



Bachelorarbeit

Optimierung des Impfschlammes für anaerobe Batch- Untersuchung nach der VDI 4630

Zur Erlangung des Grades
eines
Bachelor of Engineering (B. Eng.)
von
Herr Shengtao Yan (Matrikel-Nr.: 18409)
geboren am: 11.09.1990 in: Jiangsu

Betreuer an der Hochschule: Herr Prof. Dr.- Ing. Dietmar Heinz

Betrieblicher Betreuer: Herr Dr. Jürgen Pröter

Herr B.Sc. Harald Wedwitschka

Unternehmen: Deutsches BiomasseForschungsZentrum (DBFZ)

Merseburg, 29.08.2013

Erklärung

Ich versichere an Eides statt durch meine eigene Unterschrift, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß veröffentlichtem oder nicht veröffentlichtem Schrifttum entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Merseburg, den 29.08.2013

Shengtao Yan

Danksagung

An erster Stelle danke ich meinem Betreuer an der Hochschule Herrn Prof. Dr.- Ing. Dietmar Heinz, für die großzügig Unterstützung während der Bearbeitung vorliegender Bachelorarbeit.

Ein besonderer Dank geht an meinen Betreuer am DBFZ GmbH, Dr. Jürgen Pröter, für die Übernahme der Betreuung und die nützliche Anregungen.

Ebenso danke ich Herr Harald Wedwitschka für eine sehr gute Betreuung und seine wesentliche Hilfe bei der praktischen Durchführung dieser Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung.....	2
Danksagung.....	3
Inhaltsverzeichnis	4
1.Einleitung	6
2. Aufgabenstellung.....	7
3.Theorie und Grundlagen	8
3.1 Der Biogas-Prozess	8
3.1.1 Entstehung von Biogas.....	8
3.1.2 Zusammensetzung und Eigenschaften von Biogas	10
3.1.3 Milieubedingungen.....	11
3.1.3.1 Sauerstoff	12
3.1.3.2 Temperatur	12
3.1.3.3 PH-Wert.....	12
3.1.3.4 Nährstoffversorgung.....	13
3.1.3.5 Hemmstoff	15
3.1.4 Entwicklung von Biogas.....	16
3.2 Batch-Verfahren	18
4. Material und Methode.....	19
4.1 Impfschlamm	19
4.1.1 Entstehen von Schlamm	21
4.1.1.1 Primärschlamm.....	21
4.1.1.2 Sekundärschlamm	22
4.1.1.3 Faulschlamm.....	22
4.1.1.3.1Mikroorganismen im Faulschlamm	24
4.1.2 Gärrest von Biogasanlage	24
4.1.2.1 Bildung des Gärrestes	25
4.1.3 Einflußfaktoren auf die Qualität von Impfschlamm	25
4.1.3.1 Zusammensetzung von Faulschlamm und Gärrest	26

4.2 Einsatz einer Referenzprobe-mikrokristalline Cellulose.....	28
4.2.1 Chemie	29
4.2.2 Gewinnung mikrokristalliner Cellulose.....	29
4.2.3 Eigenschaften mikrokristalliner Cellulose.....	30
4.2.4 Nutzung mikrokristalliner Cellulose.....	30
4.3 AMPTS II	31
4.3.1 Aufbau des AMPTS II.....	32
4.3.2Vorbereitung des AMPTS II	33
4.3.3 Vorteile des AMPTS II.....	34
4.3.4 Nachteile des AMPTS II	34
4.4 Analytik	35
5.Versuchsplanung und –durchführung	41
6.Ergebnisse und Diskussion	44
6.1 Charakterisierung der Impfschlämme	44
6.1.1 TS und oTS	44
6.1.2 PH-Wert.....	44
6.1.3 FOS	45
6.1.4 Ammonium.....	46
6.1.5 Organischer Säure.....	47
6.2 Gasausbeut.....	48
6.3 Spezifische Gasproduktion	50
6.4 Abbaugrad	50
7. Zusammenfassung	52
8. Ausblick	53
Literaturverzeichnis	55
Abbildungsverzeichnis	61
Tabellenverzeichnis	63
Formelverzeichnis	64
Abkürzungsverzeichnis	65

1. Einleitung

Biogas ist neben Sonnen-, Wasser-, und Windenergie eine erneuerbare Energiequelle, die zur Einsparung fossiler Brennstoffe beiträgt. Darüber hinaus ermöglicht die Biogasproduktion aus Reststoffen und Abfällen die Verschmutzung der Umwelt zu reduzieren.

Vor der Verwendung eines organischen Substrates kann mit Hilfe eines Biogaspotentialtests der Biogasertrag und die Abbaubarkeit des Einsatzstoffs ermittelt werden. Die Durchführung des Tests ist in der Methodenvorschrift VDI 4630 vorgegeben, darüber hinaus wird darin auch auf die Impfschlammvorbereitung eingegangen. Nach der VDI 4630 ist eine ausreichende Inokulumaktivität gegeben, wenn aus dem empfohlenen Standardsubstrat Mikrokrystalline Cellulose mindestens 80% der theoretischen Biogasausbeute gebildet werden. Diese Wiederfindung wird am Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft regelmäßig erreicht. Die vorhandene VDI 4630 soll im kommenden Jahr aktualisiert werden. Anhand der neuen Vorgaben wird in Zukunft voraussichtlich eine 90%ige Wiederfindung des eingesetzten Referenzmaterials gefordert. In den vorliegenden Untersuchungen ist der Zusammenhang zwischen der Inokulumqualität und der Ergebnisse der Batchtests untersucht worden. Im Einzelnen sollten die Mikroorganismenaktivität und die Zellzahl als Einflussgrößen bewertet werden. Zielstellung ist das eingesetzte Impfmateriale dahingehend zu optimieren, dass im Referenzansatz mindestens 90% der eingesetzten mikrokrystallinen Cellulose zu Biogas umgesetzt werden.

2. Aufgabenstellung

Untersuchung zur Optimierung des Impfschlammes für anaerobe Batch-Untersuchung nach der VDI4630.

Dazu waren folgende Aufgaben zu bearbeiten:

- Literaturrecherche zum Thema Optimierung des Impfschlammes für anaerobe Batch-Untersuchung
- Planung der diskontinuierlichen Gärtestes mit unterschiedlichen Impfschlämme
- Durchführung und Auswertung der diskontinuierlichen Gärtestes mit unterschiedlichen Impfschlämme
- Zusammenfassung und Ausblick

3.Theorie und Grundlagen

3.1 Der Biogas-Prozess

3.1.1 Entstehung von Biogas

Biogas ist eine Form von erneuerbarer Energie und ermöglicht eine regionale Versorgung mit Strom und Wärme, dadurch wird eine Versorgung mit Energie gesichert. Wenn man das Biogas statt eines fossilen Energieträgers benutzt, entsteht wenig CO₂, dadurch kann man den Treibhauseffekt reduzieren.

Biogas ist ein Stoffwechselprodukt von Mikroorganismen, das entsteht, wenn sie organisches Substrat abbauen. Der Abbauprozess besteht im Wesentlichen aus 4 Stufen(Abb. 3.1), wobei mehrere unterschiedliche Bakteriengruppen beteiligt sind. Während man früher bei allen beteiligten Mikroorganismen von Bakterien gesprochen hat, differenziert man heute genauer. Die für die Methanbildung zuständigen Mikroorganismen gehören einer eigenen Gruppe, den Methanbakterien an. [2; S.19]

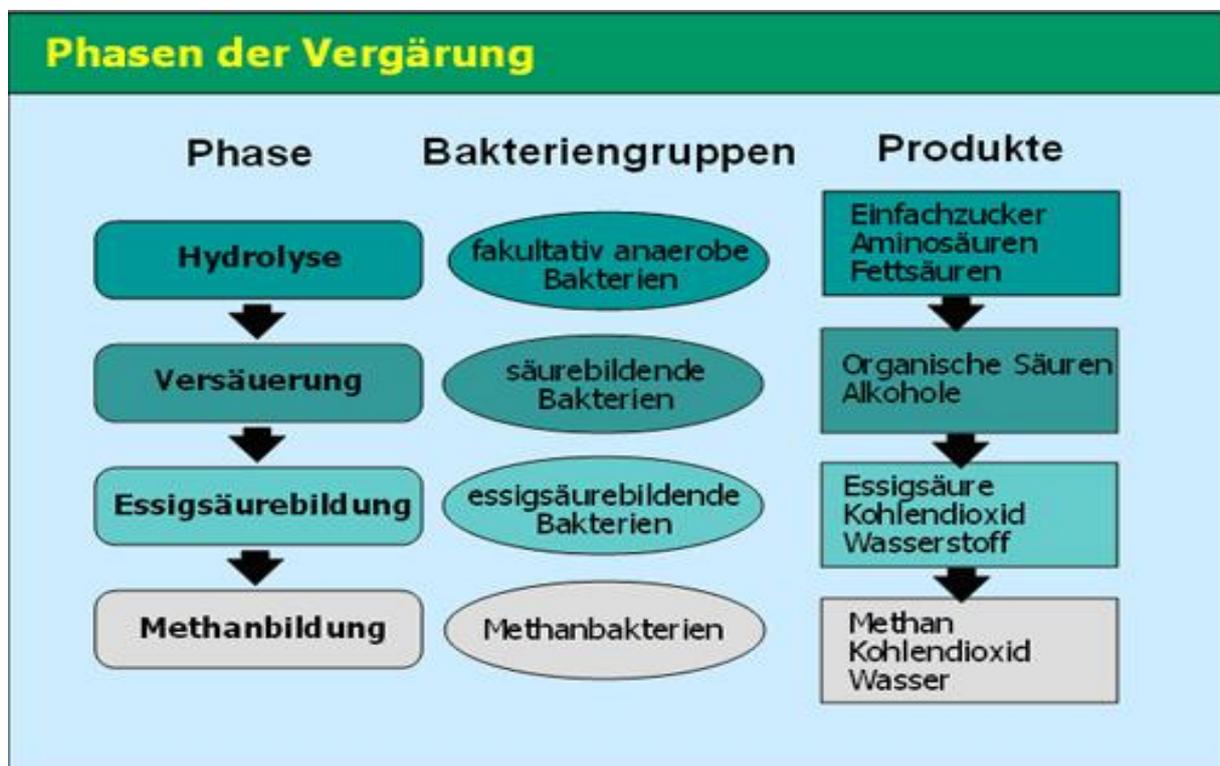


Abb. 3.1 Die vier Phasen der Faulprozesses [1]

1. Stufe-Hydrolyse

In der **Hydrolysephase** werden die festen Substanzen (Proteine, Fette, Kohlenhydrate) durch fakultativ anaerobe Bakterien in gelösten Stoffe (z.B.: Aminosäuren, Glukose, Fettsäuren) hydrolysiert. [1]

Die Hydrolyse ist ein langsamer Prozess, der von der Aktivität der extrazellulären Enzyme wie Cellulosen, Amylasen, Proteasen und Lipasen abhängig ist. Der Prozess wird durch den pH-Wert und die Verweilzeit beeinflusst. Der optimale pH-Wert für die Hydrolyse ist abhängig von den abzubauenen Substraten ab. [2; S.19]

2. Stufe-Versäuerung

In der **zweiten Phase (Versäuerung)** werden die gelösten Stoffe von den säuerbildenden Bakterien weiter zu organischen Säuren (z.B. Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure), und Alkoholen umgewandelt. Die Versäuerung wird sehr schnell verlaufen, bis die Bakterien von ihre eigenen Abbauprodukte in dem Abbauprozess gehemmt werden (niedriger pH-Wert). [1]

Dabei spielen Säure bildende Bakterien eine wichtige Rolle, die einzelne Moleküle aufnehmen und umwandeln. Das Verhältnis der in dieser Phase entstehenden Produkte zueinander ist vom Wasserstoffpartialdruck, d.h. der Konzentration an elementarem Wasserstoff, abhängig. Je niedriger dieser ist, desto höher ist der Anteil an entstehendem Acetat. [13; S.8]

3. Stufe-Essigsäurebildung

In der **dritten Phase (acetogene Stufe)** produzieren Essigsäurebakterien aus den zuvor gebildeten organischen Säuren und Alkoholen Essigsäure, Kohlendioxid und Wasserstoff als die Ausgangsprodukte für die Methanbildung. Ein Teil der Essigsäure wird von syntrophen Bakterien weiter zu Wasserstoff abgebaut. Die Bakterien dieser Phase können nur gut arbeiten, wenn der Wasserstoff und die Essigsäure rasch aus ihrer Umgebung entfernt

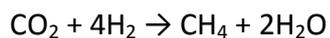
werden(d.h.geringer Wasserstoff- und Essigsäurepartialdruck). Passiert dies nicht,wird der weitere Prozessablauf blockiert.[2; S.19]

4. Stufe-Methanbildung

In der **Methanbildung**, dem letzten Phase des anaeroben Abbaus, erzeugen endlich das Methan. Durch methanogene Mikroorganismen werden die vorher entstandenen Verbindungen wie Essigsäure, Kohlendioxid und Wasserstoff umgewandelt.Die Mikroorganismengruppen aus den letzten Abbaustufen sind streng anaerob. Der optimale PH-Wert liegt bei 7 bis 7,5, mit einem tolerierbaren Schwankungsbereich zwischen 7 bis 8,5.[2; S.20]

Die eigentliche Methanbildung erfolgt auf zwei Wegen:

1.Wasserstoff mit Kohlendioxid zu Methan und Wasser umwandeln



2. Essigsäure zu Methan und Kohlendioxid zersetzt werden



3.1.2 Zusammensetzung und Eigenschaften von Biogas

Biogas ist ein durch den anaeroben, mikrobiellen Abbau von organischen Stoffen entstehendes Gasmisch, das zu 50 - 70 % aus dem hochwertigen Energieträger Methan (CH₄) besteht. Weitere Bestandteile sind 30-40% Kohlendioxid (CO₂) sowie Spuren von Schwefelwasserstoff (H₂S), Stickstoff (N₂), Wasserstoff (H₂) undKohlenmonoxid (CO).[2; S.44]



Abb. 3.2 Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas [3]

Aufgrund des relativ hohen Energiegehaltes wird Biogas als Energieträger für die Wärme- und Kraftherzeugung benutzt. Der durchschnittliche Heizwert von Biogas beträgt etwa 6000 Kcal/m³ (entsprechen 25.000 KJ/m³). Ein Kubikmeter Biogas entspricht etwa 0,6 Liter Heizöl.[4;S7]

Tabelle 3.1 Eigenschaften von Biogas [4;S8]

Dichte	1,2 kg/m³
Heizwert	4-7,5 kWh/m ³ (abhängig vom Methangehalt)
Zündtemperatur	700 °C
Zündkonzentration Gasehalt	6-12 %
Geruch	faule Eier (VORSICHT: entschwefeltes Biogas ist kaum wahrnehmbar)

3.1.3 Milieubedingungen

Bei der Entstehung des Biogases spielen die Mikroorganismen eine wichtige Rolle. Die mikrobiellen Stoffwechselvorgänge hängen von vielfältigen Einflüssen ab. Die Mikroorganismen haben die jeweiligen Eigenschaften und brauchen die optimalen Milieubedingungen. Für eine optimale Umgebung der Mikroorganismen müssen verschiedene Parameter berücksichtigt und kontrolliert werden. Dann können die Mikroorganismen in der optimalen Milieubedingung mehr Biogas produzieren.

3.1.3.1 Sauerstoff

Beim anaeroben Abbau von organischer Substanz beteiligt viele Mikroorganismen. Etwa 50% der beteiligten Bakterien sind aerob oder fakultativ anaerob und benötigen bzw. vertragen Sauerstoff. Nur die Essigsäure- und Methanbildner sind streng anaerob. Es gibt noch Sauerstoff im Substrat z.B. in frischer Gülle, verbrauchen die aeroben Bakterien diesen in den ersten Phasen des Biogasprozesses zuerst. Deshalb sind geringe Sauerstoffmengen im Reaktor nicht schädlich, die durch das gezielte Einblasen von Luft zum Entschwefeln auftreten oder auch beim Öffnen des Mannlochs entstehen können.[2; S.23]

3.1.3.2 Temperatur

Die Geschwindigkeit des Faulprozesses ist sehr stark temperaturabhängig. Je höher die Temperatur ist, umso schneller erfolgt der Abbau und die notwendige Ausfallzeit verkürzt wird. Der Methangehalt sinkt mit steigender Temperatur im Biogas. Weil bei hohen Temperaturen das im Substrat gelöste Kohlendioxid verstärkt und in die gasförmige Phase (ins Biogas) übergeht, abnimmt der relative Anteil des Methans im Biogas. Es existieren drei typische Temperaturbereiche, in denen entsprechende Bakterienstämme sich wohlfühlen:

- Psychrophile Stämme bei Temperaturen unter 25 °C
- Mesophile Stämme bei Temperaturen von 25 – 45 °C
- Thermophile Stämme bei Temperaturen über 45 °C

Die meisten Anlagen werden im mesophilen Temperaturbereich zwischen 38 und 42 °C gefahren. [2;S.24]

3.1.3.3 PH-Wert

Der optimale PH-Wert von hydrolysierenden und säurebildenden Bakterien bei einem sauren Milieu ist von PH 4,5 bis 6,3, vertragen die Essigsäure- und Methanbildner nur einen neutralen bis schwach alkalischen PH-Wert von 6,8 bis 8. Für alle Bakterien wenn der PH-Wert in der Milieubedingung außerhalb ihres Optimums liegt, werden die Bakterien in ihrer Aktivität langsamer mit den entsprechenden Folgen auf die Biogasbildung. Bei einstufigen

Verfahren ist der optimale PH-Wert für die Methanbildner am besten 7. Die zugeführte Menge und die Art der Substrate beeinflusst den PH-Wert im Reaktor. Schnell versäuernde Substrate führen zu einem PH-Wert-Abfall, deshalb werden sie nur in geringen Dosen und langsam zugegeben. [2;S.25]

3.1.3.4 Nährstoffversorgung

Die Bakterien benötigen selbst auch Nährstoffe, Vitamine, lösliche Stickstoffverbindungen, Mineralstoffe und Spurenelemente zum Aufbau ihrer Zellsubstanz. Als Anhaltswerte für eine gute Substratzusammenstellung können folgende Nährstoffverhältnisse angegeben werden:

- C : N : P : S = 600 : 15 : 5 : 3
- C : N : P = 125-200 : 5 : 1
- N : P = 3-5 : 1

Bei den Spurenelementen sind es besonders Nickel, aber auch Kobalt, Zink, Molybdän, Wolfram, Selen und Eisen, die für eine optimale Versorgung der Bakterien notwendig sind. Meist sind die Spurenelemente für den Enzymaufbau der Methanbakterien notwendig. [2;S.26]

Die folgende Tabelle 3.2 zeigt die Mindestanforderungen an die Nährstoffzusammensetzung für eine optimale Versorgung der Mikroorganismen an.

Tabelle 3.2 Mindestanforderungen an den Biogasprozess [14]

Elemente	Konzentration
Natrium	45 bis 200 ppm
Kalium	75 bis 250 ppm
Magnesium	10 bis 40 ppm
Schwefel	50 bis 100 ppm
Eisen	10 bis 200 ppm
Nickel	0,5 bis 30 ppm
Kobalt	0,5 bis 20 ppm
Molybdän, Wolfram, Selen	0,1 bis 0,35 ppm
Zink	0 bis 3 ppm

3.1.3.5 Hemmstoff

Durch eine Reihe von Substanzen kann die Stoffwechselfähigkeit und das Wachstum der Mikroorganismen gehemmt oder völlig unterdrückt werden. Die Abgaben sehen in Tabelle 3.3.

Tabelle 3.3 Hemmstoffe bei anaeroben Abbauprozessen und deren schädigende Konzentration [5;S.27]

Hemmstoff	Hemmkonzentration	Anmerkung
Sauerstoff	> 0,1 mg/l	Hemmung der obligat anaeroben methanogenen Archaeen
Schwefelwasserstoff	> 50 mg/l H ₂ S	Hemmwirkung steigt mit sinkendem pH-Wert
Flüchtige Fettsäuren	> 2.000 mg/l HAC (pH = 7,0)	Hemmwirkung steigt mit sinkendem pH-Wert. Hohe Adaptionsfähigkeit der Bakterien
Ammoniumstickstoff	> 3.500 mg/l NH ₄ ⁺ (pH = 7,0)	Hemmwirkung steigt mit steigendem pH-Wert und steigender Temperatur. Hohe Adaptionsfähigkeit der Bakterien
Schwermetalle	Cu > 50 mg/l Zn > 150 mg/l Cr > 100 mg/l	Nur gelöste Metalle wirken inhibierend. Entgiftung durch Sulfidfällung
Desinfektionsmittel	k. A.	Hemmwirkung
Antibiotika		produktspezifisch

3.1.4 Entwicklung von Biogas

-In Deutschland

In Deutschland sind bis zum Jahr 2012 etwa 7.500 Anlagen installiert worden. Seit dem Jahr 1992 versiebenfachte sich die Anlagenzahl der Biogasanlagen in Deutschland. Die installierte Leistung der Biogasanlagen im Jahr 2012 ist ungefähr 3200 MW und im Jahr 2000 ist etwas 100 MW. Die Leistung steigerte sich seit dem Jahr 2000 um Faktor 32. Im Jahr 2011 ist diese durchschnittliche Anlagenleistung auf 402 kW pro Anlage angewachsen.[15]

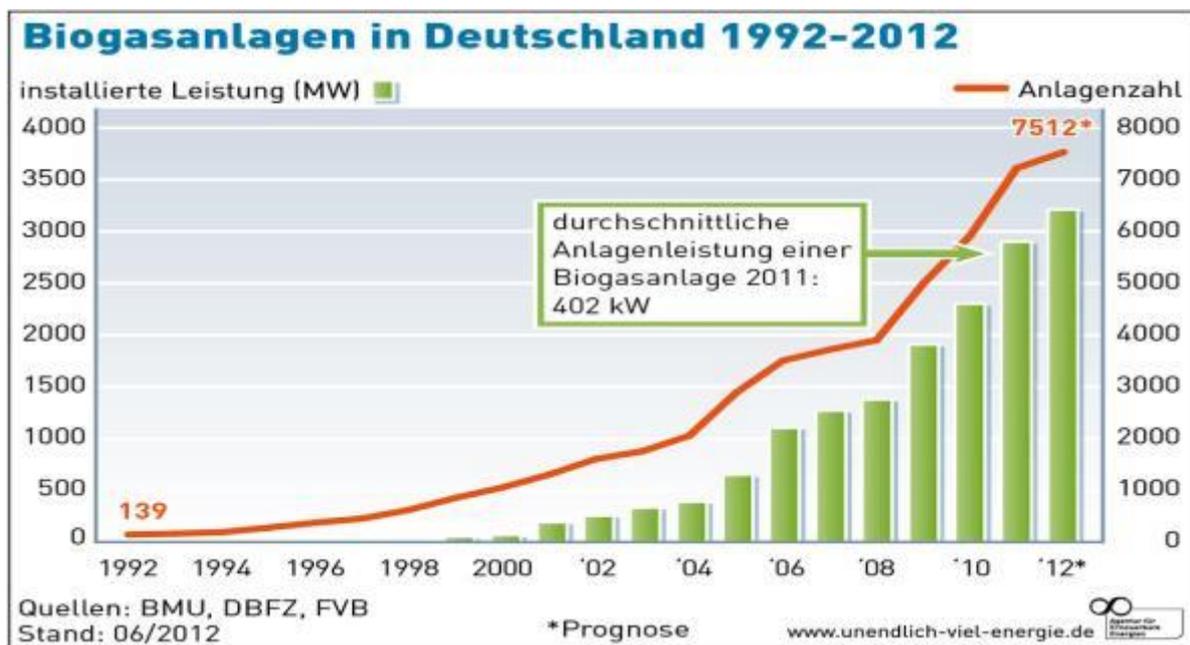


Abb.3.3 Die installierte Leistung von Biogasanlagen in Deutschland[15]

-In China

Mit einer Fülle an Biomasse verfügt China über ein enormes Potenzial zur Erzeugung von Biogas. Äquivalent zu mehr als einer Milliarde Tonnen Kohle. Es handelt sich dabei um Abfälle aus der Tierhaltung, Lebensmittelindustrie, Land- und Forstwirtschaft, aus Haushalten und zum Teil auch um Energiepflanzen. Bis zum Jahr 2050 könnte damit ein Drittel der Kohle in China ersetzt werden. Mittelfristig bis zum Jahr 2020 sollen 30 Millionen Kilowatt elektrische Leistung aus Biogas ins Stromnetz eingespeist werden.[16]

Die Anzahl der Biogasanlagen hat sich seit Jahr 2001 mehr als verdreißigfacht. Die Anteile der großen Biogasanlagen und mittleren Biogasanlagen hat sich seit dem Jahr 2006 stark erhöht.

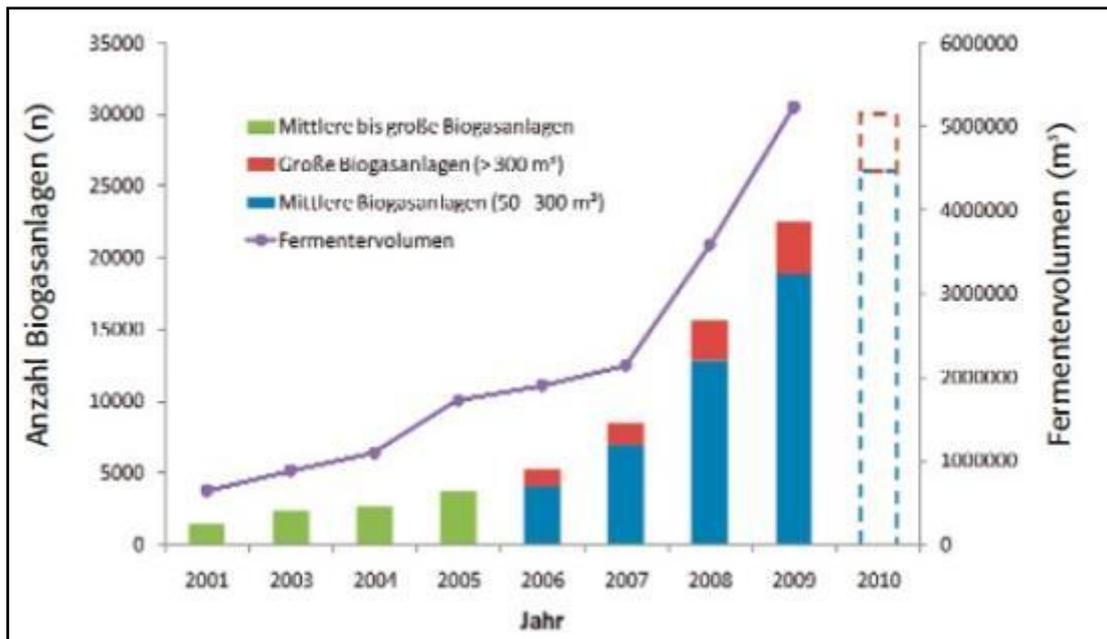


Abb. 3.4 Entwicklung von Biogasanlagen und Fermentervolumen von 2001 bis 2010 in China[16]

Jetzt investieren mehr und mehr deutsche Unternehmen die Biogasanlagen in China. Es arbeiten einige deutschen Unternehmen mit chinesischen Unternehmen zusammen, um das Vertrauen im chinesischen Markt erhöhen.[16]

3.2 Batch-Verfahren

Bei der Vergärung im Batchverfahren wird der Fermenter mit frischem Substrat gefüllt und luftdicht verschlossen. Das Substrat bleibt bis zum Ende der gewählten Verweilzeit in dem Behälter, ohne dass Substrat hinzugefügt oder entnommen wird. Nach Ablauf der Verweilzeit wird der Fermenter geleert und mit frischem Substrat befüllt. [5;S.34]

Ein Methanbildungspotenzial Test wird verwendet, um die anaerobe biologische Abbaubarkeit von Biomasse zu bestimmen. Der Test kann im Batch-Verfahren realisiert werden. Batch-Verfahren sind diskontinuierliche Verfahren, wobei eine definierte Menge Substrat am Beginn einmalig in den Fermenter gegeben wird. In dem Batch-Verfahren steigt die Gasproduktion bis zu einer Konstante. Wenn die Gasproduktion abgeschlossen ist, bekommt man eine Aussage zur maximalen Gasproduktion, die als das Methanpotential des Substrates angegeben wird. Es gibt unterschiedliche Normen zur Durchführung der Versuche, dadurch sind unterschiedliche Aussagen des Batch-Verfahrens möglich.

Methodenvorschrift VDI 4630

Das Batch-Verfahren ist anwendbar auf alle organischen Feststoffe oder Flüssigkeiten, die als repräsentative Testsubstanz eingesetzt werden können.

Derartige Gärtests erlauben Aussagen:

- Zur grundsätzlichen Bewertung des möglichen Biogasertrags und der anaeroben biologischen Abbaubarkeit eines Stoffes oder Stoffgemisches
- Zur qualitativen Beurteilung der Geschwindigkeit des anaeroben Abbaus des untersuchten Stoffes
- Zur qualitativen Bewertung der Hemmwirkung des untersuchten Stoffes im untersuchten Konzentrationsbereich [17;S.44]

Gärtestes erlauben keine Aussagen:

- Zur Prozessstabilität in Reaktoren, die mit dem untersuchten Stoff oder dem Stoffgemisch kontinuierlich beschickt werden
- Zur Biogasausbeute unter Paxisbedingungen, auf Grund möglicher negativer oder positiver Synergieeffekte
- Zur Monovergärbarkeit des Substrates unter Prozessbedingungen und
- über die Grenzen der organischen Raumbelastung[17;S.44]

Das Ergebnis eines Gärtests hängt vor allem ab von:

- der mikrobiologischen Aktivität des verwendeten Impfschlammes und
- der ordnungsgemäßen Erfassung und Auswertung der entstandenen Biogasmengen.[17;S.44]

Um vergleichbare Ergebnisse in Gärtest zu erhalten ist es notwendig, sowohl die Erstellung eines Gäransatzes als auch die Gaserfassung und deren Auswertung möglichst genau zu definieren.

4. Material und Methode

4.1 Impfschlamm

Der am DBFZ verwendete Impfschlamm setzt sich zur Hälfte aus Faulschlamm aus dem Faulturm der Kläranlage zusammen und zur anderen Hälfte aus Gärrest einer Biogasanlage des Milchviehbetriebs. Dann lagert man den Impfschlamm im Reaktor 4.17(sehen Abb. 4.1) bei 38°C im Containerlabor für den Einsatz in den Batchtests.

Nach der VDI 4630 ist als Impfschlamm unbehandelter Faulschlamm aus einer kommunalen Kläranlage geeignet, der keiner offensichtlichen Hemmung unterlegen ist. Der Faulschlamm wird von dem Faulbehälter genommen, der schon im Faulbehälter für einige Wochen gelagert wird. Durch die Faulschlamm Lagerung kann sich die Aktivität der Mikroorganismen verschlechtern. Weil die Ergebnisse der Batchtests nach VDI 4630 abhängig von der Aktivität der Mikroorganismen sind, mischt man etwa 50% an Gärrest aus einer Biogasanlage zum Faulschlamm. In dem Gärrest der Biogasanlage eines Milchviehbetriebs ist noch ein Großteil an organischen Substanzen enthalten, die sehr gut für die Erhöhung der Aktivität der Mikroorganismen ist. Der organische Anteil der Trockensubstanz im Gärrest ist höher als im Faulschlamm der Kläranlage. Nach VDI 4630 ist der Abbaugrad des eingesetzten Standardsubstrates ab 80% genug, aber durch den veränderten Impfschlamm kann ein Abbaugrad von 90% erreicht werden, was zu einer genaueren Bestimmung des Biogaspotenzials eines Substrates führen soll. Deshalb ist die Mischung von Gärrest und Faulschlamm besser als nur Faulschlamm. Im folgenden Teil wird auf die Grundlagen zum Thema Faulschlamm und Gärreste aus Biogasanlagen eingegangen.



Abb. 4.1 Der Lagerungsreaktor im Containerlabor

4.1.1 Entstehen von Schlamm

Schlamm entsteht dadurch, dass ungelöste und gelöste Stoffe in Feststoffe umgewandelt und diese aus dem Abwasser getrennt werden.[6;S.15] Die entstehenden Schlämme betragen 0,3% bis 0,5% der Volumen von dem behandelten Abwasser.[18]In einer Abwasserreinigungsanlage entsteht soviel Schlamm, wie Stoffe aus dem Abwasser eliminiert werden.[6;S.15]

4.1.1.1 Primärschlamm

Primärschlamm fällt in der mechanischen Abwasserreinigungsstufe an. Er entsteht durch die Entfernung von Großanteilen der ungelösten Abwasserinhaltsstoffe unter mechanische Einwirkung der Schwerkraft am Rechen und Sandfang (Vorklärschlamm, Rechengut).Der Schlamm, der sich im Vorklärbecken nach der Räumung im Pumpensumpf sammelt, wird Primärschlamm genannt.Die Zusammensetzung dieses Schlammes ist von den Besonderheiten des Einzugsgebietes abhängig. Der Großanteil von Primärschlamm sind die organischen Stoffe wie: Fäkalien, Gemüse, Obst, Textilien, Papier usw. Die Konsistenz ist dickbreiig mit einem Wasseranteil zwischen 93 % und 97 %. [19] Der Primärschlamm wird zügig weiterbehandelt,da dieser Klärschlamm schnell zu faulenbeginnt und dann eine starke Geruchsbelästigung verursachen kann. Um die Anlage zu schonen, sollte im Primärschlamm kein Sand zu finden sein.[20]

4.1.1.2 Sekundärschlamm

Der Sekundärschlamm (auch Überschuss-Schlamm genannt) entsteht im Belebungsbecken bei der biologischen Reinigung des Wassers. Im sogenannten Belebungsbecken werden ungewünschte Stoffe im Wasser durch Mikroorganismen wie Pilze, Bakterien und einzellige Lebewesen (Amöben/Protozoen/EPS) gebunden. Der Überschussschlamm muss regelmäßig entnommen werden. Das Verfahren ist leicht, da dieser Überschussschlamm meist an der Oberfläche des Abwassers schwimmt. Sekundärschlamm muss ebenfalls in den Faulraum zugeführt und stabilisiert werden.[20] Es ist erforderlich, die nicht benötigte Biomasse als Überschussschlamm aus dem System zu entnehmen, um die vorgewählte Biomassenkonzentration bzw. das Schlammalter konstant zu halten. Der Überschussschlamm besteht aus nicht hydrolysierbaren partikulären Stoffen und aus Bakterienmasse, die infolge des Stoffwechsels zunimmt.[19]

4.1.1.3 Faulschlamm

Allgemein entstehen Faulschlämme durch den mikrobiellen Abbau komplexer organischer Substanzen unter anaeroben Bedingungen. Dieser Prozess findet unter natürlichen Bedingungen in anaeroben Sedimenten nährstoffreicher Gewässer und Sümpfen statt. Des Weiteren fallen Faulschlämme auch bei der Abwasserbehandlung an. Faulschlämme bestehen aus einer feinkörnigen Masse, die durch Metallsulfide grau bis tiefschwarz gefärbt sind.[21]

In den Faulschlämmen erfolgt eine Mineralisierung von hochkomplexen organischen Substanzen über die methanogene Nahrungskette. Diese Nahrungskette besteht aus vier verschiedenen physiologischen Bakteriengruppen zusammen. Die gleichen Stoffwechselfvorgänge werden für die Biogasproduktion genutzt und wurden bereits im Grundlagenteil erklärt.

In einem Klärwerk entstehen während der Abwasserreinigung verschiedene Arten von Schlämmen.(Abb. 4.2)Man unterscheidet grob zwischen Rohschlämmen und behandelten Klärschlämmen. Rohschlämme umfassen Primärschlamm und Überschussschlamm. Der Primärschlamm besteht aus organischen Substanzen, die in der mechanischen Reinigungsstufe(z.B.Rechen, Sandfang)durch Sedimentation aus dem Abwasser abgetrennt wurden. Der Überschussschlamm stammt aus der biologischen Reinigungsstufe im Belebungsbecken und besteht überwiegend aus den Mikroorganismen.[22]

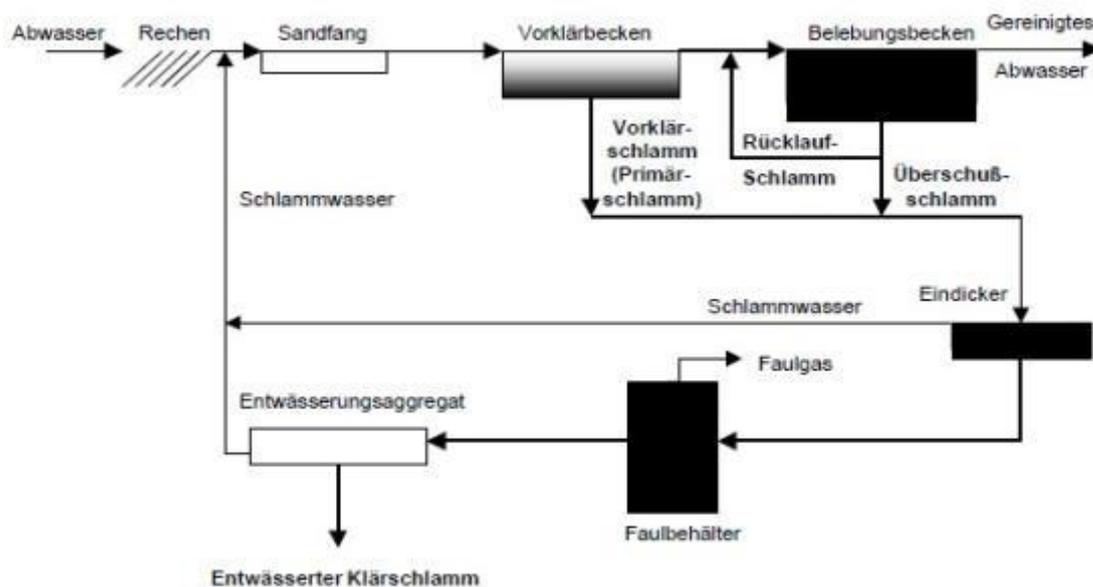


Abb. 4.2 Schematische Darstellung einer kommunalen Kläranlage[23]

Zum Ausfaulen werden Primärschlamm und Überschussschlamm im Faulbehälter zusammengeführt und dort für ca. 21 Tage bei mehrals 30 °C vergoren. In dieser Zeit zersetzen die Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen die komplexen organischen Substanzen der Rohschlämme. Ein Endprodukt dieses Faulungsprozesses ist ein Gasmisch aus ca. 40 % Kohlendioxid und ca. 60 % Methan.[22] Nach der Vergärung wurde der Großteil der organischen Stoffe von den Bakterien umgewandelt. Die Bakterien sind abhängig von der Fahrweise der Kläranlage mehr oder weniger aktiv und befinden sich in einer Hungerphase. An dieser Stelle wird der Faulschlamm als Impfschlamm genommen. Das während des Faulungsprozesses produzierte Biogas kann zur Energiegewinnung im Blockheizkraftwerk genutzt werden. Der Faulungsprozess hat auch andere Funktionen, so z.B. die Reduzierung von Abfallstoffen, die Verminderung der Geruchsbelästigung und die Vernichtung von pathogenen Keimen.

4.1.1.3.1 Mikroorganismen im Faulschlamm

Ein gesunder Faulschlamm enthält eine Vielzahl von Mikroorganismen. Diese Mikroorganismen können ganz unterschiedliche Materialien wie beispielsweise Gülle, Silage, Lebensmittel- und Bioabfälle bzw. die darin enthaltenen Fette, Kohlehydrate und Eiweiße in Biogas umwandeln. Wir können das Fermentersubstrat vereinfacht als einen einzigen, komplexen Organismus sehen, der sich wie der Mensch aus speziellen Untereinheiten zusammensetzt. Man nennt die unterschiedlichen spezialisierten Zellen, die unterschiedlichen Populationen von Mikroorganismen im Faulschlamm - einer Biozönose. Diese Mikroorganismen haben jeweils spezielle Teilaufgaben bei dem Abbau von Biomasse, wobei Stoffwechselprodukte der einen Art als Nahrung dienen, bis zuletzt Biogas (Methan) entsteht.[24]

Der belebte Schlamm hat eine erstaunliche Leistung. Die Höchstleistungen sind nur dann zu erzielen, wenn insbesondere die Ernährung und die Umweltbedingungen stimmen. Eine Fehlernährung führt nicht nur zur Reduzierung von Gasproduktion. Im schlimmsten Fall wird das Gärsubstrat im weiteren Prozessablauf durch Überproduktion von gewissen Stoffen so stark beeinträchtigt, weil zu wenige Mikroorganismen nachwachsen und absterben. Dann sinkt die Methanausbeute, wenn man keine praktischen Gegenmaßnahmen macht, kommt der Prozess dann unweigerlich zum Ende.[25]



Abb. 4.3 Säurebildner, Essigsäurebildner und Methanbildner v.l.n.r. [25]

4.1.2 Gärrest von Biogasanlage

Als Gärrest wird der flüssige oder feste Rückstand bezeichnet, der bei der Vergärung von Biomasse in einer Biogasanlage zurückbleibt. Wegen seines hohen Gehalts

an Nährstoffen wird er meist als landwirtschaftlicher Dünger verwendet. Auch die Bezeichnung Biogasgülle oder Gärprodukte wird verwendet. Gärrest kann als Impfschlamm in Batchtests einsetzen wird.

4.1.2.1 Bildung des Gärrestes

In Biogasanlagen werden verschiedenste Substrate eingesetzt, wie z.B. Gülle, Maissilage oder Biomüll. Diese enthalten Wasser und organische Verbindungen wie Kohlenhydrate (Zucker, Stärke, Hemicellulose, Cellulose), Proteine, Fette und andere Verbindungen in unterschiedlichen Anteilen. Ein großer Anteil dieser organischen Verbindungen wird während des anaerob stattfindenden Biogasprozesses von Mikroorganismen abgebaut.[26] Durch die Abbauprozesse wird aus dem zähflüssigen bis festen Substrat der flüssige bis zähflüssiger Gärrest mit einem hohen Wasseranteil. Gärreste enthalten zahlreiche Mikroorganismen die wie im Faulschlamm, am Biogasprozess beteiligt und aktiv sind.

4.1.3 Einflußfaktoren auf die Impfschlammqualität

Es gibt drei Einflussfaktoren auf die Qualität:

- die Aktivität der Mikroorganismen im Impfschlamm
- Organischer Trockensubstanzgehalt des Impfschlammes

Durch diese zwei Faktoren kann die Qualität des Impfschlammes beurteilt werden.

4.1.3.1 Zusammensetzung von Faulschlamm und Gärrest

Tabelle 4.1 Zusammensetzung von Faulschlamm[27;S.411],[18] und Gärrest[28]

Parameter	Gärrest von Biogasanlagen mit Nachwachsenden Rohstoffen	Faulschlamm
TS(%)	7,0	3-5
oTS(%)	72,9	45
PH-Wert	8,3	7-8
C/N Verhältnis	6,4	4,8
Stickstoff(g/Kg TS)	67,1	46
Ammonium(g/Kg TS)	38,6	65,7
Phosphor(g/Kg TS)	25,7	11
Kalium(g/Kg TS)	71,4	3,3
Kupfer(g/Kg TS)	Sehr niedrig(K.A.)	0,39
Zink(g/Kg TS)	Sehr niedrig(K.A.)	1,3
Chrom(g/Kg TS)	Sehr niedrig(K.A.)	0,064

Nach der obigen Tabelle kann die Zusammensetzung von Gärrest aus Biogasanlagen und Faulschlamm aus Kläranlagen verglichen werden. Der TS und oTS-Gehalt von Gärrest ist höher als der von Faulschlamm, deshalb es gibt mehr Mikroorganismen und organische Substanzen für die Aufrechterhaltung der Stoffwechselforgänge der Mikroorganismen. Der oTS im Faulschlamm ist sehr viel niedriger als im Gärrest, weshalb die Mikroorganismen weniger aktiv sind als im Gärrest. Der PH-Wert von Gärrest und Faulschlamm ist in einem zulässigen Bereich und nicht sehr unterschiedlich. Das C/N Verhältnis von Gärrest ist nicht viel größer als das von Faulschlamm. Das C/N-Verhältnis beschreibt die Gewichtsanteile von Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N) und ist ein gängiger Indikator der Stickstoff

verfügbarkeit für Mikroorganismen. Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N) sind zwei wichtige Nährstoffe für Mikroorganismen. Kohlenstoffverbindungen sind die Kraftquelle der Mikroorganismen und Stickstoff der Rohstoff für die Erzeugung neuer Zelle. Das optimale C/N Verhältnis für die Vergärung ist 10 bis 20.[18]

Das C/N Verhältnis im Gärrest und im Faulschlamm ist ähnlich, aber die Gesamtmengen von Kohlenstoffe und Stickstoffe ist im Gärrest viel höher als im Faulschlamm. Die Konzentrationen an Hemmstoffen wie Ammonium ist im Gärrest und im Faulschlamm nicht größer als die Grenzkonzentration. (Tabelle 3.3) Schadstoff- und Schwermetallkonzentrationen liegen im Gärrest und im Faulschlamm unter der Grenzkonzentration in Tabelle 3.3. Aber die Konzentration von Schwermetalle im Faulschlamm ist viel größer als die im Gärrest und das Schwermetall ist schädlich für die Mikroorganismen. Je die Konzentration von Schwermetalle niedriger ist, desto ist besser für das Leben von Mikroorganismen. Deshalb durch das obige Diskutieren ist Gärrest der Biogasanlage besser als das bevorzugte Material für Impfschlamm.

4.2 Referenzsubstrat-mikrokristalline Cellulose

Um sicherzustellen, dass die biologische Aktivität des eingesetzten Impfschlammes in Ordnung ist, soll in einem Ansatz ein Substrat mitvergoren werden, dessen Biogaspotenzial bekannt ist. Dieses Referenzsubstrat soll zum einen nicht zu schnell vergären und zum anderen aber vollständig abbaubar sein. Hier bietet sich beispielsweise mikrokristalline Cellulose (Abb. 4.4) an. [5:S.53], da sie aufgrund der chemischen Struktur schwerer biologisch abbaubar ist.

Bei einem 100%igen Umsatz der mikrokristallinen Cellulose würde ein Methanvolumen von ungefähr 358,08 ml/g_{oTS} entstehen. Nach der VDI 4630 sollte dieser Wert im Kontrollansatz zu 80 % erreicht werden. Durch eine Verbesserung der Impfschlammqualität soll der Abbaugrad der mikrokristallinen Cellulose über 90% erreicht werden.

Im folgenden Abschnitt werden einige Grundlagen zum Standardsubstrat Mikrokristalline Cellulose genannt.

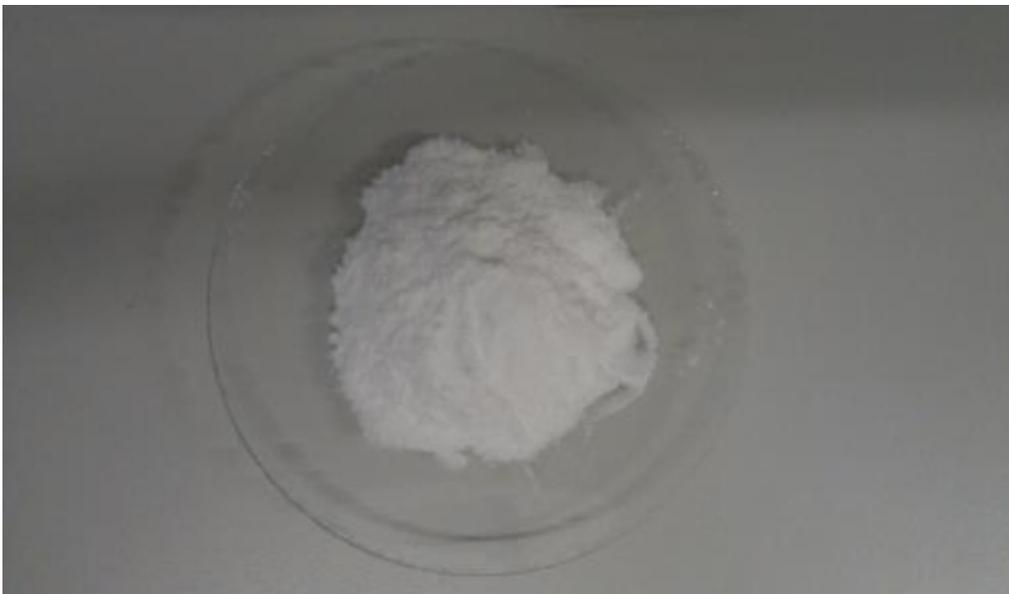


Abb. 4.4 mikrokristalline Zellulose

4.2.1 Chemie

Cellulose ist ein Vielfachzucker aus dem Monomer Cellobiose, einem Zweifachzucker. Die Monomere sind durch β -1,4-glycosidische Bindungen miteinander verknüpft. Die Cellobiose selbst besteht aus zwei Molekülen des Einfachzuckers Glucose. Deshalb wird die Glucose auch häufig als Monomer der Cellulose definiert.[29]

Die Verknüpfung der Monomere erfolgt durch eine Kondensationsreaktion, bei der zwei Hydroxygruppen (-OH) ein Wassermolekül (H_2O) bilden und das verbleibende Sauerstoffatom die ringförmige Grundstruktur (Pyranring) der beiden Monomere verbindet. Neben dieser starken, kovalenten Bindung werden intramolekular zusätzlich die weniger starken Wasserstoffbrücken ausgebildet. Häufig besteht ein Cellulosemolekül aus mehreren tausend Glucoseeinheiten.[29]

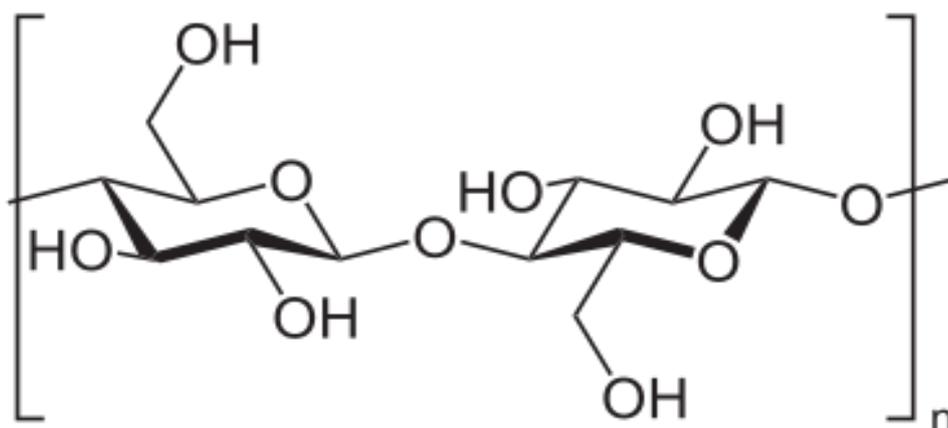


Abb. 4.5 Ein Glucose Dimer, dargestellt in Sesselkonformation (Cellobiose-Einheit)[29]

4.2.2 Gewinnung mikrokristalliner Cellulose

Zellstoff ist das Ausgangsmaterial zur Produktion von MCC. Zunächst erfolgt die Fällung der α -Cellulose, die Polymerisationsgrade von über 2.000 aufweist, mithilfe von Natronlauge. Nach einer anschließenden Reinigung und mechanischen Zerkleinerung wird die α -Cellulose einer partiellen, sauren Hydrolyse unterworfen, wodurch die Depolymerisation eintritt. Der Polymerisationsgrad der Cellulosefasern sinkt und der kristalline Anteil steigt, da vor allem

amorphe Bereiche entfernt werden. Anschließende Sprühtrocknung liefert die pulverförmige mikrokristalline Cellulose mit unterschiedlichen Partikelgrößen.[30]

4.2.3 Eigenschaften mikrokristalliner Cellulose

Mikrokristalline Cellulose ist ein geruchloses, geschmackloses, sehr feines, weißes, kurzes stabförmiges, amorphes kristallines Pulver mit einer Teilchengröße von 20-80µm. Sie ist unlöslich in Wasser, Säure, organische Lösungsmittel und Öle, aber wird in verdünnter alkalischer Lösung teilweise gelöst. [31] Mikrokristalline Cellulose hat folgende grundlegende Merkmale: die Kristallinität ist höher als bei der ursprünglichen Zellulose und sie besitzt eine starke Wasseraufnahmefähigkeit.[31]

Mikrokristalline Cellulose wird in der anaeroben Gärung zu Biogas umgesetzt, auch hier sind anaerobe Bakterien beteiligt, die die Cellulose zu Fettsäuren umsetzen. Weiterhin sind nicht nur Wiederkäuer sondern auch Pferde und Wassergeflügel in der Lage Zellulose zu verstoffwechseln, wobei bei letzteren die Verarbeitung im Dickdarm stattfindet. Einige Insekten, wie beispielsweise das Silberfischchen (*Lepisma*), sind in der Lage, mit körpereigenen Cellulasen Cellulose zu verdauen, und sie sind nicht auf Endosymbionten angewiesen.

4.2.4 Nutzung mikrokristalliner Cellulose

MCC(mikrokristalline Cellulose) ist der bevorzugte Hilfsstoff zur Herstellung von Tabletten, da er sowohl die Fließeigenschaften der Pulvermischung beeinflusst als auch aufgrund seiner plastischen Deformierbarkeit die Ausformung der Pellets während des Extrudierens bzw. Sphäronisierens begünstigt.[30] Auch in der Nahrungsmittelindustrie wird Cellulose bzw. werden Cellulosederivate verwendet, z. B. als Verdickungsmittel, Trägerstoff, Füllstoff, Trennmittel, Überzugsmittel und Schaummittel.[29]



Abb. 4.6 Produkte mit mikrokristalliner Cellulose[33]

4.3 AMPTS II

Um die erzeugten Methanmengen genauer zu messen, wird ein Automatische Methan Potential Test System in den Batchtests verwendet. Das Automatische Methan Potential Test System (AMPTS) II ermöglicht die Bestimmung des biochemischen Methanpotenzials und des dynamischen Abbauprofils jeglicher Biomassesubstrate.

4.3.1 Aufbau des AMPTS II

Die Gerätekonfiguration kann in drei Einheiten unterteilt werden: A, B und C
(Abb. 4.7)



Abb. 4.7 Anordnung und Komponenten des AutomaticMethane Potential Test System [32]

In Einheit A (Probe Inkubationseinheit; Abb. 4.8) werden bis zu 15 Flaschen, in der geringe Mengen einer Probe mit anaeroben Impfschlamm eingewogen werden, auf eine gewünschte Temperatur erwärmt. Die Medien in den Flaschen werden durch einen langsam laufenden Rührer vermischt. Die Rührgeschwindigkeit kann im Softwareprogramm eingestellt werden. Damit am Anfang eine anaerobe Atmosphäre gewährleistet werden kann, werden die Flaschen mit Stickstoff gespült.



Abb. 4.8 Einheit A :Probe Inkubationseinheit[32]Abb. 4.9 Einheit B: CO₂-Fixiereinheit[32]

In Einheit B (CO₂-Fixiereinheit; Abb.4.9) wird das Biogas jeder Flaschen durch eine Waschflasche mit einer alkalischen Lösung(3M NaOH) geleitet. Bestandteile wie CO₂ und H₂S werden in der NaOH zurückgehalten, so dass nur CH₄ zur Gasmesseinheit gelangt.

In Einheit C (Gasvolumenmessgerät; Abb.4.10) wird das Methangasvolumen mittels Kippzählereinrichtung gemessen.Wenn ein definiertes Volumen in das Gerät strömt, sammelt es sich unter einer Wippe. Hat sich genügend Gas angesammelt, reicht der Auftrieb des Gases aus die Wippe umzuklappen, wodurch das Gas entweichen kann. Danach kippt die Wippe in ihre Ausgangsposition zurück und einströmendes Gas sammelt sich von neuem unter der Wippe. Jede Bewegung beim Umschlagen der Wippe erzeugt einen elektrischen Impuls, der von der Datenerfassung aufgenommen wird. Die Datenerfassung erfolgt im Messsystem, die Datenauslesung und Auswertung ist mittels angeschlossenem Computer möglich.



Abb. 4.10 Einheit C :Gas Volumen Messgerät[32]

4.3.2 Vorbereitung des AMPTS II

Zuerst wird das Wasserbad mit destilliertem Wasser gefüllt und die Temperatur auf 36°C eingestellt. Für die Einheit B werden die kleine Gasflasche mit ungefähr 80 ml 3N Natriumlaugen gefüllt.

Für den Batchversuch wird in jede Referenzflasche mit 2,4g mikrokristalliner Cellulose eingewogen.Nach dem Einwiegen werden die Proben mit 400ml Impfschlamm gefüllt und die Motoren installiert. Anschließend werden die Glasflaschen ins Wasserbad gegeben.

Danach werden die Kabel der Motoren und die einzelnen Einheiten mit Schläuchen verbunden. Am Ende werden die Ansätze mit Inertgas(N₂) gespült und abschließend die Software des Gaserfassungssystems im Computer gestartet.

4.3.3 Vorteile des AMPTS II

Mit dem Automatische Methan Potential Test System (AMPTS) II werden das Gaspotenzial leichter und genauer gemessen.

In jeder Flaschen der Einheit A ist ein Rührer enthalten. Durch den Rührer wird das Substrat kontinuierlich mit dem Impfschlamm vermischt. Eine Geschwindigkeitseinstellung des Rührers über die Software möglich, um die Rührerleistung an die Viskosität des Gärmediums anzupassen.

Zweitens werden Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff im Biogas durch NaOH in der Einheit B zurückgehalten. Dadurch ist eine Bestimmung des Methanpotenzials des Substrats möglich.

Drittens können sehr geringe Methanproduktionen in Einheit C gemessen werden.

Viertens braucht man nicht jeder Tag die erhöhten Gasmengen zu notieren und rechnerisch auf das Normvolumen korrigieren. Es ist dennoch möglich, die Methanproduktion während des Versuchs zu überwachen und die Daten als ein Dokument herunterzuladen. Dadurch ist eine Zeiteinsparung bei der Durchführung der Batch-Untersuchung möglich.

4.3.4 Nachteile des AMPTS II

Das AMPTS II ist relativ teuer im Vergleich zu anderen Messsystemen für Batch-Untersuchung und benötigt eine kontinuierliche Versorgung mit elektrischem Strom. So entstehen zusätzliche Stromkosten und bei einem Stromausfall kommt es zum Datenverlust. Das System

misst in diesem Zeitraum keine Methanproduktion. Deshalb ist eine Prüfung der Gerätefunktion jeden Tag notwendig.

4.4 Analytik

Zur Charakterisierung des eingesetzten Impfschlammes werden zuerst der Trockensubstanzgehalt (TS) nach DIN12880 und der organische Trockensubstanz(oTS) nach DIN 12879 bestimmt.

a) Bestimmung der Trockensubstanz

Der Trockensubstanzgehalt (TS-Gehalt) ist der Anteil einer Probe, der nach vollständigem Verdampfen des enthaltenen Wassers (bei 105 °C bis 110 °C) zurückbleibt. Der TS-Gehalt wird in Massenprozent angegeben.

Zuerst wird das Leergewicht des Tiegels eingewogen und im Protokoll notiert. Dann wird die Probe in den Tiegel gegeben und das Gewicht des gefüllten Tiegels bestimmt.

Danach werden die gefüllten Tiegel in den Trockenschrank (sehen Abb.4.11) bei 105 °C gelegen, bis Gewichtskonstanz beliebt. Die Zeit vom Trocknen dauert ca. 24-48 Stunden. Nach dem Trocken werden das Wasser und leicht flüchtige Bestandteile erfolgreich entfernt.



Abb. 4.11 Trockenschrank

Der TS-Gehalt wird nach die folgenden Gleichung rechnet:[34]

$$TS = 100 * \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1}$$

TS: Trockensubstanzgehalt in %

m_2 : Masse des Tiegels nach Probenzugabe in g

m_3 : Masse des Tiegels nach Trocknung in g

Formel 4.1 Berechnung des TS-Gehalts

b) Bestimmung der organischen Trockensubstanz

Für die Bestimmung der organische Trockensubstanz wurden die Tiegel mit den getrockneten Proben im Muffelofen (siehe Abb. 4.12) bei 220 °C für 30 min und anschließend bei 550°C für 2 Stunden geglüht.

Nach dem Glühen werden die heißen Tiegel mittels der Zange in die Exsikkatoren, die mit Silikagel gefüllt werden, gestellt. Ca. 1 Stunde später ist die Abkühlung schon fertig. Dann können die Tiegel mit geglühter Probe noch mal eingewogen werden. Nach dem Auskühlen der Tiegel werden diese nochmals gewogen.

Berechnung der organischen Trockensubstanz: [34]

$$oTS = 100 * \frac{m_3 - m_4}{m_3 - m_1}$$

oTS: organischer Trockensubstanzgehalt in %TS

TS: Trockensubstanzgehalt in %

m_1 : Masse des leeren Tiegels in g

m_2 : Masse des Tiegels nach Probenzugabe in g

m_3 : Masse des Tiegels nach Trocknung in g

m_4 : Masse des Tiegels nach Glühen in g

Formel 4.2 Berechnung des oTS-Gehalts



Abb. 4.12 Muffelofen

c) Bestimmung des PH-Werts

Nach der Probenahme erfolgte die Messung des pH-Wertes mit dem pH-Messgerät WTW pH 340 der Firma VWR, das eine Ag/AgCl-Elektrode besitzt.(sehen Abb.4.11)



Abb. 4.13pH-Messgerät



Abb. 4.14 die Zentrifuge

Zur Charakterisierung des eingesetzten Impfschlammes wurde die Probe 10 Minuten bei 10 °C bei 10000g mit einer Zentrifuge (Biofuge Stratos) der Firma Thermo (Abb. 4.12) zentrifugiert. Die klare Flüssigphase wurde für die weiteren Analysen (FOS, FOS/TAC, NH₄-N, Fettsäurespektrum) genutzt. Der Grund der Trennung der Fest- und Flüssigphase besteht darin, dass Feststoffe zu Fehlern bei den Analysen führen können.

d) Bestimmung von FOS

Die Konzentration der flüchtigen organischen Säuren und der FOS/TAC-Wert wurden mittels Mettler Toledo Typ Rondo T90 bestimmt. 10 ml der Klarphase wurden mit dem Titrationsautomaten in Stufen bis zu den pH-Werten 5; 4,4; 4,3 und 4,0 titriert. Mit den Säuremengen, die während der Titration verbraucht wurden, lässt sich der FOS und der FOS/TAC-Wert berechnen.

Die Berechnungsgleichung ist folgende: [34]

$$FOS = 131340 * (V_{pH4,00} - V_{pH5,00}) * \frac{N_{H_2SO_4}}{V_{Probe}} - 3,08 * V_{pH4,30} * \frac{N_{H_2SO_4}}{V_{Probe}} * 1000 - 10,9$$

$$Ks_{4,3} \left[\frac{mmol}{l} \right] = V_{pH4,30} * \frac{N_{H_2SO_4}}{V_{Probe}} * 1000$$

FOS: Konzentration der flüchtigen organischen Säuren in mg/l

V_{pH4,00}: Volumen zutitrierter Säure bis zu pH = 4,00 in ml

V_{pH4,30}: Volumen zutitrierter Säure bis zu pH = 4,30 in ml

V_{pH5,00}: Volumen zutitrierter Säure bis zu pH = 5,00 in ml

V_{Probe}: Volumen vorgelegter, zentrifugierter Probe in ml

N_{H₂SO₄}: Normalität der Säure (molare Konzentration der Hydroniumionen der Säure) in mol/l

Ks_{4,3}: Alkalität 4,3 [mmol/l] (Normenausschuss Wasserwesen; DIN 38409-7; 2005; Beuth Verlag) in mmol/l

Formel 4.3 Berechnung von FOS nach Kapp

Gültigkeitsbereich:

Säuren von bis 70 mmol/l (0 bis 4203 mg_{HAC}/l)

NH₄⁺-N von 400 bis 10000 mg/l

e) Bestimmung des Ammoniumstickstoffgehaltes

Die Bestimmung des Ammoniumstickstoffgehaltes wurde mit einem Photospektrometer HACH DR/2000 (bei 425 nm)(sehen Abb. 4.13) durchgeführt.

Da die Ammoniumstickstoffkonzentration der Klarphase den Messbereich des Messgerätes überschreitet, wurde die Klarphase 1 zu 2000 verdünnt (125 µl mit destilliertem Wasser auf 250 ml). Von den 250 ml wurden 25 ml in eine Küvette pipettiert. Danach wurden 3 Tropfen Mineralstabilisator, 3 Tropfen Polyvinylalkohol und 1 ml Neßler-Reagenz zugegeben und die Küvette durch Schwenken durchmischt. Um das Gerät zu kalibrieren wurde eine Blindprobe gemessen, bei der an Stelle von verdünnter Klarphase destilliertes Wasser eingesetzt wurde. Am Ende erfolgt die Messung des Ammoniumstickstoffgehaltes.



Abb. 4.15das Photospektrometer

f) Bestimmung der Konzentration organischer Säuren

Um die Konzentration der flüchtigen Fettsäuren zu bestimmen wurden die Proben mittels Gaschromatographie analysiert. Für die Analyse mittels Gaschromatographie wurden 5 ml Probe mit 1000 µL Phosphorsäure sowie 1000 µL internem Standard (2-Ethylbuttersäure) versetzt und im Kühlschrank aufbewahrt

g) Nettogasproduktion

$$V_{\text{netto}} = V_{\text{brutto}} - V_{\text{blind}}$$

V_{netto} : die Nettogasproduktion der Referenzprobe in ml

V_{brutto} : die Gesamt(brutto)Gasproduktion von Referenzprobe in ml

V_{blind} : die Gasproduktion von Blindprobe in ml

Formel 4.4 Berechnung von Nettogasproduktion

h) Spezifische Gasproduktion

$$V_S = \frac{V_{\text{netto}}}{m_R * TS_R * oTS_R}$$

V_S : spezifische Gasproduktion in ml/g_{oTS}

V_{netto} : die Nettogasproduktion der Referenzprobe in ml

m_R : die Masse der Referenzprobe in g, hier 2,4 g

TS_R : Trockensubstanz der Referenzprobe in %, hier 96%

oTS_R : organische Trockensubstanz der Referenzprobe in %, hier 100%

Formel 4.5 Berechnung von spezifischer Gasproduktion

i) Abbaugrad

$$\text{Abbaugrad} = \frac{V_s}{V_{100\%}} * 100\%$$

V_s : spezifische Gasproduktion im Fermenter in ml/g_{oTS}

$V_{100\%}$: spezifische Gasproduktion bei 100%-Umsatz der Referenzprobe in ml/g_{oTS},
entspricht 358,08ml/g_{oTS}

Formel 4.6 Berechnung von Abbaugrad

5. Versuchsplanung und -durchführung

Das Impfmateriale soll hinsichtlich unterschiedlicher Aktivitäten (abhängig von zeitlicher Impfmaterialelagerung) und unterschiedlicher Feststoffkonzentrationen im anaeroben Testsystem AMPTS II untersucht werden. Hinsichtlich des Lagerungszeitraumes wird das Impfmateriale in 4 unterschiedlichen Alterungsstufen untersucht: Direkt nach Entnahme aus dem Faulbehälter (T=0), nach 1-wöchiger (T=1), nach 3-wöchiger (T=3) und nach 6-wöchiger (T=6) Lagerungszeit (im Brutschrank bei 38°C, Abb.5.1).



Abb. 5.1 Brutschrank und Lagerbehälter

Die unterschiedlichen Feststoffkonzentrationen werden mittels Zentrifugieren eingestellt: C(1)=3,18% (Original), C(2)=3,5%, C(3)=4% und C(4)=4,5%. Zuerst ist die Berechnung vorzunehmen, wie viel Wasser nach der Zentrifugierung von dem originalen Impfschlamm

entfernt werden soll, um die gewünschte Feststoffkonzentration des eingesetzten Impfschlammseinzustellen. Aus den Berechnungen ergeben sich folgende Werte.

(Tabelle 5.1)

Tabelle 5.1 Vorbereitung von Impfschlamm

TS _{Original}	TS _{Soll}	Wasserentnahme
%	%	ml/l
3,18	3,5	91
3,18	4,0	205
3,18	4,5	293

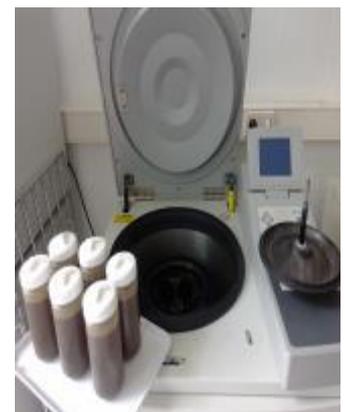
Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die Impfschlammvorbereitung.(Abb. 5.2)



Impfschlamm in den Zentrifugierungsflaschen wiegen



die eingewogenen Flaschen in die Zentrifuge setzen



Falschen aus der Zentrifuge nehmen, Wasser nach Tabelle 5.1 entfernen und das restliche Wasser mit dem Feststoffausreichend mischen

Abb. 5.2 Beschreibung der Zentrifugierung des Impfschlamm

Insgesamt werden zeitlich aufeinanderfolgend 4 Untersuchungsansätze (Test 1 bis Test 4) durchgeführt, der Versuch dauert an bis die Gasproduktion abgeschlossen ist. Dabei wird das Impfmateriale ohne (Blind) und mit mikrokristalline Cellulosezugabe (Referenz) jeweils als Dreifachansatz überprüft. Die eingesetzte Cellulose wird in einer Konzentration von 6g/l

Impfmateriel zudosiert. Die Untersuchungstemperatur beträgt T=36°C. Die Durchmischung der Suspension erfolgt mittels Rührer bei einer Leistung von 60%. Als Volumen werden jeweils V=400ml Impfmateriel je Testgefäß eingewogen. Eine Übersicht der Versuchsplanung ist in Tabelle 5.2 dargestellt.

Tabelle 5.2 Versuchsplanung von AMPTS

Datum	Probenansatz							
18.04.2013 bis 25.04.2013	C1-T0- B	C1-T0- R	C2-T0- B	C2-T0- R	C3-T0- B	C3-T0- R	C4-T0- B	C4-T0- R
25.04. 2013 bis 07.05.2013	C1-T1- B	C1-T1- R						
07.05.2013 bis 28.05.2013	C1-T3- B	C1-T3- R	C2-T3- B	C2-T3- R	C3-T3- B	C3-T3- R	C4-T3- B	C4-T3- R
28.05.2013 bis 04.07.2013	C1-T6- B	C1-T6- R	C2-T6- B	C2-T6- R	C3-T6- B	C3-T6- R	C4-T6- B	C4-T6- R

Bemerkung:C1-3,18% T0-Keine Lagerdauer

B-Blindprobe

C2-3,5% T1-1 Woche Impfschlamm Lagerdauer

R-Referenzprobe

C3-4,0% T3-3 Woche Impfschlamm Lagerdauer

C-Impfschlammkonzentration

C4-4,5% T6-6 Woche Impfschlamm Lagerdauer

Zur Charakterisierung ist das eingesetzte Impfmateriel hinsichtlich folgenderParameter zu untersuchen: PH, TS, oTS, NH₄⁺,FOS/TAC und organische Säure.

6. Ergebnisse und Diskussion

6.1 Charakterisierung der Impfschlämme

Vor und nach den Batchtests werden verschiedene Parameter der Impfschlammproben untersucht, um die Eigenschaft des Impfschlamm zu charakterisieren.

6.1.1 TS und oTS

Die Feststoffkonzentrationen des Impfschlamm wurden berechnet und durch zentrifugieren eingestellt. Die Abweichung zwischen den berechneten Werten und den tatsächlichen TS-Konzentrationen sind vor jedem Batchtest bestimmt worden.

Tabelle 6.1 TS und oTS des Impfschlamm

	T0		T1		T3		T6	
C(%)	TS(%)	oTS(%)	TS(%)	oTS(%)	TS(%)	oTS(%)	TS(%)	oTS(%)
3,18	3,18	63,69	3,2	63,57	3,23	63,74	3,25	63,1
3,5	3,42	63,97	-	-	3,45	63,89	3,48	63,45
4	3,73	64,37	-	-	3,75	64,22	3,90	63,91
4,5	4,15	64,81	-	-	4,23	64,21	4,34	64,46

6.1.2 PH-Wert

Der PH-Wert gibt Aufschluss über die Eignung der Millieubedingungen für Mikroorganismen im Gärmedium, insbesondere für die Methanbildner, da der geeignete pH-Wert für Methanbildner neutral bis schwach alkalisch von 6,8 bis 8 sein sollte. Der pH-Wert ist jeweils vor dem Versuchsstart bestimmt worden.

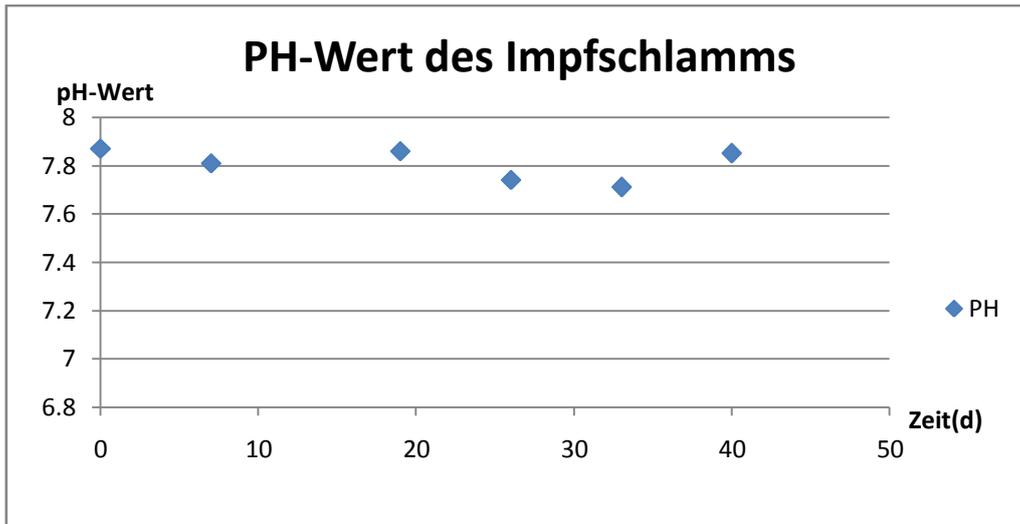


Abb. 6.1 PH-Wert des Impfschlammms

Die Grafik zeigt, dass der pH-Wert während der Lagerung innerhalb eines Bereichs zwischen 6,8 bis 8 lag. Dieser Bedingungen sind geeignet für das Leben von Methanbildnern. Die Schwankung des pH-Wertes, beeinflusst die Qualität des Impfschlammms nicht. Der Impfschlamm ist während der Lagerung nicht versäuert .

6.1.3 FOS

Die Säurekapazität gibt einen Hinweis auf die Konzentration der flüchtigen organischen Fettsäuren von Impfschlamm..

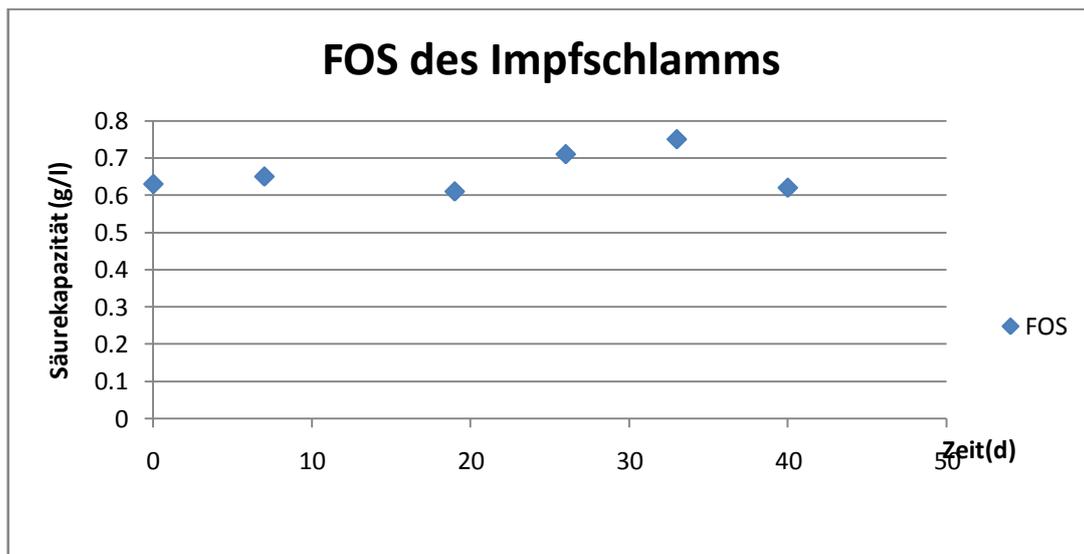


Abb. 6.2 Säurekapazität des Impfschlammms

Wie die Abbildung 6.2 zeigt, ist die Säurekapazität während der gesamten Lagerdauer des Impfschlammes nicht zu hoch. Die Grenzkonzentration der Säurekapazität ist 2 g/l. Wenn die tatsächliche Säurekapazität des Impfschlammes höher als 2 g/l ist, dann kann die Aktivität Mikroorganismen gehemmt sein. Der Impfschlamm war demnach nicht durch hohe Säurekonzentrationen gehemmt.

6.1.4 Ammonium

Beim Abbau stickstoffhaltiger organischer Substanzen, wird Ammoniak gebildet. Ammoniak bildet in Wasser ein Dissoziationsgleichgewicht mit Ammonium aus. Stickstoff wird für den Zellaufbau benötigt und ist somit ein lebensnotwendiger Nährstoff. Auf der anderen Seite konnte nachgewiesen werden, dass hohe Konzentration an Ammonium/Ammoniak im Gärmedium hemmende Wirkung auf die Methanbildung haben.

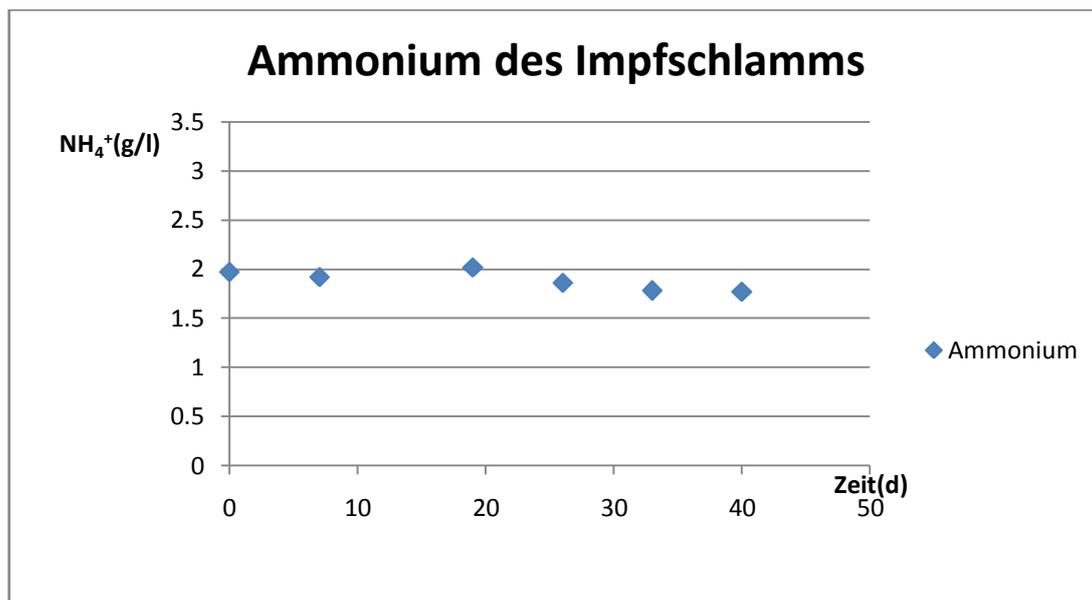


Abb. 6.3 Ammonium des Impfschlammes

Nach der obigen Grafik ist die höchste Konzentration von Ammonium im Impfschlamm ca. 2,0 g/l. Die Grenzkonzentration 3,5 g/l Ammonium kann bei der Vergärung zu einer Hemmung führen. Da die höchste Konzentration von Ammonium viel niedriger als 3,5 g/l ist, ist der Impfschlamm noch gesund und kann in der Batchtests verwendet werden.

6.1.5 Organischer Säure

Organische Säuren sind ein Zwischenprodukt bei der Bildung von Biogas. Im stationären Zustand sind die Geschwindigkeiten von Säurebildung und Umwandlung gleich, so dass die Konzentration im Fermenter konstant ist.

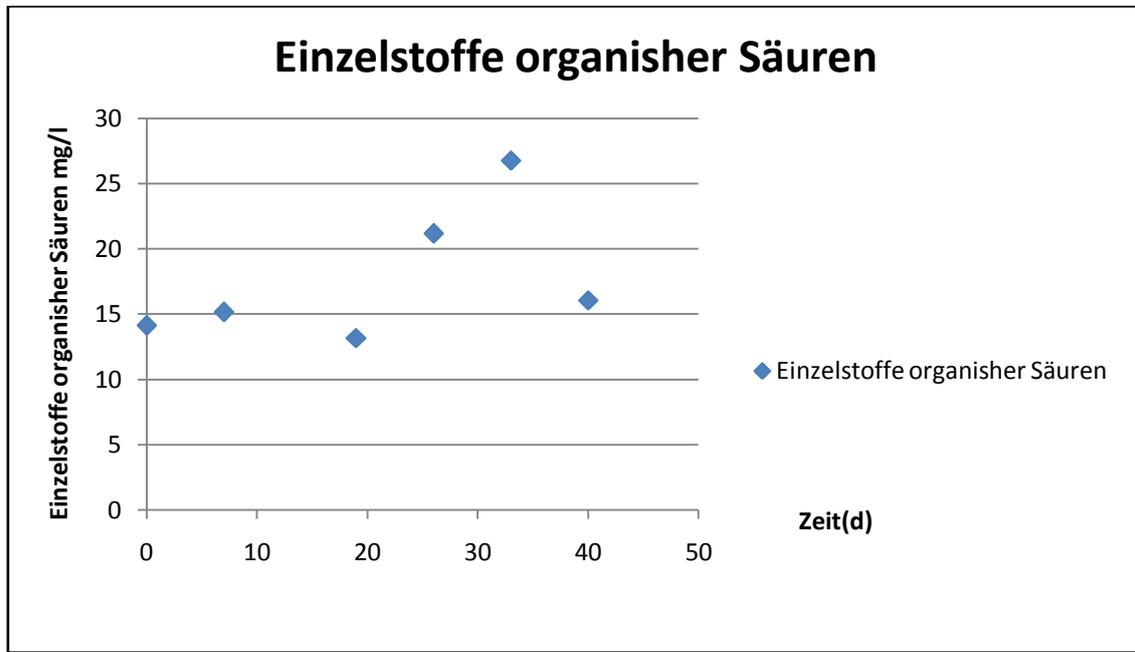


Abb. 6.4 Einzelstoffe organischer Säuren

Die organischen Säuren im gelagerten Impfschlamm sind fast vollständig Essigsäure. Die Grenzkonzentration der Essigsäure im Impfschlamm wird mit 100 bis 300 mg/l angegeben. [5;S.90] Die Gesamtkonzentration der organischen Säuren im Impfschlamm ist mit höchstens 27 mg/l sehr viel niedriger als die Grenzkonzentration. Es gibt eine Schwankung der Messwerte, diese ist sehr klein und liegt im Fehlerbereich der Messmethode. Die Konzentration an organischen Säuren liefert keinen Hinweis auf eine Hemmung des Impfschlammes.

6.2 Gasausbeute

Eine Übersicht der Methanproduktion ist in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.2 die Methanproduktion aller Probe

C (%)	T0		T1		T3		T6	
	Blind (ml)	Referenz (ml)						
3,20	*	*	10,70	669,60	25,10	729,60	45,07	684,04
3,50	51,90	832,30	-	-	22,95	754,45	51,1	780,10
4,00	94,10	911,00	-	-	65,57	828,37	70,23	806,43
4,50	103,20	926,50	-	-	75,90	874,40	94,50	841,60

*:wegen technischer Störung konnten die Werte nicht aufgezeichnet werden

Nachfolgend ist die Methanproduktion des Impfschlammes bei unterschiedlichen Feststoffkonzentration und Lagerdauern dargestellt.

-Impfschlamm mit gleicher Lagerdauer und unterschiedlicher Feststoffkonzentration

Infolge einer technischen Störung des AMPTS-Systems sind die Gasbildungswerte der Probe C1 nicht ausgewertet worden. Die folgende Grafik veranschaulicht die Methanproduktion der Ansätze mit der Feststoffkonzentration C2(3,5%), C3(4,0%) und C4(4,5%) und eine Lagerdauer von Null Tagen.

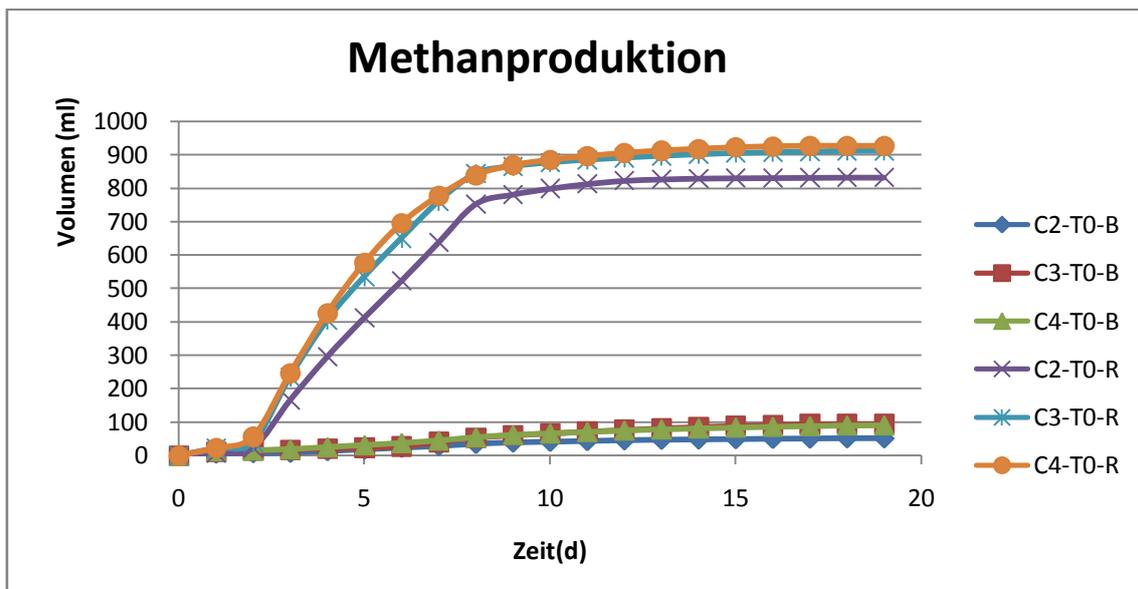


Abb. 6.5 Methanproduktion der Blindprobe und Referenzprobe des Impfschlammes bei unterschiedlicher Feststoffkonzentration und Null Tagen Lagerdauer

Nach Grafik 6.5 ist die Methanproduktion der Referenzprobe viel höher als bei der Blindprobe. Die Methanproduktion der Referenzprobe zeigt deutliche Unterschiede. Je höher die Feststoffkonzentration des Impfschlammes ist, desto größer ist die Methanproduktion der Referenzprobe. Eine hohe Mikroorganismen- und Nährstoffkonzentration im Impfschlamm, führt zu einer verstärkten Methanbildung. Eine hohe Feststoffkonzentration des Impfschlammes kann demnach das Methanpotenzial steigern.

-Impfschlamm mit gleicher Feststoffkonzentration und unterschiedlicher Lagerdauer

Hier werden die Ergebnisse der Methanproduktion der Probe C3(4,0%)-T0(kleine Lagerdauer), C3-T3(3 Wochen Lagerdauer) und C3-T6(6 Wochen Lagerdauer) dargestellt.

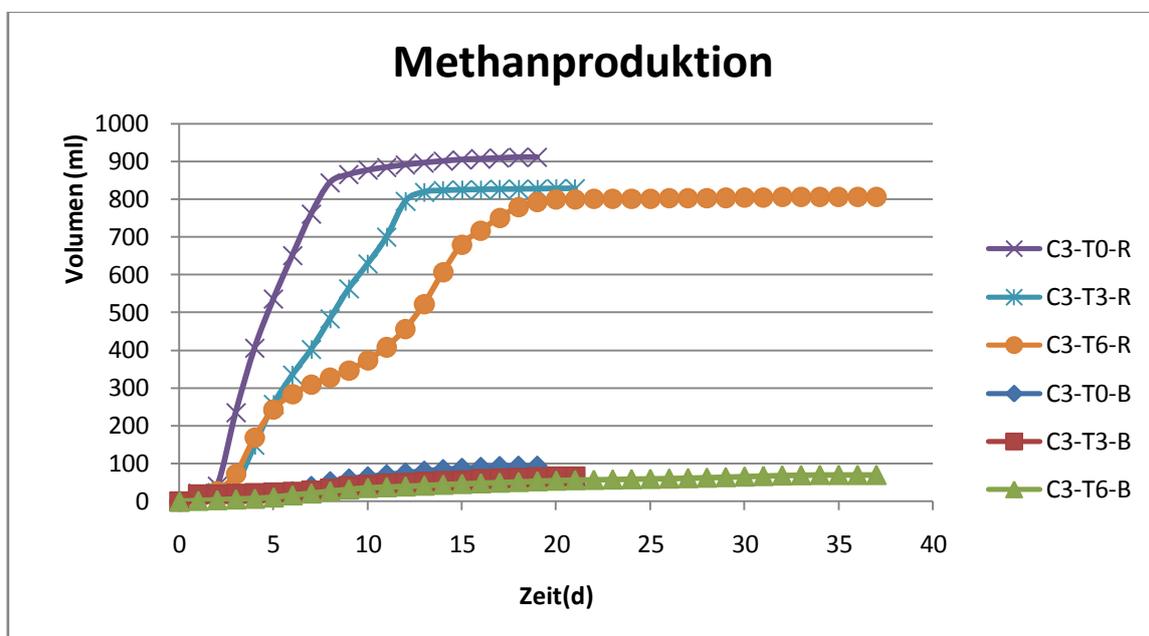


Abb. 6.6 die Methanproduktion von Blindprobe und Referenzprobe des Impfschlammes bei unterschiedlicher Lagerdauer

Die obige Grafik zeigt, dass bei jeder Lagerdauer die Methanproduktion der Referenzprobe größer war als die der Blindprobe. Je länger die Lagerdauer des Impfschlammes ist, desto niedriger ist die Methanproduktion der Blindprobe und Referenzprobe. Mit der gesteigerten Lagerdauer wird auch mehr Zeit bis zu einer konstanten Methanproduktion benötigt. Da die Aktivität der Mikroorganismen mit gesteigerter Lagerdauer sinkt, wird auch die Methanproduktion verschlechtert.

Die Grafische Auswertung zeigt, dass Impfschlamm mit hoher Feststoffkonzentration und kleiner Lagerdauer eine bessere Methanproduktion besitzt.

6.3 Spezifische Gasproduktion

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der spezifischen Gasausbeuten aus dem Referenzsubstrat. Generell steigern die Werte von V_s (spezifische Gasproduktion) mit wachsendem Gehalt an Trockenmasse von 3,18% bis 4,5%. Nach der Tabelle ist die spezifische Methanproduktion der Referenzprobe im Impfschlamm bei keiner Lagerdauer und höchster Feststoffkonzentration am größten.

Tabelle 6.3 die spezifische Methanproduktion der Referenzprobe

	$V_s(\text{ml/g}_{\text{OTS}})$			
	3,18%	3,5%	4,0%	4,5%
T0	*	338,7	354,6	357,3
T1	286,0	-	-	-
T3	305.8	317.5	331.1	346.6
T6	277.3	316.4	319.5	324.3

*:wegen technischer Störung verlieren die Werte

6.4 Abbaugrad

Nach der VDI 4630 ist der Abbaugrad ein wichtiger Parameter, um der Impfschlamm zu beurteilen. Der vorhandene VDI 4630 wird im kommenden Jahr aktualisiert. Anhand der neuen Vorgaben werden in Zukunft voraussichtlich mindestens 90% Wiederfindung des eingesetzten Referenzmaterials gefordert. Die Batchtests zeigen, welcher Batchansatz bei diesen Abbaugrad erreicht.

Der Abbaugrad in Abhängigkeit von der Lagerdauer und der Feststoffkonzentration wurden dargestellt. Infolge technischer Störung werden die Ergebnisse von C1(3,18%)-T0(keine Lagerdauer) nicht ausgewertet, sondern nur die Ergebnisse der Feststoffkonzentration C2, C3 und C4 bei der Lagerdauer T0, T3 und T6. (siehe Abb. 6.7)

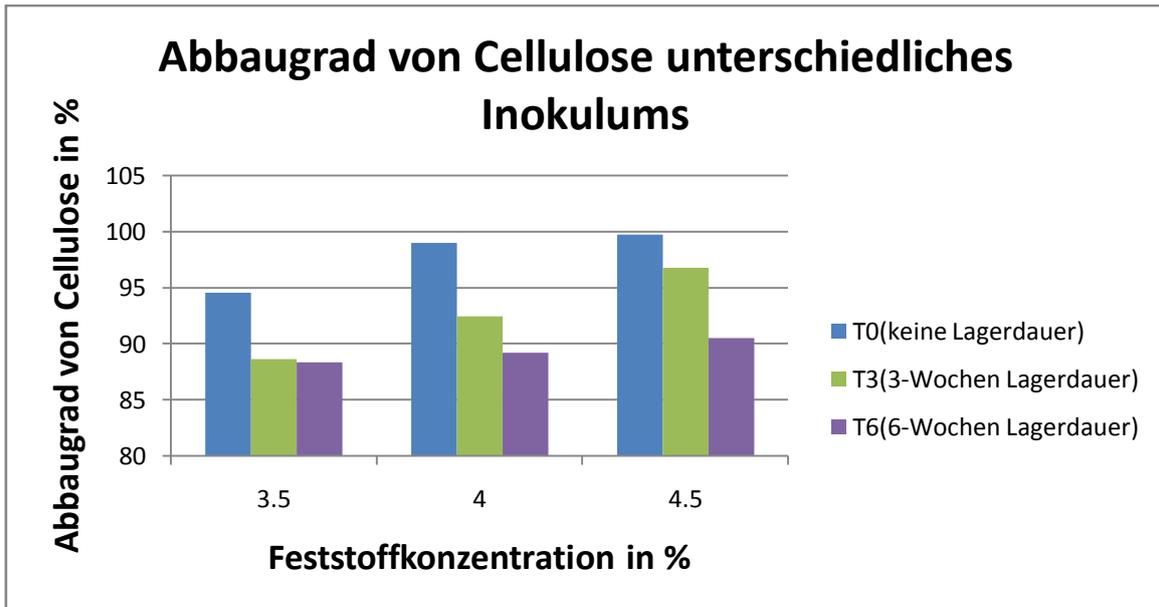


Abb. 6.7 Abbaugrad der Cellulose bei unterschiedlicher Feststoffkonzentration

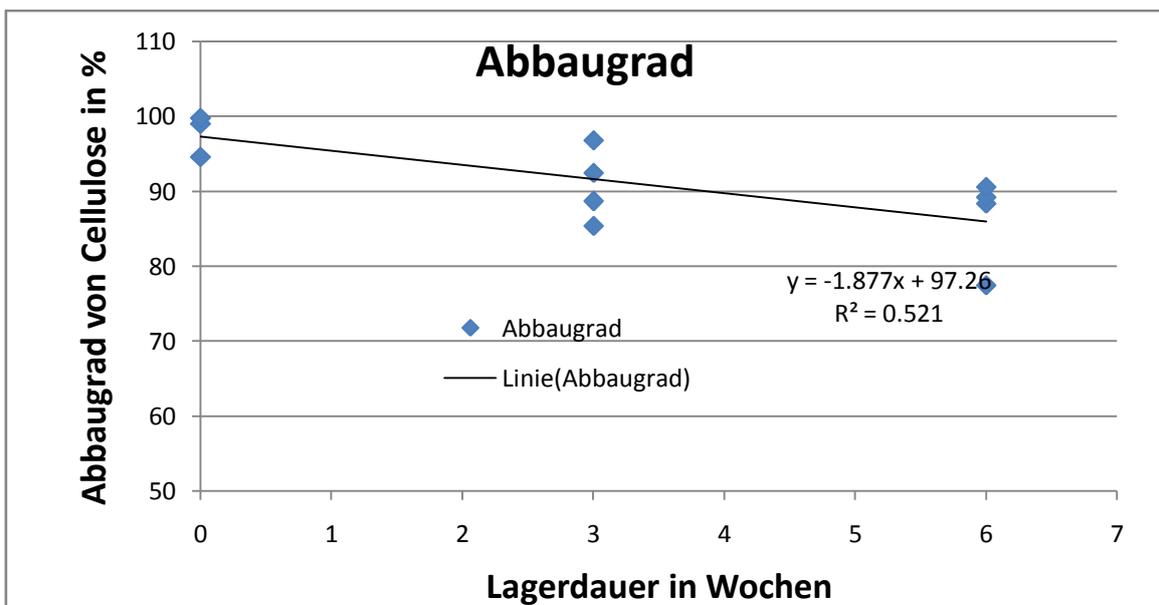


Abb. 6.8 Abbaugrad der Cellulose bei unterschiedlicher Lagerdauer

Nach dem Balkendiagramm(Abb. 6.7) erreicht der Abbaugrad von C2-T0, C3-T0, C4-T0, C3-T3 und C4-T3 90%. Je höher der Feststoffkonzentration ist, desto höher ist der Abbaugrad unabhängig von der Lagerdauer. Da es mehr Mikroorganismen und Nährstoffe im Impfschlamm mit höheren Feststoffkonzentrationen gibt, kann auch ein größerer Teil der eingesetzten Cellulose abgebaut werden. Nach dem Liniendiagramm(Abb. 6.8) kann man deutlich den Zusammenhang zwischen Abbaugrad und Lagerdauer sehen. Je länger die Lagerdauer ist, desto niedriger ist der Abbaugrad bei jeder Feststoffkonzentration. Weil durch die Lagerung des Impfschlammes die Aktivität der Mikroorganismen infolge Nährstoffmangel sinkt, sinkt auch der Abbaugrad. Deshalb sind eine kürzere Lagerdauer und höhere Feststoffkonzentrationen besser für die Impfschlammqualität.

7. Zusammenfassung

Die VDI Methodenvorschrift 4630 empfiehlt zur Qualitätskontrolle diskontinuierlicher Gärtests bei jedem Testdurchlauf Mikrokristalline Cellulose als Referenzsubstrat zu verwenden. Die Gasbildung aus der Referenz sollte mindestens 80% des theoretischen Biogaspotenzials erreichen, um eine ausreichende Aktivität des Impfschlammes zu gewährleisten. Diese Wiederfindung wird am DBFZ regelmäßig erreicht. Eine geplante Aktualisierung der VDI beinhaltet unter anderem eine Erhöhung des geforderten Mindestabbaugrads auf 90%. Nach der VDI 4630 ist das bevorzugte Inokulum für Gärtests unbehandelter Faulschlamm einer Kläranlage. Die durchgeführten Untersuchungen haben allerdings ergeben, dass Faulschlamm eine relativ geringe Aktivität besitzt und ein Zelluloseabbau von 90% nicht in jedem Fall gewährleistet werden kann. Eine Verbesserung der Abbauleistung kann durch Beimischung von aktivem Gärrest einer Biogasanlage erreicht werden. Im Grundlagenteil werden einzelne Parameter von Gärrest und Faulschlamm untersucht und im zweiten Teil werden Versuche zum Einfluss der Inokulumqualität auf den Gasertrag des Referenzsubstrates durchgeführt. Die Auswertung der Versuche hat ergeben,

dass Gärrest einer Biogasanlage eine höhere biologische Aktivität besitzt als Faulschlamm. Eine Mischung aus Faulschlamm und Gärrest scheint ein geeigneterer Impfschlamm zu sein.

Zuerst ist der gelagerte Impfschlamm auf die Parameter PH-Wert, FOS, Ammonium und organische Säure untersucht worden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass keinerlei Inhibierungen vorlagen. Dann wurde die Abbauleistung des Impfschlammes bei unterschiedlichen Feststoffkonzentration und Lagerdauern mit einem Referenzsubstrat untersucht. Die Auswertung der Ergebnisse hat gezeigt, dass je höher die Feststoffkonzentration ist, desto höher ist auch der Abbaugrad bei jeder Lagerdauer. Je länger die Lagerdauer ist, desto niedriger ist der Abbaugrad bei jeder Feststoffkonzentration. Deshalb der Abbaugrad der Referenzprobe von C4-T0 am höchsten und C1-T6 ist am niedrigsten.

Einen Abbaugrad von 90% haben die Impfschlammproben C2-T0, C3-T0, C4-T0, C3-T3 ,C4-T3 ,C4-T6 erreicht. Bei einer Feststoffkonzentration von 4,5% sind die geforderten 90% Abbauleistung unabhängig von der Lagerdauer erreicht worden. Demnach verringert sich der negative Einfluss der Lagerdauer auf die Aktivität durch eine höhere Feststoffkonzentration im Impfschlamm. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen wird deutlich, dass Faulschlamm nur in der Mischung mit Gärrest ein geeignetes Inokulum darstellt.

8. Ausblick

In den Batchuntersuchung sind vier Feststoffkonzentration 3,18%, 3,5%, 4,0% und 4,5% des Impfschlamm eingestellt worden und anschließend der Einfluss auf die Umsetzung eines Referenzsubstrates gemessen worden. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Abbaugrad mit steigender Feststoffkonzentration zunimmt. Weitere Untersuchungen sind nötig, um optimale Feststoffkonzentration des Impfschlammes zu bestimmen. Ein Vergleich

der Zusammensetzung von Gärrest und Fäulschlamm hat ergeben, dass der Gärrest einer Biogasanlage bessere Eigenschaften für den Einsatz als Impfschlamm für Batchtests hat. In den durchgeführten Tests ist eine Mischung aus Gärrest und Fäulschlamm verwendet worden. Weitere Versuche sollten klären, welches Mischungsverhältnis am besten geeignet ist, oder ob nur noch Gärrest als Impfschlamm verwendet werden sollte. Aus der Vorgabe der zukünftigen VDI Norm, dass der Mindestabbaugrad der Referenzprobe 90% sein sollte, ergibt sich weiterer Forschungsbedarf. Darüber hinaus ist eine Übertragung der gewonnenen Aussagen auf Gärmedien im großtechnischen Maßstab sinnvoll. Weitere Wiederholungsversuche zur Bestätigung und Vertiefung der gewonnenen Ergebnisse sollten durchgeführt werden.

Während der Untersuchung der Testserie T0 gab es einen Stromausfall, der zu einem Datenverlust geführt hat. Deshalb ist es erforderlich, dass in regelmäßigen Abständen die Funktion des Messgerätes überprüft wird. Eine automatisierte Sicherung, wie z.B. eine Notstromversorgung, könnte einen erneuten Datenverlust verhindern.

Literaturverzeichnis

[1] Prozessverlauf

Entstehung von Biogas

<http://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/beitrag/10785065/23822284/>

[2] Barbara Eder, Hrsg.

Biogas Praxis

Überarbeitete Auflage 2012

[3] Neues und Wissenswertes über Bioenergie und Biomasse

<http://biomasseblog.de/2013/01/wie-funktioniert-eigentlich-biogas/>

[4] Mac van der Horst und Sven Rademacher

Chemie Referat

März 2002

[5] Deutsches BiomasseForschungszentrum gemeinnützige GmbH

Leitfaden Biogas von der Gewinnung zur Nutzung

Vollständig überarbeitete Auflage, Gülzow, 2010

[6]Peter M.Kunz

Behandlung von Schlamm

1.Auflage.1998

[7]Schlammarten

<http://www.lenntech.de/bibliothek/schlamm/arten/schlammarten.htm>

[8]klärschlamm

<http://www.klaerschlamm-entsorgung.com/index.php?s=klarschlamm>

[9]Fritsche, W. (Hrsg.) (2002)

Mikrobiologie

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg,Berlin

[10]Mudrack, K., Kunst, S. (1994)

Biologie der Abwasserreinigung

4. Auflage, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.

[11]Prof. Dr. Rolf Näveke

Prof. Dr.-ing. Dietmar C. Hempel

Mikrobiologische Untersuchungen zum verbesserten Abbau von Schlamm aus
Abwasserreinigungsanlagen durch Aufschluss

17.08.2000

[12] Institut für Umweltanalytik und Wasserwirtschaft

<http://www.iul-schleswig.de/biogas-allgemein.html>

[13] Biogashandbuch, Bayern - Materialienband

Juli 2007

<http://www.lfu.bayern.de/abfall/biogashandbuch/index.htm>

[14] Kloss. R.

Planung von Biogasanlagen

oldenbourg Verlag, München, 1986

[15] 01.07.2012 Entwicklung von Biogasanlagen in Deutschland

<http://www.gastip.de/News/23690/Entwicklung-von-Biogasanlagen-in-Deutschland.html>

[16] Bernhard Raninger, QianMingyu (GIZ), Dong Renjie (CAU)

China entdeckt Biogas neu

[17] Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme,
Stoffdatenerhebung, Gärversuche

VDI 4630, April 2006

[18]Nie Hong(zhongguoshiyoudaxue)

Chengshiwunichanjiawantexing

30.12.2011

[19]Schlammarten

<http://www.lenntech.de/bibliothek/schlamm/arten/schlammarten.htm>

[20]klärschlamm

<http://www.klaerschamm-entsorgung.com/index.php?s=klarschlamm>

[21]Fritsche, W. (Hrsg.) (2002)

Mikrobiologie

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin

[22]Mudrack, K., Kunst, S. (1994)

Biologie der Abwasserreinigung

4. Auflage, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.

[23]Prof. Dr. Rolf Näveke

Prof. Dr.-ing. Dietmar C. Hempel

Mikrobiologische Untersuchungen zum verbesserten Abbau von Schlamm aus
Abwasserreinigungsanlagen durch Aufschluss

17.08.2000

[24] Dr. –Ing Klemens Finsterwalder

Ernährungsberatung für Biogasanlagen mit BIOTIP

[25] Institut für Umweltanalytik und Wasserwirtschaft

<http://www.iul-schleswig.de/biogas-allgemein.html>

[26] Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Karlsruhe

Inhaltsstoffe von Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten
pflanzenbaulichen Verwertung

Projektbericht, Dezember 2008

[27] Paul Koppe, Alfred Stozek

Kommunales Abwasser

[28] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Handreichung Biogasgewinnung und
–nutzung, ISBN 3-00-014333-5.

Kostenlose 232-seitige Broschüre der FNR

[29] Stryer, Lubert

Biochemie

4. Auflage, korrigierter Nachdruck, Heidelberg, 1999

[30] PHARMAZEUTISCHE HILFSSTOFFE

www.bibliothek.uni-halle.de

[31]Zhang Caili, Zhang Xin

weijinxianweisu de texinzijiyong

Sep. 2006

[32]AMPTS

<http://www.bioprocesscontrol.com>

[33]Energie Plattform

http://energy-plattform.blogspot.de/2012_09_01_archive.html

[34]Formelsammlung von DBFZ

2010.10.19

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1 Die vier Phasen der Faulprozesses

Abb. 3.2 Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas

Abb.3.3 Die installierte Leistung von Biogasanlagen in Deutschland

Abb. 3.4 Entwicklung von Biogasanlagen und Fermentenvolumen von 2001 bis 2010 in China

Abb. 4.1 Der Lagerungsreaktor im Containerlabor

Abb. 4.2 Schematische Darstellung einer kommunalen Kläranlage

Abb. 4.3 Säurebildner, Essigsäurebildner und Methanbildner

Abb. 4.4 mikrokristalline Zellulose

Abb. 4.5 Ein Glucose Dimer, dargestellt in Sesselkonformation (Cellobiose-Einheit)

Abb. 4.6 Produkte mit mikrokristalliner Cellulose

Abb. 4.7 Anordnung und Komponenten des Automatic Methane Potential Test System

Abb. 4.8 Einheit A: Probe Inkubationseinheit

Abb. 4.9 Einheit B: CO₂-Fixiereinheit

Abb. 4.10 Einheit C: Gas Volumen Messgerät

Abb. 4.11 Trockenschrank

Abb. 4.12 Muffelofen

Abb. 4.13 pH-Messgerät

Abb. 4.14 die Zentrifuge

Abb. 4.15 das Photospektrometer

Abb. 5.1 Der Brutschrank von der Lagerung

Abb. 5.2 Erklärung der Zentrifugierung des Impfschlamm

Abb. 6.1 PH-Wert des Impfschlamm

Abb. 6.2 Säurekapazität des Impfschlamm

Abb. 6.3 Ammonium des Impfschlamm

Abb. 6.4 Einzelstoffe organischer Säuren

Abb. 6.5 die Methanproduktion von Blindprobe und Referenzprobe des Impfschlamm bei unterschiedlicher Feststoffkonzentration

Abb. 6.6 die Methanproduktion von Blindprobe und Referenzprobe des Impfschlamm bei unterschiedlicher Lagerdauer

Abb. 6.7 Abbaugrad der Cellulose bei unterschiedlicher Feststoffkonzentration

Abb. 6.8 Abbaugrad der Cellulose bei unterschiedlicher Lagerdauer

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1 Eigenschaften von Biogas

Tabelle 3.2 Mindestanforderungen an den Biogasprozess

Tabelle 3.3 Hemmstoffe bei anaeroben Abbauprozessen und deren schädigend
Konzentration

Tabelle 5.1 Vorbereitung von Impfschlamm

Tabelle 5.2 Versuchsplanung von AMPTS

Tabelle 6.1 TS und oTS des Impfschlamm

Tabelle 6.2 die Methanproduktion aller Probe

Formelverzeichnis

Formel 4.1 Berechnung des TS-Gehalts

Formel 4.2 Berechnung des oTS-Gehalts

Formel 4.3 Berechnung von FOS nach Kapp

Formel 4.4 Berechnung von Nettogasproduktion

Formel 4.5 Berechnung von spezifischer Gasproduktion

Formel 4.6 Berechnung von Abbaugrad

Abkürzungsverzeichnis

VDI	VEREIN DEUTSCHER INGENIURE
CO ₂	Kohlendioxid
H ₂	Wasserstoff
CH ₄	Methan
H ₂ O	Wasser
CH ₃ COOH	Essigsäure
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
N ₂	Stickstoff
CO	Kohlenmonoxid
z.B.	zum Beispiel
C:N:P:S	Nährstoffverhältnis: Kohlendioxid zu Stickstoff zu Phosphor zu Schwefel
K.A.	keine Angabe
MW	Megawatt
kW	kilowatt
TS	Trockensubstanz
oTS	organische Trockensubstanz
C/N	Kohlenstoff zu Stickstoff
ml	milliliter
g	gramm

μm	micrometer
MCC	mikrokristalline Cellulose
AMPTS	Automatische Methan Potential Test System
NaOH	Natriumhydroxyd
DIN	Deutsches Institut für Normung
FOS	flüchtigen organischen Säuren
NH ₄ ⁺	Ammonium
μl	Microliter
C1	Feststoffkonzentration: 3,18%
C2	Feststoffkonzentration: 3,5%
C3	Feststoffkonzentration: 4,0%
C4	Feststoffkonzentration: 4,5%
T0	Lagerdauer: keine
T1	Lagerdauer: 1 Woche
T3	Lagerdauer: 3 Wochen
T6	Lagerdauer: 6 Wochen
B	Blindprobe
R	Referenzprobe