartet. Bei der Raumbelastung von 0.25 g/(d·l) wird total 93 % vom zugegebenen 2.3-Butandiol abgebaut und bei der höchsten Raumbelastung von 0.5 g/(d·l) sind dies noch 84 %. Das 2.3-Butandiol wird zwar nicht mehr komplett abgebaut, aber alle Ansätze bleiben bis zum Versucheende stabil. Bei längerer Versuchsdauer ist jedoch eine Störung durch das aufkonzentrierende 2.3-Butandiol nicht auszuschliessen.

Am Schluss werden in allen Flaschen pH-Werte von 7.2 bis 7.8 gemessen.

Fazit: Geringe Konzentrationen an 2.3-Butandiol fördern den Abbau zu Biogas. Eventuell machen sich Synergieeffekte bemerkbar, so dass bestimmte zusätzliche Moleküle im vorliegenden Impfschlamm abgebaut werden können. Bei der Vergärung von Rohglycerin als Co-Substrat wurde dieser Effekt an der Universität für Bodenkultur (Wien) von *Amon et al.* bereits nachgewiesen [1]. Diese Substrate würden ansonsten nicht abgebaut werden (wie in der Kontrolle). Bei steigenden Raumbelastungen schon ab 0.25 g/(d·l) nimmt aber der Abbau ab.

Diskussion zu den Fed-Batch-Versuchen

Die mangelnde Abbauleistung von Roh- und Reinglycerin bei höheren Konzentrationen könnte durchaus mit der Bildung an den Zwischenprodukten 1.2-Propandiol und 2.3-Butandiol begründet werden. Denn die Fed-Batch-Versuche im Labor zeigten, dass bei höherer Konzentration der untersuchten Zwischenprodukte eine geringere Abbauleistung vorliegt.

Allerdings ist es nicht bewiesen, dass dies der einzige Grund ist. Vor allem die Tatsache, dass geringe Konzentrationen von 1.2-Propandiol gut abbaubar sind und bei 2.3-Butandiol sogar eine Stimulierung des Abbaus verursacht, müsste bei normalem Abbau dazu verhelfen, dass gar nie hemmende Konzentrationen auftauchen. Denn die Zwischenprodukte werden nicht schubweise dazugegeben (wie im Fed-Batch), sondern kontinuierlich aus dem Glycerin gebildet. Hier stellt sich die Frage, welcher Prozess schneller abläuft. Wenn die Bildung der Zwischenprodukte schneller abläuft als deren weitere Verarbeitung, so können sich tatsächlich zu hohe Konzentrationen von 1.2-Propandiol und 2.3-Butandiol akkumulieren.

Darum funktioniert die anaerobe Vergärung von Rohglycerin im einstufigen Prozess nur bei sehr geringen Raumbelastungen.

In diesem Falle könnte eine abgetrennte Hydrolyse-Stufe vor der Methanisierung Abhilfe schaffen. Die Zwischenprodukte würden sich in der Hydrolyse-Stufe akkumulieren, könnten aber kontinuierlich in entsprechend geringen Konzentrationen dem Hauptgärprozess zugegeben werden. Dieses Verfahren wäre in weiteren Versuchen zu testen. Derzeit laufen dazu Untersuchungen an der *Technischen Universität Cottbus* [6].

4.2.3 Ultrafiltration und Umkehrosmoseversuch

Die durchgeführten Berechnungen bezüglich der Mengen- und Nährstoffaufteilung bei der UF/UO basieren (**Tabelle 3**) nebst den Versuchsergebnissen auf Erfahrungswerten der Firma *MERITEC GmbH*. Je nach Zusammensetzung des Inputs (Substrat, Hofdünger), Verweilzeit und Abbau im Fermenter können die Resultate anders ausfallen.

Die UF wies während der gesamten Versuchsdauer von Beginn an geringe Fluxleistungen auf. Die Weiterbehandlung mit der UO zeigt im Vergleich zu ähnlichen Produkten sehr gute Fluxleistungen an der Membrane. Falls bei einem Pilotversuch nochmals eine geringe UF-Fluxleistung festgestellt wird, muss auf eine andere UF-Membrane zurückgegriffen werden.

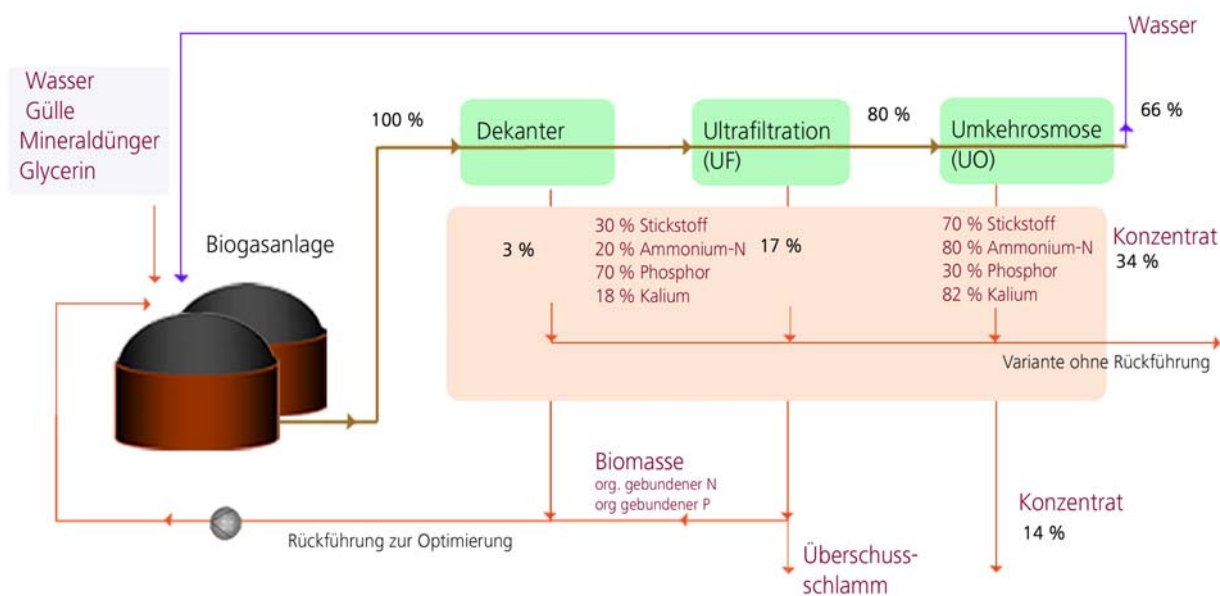
Es ist zu beachten, dass durch die Aufbereitungsanlage ein hochwertiger Dünger produziert wird, welcher eventuell verkauft werden kann. Das UF-Retentat stellt einen P-Dünger mit hohem Anteil an organischer Masse und das UO-Retentat einen flüssigen Mineraldünger mit hohen Gehalten an N und K dar.

Tabelle 3: Eigenschaften der einzelnen Produkte (Quelle: Analytik von Pilotversuch)

	Gärsubstrat	UF-Retentat	UF-Permeat	UO-Retentat	UO-Permeat
Menge Substrat	60.0	10.0	50.0	10.0	40.0
	[% FS]				
TS-Gehalt	3.89	7.09	1.59	4.92	0.01
	[% TS]				
oTS-Gehalt	63.00	68.70	46.50	50.90	69.40
	[kg/t FS]				
Stickstoff (Ntot)	3.100	4.500	1.900	5.200	0.041
Ammonium (NH ₄ -N)	1.800	2.300	1.800	4.700	0.040
Phosphor (Ptot)	0.634	1.120	0.112	0.340	0.005
Kalium (Ktot)	3.960	4.330	3.950	11.500	0.042
	[mg/kg]				
Stickstoff (Ntot)	3'100	4'500	1'900	5'200	41
Ammonium (NH ₄ -N)	1'800	2'300	1'800	4'700	40
Phosphor (Ptot)	634	1'120	112	340	5
Kalium (Ktot)	3'960	4'330	3'950	11'500	42

Schematische Darstellung einer Biogasanlage mit Ultrafiltration- und Umkehrosmoseanlage (Figur 23): Das Gärgut aus dem Fermenter wird zuerst zu einem Dekanter (z.B. Zentrifuge) geführt. Dort werden die groben Bestandteile und auch ein Teil der Biomasse vom übrigen Substrat abgetrennt. Das übrige Substrat gelangt zur Ultrafiltration bei welcher die gesamte Biomasse mit den darin gebunden Nährstoffen (vor allem Phosphor) zurückgehalten werden kann. Die Menge des Retentats kann durch die Anlage gesteuert werden und beträgt je nach Ausgangssubstrat maximal 17 bis 18 % der Gesamtmenge. Das Retentat des Dekanters und der Ultrafiltration kann entweder an die Landwirtschaft als wertvoller Dünger abgegeben oder zurück in den Fermenter geführt werden. Die Rückführung der Biomasse macht Sinn, da so ein stabiler Prozess erreicht wird. Allerdings wird dann auch Kalium zurück in den Fermenter geführt, wodurch sich auch dieses aufkonzentriert, falls mehr Kalium dem Prozess zugeführt als weggeführt wird. Damit sich die abgestorbene Biomasse und auch allfällige Hemmstoffe nicht aufkonzentrieren, muss dem Prozess Überschussschlamm entnommen werden. Dieser muss weggeführt und kann als Dünger eingesetzt werden. Das hygienisch einwandfreie Permeat der Ultrafiltration kann der Umkehrosmose zugeführt werden, bei welcher das Prozesswasser zurück gewonnen wird. Das Prozesswasser oder UO-Permeat hat die Qualität, um es in einen grösseren Vorfluter oder in eine Kläranlage einzuleiten. Da bei der Vergärung von Rohglycerin zur Verdünnung sowieso Wasser benötigt wird, macht es Sinn dieses erneut in der Anlage zu verwenden.

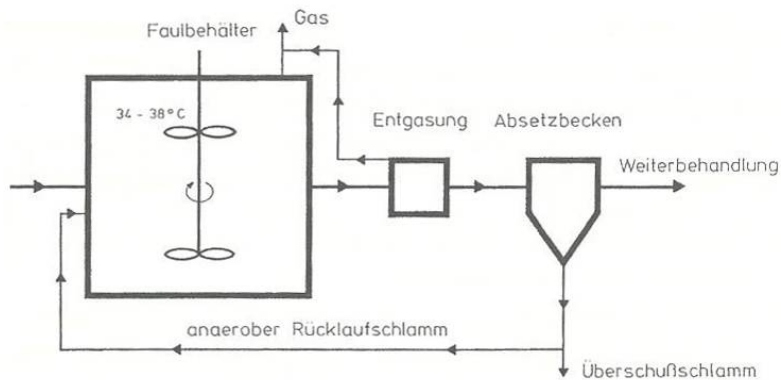
Nebst dem Prozesswasser fällt bei der UO auch ein konzentrierter Nährstoffdünger (UO-Retentat) an, welcher hauptsächlich den gelösten Stickstoff (Ammonium-N) und das Kalium enthält (14 bis 16 % der Gesamtmenge). Dieses Konzentrat kann in der Landwirtschaft verwertet werden.



Figur 23: Prinzipschema einer Biogasanlage mit UF/UO inkl. Mengen- und Nährstoffbilanz (vereinfacht)

4.3 Diskussion

Rückführung der Biomasse: Nach der Vergärung gelangt das Endprodukt über einen Überlauf ins Endlager oder in ein Absetzbecken. In dieser Einrichtung kann sich die Biomasse absetzen, von unten abgesaugt und zurück in den Fermenter befördert werden. Ähnliche Systeme sind derzeit in der Abwasserbehandlung anzutreffen.



Figur 24: Schema einer Biomasserückführung [5]

Rückhalt der Biomasse: Wie beim durchgeführten Versuch kann die Biomasse auch im Fermenter zurückgehalten werden. Dazu wird die Beschickung einmal in der Woche während mehreren Stunden unterbrochen und der Fermenter wird nicht mehr durchmischt. Während dieser Zeit kann sich die Biomassen absetzen und das überschüssige Gärgut kann oben abgesaugt und abgeleitet werden.

Membranreaktoren mit Ultrafiltration: In Kombination mit einer Ultrafiltration (ev. auch Umkehrosmose) könnte ein Membranreaktor realisiert werden. Dabei würde sich die Biomasse nicht absetzen, sondern bei der Ultrafiltration aufkonzentrieren und könnte anschliessend zurück in den Fermenter gebracht werden. Dadurch kann der Prozess bei einer höheren Raumbelastung gefahren oder allfälliges Gaspotenzial im Rückfuhrschlamm noch besser ausgenutzt werden (siehe Kapitel UF/UO).

Am einfachsten lässt sich die Auftrennung des Gärguts über eine Ultrafiltrations- und Umkehrosmoseanlage realisieren. Diese Variante ist jedoch mit relativ hohen Investitionskosten verbunden.

Gemäss Herrn Meier von der **MERITEC GmbH** (Planer und Hersteller der UF/UO-Anlage) ist vor der Realisierung einer solchen Anlage unbedingt ein Pilotierungsversuch durchzuführen, um die Werte des Versuchs und die Funktion zu verifizieren.

Es sollte auf keinen Fall ganz auf die **Güllezufuhr** verzichtet werden. Wie beim dritten Versuch ersichtlich wird, läuft der Prozess stabiler und reagiert somit weniger stark auf Veränderungen. Über die Gülle können auch Enzyme und Nährstoffe kostengünstig zugeführt werden.

Auf jeden Fall ist der Prozessüberwachung besondere Beachtung zu schenken. Da nur substratspezialisierte Bakterien vorliegen, reagieren diese sensibler auf Veränderungen.

5 Phase 3 - Umsetzung eines konkreten Bauprojekts

Von einer Biodieselanlage (BDA-600) der Firma *Mecan AG* fallen im Jahr rund 800 t/a Rohglycerin an. Beim vorliegenden Projekt soll Rohglycerin von 2 solchen Anlagen und somit 1'600 t/a Rohglycerin in einer Biogasanlage verwertet werden. Damit kann eine installierte elektrische Leistung von 500 kW erreicht und somit bis zu 3'500 MWh (1'000 Haushalte) Strom im Jahr produziert werden.

Die Fed-Batch-Versuche haben gezeigt, dass die Vergärung von Rohglycerin bei einer mittleren Raumbelastung von rund $0.65 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ während mindestens 60 Tagen stabil läuft. Bei höheren Raumbelastungen konnte weder im kontinuierlichen System des Pilofermenters noch in den Fed-Batch-Versuchen einen stabilen biologischen Prozess aufrechterhalten werden. Zudem fehlen Langzeit-Versuche über mehrere Monate bei einer niedrigen Raumbelastung. Trotzdem wurden die bisherigen Erfahrungen verwendet, um eine Auslegung für die Umsetzung eines konkreten Bauprojekts zu erstellen. In der Folge wird diese Auslegung detailliert beschrieben.

Da dem Prozess durch das Substrat Rohglycerin nur wenige, für die Biologie essentielle Nährstoffe, zugeführt werden, ist es notwendig, diese entweder über Mineraldünger oder Hofdünger zuzugeben. Bei einem jährlichen Rohglycerinanfall von 2 BDA-600 sind bis zu 60 t Mineraldünger oder je nach Hofdünger Art und System zwischen 1'000 und 6'000 t/a Hofdünger notwendig, um den Nährstoffbedarf zu decken. Da das Rohglycerin einen hohen Kaliumgehalt aufweist, muss dem Prozess zur Verdünnung 10'000 bis 16'000 L Wasser zugegeben werden. Die Hoffnung besteht, dass die benötigte Verdünnung stark reduziert werden kann. Wird in eine Ultrafiltrations- und Umkehrosmoseanlage (UF/EO-Anlage) investiert, kann dadurch Prozesswasser zurück gewonnen und wieder verwertet werden. Durch diese UF/EO-Anlage könnten die Endproduktmenge und somit Endlagervolumen bis zu zwei Drittel reduziert werden. Diesem Vorteil gegenüber stehen jedoch die hohen Investitionskosten dieser Aufbereitungsanlage. Ohne eine solche Gärgut-Aufbereitung wären bei einer 4-monatigen Lagerdauer bis zu 4'800 m^3 Lagervolumen notwendig. Jährlich fallen somit rund 14'500 t Gärgut (Flüssigdünger) an.

Die Nährstoffe, welche in Form von Gärgut oder mit UF/EO-Anlage in konzentrierter Form anfallen, werden idealerweise in der Landwirtschaft verwertet. Mit Hilfe von Düngungsnormen (kulturenspezifischer Nährstoffbedarf) kann die notwendige Fläche zur Ausbringung der Nährstoffe berechnet werden. Eine Fläche von 50 bis 70 ha wäre notwendig, je nachdem welche Kulturen gedüngt werden sollen. Zur notwendigen Flächenberechnung ist das Kalium der Ausschlag gebende Nährstoff.

Durch eine Wirtschaftlichkeitsberechnung von 5 Varianten - Nährstoffzugabe über Rinder-, Schweine-, Hühnergülle, Mineraldünger oder die Investition in eine UF/EO-Anlage - kann ausgesagt werden, dass die Anlage nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Ausschlaggebend hierfür ist vor allem die maximal mögliche Raumbelastung von ca. $1.0 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$, weshalb ein grosses Fermentervolumen erforderlich ist, was wiederum mit hohen Investitionskosten verbunden ist.

Je nach Variante bestehen Vor- und Nachteile. So müssen z.B. die grossen Mengen Hofdünger erst beschafft und die Endprodukte auch wieder verwertet werden können. Beim Resultat der Wirtschaftlichkeit geht es vor allem darum, den Aufwand und somit die Kosten für die Zu- und Wegfuhr der Nährstoffe bzw. der Endprodukte sowie der Vollzug in der Praxis abzuschätzen und so die beste Variante bestimmen zu können.

5.1 Lösungsweg – Methode

Nährstoffverhältnis: Das N:P-Verhältnis im Fermenter sollte etwa 5:1 betragen. Dementsprechend beträgt der Stickstoffbedarf 6 kg N/t CSB und der Phosphorbedarf 1.2 kg P/t CSB. Bei Fettsäuren und Proteinen liegt bei einem CSB:N:P-Verhältnis von etwa 800:5:1 ein ausgewogenes Nährstoffverhältnis vor

Der Schwefelgehalt soll dem Phosphorbedarf entsprechen, so dass sich ein Nährstoffbedarf von CSB:N:P:S von 800:5:1:1 ergibt [5].

Kalium ist der einzige Nährstoff, welcher im Rohglycerin in relativ hohen Konzentrationen vorhanden ist. Durch die Zugabe von grossen Rohglycerinmengen wird die Kaliumkonzentration bzw. der Salzgehalt im Fermenter zu hoch (max. 3 kg/t FS) und die Bakterien werden gehemmt. Deshalb ist es notwendig, dass das Rohglycerin mit Wasser oder Hofdüngern verdünnt wird. Damit die Kaliumkonzentration im Fermenter nicht ansteigt, wird das Rohglycerin im Verhältnis 1:10 mit Wasser oder Gülle verdünnt.

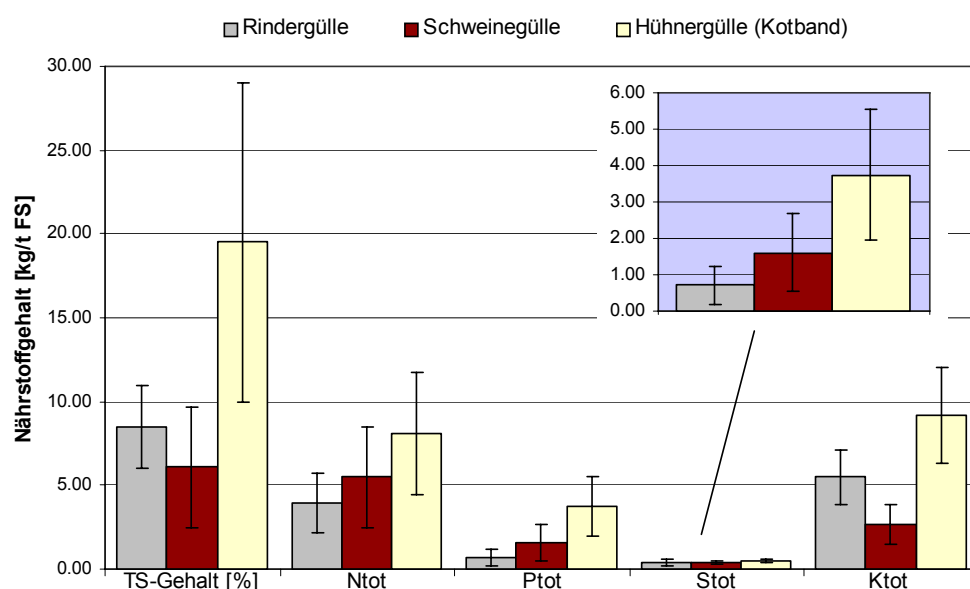
Als essentielle Spurenelemente für methanbildende Bakterien sind Nickel, Kobalt, Molybdän, Eisen, Selen und Wolfram nachgewiesen worden. Die Spurenelemente können in einer angefertigten Mischung bezogen und zugegeben werden. Die Kosten sind verhältnismässig gering, weshalb diese nicht weiter berücksichtigt werden.

5.1.1 Definition der Rahmenbedingungen zur Nährstoffberechnung

Bei den nachfolgenden Berechnungen wird davon ausgegangen, dass die Nährstoffe im oben genannten Verhältnis dem Prozess zugegeben werden müssen. Wie viel Nährstoffe und wie viele Hofdünger bzw. Mineraldünger dem Prozess zugegeben werden müssen, hängt somit von den Eigenschaften (Nährstoffgehalt, CSB, TS-Gehalt) des Rohglycerins, der Hofdünger und der Kunstdünger ab. Nachfolgend sollen die Ausgangssubstrate diesbezüglich genauer erläutert werden. Die Angaben des Rohglycerins stammen von einer Analyse, diejenigen der Hofdünger aus der Literatur und von Erfahrungswerten und die Angaben der Mineraldünger von einem Hersteller in der Schweiz. Je nach Region und Biodieselanlage können die Eigenschaften variieren.

Hofdünger: Die Nährstoffkonzentrationen und TS-Gehalte der Hofdünger können nicht genau angegeben werden, da diese von Betrieb zu Betrieb, aufgrund der verschiedenen Stallungssystemen und Fütterungen, unterschiedlich ausfallen. In der Literatur wird oftmals ein Bereich angegeben, welcher recht gross sein kann.

Die Berechnungen der Studie wurden mit den Mittelwerten dieser Bereichsangaben durchgeführt. Wird das Projekt konkret und steht die Verwertung von Hofdünger zur Diskussion sollten die Hofdünger auf deren genauen Eigenschaften untersucht und die genauen notwendigen Mengen neu berechnet werden.



Figur 25: Nährstoffgehalte der verschiedenen Hofdünger [FAT-Bericht, Wirzkalender, Bodengesundheitsdienst GmbH in Ochsenfurt, 2006]

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die Hühnergülle in der Regel einen deutlich höheren TS-Gehalt und auch mehr Nährstoffe enthält, als die Rinder- und Schweinegülle. Die Abbildung zeigt auch, dass Rindergülle tendenziell einen höheren TS- und Kaliumgehalt aufweist als eine Schweinegülle. Die Schweinegülle hat aber einen höheren Phosphor und Stickstoffgehalt. Der Schwefelgehalt von Rinder- und Schweinegülle unterscheidet nur gering, während dieser beim Hühnermist doppelt so hoch ist als bei den beiden andern.

Zur Vergärung sind Rinder- und Schweinegülle besser geeignet als die Hühnergülle, da diese weniger Fremdstoffe wie Sand und Kalk beinhalten. Die Hühnergülle hat einen Vorteil: zur Deckung der Nährstoffe sind aufgrund der höheren Konzentrationen weniger Volumen notwendig.

Mit folgenden Nährstoffgehalten wurde gerechnet:

Tabelle 4: Einbezogene Nährstoffgehalte der Hofdünger

	Wert [kg/t FS]			
	Rindergülle	Schweinegülle	Hühnergülle	Umrechnungsfaktor
TS-Gehalt	8.50	6.10	19.50	-
Stickstoff (Ntot)	3.95	5.50	8.09	-
Phosphor (Ptot)	0.71	1.60	3.75	2.29 (Ptot zu P ₂ O ₅)
Schwefel (Stot)	0.40	0.40	0.50	-
Kalium (Ktot)	5.49	2.67	9.15	1.20 (Ktot zu K ₂ O)

Mineraldünger: Eine Möglichkeit die notwendigen Nährstoffe dem Prozess beizugeben besteht darin, diese in Form von mineralischen Kunstdüngern zuzuführen. Nachfolgend werden mögliche Mineraldünger zur Deckung des Nährstoffbedarfs und deren Kosten erwähnt. Die aufgeführten Handelsdünger sind Mineraldünger, wie sie in der Schweiz üblicherweise eingesetzt werden. In der Schweiz kann der Dünger in Big-Bags in einer Menge von 700 kg bestellt werden.

Tabelle 5: Eingerechnete Mineraldünger inkl. Kosten bei Grossmengen

Düngerart/Düngername	Nährstoffgehalt	Preis [CHF/100 kg]
Harnstickstoff 46 %	Stickstoff: 46 %	69
Ammonsulfat granuliert 21% +24S	Stickstoff: 21 %; Schwefel: 24 %	52
Triplesuperphosphat 46%	Phosphor: 46 %	55

Nährstoffbedarf der Kulturen: Nachfolgend sind Düngungsnormen von Kulturen [10] aufgeführt. Um das Kalium zu verwerten, sollte das Endprodukt der Biogasanlage möglichst für eine Kultur mit hohem Kaliumbedarf verwendet werden. Kulturen mit hohem Kaliumbedarf sind insbesondere Kartoffeln, Zuckerrüben und Sonnenblumen. Einen tiefen Kaliumbedarf hingegen haben die Getreidekulturen.

Da die Möglichkeit besteht, dass zur Biodieselherstellung Raps angepflanzt wird, wird in dieser Studie vor allem diese Kultur in den Berechnungen berücksichtigt.

Tabelle 6: Eingerechnete Mineraldünger inkl. Kosten bei Grossmengen

Nährstoff	Bedarf Raps	Bedarf Kartoffeln	Bedarf Zuckerrüben	Bedarf Kunswiese (intensiv)	Bedarf Silomais	Bedarf Winterweizen
Stickstoff (Ntot) [kg/ha]	140	120	100	120	110	140
Phosphor (Ptot) [kg/ha]	35	39	41	35	50	31
Schwefel (Stot) [kg/ha]	80	20	34	28	20	23
Kalium (Ktot) [kg/ha]	117	333	275	200	208	75

5.1.2 Berechnung der notwendigen Gülle- und Mineralstoffmengen (inkl. Kosten)

Güllebedarf: Nachfolgend werden die notwendigen Güllemengen zur Abdeckung des Nährstoffbedarfs aufgezeigt. Wichtig ist auch die Kaliummenge (Kalium-Fracht), welche durch diese Hofdüngermenge zusätzlich in den Biogas-Prozess gebracht wird. Da zur Abdeckung des Schwefelbedarfs eine sehr hohe Rinder- und Schweinegüllemenge (~ 10'000 t/a) notwendig wäre, soll in erster Linie der Stickstoff oder Phosphorbedarf mit dieser Gülle gedeckt werden. Somit sind ca. 5'600 t Rindergülle oder ca. 3'500 t Schweinegülle notwendig. Welcher der beiden Nährstoffe in erster Linie gedeckt werden soll, hängt mit den entstehenden Mineraldüngerkosten zusammen, welche anfallen, um den restlichen Schwefelbedarf, aber auch für den restlichen Stickstoff- (bei Rindergülle) und Phosphorbedarf (bei Schweinegülle) zu decken.

Tabelle 7: Notwendige Güllemengen um den Nährstoffbedarf der Biogasanlage zu decken

Nährstoff	Güllemenge [t/d]	Güllemenge [t/a]	[t/a]
Rindergülle			
Stickstoff	14	4'957	
Phosphor	16	5'618	
Schwefel	27	9'828	
Kalium-Fracht auf Schwefelbedarf eingestellt			54
Kalium-Fracht auf Phosphorbedarf eingestellt			31
Schweinegülle			
Stickstoff	10	3'562	
Phosphor	7	2'479	
Schwefel	27	9'828	
Kalium-Fracht auf Schwefelbedarf eingestellt			26
Kalium-Fracht auf Phosphorbedarf eingestellt			10
Hühnergülle			
Stickstoff	3	1'005	
Phosphor	1	490	
Schwefel	3	1'049	
Kalium-Fracht auf Schwefelbedarf eingestellt			0.52

Durch den Einsatz von ca. 1'000 t/a **Hühnergülle** könnten alle drei notwendigen Nährstoffmengen der Anlage zugeführt werden, weshalb auch keine Mineralstoffdünger benötigt werden. Nachfolgende Tabellen zeigen die Berechnung der notwendigen Mineralstoffmengen bei der Zufuhr von Rinder- und Schweinegülle (Annahme Düngerart: Ammonsulfat granuliert).

Tabelle 8: Notwendiger Mineraldüngerbedarf und -kosten beim Rindergülleinsatz

Nährstoff	Bedarf minimal [t/a]	Zufuhr über Gülle [t/a]	Zufuhr über Mineraldünger [t/a]
Stickstoff	19.57	22.20	1.47
Phosphor	3.96	3.96	0.00
Schwefel	3.93	2.25	1.68
Düngerart	Düngermenge [t/a]	Total Kosten [CHF/a]	
Ammonsulfat granuliert 21%+24S	7.0	3'639	

Durch die **Rindergülle** (5'600 t/a) können 2.25 t des Schwefelbedarfs gedeckt werden. Die restlichen 1.68 t werden durch den Mineraldünger Ammonsulfat (21 % N und 24 % S) gedeckt. Durch die Zufuhr dieses Düngers wird zudem noch Stickstoff beigefügt, welcher in dieser Menge nicht notwendig wäre.

Tabelle 9: Notwendiger Mineraldüngerbedarf und -kosten beim Schweinegülleinsatz

Nährstoff	Bedarf minimal [t/a]	Zufuhr über Gülle [t/a]	Zufuhr über Mineraldünger [t/a]
Stickstoff	19.57	19.59	2.19
Phosphor	3.96	5.69	0.00
Schwefel	3.93	1.42	2.50
Düngerart	Düngermenge [t/a]	Total Kosten [CHF/a]	
Ammonsulfat granuliert 21%+24S	10.4	5'419.9	

Durch die **Schweinegülle** (3'500 t/a) können 1.42 t des Schwefelbedarfs gedeckt werden. Die restlichen 2.50 t werden durch den Mineraldünger Ammonsulfat (21 % N und 24 % S) gedeckt. Durch die Zufuhr dieses Düngers wird zudem noch Stickstoff beigefügt, welcher nicht notwendig wäre.

Mineraldüngerbedarf: Nachfolgend wird die notwendige Mineraldüngermenge zur Abdeckung des Nährstoffbedarfs aufgezeigt, falls keine Gülle zugeführt wird. In der Schweiz gibt es derzeit keinen Dünger, welcher nur Schwefel enthält. Da der Stickstoff sowieso auch mit Kunstdünger gedeckt werden muss, spielt dies keine Rolle. Die Berechnung zeigt, dass im Jahr rund 60 t Mineraldünger notwendig sind.

Tabelle 10: Berechnete notwendige Düngermengen und deren Kosten

Nährstoff	Düngerart	Düngermenge [kg/d]	Düngerpreis [CHF/d]	Total Kosten [CHF/a]
Stickstoff	Harnstoff 46 %/ Ammonsulfat granuliert 21 % + 24S	97.5	67.3	24'228.8
Phosphor	Triple superphosphat 46 %	23.9	12.4	4'478.5
Schwefel	Ammonsulfat granuliert 21 % + 24S	45.5	25.0	9'009.2
Total		167	104	37'716.6

5.1.3 Berechnung des Flächenbedarfs für die Ausbringung des Endproduktes

Durch das Rohglycerin aber auch durch die Zufuhr von Hofdüngern und somit den notwendigen Nährstoffen, sammeln sich diese nach der Vergärung in dem vergorenen Endprodukt (Dünger) wieder an. Die Nährstoffe werden idealerweise zurück in der Landwirtschaft gebracht. Mit Hilfe der Düngungsnormen lassen sich die notwendigen Flächen berechnen, welche notwendig sind, um die Nährstoffe zu verwerten. Da grosse Mengen Kalium bei der Rohglycerinmonovergärung anfallen, ist dies der Nährstoff, welcher bei der Flächenberechnung am meisten Bedeutung zukommt. Nachfolgend ist der Flächenbedarf für die Ausbringung der einzelnen Nährstoffe bei den Kulturen Raps, Silomais, Kunstwiese und Winterweizen dokumentiert.

Tabelle 11: Notwendiger Flächenbedarf um die anfallenden Nährstoffe auszubringen bei verschiedenen Kulturen (gemäss Düngungsnorm [10] ohne Umkehrosmose)

		Flächenbedarf Raps [ha]	Flächenbedarf SM [ha]	Flächenbedarf KW [ha]	Flächenbedarf WW [ha]
	Nährstofffracht [t/a]	Rindergülle			
Stickstoff (N _{tot})	21.04	15.0	19.1	17.5	15.0
Phosphor (P _{tot})	3.96	11.3	7.9	11.3	12.9
Schwefel (S _{tot})	3.93	4.9	19.6	14.0	17.1
Kalium (K_{tot})	83.6	71.7	40.1	41.8	111.5
		Schweinegülle			
Stickstoff (N _{tot})	21.76	15.5	19.8	18.1	15.5
Phosphor (P _{tot})	3.96	11.3	7.9	11.3	12.9
Schwefel (S _{tot})	3.93	4.9	19.6	14.0	17.1
Kalium (K_{tot})	62.3	53.4	29.9	31.2	83.1
		Hühnergülle			
Stickstoff (N _{tot})	19.57	14.0	17.8	16.3	14.0
Phosphor (P _{tot})	3.96	11.3	7.9	11.3	12.9
Schwefel (S _{tot})	3.93	4.9	19.6	14.0	17.1
Kalium (K_{tot})	53.32	45.7	25.6	22.9	71.1

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass Kalium der massgebende Nährstoff ist, da zur Verwertung der anderen Nährstoffe bedeutend weniger Fläche benötigt wird. Der unterschiedliche Bedarf an Fläche bei der Verwertung von Rinder-, Schweine- und Hühnergülle kommt vom Kalium, welche nebst dem Rohglycerin zusätzlich über diese Gülle in den Prozess gebracht wird. Aufgrund der hohen Kaliumgehalte in der Rindergülle wird bei der Verwertung dieser Variante mehr Fläche benötigt. Werden die Nährstoffe über Mineraldünger zugeführt, so kann davon ausgegangen werden, dass eine ähnliche Fläche wie bei der Variante mit Hühnergülle benötigt wird.

5.1.4 Berechnung der notwendigen Gülle- und Mineralstoffmengen beim Einsatz UF/VO

Bei der Variante UF/VO wird davon ausgegangen, dass nebst dem rückgeführten Prozesswasser nur falls notwendig zusätzliches Wasser verwendet wird. Dafür sollen rund 7'000 t Schweinegülle zugeführt werden, damit dem Prozess einerseits Nährstoffe zugeführt und andererseits Stabilität (Pufferung) gegeben wird. Wird die gesamte Biomasse, welche bei der Ultrafiltration und beim Dekanter anfällt, in die Fermenter zurückgeführt so könnten gemäss Analysen und Aussage [Meier MERITEC GmbH, 2007] rund 30 % des Stickstoffs, 70 % des Phosphors und nach der Annahme, dass sich der Schwefel ähnlich dem Phosphor verhält, rund 70 % des Schwefels wieder dem Prozess zur Verfügung steht. Zusammen mit der Schweinegülle könnte somit der gesamte Nährstoffbedarf abgedeckt werden.

Tabelle 12: Nährstoffzufuhr Variante UF/VO

Nährstoff	Bedarf minimal [t/a]	Zufuhr über Gülle [t/a]	Zufuhr über Rückführung [t/a]	[%] ¹⁾	Zufuhr total
Stickstoff	19.57	13.75	5.87	30.0	19.6
Phosphor	3.96	4.00	2.77	70.0	6.8
Schwefel	3.93	1.00	2.75	70.0	3.7

1) falls das gesamte UF-Retentat rückgeführt wird

5.1.5 Beschrieb der Varianten und Auslegung der Anlage

5.1.5.1 Definition der Rechnungsvarianten

Im nachfolgenden Kapitel sollen die Stoffe, welche für einen störungsfreien Betrieb und aufgrund der biologischen Notwendigkeit, nebst dem Rohglycerin, zusätzlich zugeführt werden müssen, genauer beschrieben werden. Dabei und somit auch bei der Auslegung der Anlage wurden verschiedene Annahmen getroffen, welche sich aus den Erkenntnissen des laufenden Pilotversuchs (Phase I und II) ergaben. Die Auslegung erfolgte aufgrund der folgenden entscheidenden Annahmen.

- Das zugegebene Rohglycerin muss im Verhältnis 1:10 mit Wasser oder Gülle verdünnt werden (wegen Kaliumgehalt). Dadurch wird bei einer Rohglycerinmenge von 1'600 t/a eine Verdünnungsmenge von 8'800 t/a benötigt. Aufgrund der hohen Verdünnung fallen somit grosse Mengen an Endprodukten an. Ausser es wird in eine Umkehrosmoseanlage investiert.
- Eine Raumbelastung über $1 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ darf nicht überschritten werden, da die Biomasse ansonsten das Rohglycerin nicht genügend abbauen kann und der Prozess nach einer gewissen Zeit zum Erliegen kommt. Die Fermenter sind dementsprechend grosszügig ausgelegt.

In der nachfolgenden Studie werden insgesamt 5 Varianten gerechnet. Die Varianten sollen zum einen verschiedene Möglichkeiten für einen Betrieb der Anlage und zum anderen die wirtschaftlichen Unterschiede der verschiedenen Betriebsmöglichkeiten aufzeigen. Folgenden Varianten werden gerechnet. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Stoffmengen der Varianten, von welchen die Wirtschaftlichkeit berechnet wird.

Tabelle 13: Stoffmengen- und Biogasertragsberechnung

Substrat	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
	[t/a]	Biogas [m ³ /d]	[t/a]	Biogas [m ³ /d]	[t/a]	Biogas [m ³ /d]	[t/a]	Biogas [m ³ /d]
Rindergülle (Milchvieh)	5'600	333	0	0	0	0	0	0
Schweinegülle	0	0	3'500	202	0	0	2'500	144
Hühnerkot (Kotband)	0	0	0	0	1'000	191	0	0
Rohglycerin	1'600	3'801	1'600	3'801	1'600	3'801	1'600	3'801
Wasser	8'800	0	10'900	0	13'400	0	0	0
Wasser von UF/VO	0	0	0	0	0	0	10'400	0
Rückführung Biomasse UF/VO	0	0	0	0	0	0	1'500	0
Total Substrat/Biogasertrag	16'000	4'134	16'000	4'003	16'000	3'992	16'000	3'945

Variante 1: Es wird nebst den oben genannten Rahmenbedingungen davon ausgegangen, dass die notwendigen Nährstoffe (in erster Linie Phosphor) hauptsächlich mit Rindergülle der Anlage zugeführt werden sollen. Da für die Deckung des Schwefelbedarfs eine sehr grosse Menge Rindergülle notwendig ist, soll der Schwefelbedarf über Mineraldünger gedeckt werden. Gülle- und Wassermenge, welche eingerechnet werden, ergeben eine Verdünnung des Rohglycerins im Verhältnis 1:10.

Variante 2: Es wird nebst den oben genannten Rahmenbedingungen davon ausgegangen, dass die notwendigen Nährstoffe (hier in erster Linie Stickstoff) hauptsächlich mit Schweinegülle der Anlage zugeführt werden sollen. Da die Schweinegülle viel Stickstoff und weniger Phosphor enthält wird mit erster Priorität der Stickstoffbedarf mit dieser Gülle gedeckt.

Auch hier wäre für die Deckung des Schwefelbedarfs eine sehr grosse Menge Schweinegülle notwendig. Deshalb soll der Schwefelbedarf über Mineraldünger gedeckt werden. Gülle- und Wassermenge, welche eingerechnet werden, ergeben eine Verdünnung des Rohglycerins im Verhältnis 1:10.

Variante 3: Es wird nebst den oben genannten Rahmenbedingungen davon ausgegangen, dass alle notwendigen Nährstoffe hauptsächlich mit Hühnergülle der Anlage zugeführt werden sollen. Da die Hühnergülle einen höheren TS-Gehalt und somit höhere Nährstoffgehalte als die Rinder- und Schweinegülle aufweist, kann der gesamte Nährstoffbedarf der Biomasse (inkl. Schwefel) mit Hühnergülle gedeckt werden, weshalb

keine Mineraldünger mehr notwendig sind. Gülle- und Wassermenge, welche eingerechnet werden, ergeben eine Verdünnung des Rohglycerins im Verhältnis 1:10.

Variante 4: Es wird nebst den oben genannten Rahmenbedingungen davon ausgegangen, dass zum Betrieb der Anlage zur Nährstoffzugabe hauptsächlich Schweinegülle zugeführt werden. Durch eine **Ultrafiltrations- und Osmoseanlage** soll ein Teil der Nährstoffe und des Wassers nach der Vergärung zurück gewonnen werden und im Kreis zurück in die Vergärung gebracht werden. Dabei kann die notwendige Wasser- und Güllemenge (ev. auch Mineralstoffmenge) sowie der Endprodukthanfall reduziert werden. Dadurch können der Aufwand und die Kosten auf der In- und Outputseite optimiert werden. Im Gegenzug entstehen Kosten bei der Investition in die Gülleaufbereitungs-Anlage und deren Betrieb. Die Rückführung des Wassers und somit die Wasser- und Güllezugabe, welche eingerechnet werden, ergeben eine Verdünnung des Rohglycerins im Verhältnis 1:10. Bei der Rückführung ist besonders der Aufkonzentrierung des Kaliums grosse Beachtung zu schenken.

Variante 5 (Mineraldünger): Es wird nebst den oben genannten Rahmenbedingungen davon ausgegangen, dass alle notwendigen Nährstoffe nur mit Mineraldünger der Anlage zugeführt werden. Dabei soll die Anlage mit einer UF/VO-Anlage mit all ihren Vor- und Nachteilen realisiert werden. In der Wirtschaftlichkeit werden die Mehrkosten und -einnahmen dargestellt.

Gesamtbeurteilung: Je nach Gegebenheiten der Region, ob zum Beispiel genügend Gülle vorhanden wäre, ob eher Milchvieh-, Schweine- oder Hühnerbetriebe in der Region des Biogasanlagenstandortes sind oder allenfalls auf Hofdünger ganz verzichtet werden soll, kann abgeschätzt werden, welche Variante beim entsprechenden Standort am ehesten in Frage kommt. Die Varianten sollen die Grössen und Mengen aufzeigen, damit eine grobe ökonomische und ökologische Gesamtbeurteilung gemacht werden kann.

In der folgenden Tabelle werden die Prozessparameter der einzelnen Varianten bei den genannten Stoffmengen ersichtlich.

Tabelle 14: Technische Prozessparameter der Stoffflüsse (Berechnungen)

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Einheit
tägliche Beschickungsmenge	44.4	44.4	44.4	44.4	[t/d]
oTS Fracht	5.23	4.55	4.45	4.40	[t/d]
TS im Input	14.52	13.10	13.45	10.67	[%]
TS im Output ¹⁾	10.10	9.26	9.70	6.96	[%]
Biogasertrag	4'134	4'003	3'992	3'945	[m ³ /d]
Methangehalt	64.2	64.7	64.6	64.8	[%]

1) Der berechnete TS-Gehalt ist aufgrund der Rohglycerinverwertung relativ hoch. Das Endprodukt ist jedoch trotzdem noch sehr flüssig

5.1.5.2 Definition der Ausgangssubstrate und -mengen:

Die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage steht und fällt immer mit dem Gasertrag. Deshalb ist es besonders wichtig, dass bei der Planung mit realistischen Substratangaben gerechnet wird. Der Bauherr wird deshalb gebeten, die Angaben der nachfolgenden Tabellen gründlich zu prüfen. Die Nährstoffgehalte der verschiedenen, einbezogenen Hof- und Mineraldüngern werden im Kapitel "Nährstoffe" beschrieben und in diesem Kapitel nicht weiter erwähnt.

Tabelle 15: Stoffdaten der Ausgangssubstrate (Frischsubstanz FS, Trockensubstanzgehalt TS, organischer Trockensubstanzgehalt oTS und Biogasertrag)

Substrat	TS [g/g von FS]	oTS [g/g von TS]	Biogasertrag [l/kg oTS]
Rindergülle (Milchvieh)	0.090	0.850	280
Schweinegülle	0.061	0.850	400
Hühnergülle (Kotband)	0.195	0.750	470
Rohglycerin ¹⁾	0.972	0.936	940

1) Die Qualität des Rohglycerins ist zu prüfen, da dadurch der Biogasertrag entscheidend beeinflusst wird. In vorliegender Studie wird auf Erfahrungswerte der *Genesys Biogas AG* zurückgegriffen.

5.1.5.3 Auslegung aufgrund der technischen Prozessparameter (Berechnungen)

Eine berechnete Verweilzeit von mind. 35 bis 40 Tagen ist zweckmässig. Eine minimale Verweilzeit von rund 25 Tagen sollte nicht unterschritten werden, da dadurch das Biogaspotential des Ausgangssubstrates nicht optimal genutzt werden kann. Aufgrund der tiefen Raumbelastung von $1.0 \text{ kg oTS}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$, welche maximal möglich ist, müssen die Fermenter dem entsprechend gross ausgelegt werden.

Tabelle 16: Auslegung aufgrund der technischen Prozessparameter (Berechnungen)

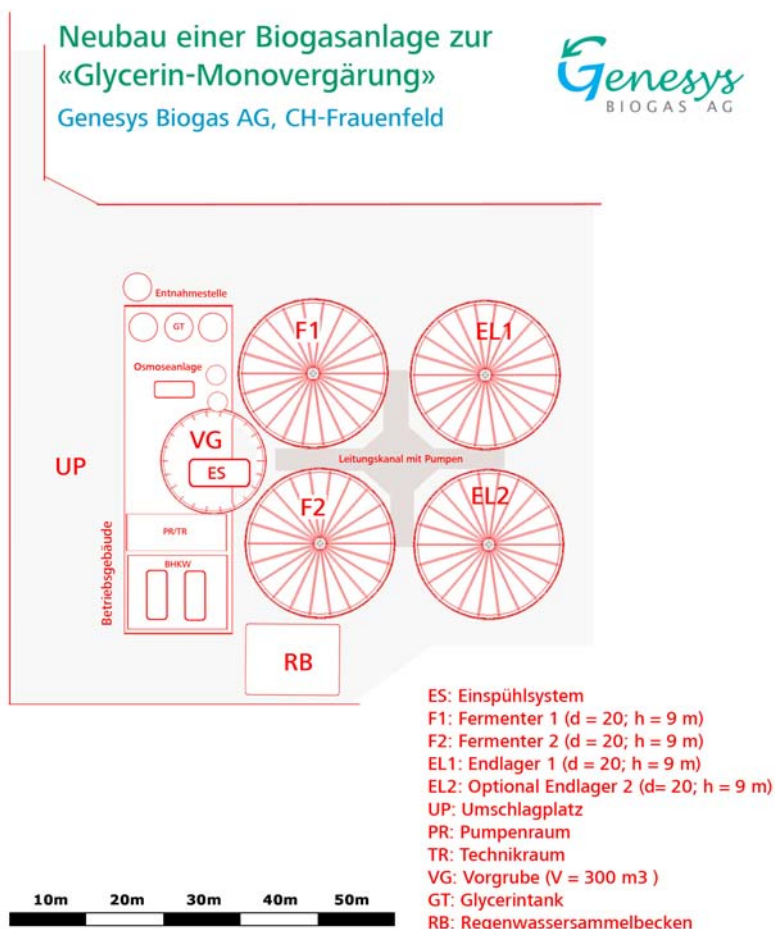
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Einheit
Fermenterdurchmesser (innen)	20.0	20.0	20.0	20.0	[m]
Fermenterhöhe	9.0	9.0	9.0	9.0	[m]
Fermenterbauvolumen (total, 2 Fermenter)	5'655	5'655	5'655	5'655	[m ³]
Fermenternutzvolumen (total, 2 Fermenter)	5'246	5'246	5'246	5'246	[m ³]
Betriebstemperatur	40	40	40	40	[°C]
Verweilzeit	118.0	118.0	118.0	118.0	Tage
Auslastung der Anlage bezogen auf BHKW	84.9	82.9	82.5	81.8	[%]
Angenommene Betriebstage pro Jahr	360	360	360	360	[d/a]
Raumbelastung	1.00	0.87	0.85	0.84	[kg oTS/V • d]
BHKW-Leistung elektrisch	526	526	526	526	[kW _{el}]
Betriebszeit BHKW	20.4	19.9	19.8	19.6	[h/d]

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Anlagenkomponenten und Funktion

Nachfolgend sind die Hauptkomponenten einer Biogasanlage zur Monovergärung von Rohglycerin aufgelistet. Je nach Gegebenheiten und bestehender Infrastruktur, sowie Variante kann auch auf einzelne Komponenten verzichtet werden.

- Annahme- und Umschlagplatz
- Sammel- und Vorgrube mit Sedimentationsschacht
- Eintrag für Gülle oder Mineraldünger inkl. Annahnebunker
- Div. Fermenter mit aufgebautem Gasspeicher
- Div. Endlager oder Lagunen (einige Endlager könnten allenfalls auch direkt bei den Landwirtschaftsbetrieben stationiert werden)
- Ev. Absetzbecken
- Betriebsgebäude mit Technik-, Pumpen-, und Elektroraum (inkl. BHKW)
- Rohglycerinlagertanks
- Regenwasserauffangbecken
- Ev. Ultrafiltration und Umkehrosmoseanlage



Figur 26: Mögliche Konzeption einer Biogasanlage zur Rohglycerinmonovergärung

5.2.2 Technische Anforderungen

5.2.2.1 Eintrag der Substrate (Gülle, Wasser, Mineraldünger, Rohglycerin)

Damit der biologische Prozess im Fermenter stabil läuft, müssen zusätzlich zum Rohglycerin noch andere Komponenten beigefügt werden. Dies sind insbesondere Wasser und/oder Gülle sowie gegebenenfalls Mineraldünger, wenn der Nährstoffbedarf nicht durch Gülle gedeckt werden kann. Die verschiedenen Komponenten werden idealerweise direkt mit dem Rohglycerin beschickt.

In einer Güllegrube (Vor- oder Sammelgrube) werden die notwendigen Güllemengen gesammelt und von dort kontinuierlich den verschiedenen Fermenter zudosiert. Um anfallendes Regenwasser beim Biogasprozess nutzen zu können, würde Platz und Dachwasser in einer Lagune oder Behälter gesammelt und von dort, über die Beschickungsleitung den Fermenter zugeführt werden.

Mineraldünger könnten über einen Dosierbehälter (Einspühsystem) in dieselbe Leitung und somit bei der Gülle- oder Wasserbeschickung mit der Gülle oder dem Wasser eingetragen werden. Das Rohglycerin wird entweder auch über diese Leitung oder idealerweise über eine separate Leitung beschickt, damit bei einem Störfall schnell reagiert werden kann.

Alle Fermenter werden gleichzeitig, identisch und kontinuierlich beschickt. Dabei verlässt dieselbe Menge (kontinuierliches System), welche beschickt wurden, den Fermenter über einen Überlauf und gelangt ins Endlager. Die Biomasse kann dort abgesetzt und dem Fermenter zurückgeführt werden. Alternativ könnten die Fermenter auch während einer Woche gefüllt, die Biomasse dann während ein paar Stunden abgesetzt und die wöchentlich beschickte Menge oben abgepumpt werden. So kann die Biomasse zurückgehalten werden. Bei der Investition in eine UF/VO-Anlage kann die Biomasse bei der Ultrafiltration zurückgeführt werden (folglich Biomassenrückhalt).

5.2.2.2 Notwendige Lagerkapazität und Endproduktmengen (berechnet)

Variante 1 bis 3 (und 5): Folgende Auflistung zeigt die Substratmengen, die beim Betrieb der Anlage anfallen und welche Lagerkapazitäten, für eine Lagerzeit von 4 Monaten, nötig sind. Da bei den ersten drei Varianten eine Verdünnung des Rohglycerins von 1:10 angestrebt wird, sind die Endproduktmengen bei diesen Varianten identisch. Die Endprodukte der Variante 4 werden separat aufgelistet.

- Endproduktmenge (Gärgut, ca. 9 % TS): 14'300 m³/a
- Notwendige Lagerkapazität für 4 Monate: ca. 4'800 m³

Der beim Stoff-Output im Vergleich zum Input feststellbare Massenverlust resultiert aus dem im Fermenter verdunsteten Wasser und dem hergestellten Biogas.

Aufgrund der notwendigen Lagerkapazität werden zwei Endlager (geschlossen/gedeckt) mit einem Volumen von 5'200 m³ (Nutzvolumen) eingeplant. Ob die Endlager mit einer Biomasserückführung ausgestattet werden soll, hängt vom System ab, welches realisiert werden soll (siehe Biomassenrückführung).

Auf jeden Fall würde es Sinn machen, verschiedene Endlager nicht bei der Biogasanlage, sondern direkt beim Verbraucher, dem Landwirt zu realisieren. Dieser hätte dann die Möglichkeit selbst zu entscheiden, wann er seine Flächen düngen möchte. Das Endprodukt hat aufgrund der Nährstoffzufuhr zum Biogasprozess auf jeden Fall einen höheren Nährstoffwert, was den Landwirten auch was Wert sein sollte (z. B. Ausbringkosten selber tragen). Das Gärgut kann beinahe mit mineralischen Düngern verglichen werden. Dies gilt vor allem dann, wenn eine UF/VO-Anlage betrieben werden soll.

Einen Ertrag durch den Verkauf der Endprodukte wurde in der Studie nicht berücksichtigt. Gegebenfalls könnte mit den betroffenen Landwirten vertraglich festgelegt werden zu welchen Bedingungen sie das Gärgut beziehen können (Transportkosten zu ihren Lasten, Gärgut selbst beziehen etc.)

Variante UF/VO: Bei der Variante mit UF/VO kann im Jahr bis zu 12'000 t Prozesswasser zurück gewonnen und zurück geführt werden, was sich entscheidend auf die notwendige Lagerkapazität und somit auch auf den Transport und die Ausbringung der Endprodukte auswirkt. Als Endprodukt fallen bei der UF/VO einerseits ein Nährstoffkonzentrat und andererseits Überschussschlamm an. Bei der Rückführung darf nicht immer die gesamte Menge in den Fermenter zurück geführt werden, damit überschüssige abgestorbene Biomasse

weggeführt werden kann. Je nach dem, wie viel Überschussschlamm weggeführt wird, fällt mehr oder weniger Endprodukt an.

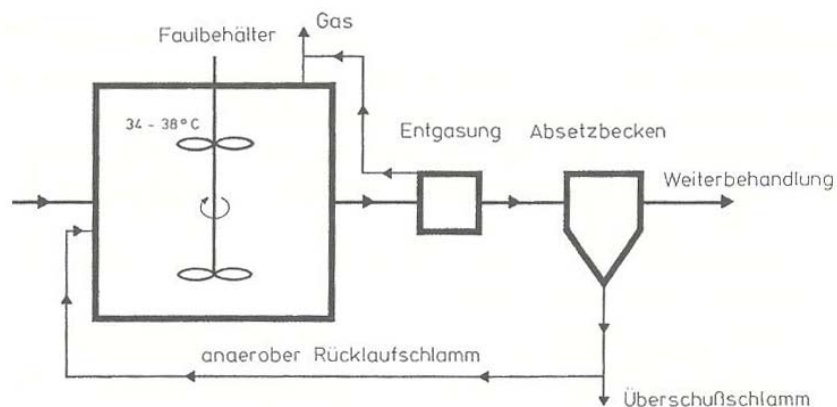
- Endproduktmenge (Konzentrat): 5'500 m³/a
- Notwendige Lagerkapazität für 4 Monate: ca. 1'850 m³

Dementsprechend reduziert sich die notwendige Lagerkapazität bei der Rückführung von Prozesswasser knapp um das dreifache.

5.2.2.3 Biomassenrückhalt

Die derzeitigen Versuche bezüglich der Rohglycerin-Monovergärung haben gezeigt, dass ein konventionelles kontinuierliches System (Nasssystem der Co-Vergärung) für die Rohglycerinmonovergärung nur beschränkt geeignet ist, da die Biomasse ausgewaschen und die Raumbelastung bzw. die Schlammbelastung zunehmen und der Prozess mit steigender Zugabe von Rohglycerin zum Erliegen kommt. Die Biomasse wird vor allem aus dem Grund ausgewaschen, da sie sich auf keinen festen Bestandteilen ansiedeln kann. Als Lösung muss die Biomasse entweder in den Fermenter zurückgeführt oder im Fermenter zurückgehalten werden. Welches System sich bei einer grossen Anlage am besten eignen würde, müsste noch genauer untersucht werden.

Rückführung der Biomasse: Nach der Vergärung gelangt das Endprodukt über einen Überlauf ins Endlager, eine Lagune oder ein Absetzbecken. In dieser Einrichtung kann sich die Biomasse absetzen, von unten abgesaugt und zurück in den Fermenter befördert werden. Ähnliche Systeme sind derzeit in der Abwasserbehandlung anzutreffen.



Figur 27: Schema einer Biomasserückführung [5]

Membranreaktoren mit Ultrafiltration: In Kombination mit einer Ultrafiltration (ev. auch Umkehrosmose) könnte ein Membranreaktor realisiert werden. Dabei würde sich die Biomasse nicht absetzen, sondern bei der Ultrafiltration aufkonzentrieren und könnte anschliessend zurück in den Fermenter gebracht werden. Dadurch kann der Prozess bei einer höheren Raumbelastung gefahren oder allfälliges Gaspotenzial im Rückfuhrschlamm noch besser ausgenutzt werden (siehe Kapitel UF/UO).

5.2.2.4 Kenndaten und Anforderung an die UF/VO-Anlage

Die nachfolgende Anlage wurde für eine Verarbeitungsmenge von 35'000 t/a ausgelegt. Als Richtpreis für die vorgesehene Menge wird davon ausgegangen, dass ca. 70 % dieser Investitionskosten anfallen.

Nachfolgende Tabelle zeigt den Lieferumfang und die Kosten, welche zusätzlich zur Biogasanlage durch die UF/VO-Anlage anfallen würden. Alle Angaben stammen von einer Richtofferte der Firma MERITEC GmbH (April 2007). Die Anlage sollte gesamthaft in einem entsprechenden Betriebsgebäude untergebracht sein.

Tabelle 17: Kosten und Amortisation UF/VO-Anlage

Kostenpunkt	Beschreibung	Kosten [CHF]
UF/VO-Anlage	Dekanter, Ultrafiltration, Umkehrosiose komplett geliefert und installiert inkl. - Elektrosteuerung inkl. Visualisierung zur schnellen und einfachen Bedienung - Technische Unterlagen (CAD-System) mit Schema, Klemmenplan und Stückliste - Software für SPS und Touch-Screen - Verrohrung, Starkstrominstallation, Pneumatikverschlauchung (exkl. Einspeisung in Steuerschrank) - Montage, Inbetriebnahme, Personalschulung	952'000
Amortisation	Kosten Amortisation und Kapitalverzinsung (5 %) Abschreibedauer 10 Jahre auf alle Teile	123'760
Stromkosten	13 kWh/m ³ Eingangsubstrat. Strompreis CHF 0.15/kWh	28'275
Unterhalt	Membranersatz, Wartung, CHF 0.6/m ³	8'700
Betreuung	20 min/d, wird im Arbeitsaufwand der Biogasanlage berücksichtigt	0
Total der Kosten		160'735

Die Betriebskosten der Aufbereitungsanlage fallen mit ca. CHF 161'000.- recht hoch aus. Die gesamte Anlage hat einen Platzbedarf von ca. 75 m² und könnte im Betriebsgebäude der Biogasanlage leicht untergebracht werden.

Tabelle 18: Kenndaten der UF/VO-Anlage

Stufe	Leistung Produktanforderung	Installierte Leistung (kW)	Leistungsbedarf (kW)	Platzbedarf
Dekanter (Fest-Flüssig-Trennung)	6 m ³ /h Gärsubstrat max. 3 % OS im Zulauf	11	6.6	20 m ² , 3 m Höhe
Ultrafiltration (UF)	4.7 m ³ /h UF-Permeat max. 1.5 % OS im Zulauf	50.5	35.3	25 m ² , 3 m Höhe mit Aussparung 2 x 2 m mit 5.5 m Höhe
Umkehrosiose (VO oder RO)	3.2 m ³ /h RO-Permeat Im Zulauf: max. 1.5 % Salzgehalt pH 2 bis 11 max. 60°C	37.5	22.5	25 m ² , 3 m Höhe
Steuerung				5 m ² , 3 m Höhe
Total				75 m²

Aus der Behandlung von 16'000 t Gärsubstrat resultieren gesamthaft etwa 5'500 t Endproduktmengen. Genauer geprüft werden muss die Möglichkeit einer Rückführung der Feststoffe bzw. des UF-Retentats zurück in die Fermenter, was eine massgebliche Leistungssteigerung der Fermenter zur Folge haben kann und die Endproduktmenge reduziert.

5.2.3 Kosten Gülle-Zufuhr und -wegfuhr

Die notwendigen Kosten für die Güllezufuhr und die Endproduktwegfuhr (Gärgut-Wegfuhr) wurden aus den notwendigen und anfallenden Mengen berechnet. Dabei wurden die Annahmen in den nachfolgenden Tabellen getroffen. Diese Annahmen können je nach Region bzw. Lage der Landwirte variieren. Die Ermittlung der genauen Kosten sollte einfach sein, da dazu ein Transportunternehmer angestellt werden kann.

Da zur Verdünnung grosse Mengen Wasser zugeführt werden muss, fallen vor allem bei der Gärgut-Wegfuhr hohe Kosten an. Dabei wurden die Ausbringkosten (Verteilung aufs Feld), welche beim Landwirt anfallen nicht berücksichtigt. Literaturwerte haben gezeigt, dass hierzu mit ca. CHF 10.-/t gerechnet werden kann. Die Tabellen zeigen, dass durch die UF/VO-Anlage die Endproduktmenge und somit die Kosten deutlich reduziert werden können.

Tabelle 19: Berechnung der Gülle-Zufuhrkosten

	Rindergülle	Schweinegülle	Hühnergülle	Umkehrosrose	Einheit
Zubr.menge flüssig	5'600	3'600	1'000	2'500	t
mittl. Transportdistanz	30	30	30	30	km
mittl. Transportmenge	20	20	20	20	m ³
Anz Fahrten flüssig	280	180	83	125	-
Distanz total (hin und zurück)	16'800	10'800	5'000	7'500	km
Benzinverbrauch					
Verbrauch	25	25	25	25	l/100 km
Benzinpreis	1.8	1.8	1.8	1.8	CHF/L
Benzin total	4'200	2'700	1'250	1'875	l
Kosten Benzin	7'560	4'860	2'250	3'375	CHF
Arbeitsaufwand					
Durchschn.geschw.	40	40	40	41	km/h
Zeitaufwand Fahrer	420	270	125	183	h
Lohn Fahrer	40	40	40	40	CHF/h
Kosten Fahrer	16'800	10'800	5'000	7'317	CHF
Kosten total	24'360	15'660	7'250	10'692	CHF

Tabelle 20: Berechnung der Gärgut-Wegfuhrkosten

	Gülle	Mineraldünger	Umkehrosrose	Einheit
Ausbr.menge flüssig	14'200	14'200	5'500	t
mittl. Transportdistanz	30	30	30	km
mittl. Transportmenge	20	20	20	m ³
Anz Fahrten flüssig	710	710	275	-
Distanz total (hin und zurück)	42'600	42'600	16'500	km
Benzinverbrauch				
Verbrauch	25	25	25	l/100 km
Benzinpreis	1.8	1.8	1.8	CHF/L
Benzin total	10'650	10'650	4'125	l
Kosten Benzin	19'170	19'170	7'425	CHF
Arbeitsaufwand				
Durchschn.geschw.	40	40	40	km/h
Zeitaufwand Fahrer	1'065	1'065	413	h
Lohn Fahrer	40	40	40	CHF/h
Kosten Fahrer	42'600	42'600	16'500	CHF
Kosten total	61'770	61'770	23'925	CHF

Die Kosten für die Ausbringung beim Landwirt aufs Feld wurden in der Wirtschaftlichkeit nicht berücksichtigt. Diese betragen zusätzlich zu den Transportkosten in der Schweiz ca. CHF 5.5/t Substrat.

5.2.4 Wirtschaftlichkeit

5.2.4.1 Schema Stofffluss und Übersicht der Varianten

Nachfolgend sind die verschiedenen wichtigen Kriterien zur Beurteilung der Varianten in einer Übersicht dargestellt. Wichtige Kriterien sind vor allem der notwendige Hofdünger- oder Mineralstoffbedarf, die Endproduktmengen, sowie der Wasserbedarf. Je nach Gegebenheiten am Biogasanlagenstandort kann eine der Varianten vielleicht ausgeschlossen werden.

Tabelle 21: Übersicht der anfallenden Kosten der verschiedenen Varianten

	Variante 1 - Rindergülle	Variante 2 - Schweingülle	Variante 3 - Hühnergülle	Variante 4 - Umkehrosmose	Variante - Mineralstoffdünger	Einheit
Minimaler Güllebedarf (auf Phosphor/Stickstoff bezogen)	5'600	3'600	1'000	2'500	0	t/a
Kosten Gülle-Zufuhr	24'360	15'660	7'250	10'692	0	CHF/a
Minimaler Düngerbedarf (Mineralsdünger)	7	10	0	0	60	t/a
Kosten Mineraldünger	3'639	5'420	0	0	37'717	CHF/a
Minimaler Flächenbedarf (Raps, auf Kalium bezogen)	72	53	46	51	45	ha
Wegfuhrmenge	14'200	14'200	5'500	5'500	14'200	t/a
Kosten Gärgut-Wegfuhr	61'770	61'770	61'770	23'925	61'770	CHF/a
Notwendige Wassermenge	10'400	12'400	15'000	5'600	16'000	t/a
Investitionskosten UF/UO	0	0	0	952'000	0	CHF
Amortisation UF/UO	0	0	0	123'760	0	CHF/a
Kosten Unterhalt und Betrieb UF/UO	0	0	0	36'975	0	CHF/a
Reduktion Lagerkosten	0	0	0	-24'000		CHF/a
Total der Kosten	89'769	82'850	69'020	171'352	99'487	CHF/a

5.2.4.2 Investitionskosten

Tabelle 22: Investitionskostenabschätzung der Biogasanlage zur Rohglycerin-Monovergärung

Gruppe	Beschreibung	Variante 1 bis 3 [CHF]	Variante 4 [CHF]
2 x Fermenter	Fermenter (d = 20 m, h = 9 m), $V_B = 2'800 \text{ m}^3$, $V_N = 2'250 \text{ m}^3$ mit Mittelpilz und integrierter Isolation auf der Unter- und Aussenseite, inkl. Drucktüre 80x60 cm aus Edelstahl, Wärmedämmung, Betonschutzfolie, Kunststoffeinlagen, Eternit-Schachtfutter, Kernlochbohrungen etc.	410'000	410'000
Fermenter Zubehör für 2 Fermenter	Fermenterheizungssystem, Schaugläser, Ex-Leuchte, Fermenterrührwerk inkl. Halterung und Podest, Über-, Unterdrucksicherung, Gasspeicher, Kompressor, Entschwefelungseinheit, Niveausonde, Sicherheitsschwimmer, Holzdecke, Aussenverkleidung etc.	365'000	365'000
2 x Nachgärer/Endlager 1 x Endlager bei Variante 4	Nachgärer (d = 20 m, h = 9 m), $V_B = 2'800 \text{ m}^3$, $V_N = 2'250 \text{ m}^3$ mit Mittelpilz, inkl. Drucktüre 80x60 cm aus Edelstahl, Wärmedämmung, Betonschutzfolie, Kunststoffeinlagen, Eternit-Schachtfutter, Kernlochbohrungen etc.	365'000	182'500
Nachgärer/Endlager Zubehör für 2 Behälter 1 x Zubehör bei Variante 4	Schaugläser, Ex-Leuchte, Nachgärrührwerk inkl. Halterung und Podest, Über-, Unterdrucksicherung, Gasspeicher, Kompressor, Entschwefelungseinheit, Niveausonde, Sicherheitsschwimmer, Holzdecke, Aussenverkleidung etc.	250'000	250'000
Gasinstallationen	Gasmagnetventilgruppe, Gasentnahme, Gasleitungen, Kondensatschacht, Aktivkohlefiltergehäuse, Gaskühlung, Gaszähler, Not-Gasfackel etc.	75'000	75'000
Vor- und Sammelgrube	Betongrube, geschlossen (d = 9 m, h = 3 m, $V_B = 300 \text{ m}^3$, $V_N = 190 \text{ m}^3$), Einwurf inkl. Abdeckung, Aussparungen etc.	75'000	75'000
Vor- und Sammelgrube Zubehör	Tauchmotorrührwerk, Reissmixpumpe, Tauchkolbenpumpe, diverses Installationsmaterial	20'000	20'000
Feststofftechnik	Einspühsystem Börger	95'000	95'000
Technikcontainer inkl. Elektro- raum und BHKW	Container zu 526 kW-BHKW inkl. Doppelflügeltür, Zu- und abluftöffnungen mit Wetterschutzgitter, angebaute Wärmeauskopplung, elektrische Verkabelung bis Schaltschrank, Gasregelstrecke, Notkühlereinheit, Abgasanlage inkl. Schalldämpfer, Belüftung mit Ventilator, Abteil für Steuerschrank, Einspeiseschrank und Computer, Heizkreisverteiler	595'000	595'000
	BHKW-Kompaktmodul mit MAN Gasmotor (elektrische Leistung: 525 kW, thermische Leistung: 558 kW) inkl. Wärmetauscher für Motorkühlkreislauf, Pumpen, Sicherheitseinrichtungen, Ausdehnungsgefäss, Abgaswärmetauscher etc.		
Elektrisches	Steuerungsschrank, Computer für Visualisierung, Überwachung und Steuerung der gesamten Anlage, Sicherheitseinrichtungen, EW-Einspeiseschrank, Elektroinstallation etc.	125'000	125'000
Netzanbindung	Leitungen, Transformator	150'000	150'000
Heizung	Plattenwärmetauscher für Fernwärmeabgang, Pumpen, Heizverteiler, hydraulische Weiche, Fernwärmeleitung zu Fermenter, Membran-Druckausdehnungsgefäss, etc.	55'000	55'000
Gülletechnik	Pumpen, Spezialreaktorüberlauf, Kompletzentleerung, Leitungen, diverse Schieber und Bögen, Sammelbehälter, Rührwerk und -leitungsmontage, Leitungskanal inkl. Baumeisterarbeiten	250'000	250'000
Betriebsgebäude	Bodenplatte, Maurerarbeiten, Dach, Verschalung und Tore, etc. (20 x 40 m)	320'000	320'000
Wasserbecken Regenwasserrückhalt	Grube inkl. Folie: ($V = 1'000 \text{ m}^3$) mit Aushub (3 m Tiefe; ebenes Terrain)	40'000	40'000
Baumeisterarbeiten	Aushub, betonierte Plätze, Kiesplätze, Fundamente, Werkleitungen etc.	260'000	260'000
Vorprojekt- und Projektphase	Machbarkeitsstudie, Detailstudien, Bauprojekt, Schätzung der Baukosten und Termine, Baubewilligungsverfahren, Kostenvoranschlag	80'000	80'000
Vorbereitungs-, Ausführungs- und Abschlussphase	Provisorische Ausführungspläne, Ausschreibungen, Analyse der Angebote, Vergabungsanträge, Terminplan, Unternehmer- und Lieferantenverträge, Ausführungspläne, Bauleitung, Schlussabrechnung, Dokumentation über das Bauwerk, Leitung der Garantiearbeiten	190'000	190'000
Biotechnologische Betreuung	Biotechnologische Betreuung "BiogasSTART": 12 Monate Betreuung Gärprozess zum schnellen und sicheren Anfahren des Fermenters, inkl. regelmässiger Probenahme und Laboranalyse, Inbetriebnahme, Prozessbetreuung und Schulung	15'500	18'000
Wartung und Unterhalt	Garantiewartung 12 Monate	12'000	14'000
Unvorhergesehenes	3 % der Investitionskosten	112'425	107'085
	Kosten Total exkl. MWSt.	3'859'925	3'676'585
Umkehrosmose/Ultrafiltration	Zur Nährstoffauftrennung und Rückführung von Wasser	0	1'088'000
	Kosten Total exkl. MWSt.	3'859'925	4'764'585

5.2.4.3 Wirtschaftlichkeit

Tabelle 23: Wirtschaftlichkeitsberechnung der verschiedenen Varianten

Technische Angaben zum BHKW und Biogas	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Einheit	Mineraldünger (Zusatzkosten zu Var. 4)
Leistung elektrisch BHKW	526	526	526	526	[kW]	
Wirkungsgrad elektrisch BHKW	0.4039	0.4039	0.4039	0.4039	[-]	
Leistung thermisch BHKW	558	558	558	558	[kW]	
Wirkungsgrad thermisch BHKW	0.428	0.428	0.428	0.428	[-]	
Heizwert Biogas	6.42	6.47	6.46	6.48	[kWh/m ³]	
Betriebsdaten						
Biogasertrag	4'134	4'003	3'992	3'945	[m ³ /d]	
Betriebsstunden	20.38	19.90	19.79	19.63	[h/d]	
Energieerträge						
Tagesstromertrag	10'719	10'467	10'411	10'328	[kWh/d]	
Tageswärmeertrag	11'371	11'104	11'044	10'956	[kWh/d]	
Jahresstromertrag	3'858'805	3'768'252	3'747'811	3'717'991	[kWh/a]	
Jahreswärmeertrag	4'093'561	3'997'500	3'975'815	3'944'181	[kWh/a]	
Kosten						
Grundkosten Kompakt-Biogasanlage	3'859'925	3'859'925	3'859'925	3'676'585	[CHF]	
Kosten Amortisation und Kapitalverzinsung (5 %) Biogasanlage	473'533	473'533	473'533	451'159	[CHF/a]	-12'350
Grundkosten UF/UO-Anlage	0	0	0	952'000	[CHF]	
Kosten Amortisation und Kapitalverzinsung (5 %) UF/UO	0	0	0	123'760	[CHF/a]	
Kosten Gülle-Zufuhr (Transport)	24'360	15'660	7'250	10'692	[CHF/a]	-10'692
Kosten Gärgut-Wegfuhr (Transport)	61'770	61'770	61'770	23'925	[CHF/a]	
Biotech-Service	15'500	15'500	15'500	18'000	[CHF/a]	
Betreuung und Service Biogasanlage mit BHKW (Personal)	50'000	50'000	50'000	50'000	[CHF/a]	
Management (Koordination, Buchhaltung etc.)	60'000	60'000	60'000	60'000	[CHF/a]	
Versicherungen (Feuer, Haftpflicht,...)	14'000	14'000	14'000	16'000	[CHF/a]	
Analytik (Schwermetalle, Nährstoffe etc.)	8'000	8'000	8'000	13'000	[CHF/a]	
Unterhalt Biogasanlage (Material für Unvorhergesehenes)	22'562	22'562	22'562	21'525	[CHF/a]	
Servicekosten BHKW (Material)	57'882	56'524	56'217	55'770	[CHF/a]	
Kosten Kunstdüngerzukauf	3'639	5'420	0	0	[CHF/a]	37'717
Betriebskosten Umkehrosmose/Ultrafiltration (Strom, Unterhalt, Wartung)	0	0	0	36'975	[CHF/a]	
Total Kosten Biogasanlage pro Jahr	791'246	782'969	768'832	880'806	[CHF/a]	14'675

Technische Angaben zum BHKW und Biogas	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Einheit	Mineraldünger (Zusatzkosten zu Var. 4)
Eigenverbräuche						
Stromeigenverbrauch Biogasanlage	192'940	188'413	187'391	185'900	[kWh/a]	
Stromverbrauch UF/UO	0	0	0	188'500	[kWh/a]	
Wärmeeigenverbrauch Biogasanlage	1'228'068	1'199'250	1'192'744	1'183'254	[kWh/a]	
Überschüsse						
Stromüberschuss pro Jahr in kWh	3'665'865	3'579'840	3'560'420	3'532'091	[kWh/a]	
Stromüberschuss pro Jahr in Anzahl Haushalte	1'047	1'023	1'017	1'009	[Haushalte]	
Wärmeüberschuss pro Jahr in kWh	2'865'493	2'798'250	2'783'070	2'760'926	[kWh/a]	
Wärmeüberschuss pro Jahr in Liter Heizöl-Äquivalenten	287	280	278	276	[t Heizöl äq.]	
Erträge						
Ertrag Stromverkauf EW	769'832	751'766	747'688	529'814	[CHF/a]	
Ökostromzuschlag pro Jahr	0	0	0	0	[CHF/a]	
Ertrag total für Stromproduktion	769'832	751'766	747'688	529'814	[CHF/a]	
Ertrag durch Wärmeverkauf	0	0	0	0	[CHF/a]	
Ertrag durch Entsorgung	0	0	0	0	[CHF/a]	
Ertrag durch Düngerverkauf	0	0	0	0	[CHF/a]	
Total Einnahmen Biogasanlage pro Jahr	769'832	751'766	747'688	529'814	[CHF/a]	0
Reingewinn						
Reingewinn Biogasanlage	-21'414	-31'202	-21'144	-350'992	[CHF/a]	-14'675
Arbeitsertrag pro Jahr für Management, Betreuung und Wartung						
Arbeitsertrag	110'000	110'000	110'000	110'000	[CHF/a]	
Schlussrechnung Reingewinn und Arbeitsertrag						
Ertrag Biogasanlage	88'586	78'798	88'856	-240'992	[CHF/a]	-14'675
Mindereinnahmen Ausbringung (ca. CHF 5.5/t)	83'230	83'230	83'230	31'075	[CHF/a]	
Reingewinn inkl. Ausbringung	-104'644	-114'432	-104'374	-382'067	[CHF/a]	-14'675

5.3 Diskussion

Die geplante Anlage mit einer Leistung von 500 kW_{el} kann nicht wirtschaftlich betrieben werden. Ausschlaggebend hierfür ist vor allem die maximal mögliche Raumbelastung von ca. 1.0 kg oTS/(d·m³), weshalb ein grosses Fermentervolumen erforderlich ist, was wiederum mit hohen Investitionskosten verbunden ist.

Am rentabelsten scheint die Variante 3, bei welcher mit der Zufuhr von **Hühnergülle** gerechnet wird. Nach der Berechnung ist der Güllebedarf zur Nährstoffabdeckung aufgrund der höheren Gehalte in der Gülle am geringsten. Betrachtet man den Unterschied der Verluste der ersten 3 Varianten auf die gesamten Kosten und Einnahmen der Anlage, so scheint dieser relativ gering zu sein (CHF 300 bis 10'000). Bei einer Beurteilung, welche der ersten Varianten besser ist, sollten deshalb eher die Rahmenbedingungen gewertet werden. Dies sind insbesondere die notwendige Gülle-, Mineralstoff- und Wassermenge sowie das Vorhandensein dieser Stoffe in der Umgebung.

Variante 4 mit **UF/VO** weist aufgrund der hohen Investitions- und Betriebskosten der Aufbereitungsanlage deutlich mehr Verlust auf als die anderen drei Varianten. Es ist jedoch zu beachten, dass bei den anderen Varianten angenommen wird, dass das Wasser kostenlos und in uneingeschränkter Menge zur Verfügung steht. Angesichts der Klimaerwärmung und der steigenden Wasserknappheit kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Wasser nicht grenzenlos verwendet werden kann.

Müssten die Hofdüngermengen der Varianten 1 bis 3 von weit her transportiert werden und könnten allenfalls nicht genügend Hofdünger oder auch Wasser zur Verfügung gestellt werden, so kann auf die UF/VO-Anlage nicht verzichtet werden. Die UF/VO-Anlage hat zudem den Vorteil, dass flexibler reagiert werden kann, falls einer der Rohstoffe (Gülle, Wasser) nicht mehr zur Verfügung stehen würden. Zudem kann durch die Biomassenrückführung der Prozess und somit die Wirtschaftlichkeit weiter optimiert werden.

Durch die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Varianten kann weiter folgendes ausgesagt werden:

Positiv auf die Wirtschaftlichkeit würde sich auswirken:

- Die Wärmenutzung ist zu prüfen. In vorliegender Studie wurde weder eine betriebsinterne Wärmenutzung noch ein Wärmeverkauf berücksichtigt. Theoretisch stehen knapp 2'800 MWh Wärme (entspricht ca. 280'000 t Heizöl) zur Verfügung. Die Wärme kann vor Ort verwendet oder an Dritte verkauft werden. Die anfallende Wärme kann zur Beheizung von Gebäuden, zur Produktion von Warmwasser, für die Beheizung von industriellen Prozessen oder anderweitig verwendet werden. Eine Nutzung der anfallenden Wärme würde die Wirtschaftlichkeit der Anlage positiv beeinflussen.
- Unterstützungsbeiträge (z.B. von Regierung für Pilotanlage)
- Bei allen Varianten, insbesondere bei der Variante mit UF/VO ist zu beachten, dass durch die Anlage hochwertige Dünger produziert werden, welche eventuell verkauft werden können. Das UF-Retentat stellt einen hochwertigen P-Dünger mit hohem Anteil an organischer Masse dar. Das VO-Retentat stellt einen flüssigen Mineraldünger mit hohen Gehalten an N und K dar.
- Tiefere Personalkosten: In der Studie wurde damit gerechnet dass ein Manager und eine Arbeitskraft zu 100 % angestellt sind.
- Günstigere Lagermöglichkeit: Die Endlager könnten auch günstiger erstellt werden, z.B. mit einer geschlossenen Lagune oder einer einfacheren Abdeckung (Hexa-cower).

Durch die Berechnung bezüglich Kaliumgehalts des Gärguts im Fermenter kann folgendes ausgesagt werden (diese Berechnung sind in vorliegender Studie nicht enthalten):

- Die Kaliumgehalte des Eingangssubstrats (Rohglycerin) sind sehr hoch. Dadurch können bei der Vergärung vor allem bei der Rückführung der Biomasse (UF/VO) Probleme auftreten, da sich Kalium im Fermenter anreichert. Daher wird bei allen Varianten mit einer Verdünnung des Rohglycerins im Verhältnis 1:10 gerechnet.
- Für die Biologie im Fermenter gibt es keinen festen Grenzwert, unterhalb von welchem eine reibungslose Biogasproduktion garantiert werden kann, insbesondere da sich die Bakterienflora an ein Milieu mit hohen Kaliumgehalten anpassen kann. Allerdings ist dieser Anpassungsfähigkeit Grenzen gesetzt (vgl. Phase II).

- Die UF/VO-Anlage müsste zuerst in einem Pilotversuch mit den Originalsubstraten geprüft werden.
- Um einen reibungslosen Betrieb garantieren zu können muss die Biomasse mit einer der beschriebenen Variante zurückgeführt oder zurückgehalten werden. Damit die Gärgutmenge nicht zu hoch ausfällt empfiehlt es sich diesbezüglich in eine UF/VO-Anlage zu investieren.
- Die Methode der Ultrafiltration und Umkehrosmose sollte in der Lage sein, den Gleichgewichtsgehalt an Kalium im Fermenter zu regulieren. Eine Rückführung der Biomasse bei der Ultrafiltration sollte erst im Betrieb optimiert werden.
- Grundsätzlich können alle Varianten betrieben werden. Ev. braucht es aber bei der einen oder anderen in der Realität noch etwas mehr Verdünnungswasser oder Hofdünger.

Als Fragezeichen bleiben nach dieser Grobplanung bestehen:

- Ist es logistisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll solch grosse Mengen an Hofdünger zu der Biogasanlage zu transportieren und dort zu verarbeiten?
- Ist es ökologisch und ökonomisch sinnvoll eine Anlage mit soviel Rohglycerin zu betreiben oder soll das Rohglycerin nicht besser an kleiner Anlagen abgegeben oder verkauft werden.
- Ist es ökologisch sinnvoll die Anlage nur mit Mineraldünger zu betreiben?
- Ist es möglich den Fermenter bei erhöhten Kaliumgehalten über längere Zeit stabil zu betreiben?
- Welche wirtschaftlichen Vorteile (erhöhter Gasertrag) kann durch die Rückführung der Biomasse erreicht werden? Dies vor allem neben der Wassereinsparung und Reduktion der Endproduktmengen.
- Kann die Überschusswärme des BHKW vor Ort genutzt werden oder ist die Erstellung von Wärmeleitungen sinnvoll, um die Wärme an Dritte verkaufen zu können. Die Nutzung der vorhandenen Überschusswärme kann die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage entscheidend positiv beeinflussen.
- Beteiligen sich Dritte an einer solchen Anlage (Unterstützungsbeiträge etc.)?
- Können die Endprodukte (Dünger) abgesetzt werden? Das Endprodukt weist eine viel bessere Qualität auf als das Anfangsprodukt. Eventuell kann dieses sogar verkauft werden. Vor allem die produzierten Dünger in Variante 4 sind sehr wertvoll.

Fazit:

Aufgrund der langjährigen Erfahrung bei der Planung und dem Bau von Biogasanlagen erachtet die *Genesys Biogas AG* die Realisierung eines solchen Projekts als möglich, aber aus wirtschaftlicher Sicht, bei den heutigen Rahmenbedingungen, eher als unnötig. Das Rohglycerin kann anderweitig abgesetzt, in anderen Biogasanlagen vergoren oder gar verkauft werden.

Vor allem die Variante 4 mit UF/VO bietet jedoch gute Grundvoraussetzungen für einen ökologischen Betrieb. Voraussetzungen für einen störungsfreien, wirtschaftlichen und ökologischen Betrieb sind:

- Vorhandensein von genügend Wasser und Hofdünger (Nährstoffzufuhr)
- Eine technisch geeignete Lösung zur Minderung des K-Gehalts im Fermenter und Rückführung oder Rückhalt der Biomasse.

6 Schlussfolgerungen

Maximaler Gasertrag von Rohglycerin und Gaszusammensetzung in der Praxis

Im Jahr 2007 konnte der Biogasertrag von Rohglycerin aus der RME-Produktion im Praxisversuch festgestellt werden. Der maximale Biogasertrag von Rohglycerin beträgt im kontinuierlichen Praxisbetrieb 1100 l/l Rohglycerin, bzw. 870 l/kg Rohglycerin. Der mittlere Methangehalt im Biogas liegt bei 70 %.

Adaptionsgeschwindigkeit der Biologie an das Substrat Rohglycerin & Reaktion auf Futtermengenveränderung

Es wurde in den Versuchen gezeigt, dass die Adaptionsgeschwindigkeit der Biologie an das Substrat Rohglycerin hoch ist. Zwei bis drei Tage nach dem Start der Glycerinzugabe werden bereits 100 %-ige Abbauraten erreicht. Bei einer adaptierten Biologie wird die Biogasproduktion durch Änderungen der Beschickungsmenge in weniger als einem Tag entsprechend beeinflusst. Aufgrund der bisherigen Versuche kann festgehalten werden, dass eine gut adaptierte Biologie innerhalb von 5 Stunden auf eine Steigerung der Beschickung mit Zunahme der Gasproduktion reagiert.

Maximal mögliche Raumbelastung bei mesophilen Betriebsbedingungen

Bei mesophilen Bedingungen ($\sim 40^\circ\text{C}$) im Fed-Batch-Versuch konnte der biologische Abbauprozess erfolgreich während mindestens 60 Tagen bei einer mittleren Raumbelastung von $0.65 \text{ kg oTS}/(\text{d}\cdot\text{m}^3)$ stabil gehalten werden. Bei höheren Raumbelastungen von über $1.5 \text{ kg oTS}/(\text{d}\cdot\text{m}^3)$ konnten keine stabilen Abbauraten beobachtet werden. In den kontinuierlichen Pilotversuchen wurden Raumbelastungen von 2.5 bis $3.0 \text{ kg oTS}/(\text{d}\cdot\text{m}^3)$ erreicht, wobei jedoch der Prozess in keinem der Versuche länger als rund 20 Tage stabil gelaufen ist. Dies ist als Misserfolg zu bewerten.

Technische Massnahmen zur Erhöhung der maximalen Raumbelastung

Die technischen Massnahmen (Biomasserückhaltung im Pilotfermenter) zeigten Wirkung, indem der TS-Gehalt im Fermenter langsamer zurückging. Dies ist als Teilerfolg zu bewerten. Bisher wurde das Rohglycerin in den kontinuierlichen Versuchen 1:10 mit Wasser verdünnt. Sollte diese Vergärung grosstechnisch in Einsatz kommen, so müsste die Kaliumkonzentration im Fermenter beobachtet werden und später mit Verdünnung oder Rückgewinnung des Kaliums (Umkehrosmose) gearbeitet werden. Alternativ könnte weiter untersucht werden, ob sich das Kalium im Rohglycerin fällen lässt.

Hemmungen und Limitationen des Prozesses aufdecken

Die Fed-Batch-Versuche haben erfolgreich gezeigt, dass Rohglycerin leicht besser abgebaut wird als Reinglycerin. Diese Tatsache beweist, dass die Prozessstörungen und mangelhafte Abbauraten nicht an einem zusätzlichen Input-Stoff im Rohglycerin (wie z.B. Methanol) liegen können. Sonst müsste das Reinglycerin problemlos abbaubar sein, da dieses keine Nebenprodukte enthält.

Die Prozessstörungen entstehen somit alleine aufgrund von Hemmungen der Zwischenprodukte, die aus dem Abbau von Glycerin entstehen. Unter anderen sind dies die Stoffe 1.2-Propandiol und 2.3-Butandiol. Es wurde gezeigt, dass die beiden Stoffe bei höheren Konzentrationen Hemmungen verursachen, beziehungsweise nicht vollständig abgebaut werden.

Weitere Hemmstoffe, die während des Abbaus entstehen, können nicht ausgeschlossen werden.

Die zusätzlichen Stoffe im Rohglycerin haben eher einen stabilisierenden, fördernden Charakter auf den Abbau. Sie weisen sich somit durch einen positiven Nebeneffekt aus.

Es wurde festgestellt, dass die Prozessstabilität nicht am Mangel von Haupt- und Spurennährelementen scheitert. Diese wurden in den kontinuierlichen Versuchen in genügender Menge zugegeben.

Umsetzung eines konkreten Bauprojekts

Aufgrund der langjährigen Erfahrung bei der Planung und dem Bau von Biogasanlagen erachtet die Genesys Biogas AG die Realisierung eines solchen Projekts als möglich, aber aus wirtschaftlicher Sicht zurzeit eher nicht rentabel. Das Rohglycerin kann anderweitig abgesetzt, in anderen Biogasanlagen vergoren oder gar verkauft werden.

Beim Einsatz von Rohglycerin als Co-Substrat zu Hofdünger können wesentlich höhere Raumbelastungen bei stabilem Betrieb ermöglicht werden. Dies verbessert die Wirtschaftlichkeit massiv. Zudem erübrigt sich eine Ergänzung von Nährstoffen.

7 Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

a	Jahre	kW _{el}	Kilowatt elektrisch
BHKW	Blockheizkraftwerk	kW _{th}	Kilowatt thermisch
BDA	Biodieselanlage	kWh	Kilowattstunde
CH ₄	Methan	m ³	Kubikmeter
CO ₂	Kohlendioxid	km	Kilometer
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
d	Tage	Nm ³	Norm-Kubikmeter
EW	Elektrizitätswerk	N	Stickstoff
FS	Frischsubstanz	Mio.	Millionen
GG	Gärgut	oTS	Organische Trockensubstanz
h	Stunden	P	Phosphor
H	Höhe	S	Schwefel
HT/NT	Hochtarif/Niedertarif	t	Tonne
H ₂ S	Schwefelwasserstoff	TS	Trockensubstanz
K	Kalium	UVB	Umweltverträglichkeitsbericht
kW	Kilowatt	UF/UO	Ultrafiltration/Umkehrosmose

Begriffe

Co-Substrat	Zusätzlich hinzugenommene organische Reststoffe, die nicht direkt in der Landwirtschaft anfallen
Gärgut	Gesamte im Fermenter verarbeitete Biomasse
Vergorene Gülle	Geruchsarmes Gärgut nach der Verarbeitung im Fermenter (TS = ~ 10 %)
UF-Retentat/-Permeat	Rückstand und Durchfluss bei der Ultrafiltration
UO-Retentat/-Permeat	Rückstand und Durchfluss bei der Umkehrosmose

8 Referenzen

- [1] **Amon et al.:** *Untersuchung zur Wirkung von Rohglycerin aus der Biodieselerzeugung als leistungssteigerndes Zusatzmittel zur Biogaserzeugung aus Silomais, Körnermais, Rapspresskuchen und Schweinegülle*, Universität für Bodenkultur Wien, 2004
- [2] **Baier U.:** *Mündliche Mitteilung*. Hochschule Wädenswil (ZHAW), Februar 2007
- [3] **Biebl et al.:** *Microbial production of 1,3-propanediol*, Appl. Microbiol. Biotechnol. 52: 289-297, 1999
- [4] **Biebl et al.:** *Fermentation of glycerol to 1,3-propanediol and 2,3-butanediol by Klebsiella pneumoniae*, Appl. Microbiol. Biotechnol. 50: 24-29, 1998
- [5] **Bischofsberger et al.:** *Anaerobtechnik*, 2., vollständig überarbeitete Auflage, 650 Seiten, 2005
- [6] **Busch G. und Sieber M.:** *Zweistufiges Fest-Flüssig-Biogasverfahren mit offener Hydrolyse*, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2007
- [7] **Eder B. und Schulz H.:** *Biogas-Praxis*, ökobuch Verlag, 2006
- [8] **Engeli H.:** *Sicherheitsregeln für landwirtschaftliche Biogasanlagen*. Stand der Technik 1998 für die Praxis. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT); FAT-Berichte Nr. 530, 8 Seiten, 1999
- [9] **FAT:** *Eindrillen von konzentrierter Gülle nach der CULTAN-Methode bei Kartoffeln und Zuckerrüben*; www.fat.ch. 2006
- [10] **Landwirtschaftliche Beratungszentrale Lindau (LBL):** *Wirz Handbuch; Betrieb und Familie 2003 / Pflanzen und Tiere 2006*, Wirz Verlag Schweiz, 2006

9 Anhang

A Anaerobe Biogasbildung (GB21)

Titel	Anaerobe Biogasbildung (GB21)
Objekt/ Projekt	Anaerobe Batch-Versuche zur Ermittlung des Biogaspotentials von flüssigen Proben.
Zweck	Diese SOP beschreibt Messung und Auswertung von Versuchen zur Quantifizierung des Biogaspotentials von flüssigen Proben. Dies in Anlehnung an die Methode der deutschen Abfallablagerversordnung. Die beschriebene Methode ist adaptiert auf Messungen in gasdicht verschlossenen Flaschen mit Druckablesung.
Geltungsbereich	Hochschule Wädenswil Fachbereich Umweltbiotechnologie der Abteilung Biotechnologie

1 Material

1.1 Geräte

Objekt	Spezifikation
Waage	Genauigkeit 10 mg
Sieb	feinmaschig, ca. 1-2 mm Maschenweite
Gummistopfen	Ø unten 29 mm, Ø oben 35 mm, Höhe 30 mm vom Semadeni Katalognummer 3152
Anaerob-Batch-Flaschen	Glasflaschen von Soda-Fresh AG druckgeprüft und mit Sicherheitsbeschichtung
Schraubverschlüsse, rostfreier Stahl	Deckel für Infusionsflasche VWR Nr. 391-6048 (nicht im Katalog)
Nadeln	0.8 x 40 mm, Farbcode grün, Luer weiblich z.B. Terumo von Milian, TER-NN-2138R
2-Weg-Hahnen	Luerlock männlich/ Luerlock weiblich Zum Beispiel Discofix blau von BBraun Artikelnummer 4099117
Barometer, digital	Typ Leo2 von Keller Druckmesstechnik, Winterthur Von -1...+2 Bar, Ablesung 1 mbar, mit Svielanschluss
Sviel	männlich/männlich, von Keller Druckmesstechnik, Winterthur
Vakuumpumpe	
Inkubationsschüttler	thermostatisierbar

1.2 Verbrauchsmaterial

Stickstoff	aus Druckgasflasche
Cellulose Pulver	Fluka Nr. 09906
Wasser	Hahnenwasser
Inokulum	Beispielsweise Presswasser der Kompogasanlage in Samstagen, Schlamm aus einer kommunalem Kläranlage oder einer landwirtschaftlichen Biogasanlage oder je nach Fragestellung.
Substrate und Hemmstoffe	Je nach Fragestellung.

2 Durchführung

2.1 Vorarbeiten

2.1.1 Matrix für Versuchsanordnung für einfachen Substrat-Abbautest (Vorschlag):

- A) Inokulum + Wasser
Eigenaktivität des Inokulums, „Kontrolle“
- B) Inokulum + Wasser + 1g Cellulose
Prüfung auf genügende Aktivität des Inokulums, „Referenz“
- C) Inokulum + Probe + eventuell Wasser, je nach Verdünnung
Abbau der „Probe“

Mögliche Auswertungen: Wenn B-A eine Aktivität > 400 Normliter Gas pro kg Cellulose ergibt, dann ist die Aktivität des Inokulums genügend. C-A ergibt das Biogaspotential des Substrats.

Es werden im Normalfall 3 Wiederholungen pro Probe und Referenzprobe angesetzt. Für die Kontrolle sollten 3, besser jedoch 4 Wiederholungen angesetzt werden, da die Mittelwerte der Kontrollwerte für die Berechnung aller weiteren Proben eingesetzt werden.

2.1.2 Matrix für Versuchsanordnung für Abbautest mit Hemmung (Vorschlag):

- A), B) und C) wie unter 4. Zusätzlich:
- D) Hemmstoff + Inokulum + Wasser
 - E) Hemmstoff + Inokulum + Wasser + 1 g Cellulose
 - F) Hemmstoff + Inokulum + Substrat

Mögliche zusätzliche Auswertungen

- D-A: Hemmung der Eigenaktivität des Inokulums
- E-B: Hemmung des Abbaus von Cellulose
- F-C: Hemmung des Abbaus des Substrats

Es werden im Normalfall 3 Wiederholungen pro Probe und Referenzprobe angesetzt. Für die Kontrolle sollten 3, besser jedoch 4 Wiederholungen angesetzt werden, da die Mittelwerte der Kontrollwerte für die Berechnung aller weiteren Proben eingesetzt werden.

2.1.3 Analytische Arbeiten

Je nach Fragestellung sollte von Substrat, Inokulum und Hemmstoff der TOC, DOC, Stickstoff sowie Trockenrückstand und Glühverlust bestimmt werden. Falls neben dem Gasertrag auch der Abbaugrad des Substrats und oder des Hemmstoffs bestimmt werden soll, so ist die Messung von DOC/TOC für die nachträgliche Bilanzierung unerlässlich.

2.1.4 Auslitern der Sodafresh-Flaschen, Aufbewahrung von Probe und Inokulum

Das Totalvolumen der Flaschen mittels Auslitern bestimmen. Dazu das Gewicht des eingefüllten Wassers bestimmen, die Wassertemperatur messen und mittels Füllgewicht und spez. Gewicht des Wassers das Volumen berechnen. Davon das in die Flasche ragende Volumen des Gummistopfens subtrahieren

(normalerweise 14,5 ml, siehe hierzu auch Vorlage GB21.xlt). Die Flaschen mit wasserfester Farbe nummerieren. Dieser Arbeitsschritt ist oft schon gemacht.

Die Proben sollten möglichst frisch, das heisst innert 48 Stunden angesetzt werden. Auf jeden Fall Inokulum, Substrate und Hemmstoffe gekühlt bei 2-4 °C bis zum Ansetzen des Versuchs lagern.

2.1.5 Inokulum vorbereiten

Das Inokulum durch ein engmaschiges Sieb sieben, mit Stickstoff belüften und durchmischen. Den pH-Wert des Inokulums messen und, je nach Fragestellung des Versuchs, den pH auf 7,3 bis 7,8 mit 2M Salzsäure oder 2M Natronlauge einstellen. Die Konzentration der zugegebenen Säure/Lauge und das zugegebene Volumen notieren.

Um die Eignung des Inokulums betreffend genügender Abbauleistung zu testen, können vorgängig zum eigentlichen Abbauprobieren einige Kontroll- und Referenzproben mit Cellulose angesetzt und für die Dauer von etwa 4-5 Tagen gemessen werden. Danach kann aus der Differenz (Referenzprobe minus Kontrolle) abgeschätzt werden, ob die Abbauleistung des Inokulums die geforderten 400 Normliter/kg Cellulose in 21 Tagen zu liefern vermag. Das für den eigentlichen Versuch zurückgestellte Inokulum sollte je nach Versuchsanordnung unter Abschluss von Sauerstoff aufbewahrt, gekühlt und eventuell gefüttert werden.

2.2 Ansetzen des Versuchs in den Batch-Flaschen

1. Den Schüttler temperieren.
2. Die Soda-Fresh Flaschen auf Beschädigungen, insbesondere auch am Flaschenhals prüfen. Defekte Flaschen in die Bruchglassammlung geben. Arbeitssicherheit!
3. Inokulum, Substrat, Wasser, Hemmstoffe und Cellulose gemäss Matrix in die Flaschen füllen.
4. Den pH-Wert in den Flaschen messen und protokollieren. Je nach Versuchsanordnung den pH-Wert korrigieren. Bewährt haben sich Ausgangswerte zwischen 7,5 und 8, die mit 2-molarer NaOH eingestellt wurden.
5. Die Flaschen mit Stopfen und Schraubverschluss verschliessen. Dabei den Stopfen mit etwas Glycerin bestreichen. Die Nadeln durch den Stopfen stechen, Zweiweg-Hahn und Sviel aufsetzen. Den Stopfen nur einmal durchstechen, da er sonst undicht wird. Bei durchstochenen Stopfen die Nadel deshalb drin lassen.

6. Die Soda-Fresh-Flaschen auf etwa -0.7 Bar vakuumieren. Hahn schliessen, mit Manometer Unterdruck überprüfen.
7. Die Druckreduzierung der Stickstoffflasche -das zweite Ventil von der Flasche her gesehen- bei geschlossenem Auslass auf maximal 1 atm einstellen (Arbeitssicherheit!).
8. Die Soda-Fresh-Flasche mit der Stickstoffflasche verbinden. Zuerst den Hahn der Sodaflasche öffnen, dann den Auslass der Stickstoffflasche. Den Druckausgleich zulassen.
9. Den Auslass der Stickstoffflasche und den Hahn der Sodaflasche schliessen. Verbindung trennen. Manometer aufsetzen, Hahn der Sodaflasche öffnen, und Dichtigkeit des Systems prüfen. Hahn schliessen, Überdruck ablassen und mit dem Manometer überprüfen ob es keinen Druck mehr in der Flasche hat. Hahn schliessen.
10. Eventuell Punkt 6-9 wiederholen, damit der Sauerstoff weitgehend eliminiert wird.
11. In den thermostatisierten Schüttler stellen. Temperatur und Schüttelfrequenz überprüfen, eventuell einstellen und notieren.
12. Nach 1-2 Std. hat sich die Temperatur in den Flaschen eingestellt und das Gas des Kopfraumvolumens ausgedehnt. Den Hahn nochmals kurz öffnen und den entstandenen Überdruck ablassen. Zeit und Datum auf dem Protokollblatt notieren. Ab jetzt beginnt die Messung.
13. Den aufgebauten Druck täglich messen (Achtung: **Schutzbrille tragen!**). Manometer aufsetzen, Hahn öffnen, ablesen, Hahn schliessen, Manometer entfernen. Um zu verhindern, dass sich der Inhalt abkühlt sollte möglichst schnell gemessen werden.
14. Datum Zeit und den Druck protokollieren. Sofern der Druck in der Flasche grösser als 0,5 bar ist bzw. zu erwarten ist, dass er bis zum nächsten Ablesen über 0,5-1 bar steigen wird, das Gas nach dem Ableasen ablassen. Mit dem Manometer den drucklosen Zustand überprüfen und den Hahn wieder schliessen. Die Druckentlastung im Protokoll vermerken (belüftet? „ja“). Druckmessungen im Normalfall täglich machen, bei zu starker Gasentwicklung mehrmals, bei sehr schwacher Gasentwicklung eventuell nur arbeitstäglich. Falls die Gasentwicklung zu stark ist, können die Proben geteilt werden (Achtung, dadurch ergeben sich neue Kopfvolumina!)
15. Nach etwa der Hälfte der Messzeit von 21(oder je nach Versuchsbedingungen bereits nach 4) Tagen sollte der pH in den Flaschen, in denen die Biogasproduktion am höchsten ist, geprüft und allenfalls bei starker Versäuerung durch Zugabe von 2M Natronlauge nach oben korrigiert werden. Im Normalfall ist es günstig, wenn der pH den Wert von 6,8 während der Versuchslaufzeit nicht unterschreitet, damit Hemmungen durch zu tiefe pH-Werte vermieden werden können.
16. a) Beim wieder Verschliessen sind die Flaschen wie beim Neu-Ansetzen mit Stickstoff zu spülen (Punkte 6-9). Da die Flaschen während der pH-Messung und –korrektur auf Raumtemperatur abkühlen, entsteht bei der Wiedererwärmung im Schüttler ein temperaturbasierter Druckunterschied, der

nicht von der Gasproduktion herrührt. Um diesen Fehler auszugleichen, müssen die Flaschen nach etwa 30 Minuten druckentlastet werden (Hahn öffnen, mit Manometer Nullstand überprüfen, Hahn schliessen).

16. b) Alternativ zu dem unter 15. a) erwähnten Vorgehen kann die pH-Kontrolle in separaten pH-Kontrollflaschen, die mit flacher Septumdichtung anstelle des Zapfens verschlossen werden, durchgeführt werden. Das Öffnen derselben für eine regelmässige pH-Kontrolle ist wesentlich einfacher.
17. Nach der Messperiode (meist 21-22 Tage) den pH in allen Flaschen messen und protokollieren. Er sollte in keiner Flasche unter 6,8 sein. Ist er unter 6,8 so besteht Möglichkeit infolge Versäuerung eine zu geringe Biogasproduktion erfasst zu haben. In der Auswertung vermerken.
18. Beim Abbau des Versuchs die Nadeln in den Zapfen belassen, da die Zapfen sonst undicht und somit unbrauchbar werden. Sind die Nadeln verbogen oder unbrauchbar, müssen die Nadeln separat entsorgt (Sammelbox) und die Zapfen weggeworfen werden! Sie sind nach mehrmaligem Durchstechen nicht mehr dicht.

3 Auswertung der Versuche

Die deutsche Methode GB21 (für Feststoffe gedacht) ist definiert für Nettonormvolumen/Trockenmasse, jedoch kann je nach Fragestellung die Normierung anders gewählt werden. Beispiele sind:

- Nettonormvolumen/Masse Glühverlust
- Nettonormvolumen/Masse eingesetzter TOC

Für die tabellarische Auswertung der grossen Datenmengen existiert eine Excelvorlage Vorlage GB21.xlt. Das Auswertung wird hier nur kurz in groben Schritten skizziert.

- 1) Das Kopfvolumen der Flasche wie folgt bestimmen

$$V_{\text{Kopf}} = V_{\text{Total}} - \text{VolumenanteilVerschlusszapfen} - V_{\text{eingefüllt}}$$

- 2) Das Normvolumen (0°C, 1013mbar) für jede einzelne zeitliche Ablesung und jede Flasche separat berechnen:

$$\text{Normvolumen [ml]} = \frac{\text{Kopfvolumen [ml]} \times 273\text{K} \times \text{Druckrohrweite [mbar]}}{\text{Versuchstemperatur [K]} \times 1013 \text{ mbar}}$$

- 3) Das Nettonormvolumen für jede einzelne zeitliche Ablesung von Kontrollen, Referenz und Proben je separat berechnen:

$$\text{a) NettonormvolumenKontrolle} = \text{NormvolumenKontrolle}$$

- b) Mittelwertbildung von a) => MittelwertNormvolumenKontrolle
- 4)
- c) NettonormvolumenProbe = NormvolumenSubstrat - MittelwertNormvolumenKontrolle.
- d) NettonormvolumenReferenz = NormalvolumenReferenz - MittelwertNormalvolumenKontrolle
- 5) Bestimmung der Mittelwerte der Wiederholungen. Die Einzelresultate bei Versuchsabbruch oder nach 21 Tagen sollten nicht mehr als 20% vom jeweiligen Mittelwert abweichen. Eventuell vorhandene Ausreisser sollten nicht in die Auswertung einbezogen werden (Elimination muss erwähnt werden).
- 6) Die Nettonormvolumen oder die entweder auf Glühverlust, Trockenrückstand oder TOC normierten spezifischen Nettonormvolumen graphisch als Funktion der Zeit auftragen.
- 7) Das Nettonormvolumen der Referenz sollte grösser als 400 Liter/kg
= 0.4 Liter/g Cellulose sein. Soll der Abbaugrad der Cellulose bestimmt werden, so sieht die Rechnung wie folgt aus:
- 8) Cellulose $C_6H_{10}O_5$ => Formelgewicht $72 + 5 \times 18 = 162$ Dalton
162 g Cellulose entsprechen bei vollständigem Abbau 6 mol Gas => 6×22.414 Liter = 134.5 Liter
- 1 g Cellulose (100% Abbau) => = 830.1 Milliliter Gas

$$\text{AbbaugradCellulose [\%]} = \frac{\text{NettoNormvolumenReferenz [ml]} \times 100\%}{830.1 [\text{ml}]}$$

Die von der Norm geforderten 400 Liter/kg Cellulose bzw. 400 ml/g Cellulose entsprechen einem geforderten minimalen Abbaugrad von
 $(400/830.1) \times 100\% = 48 \%$ Abbau.