Abschlussbericht für das

BMBF-Verbundprojekt »Biogaseinspeisung«

»Beseitigung technischer, rechtlicher und ökonomischer Hemmnisse bei der Einspeisung biogener Gase in das Erdgasnetz zur Reduzierung klimarelevanter Emissionen durch Aufbau und Anwendung einer georeferenzierten Datenbank«

Band 2
Prozessüberwachung und -automatisierung zur Dynamisierung und Verbesserung der Effizienz des Biogasanlagenbetriebs

Oberhausen, Leipzig, Wuppertal, Bochum, Essen, Magdeburg, Trier
im Juni 2009

Der Gesamtabschlussbericht entstand im Rahmen des Verbundprojektes »Biogaseinspeisung« und wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 01LS05039, 01LS05040, 01LS05041, 01LS05042, 01LS05043, 01LS05044, 01LS05045 gefördert. Die inhaltliche Verantwortung liegt bei den Autoren. Die Autoren danken dem Fördermittelgeber für die freundliche Unterstützung.

Der vorliegende Band 2 fasst die Ergebnisse der Arbeitspakete 2.1 und 2.2 zusammen. Band 2 wurde erstellt durch

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Dipl.-Ing. Joachim Krassowski
Osterfelder Straße 3

46047 Oberhausen

Telefon: 0208-8598-1162
Fax: 0208-8598-1290

E-Mail: joachim.krassowski@umsicht.fraunhofer.de
Internet: http://www.umsicht.fraunhofer.de

Weitere Ergebnisse finden sich in:

Band 1 Kurzfassung (Executive Summary)

Band 2 Prozessüberwachung und -automatisierung zur Dynamisierung und Verbesserung der Effizienz des Biogasanlagenbetriebs

Band 3 Synthesegasmethanisierung. Verfahrenstechnische und ökonomische Analyse thermochemischer Gaserzeugungs- und Aufbereitungsverfahren

Band 4 Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007-2008

Band 5 Technische, rechtliche und ökonomische Hemmnisse und Lösungen bei der Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz aus Sicht eines Gasunternehmens

Band 6 Entwicklung und Anwendung einer GIS-Applikation zur Standortfindung und Potenzialanalyse der Biomethanerzeugung. Räumliche, ökonomisch-ökologische Bilanzierung als Bewertungsgrundlage für Energiesystemszenarien

Band 7 Rechtlicher Rahmen der Biogaseinspeisung. Gesetzgeberische Ziele, Substraterzeugung, Raumordnung, Anlagengenehmigung, Netzzugang und Förderung

Das Projekt wurde gefördert durch:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Im Rahmen der Fördermaßnahme »klimazwei« – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen:

klimazwei
Risiken mindern · Chancen nutzen

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Forschung für Nachhaltigkeit, Wissenschaft und Gesellschaft
Heinemannstr. 2
53175 Bonn

Telefon: 01888 57-0
Fax: 01888 57-83601
Internet: www.bmbf.de

Die Arbeiten erfolgten in enger Kooperation mit Experten eines projektbegleitenden Ausschusses. Die intensiven Diskussionen mit den beteiligten Vertretern der Gaswirtschaft, Biogaswirtschaft, Landwirtschaft, Planungsbehörden, Vertretern von Bundes- und Landesministerien sowie weiterer öffentlicher Einrichtungen haben maßgeblich zum Erfolg des Projekts beigetragen.

Projektkoordination:

Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Institutsleiter:
Prof. Dr.-Ing. Eckhard Weidner

Geschäftsfeld Energieanlagentechnik
Geschäftsfeld Ressourcenmanagement
Geschäftsfeld Nachwachsende Rohstoffe

Osterfelder Straße 3
46047 Oberhausen

Name	Telefon	E-Mail
Dipl.-Ing. Wolfgang Urban	0208 8598-1124	wolfgang.urban@umsicht.fraunhofer.de
Dr.-Ing. Barbara Zeidler-Fandrich	0208 8598-1143	barbara.zeidler@umsicht.fraunhofer.de

Projektpartner:

alta4 Geoinformatik AG

Ruhr-Universität Bochum
Institut für Berg- und Energierecht

E.ON Ruhrgas AG

Hochschule Magdeburg – Stendal (FH)
FB Wasser- und Kreislaufwirtschaft,
Institut für Wasserwirtschaft und Ökotechnologie

Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Inhalt

1	**Übersicht Arbeitspaket 2: Technologiegrundlagen**	**1**
2	**Dynamisierung des Betriebs von Biogasanlagen durch anlagentechnische und biologische Anpassungen**	**2**
2.1	Biogasabgabe gemäß einer Tagesganglinie	3
2.1.1	Chargenweise Fermenterbeschickung	3
2.1.2	Betriebsstabilität bei chargenweiser Beschickung	4
2.1.3	Dynamisierung der Biogasabgabe durch anlagenintegrierte Gasspeicherung	5
2.1.4	Auswirkungen der Modulation auf die Auslegung der Biogasanlagen und die Gasgestehungskosten	5
2.2	Biogasabgabe gemäß einer Jahresganglinie	7
2.2.1	Auswirkungen der Modulation auf die Auslegung der Biogasanlagen und die Gasgestehungskosten	7
2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse und Kostenübersicht	9
3	**Prozessüberwachung von Biogasanlagen**	**10**
3.1	Effizienzsteigerung durch kontinuierliche Biogasanalyse	10
3.2	Lösungsansätze	12
3.3	Grundlegende Architektur des Prozessbeobachters	13
3.4	Implementierung des Prozessbeobachters in den Anlagenbetrieb	16
3.5	Verifikation des Systems mit praktischen Versuchen	18
3.6	Hauptmerkmale des Prozessbeobachters	18
4	**Substratvorbehandlung als Maßnahme zur Anlagenoptimierung**	**19**
4.1	Literaturrecherche zur Untersuchung von Substratvorbehandlungsmethoden	19
4.1.1	Übersicht bestehender Aufschlussverfahren	19
4.1.2	Leistungsfähigkeit der Vorbehandlungsverfahren	21
4.2	Ausgewählte Aufschlussverfahren	26
4.2.1	Thermische Vorbehandlung	26
4.2.2	Mechanische Vorbehandlung	27
4.3	Praktische Versuche zur Beschleunigung der Biogasproduktion durch den Einsatz von Zellaufschlussverfahren	29
4.3.1	Methoden und Versuchsdurchführung	29
4.3.2	Mechanischer Aufschluss	30
4.3.3	Thermischer Aufschluss	31
4.4	Ergebnisse	32
4.4.1	Mechanischer Aufschluss	32
4.4.2	Thermischer Aufschluss	33
4.4.3	Kosten der Aufschlussverfahren und Bewertung	34
5	**Literaturverzeichnis**	**35**

1 Übersicht Arbeitspaket 2: Technologiegrundlagen

In den Arbeitspaketen 2.1 und 2.2 wurden schwerpunktmäßig die Möglichkeiten einer effizienteren Ressourcennutzung durch Dynamisierung der Biogasproduktion untersucht. Die Arbeitspakete 2.3 und 2.4 behandeln die Technologiegrundlagen thermochemische Vergasung und der entsprechenden Gasaufbereitung, die Ausführungen dazu finden sich in Band 3.

In den Arbeitspaketen 2.1 und 2.2 wurden die technischen Möglichkeiten, den Prozess der Biogasbildung zu dynamisieren, untersucht. Dies betraf:

- die Anpassung der Anlagenkonfiguration und Betriebsführung zur dynamischen Gasabgabe von Biogasanlagen
- die Entwicklung eines innovativen Prozessbeobachters zur Steigerung der Anlageneffizienz und Betriebsstabilität
- die Untersuchung von Möglichkeiten, die Dynamik des biologischen Prozesses der Biogasbildung (Steigerung und Hemmung) zu beeinflussen, so dass durch effizienten Einsatz dieser Maßnahmen eine Lastanpassung der Biogasfreisetzung an die Abnahme des Gasnetzes möglich wird.

2 Dynamisierung des Betriebs von Biogasanlagen durch anlagentechnische und biologische Anpassungen

Gegenüber allen anderen Formen der Erzeugung erneuerbarer Energien, haben Biogasanlagen den großen Vorteil, dass ihre Energieerzeugung unabhängig von direkten Umwelteinflüssen, wie dem Vorhandensein von Sonnenlicht oder Wind, ist. Derzeit wird diese Eigenschaft der Bioenergie vorrangig dazu genutzt, kontinuierlich Grundlastenergie zu erzeugen. Für das Projekt »Biogaseinspeisung« wurde untersucht, ob bzw. zu welchen Kosten die Biogasproduktion auch strukturiert erfolgen kann, um Regelenergie zur Verfügung stellen zu können.

Für die Nutzung des Biogases in Erdgasnetzen stand die konkrete Frage im Raum, ob es gelingen kann, mit Biogas die sowohl tageszeitlich als auch jahreszeitlich bedingten Verbrauchsschwankungen zu kompensieren.

Zur Ermittlung der Möglichkeiten und der resultierenden Kosten wurden Standardlastprofile wie sie in Bild 2-1 und Bild 2-2 dargestellt sind, zugrunde gelegt.

Bild 2-1
Erdgas-Tagesverbrauchskurve

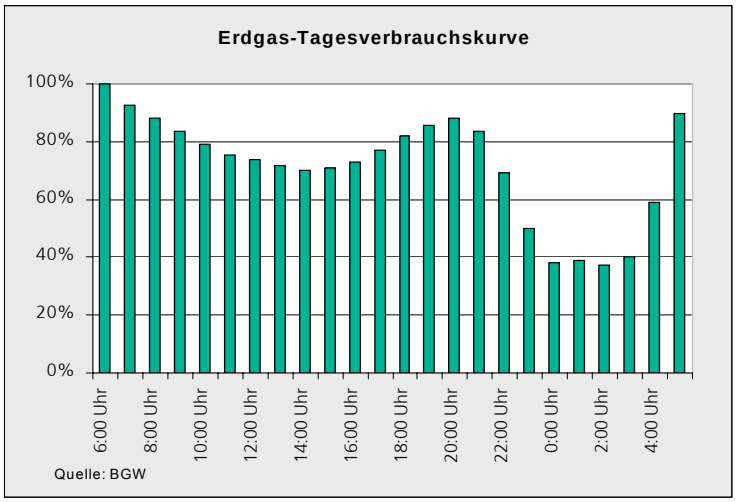
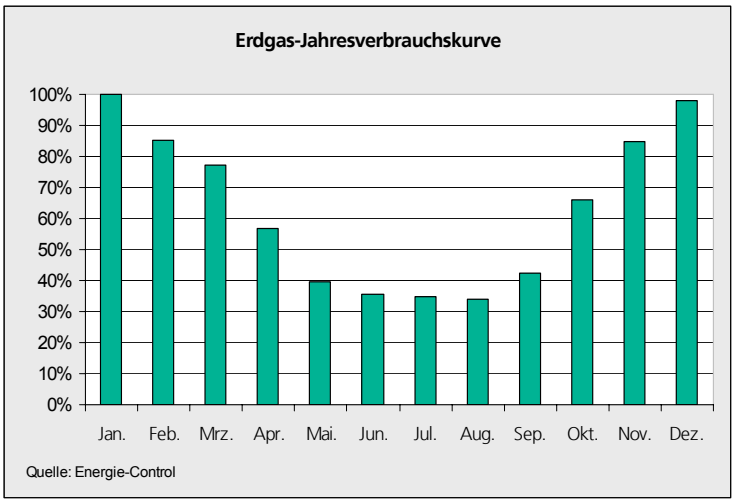


Bild 2-2
Erdgas-Jahres-
verbrauchskurve



Der Einsatz solcher Standardlastprofile wurde gewählt, da hierdurch eine übertragbare und nachvollziehbare Basis für die Berechnungen zur Verfügung steht. Gleichwohl muss bei der Interpretation der gewonnenen Ergebnisse berücksichtigt werden, dass reale Verbrauchskurven abhängig von der Art und Beschaffenheit der an das jeweilige Gasnetz angeschlossenen Verbraucher und der klimatischen Bedingungen deutlich von solchen Standardfällen abweichen können.

2.1 Biogasabgabe gemäß einer Tagesganglinie

Die Anpassung der Biogasabgabe an die wechselnden Lastfälle eines Tagesgangs ist auf verschiedene Weise denkbar. Zum einen besteht die Möglichkeit, die Biogasproduktion wie bei herkömmlichen Biogasanlagen konstant zu halten und Verbrauchsvariationen durch einen ausreichend dimensionierten Gaspuffer auszugleichen. Zum anderen kann auch direkt bei der Gasproduktion eingegriffen werden, indem die Substratbeschickungsmengen und die daraus resultierende Gasproduktion des biologischen Prozesses variiert werden.

Zur Überprüfung der geeigneten Lösungsansätze wurden praktische Versuche in einer kontinuierlich betriebenen Laborbiogasanlage mit ca. 23 l Gärvolumen und an einer halbtechnischen Biogasanlage mit einem Gärvolumen von ca. 200 l durchgeführt sowie theoretische Rechenmodelle erstellt.

2.1.1 Chargenweise Fermenterbeschickung

Grundsätzlich ist die Gasabgabe von Biogasanlagen innerhalb ihrer Auslegungsdaten von der Beschickungsmenge der Substrate abhängig. Bei allen bisher betriebenen großtechnischen Biogasanlagen wird hierbei versucht,

die Biologie so gleichmäßig wie möglich zu belasten und damit eine maximale Biogasproduktion aus dem vorhandenen Fermentervolumen zu erzielen.

Bei den Versuchen, einen Tageslastgang im Versuchsbetrieb nachzustellen, wurde von dieser quasi-kontinuierlichen Fermenterbeschickung abgewichen und der Fermenter zu vorgegebenen Zeiten mit festgelegten Substratchargen beschickt.

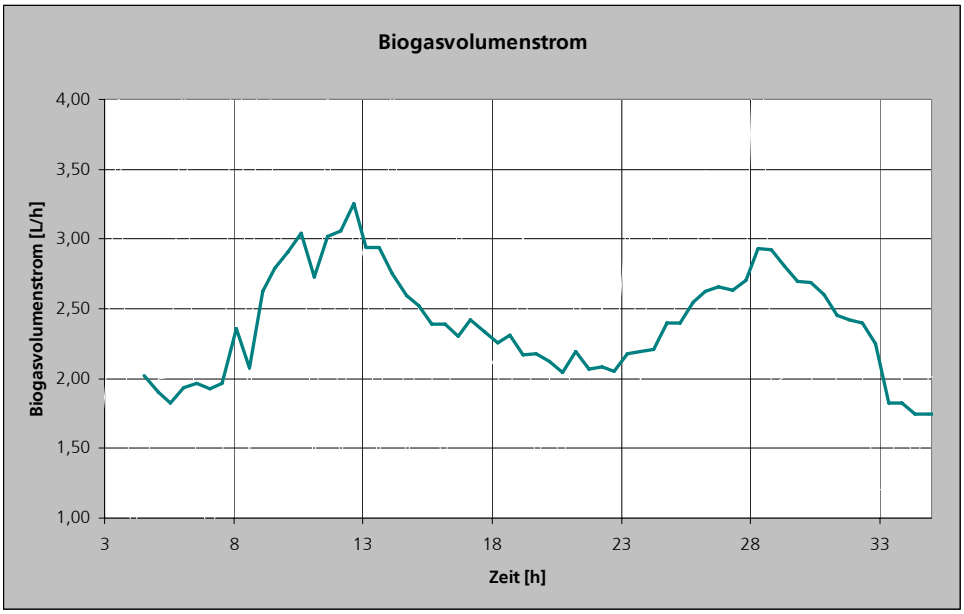
Als Schwerpunkt der Untersuchungen sollte hierbei die Frage beantwortet werden, ob eine solche chargenweise Belastung langfristig Auswirkungen auf die Betriebsstabilität hat und ob die Belastung der Fermenter so gezielt gesteuert werden kann, dass hiermit tatsächlich die Anforderungen eines Tageslastganges erfüllt werden können.

2.1.2 Betriebsstabilität bei chargenweiser Beschickung

Zur Nachstellung der Verbrauchsspitzen in den Morgen- und Abendstunden, wie sie in Bild 2-1 dargestellt sind, wurden die Versuchsfermenter jeweils zweimal täglich mit Substrat beschickt. Hierbei wurde angestrebt, kontinuierlich eine Raumbelastung von 3,5 $kg_{oTS}/m^3/d$ im Fermenter einzustellen. Vom Zahlenwert entspricht dies der Raumbelastung, die auch in quasi-kontinuierlich betriebenen großtechnischen Biogasanlagen in der Regel vorliegt. Versuche, die jeweils über Zeiträume von ca. 4 Monaten durchgeführt wurden, zeigten hierbei keine Betriebsinstabilitäten, die mit der chargenweisen Fermenterbeschickung in Zusammenhang gebracht werden konnten.

Die Verläufe der Biogasproduktionsmenge folgten, wie in Bild 2-3 gezeigt wird, relativ gut den Beschickungschargen.

Bild 2-3
Gasproduktion bei chargenweiser Beschickung



Aus der Auswertung aller Versuchsdaten zeigte sich jedoch, dass eine Dynamisierung zur Generierung eines Tagesgangs nur innerhalb bestimmter

Grenzen möglich ist, da die Gasproduktion auch bei der chargenweisen Beschickung ein relativ konstantes Grundniveau nicht unterschreitet.

Wurde durch die initiierten Stoßbelastungen die maximal erzielbare Biogasproduktion auf 100 % gesetzt, so lag die minimale Gasproduktion zwischen den einzelnen Stoßbelastungen bei ca. 60 % dieses Maximalwertes.

Aus den durchgeführten Versuchen kann geschlossen werden, dass die Erzeugung eines Tageslastgangs mit zwei Peaks bei der Gasproduktion, durch eine chargenweise Fermenterbeschickung grundsätzlich möglich ist.

Im Vergleich mit der in Bild 2-1 dargestellten Erdgas-Tagesverbrauchskurve, bei der der minimale Gasverbrauch bei ca. 40 % des maximalen Verbrauchs liegt, zeigt sich jedoch, dass diese Variationsbreite bei den Versuchen zur biologischen Modulation der Gasproduktion im Versuchsbetrieb nicht erreicht werden konnte.

Weiter einschränkend muss hier nochmals angeführt werden, dass die der Auswertung zugrunde gelegten Standardlastfälle insbesondere in Gasnetzen mit geringen Durchsätzen, wie sie häufig in ländlichen Regionen vorliegen, häufig nicht die Realität widerspiegeln. In derartigen Gasnetzen kann eine Variation der Gasabnahme zwischen 100 % und beinahe 0 % beobachtet werden.

2.1.3 Dynamisierung der Biogasabgabe durch anlagenintegrierte Gasspeicherung

Die Belastungsversuche zur Analagendynamisierung zeigten, dass die Grenzen, in denen eine Variation der Gasproduktion möglich erscheint, allein nicht ausreichend sind, um gezielt einen Tageslastgang abzubilden. Somit muss der Spielraum der Dynamisierung im Regelfall immer durch eine parallel durchgeführte anlagentechnische Anpassung mittels interner Gasspeicher, durchgeführt werden.

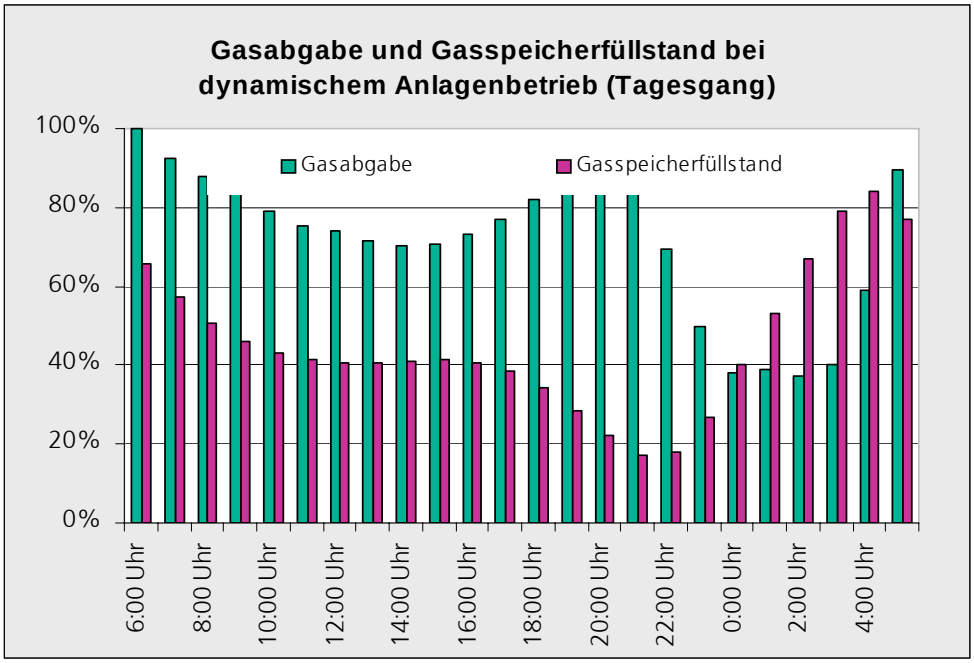
2.1.4 Auswirkungen der Modulation auf die Auslegung der Biogasanlagen und die Gasgestehungskosten

Die Anpassung an tageszeitlich wechselnde Verbrauchsmengen kann am besten durch ausreichend dimensionierte Biogasspeicher erreicht werden. Durch diesen Lösungsansatz können kurzzeitige Verbrauchsschwankungen problemlos ausgeglichen werden.

Relevante Mehrkosten sind bei diesem Ansatz für die Biogasaufbereitungsanlage anzusetzen, da die Biogasspeicherung auf der Rohgasseite erfolgt und die Aufbereitungsanlage in diesem Konzept daher auf die maximale Gasabgabe zu dimensionieren ist.

Das nachfolgende Bild 2-4 zeigt den Verlauf der Gasabgabe und des Gasspeicherfüllstandes einer solchen Anlage.

Bild 2-4 Gasabgabe und Gasspeicherfüllstand bei dynamischem Anlagenbetrieb (Tagesgang)



Durch die Dynamisierung entstehen aufgrund der zusätzlich erforderlichen Gasspeicher und durch die auf die maximale Gasproduktion zu dimensionierende Gasaufbereitungsanlage unvermeidliche Mehrkosten. In Tabelle 2-1 und Tabelle 2-2 sind die Kosten für die Gasproduktion bei dynamischer Gasabgabe für zwei typische Anlagengrößen aufgeführt und den Kosten der konstanten Biogasproduktion gegenübergestellt. Die angegebenen Werte beziehen sich hierbei jeweils auf den unteren Heizwert H_i.

Tabelle 2-1: Mehrkosten tagesdynamische Gasproduktion 1.000 Nm³/h

	Konstante Anlagenlast (Gasabgabe 1.000 m³/h Rohbiogas)	**Biogasabgabe gem. Tagesganglinie** max. 1.398 m³/h min. 523 m³/h ∅ 1.000 m³/h
Gasgestehungskosten Substrateinsatz	3,05 ct/kWh ($H_{i,N}$)	3,05 ct/kWh ($H_{i,N}$)
Gasgestehungskosten Anlagenbetrieb/Wartung	2,54 ct/kWh ($H_{i,N}$)	2,68 ct/kWh ($H_{i,N}$) (+ 0,14 ct)
Gasgestehungskosten Investition und Kapitaldienst	1,13 ct/kWh ($H_{i,N}$)	1,46 ct/kWh ($H_{i,N}$) (+ 0,33 ct)
Gasgestehungskosten Summe	6,72 ct/kWh ($H_{i,N}$)	7,19 ct/kWh ($H_{i,N}$) (+ 0,47 ct)

Tabelle 2-2: Mehrkosten Tagesdynamische Gasproduktion 2.000 Nm³/h

	Konstante Anlagenlast (Gasabgabe 2.000 m³/h Rohbiogas)	**Biogasabgabe gem. Tagesganglinie** max. 2.795 m³/h min. 1.043 m³/h ∅ 2.000 m³/h
Gasgestehungskosten Substrateinsatz	3,05 ct/kWh ($H_{i,N}$)	3,05 ct/kWh ($H_{i,N}$)
Gasgestehungskosten Anlagenbetrieb/Wartung	2,44 ct/kWh ($H_{i,N}$)	2,50 ct/kWh ($H_{i,N}$) (+ 0,06 ct)
Gasgestehungskosten Investition und Kapitaldienst	0,92 ct/kWh ($H_{i,N}$)	1,14 ct/kWh ($H_{i,N}$) (+ 0,22 ct)
Gasgestehungskosten Summe	**6,41 ct/kWh ($H_{i,N}$)**	**6,69 ct/kWh ($H_{i,N}$) (+ 0,28 ct)**

2.2 Biogasabgabe gemäß einer Jahresganglinie

Jahreszeitlich bedingte Verbrauchsschwankungen können mittels einer Gasspeicherung in den Niederdruckgasspeichern von Biogasanlagen nicht bedient werden. Die Anpassung an solche Anforderungen kann jedoch über die gezielte Steuerung des biologischen Prozesses erreicht werden. Die im Projekt durchgeführten Langzeitversuche mit einer Laboranlage haben gezeigt, dass ein über einen langen Zeitraum erfolgender kontinuierlicher Lastwechsel keinen erkennbaren negativen Effekt auf die Stabilität des biologischen Prozesses zeigt.

Nach einer Ruhezeit des Fermenterinhalts von drei Monaten betrug in den Laborreaktoren von Fraunhofer UMSICHT der Zeitraum von der ersten Beschickung bis zur Erreichung der Auslegungsgasleistung ca. drei Wochen. Hieraus kann abgeleitet werden, dass die anaerobe Biologie durch die Ruhezeit keinen größeren Aktivitätsverlust erfährt.

In der Praxis kann dieser Zeitraum jedoch deutlich variieren, da sich zum einen die Lagerbedingungen in großtechnischen Biogasanlagen deutlich voneinander unterscheiden können, zum anderen auch ein längerer Zeitraum für das Aufheizen des Fermenterinhalts berücksichtigt werden muss.

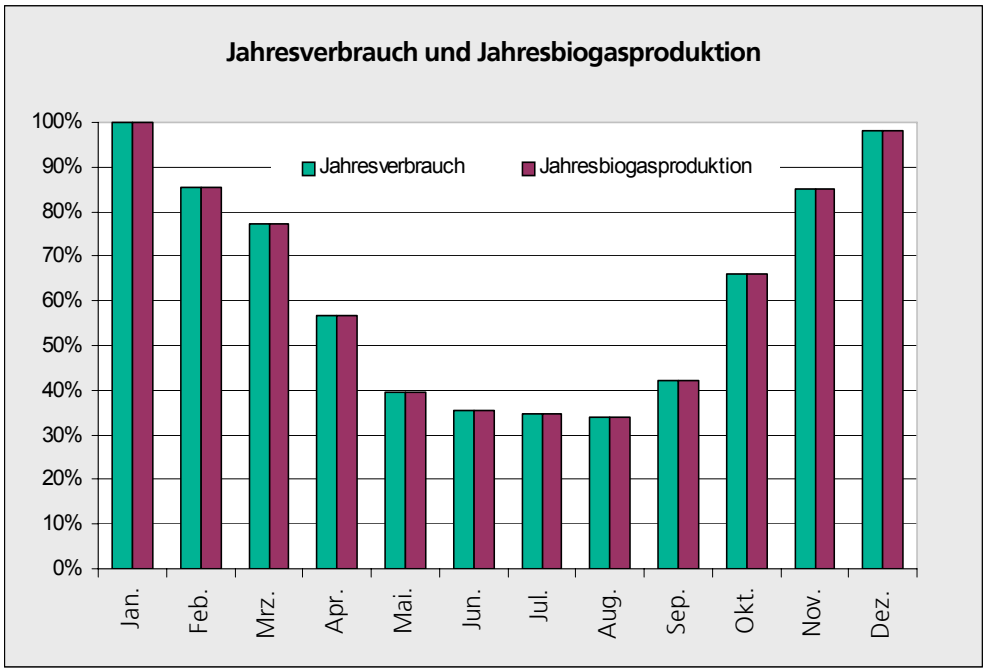
2.2.1 Auswirkungen der Modulation auf die Auslegung der Biogasanlagen und die Gasgestehungskosten

Für die anlagentechnische Ausgestaltung bei der jahresdynamischen Biogaserzeugung bedeutet der Weg über die biologische Leistungsanpassung, dass sowohl die Biogaserzeugungsanlage als auch die Biogasaufbereitungsanlage auf die maximale Gasabgabe ausgelegt werden muss. Eine Anlage, die auf eine über das ganze Jahr gemittelte Rohbiogasabgabe von 2.000 Nm³/h Rohbiogas ausgelegt ist, müsste dementsprechend auf eine maximale Gasproduktion von 3.200 Nm³ dimensioniert werden. Bild 2-5 zeigt

die Jahresverbrauchskurve mit der angepassten Biogasproduktion. Hieraus wird deutlich, dass die Biogasabgabe nicht über eine Gasspeicherung, sondern über die gezielte biologische Belastung angesteuert wird.

Analog zur tagesdynamischen Biogasabgabe wurden die Mehrkosten der Biogaserzeugung für die jahresdynamische Gasabgabe berechnet.

Bild 2-5 Jahresverbrauch und Jahresbiogas-produktion



Die Gasgestehungskosten für zwei Modellanlagen sind in Tabelle 2-3 und Tabelle 2-4 dargestellt.

Tabelle 2-3: Mehrkosten jahresdynamische Gasproduktion 1.000 Nm³/h

	Konstante Anlagenlast (Gasabgabe 1.000 m³/h Roh-biogas)	**Biogasabgabe gem. Jahresganglinie** max. 1.590 m³/h min. 540 m³/h ∅ 1.000 m³/h
Gasgestehungskosten Substrateinsatz	3,05 ct/kWh ($H_{i,N}$)	3,05 ct/kWh ($H_{i,N}$)
Gasgestehungskosten Anlagenbetrieb/Wartung	2,54 ct/kWh ($H_{i,N}$)	2,93 ct/kWh ($H_{i,N}$) (+ 0,39 ct)
Gasgestehungskosten Investition und Kapitaldienst	1,13 ct/kWh ($H_{i,N}$)	1,87 ct/kWh ($H_{i,N}$) (+ 0,74 ct)
Gasgestehungskosten Summe	**6,72 ct/kWh ($H_{i,N}$)**	**7,85 ct/kWh ($H_{i,N}$) (+ 1,13 ct)**

Tabelle 2-4: Mehrkosten jahresdynamische Gasproduktion 2.000 Nm³/h

	Konstante Anlagenlast (Gasabgabe 2.000 m³/h Rohbiogas)	**Biogasabgabe gem. Jahresganglinie** max. 3.182 m³/h min. 1.081 m³/h ∅ 2.000 m³/h
Gasgestehungskosten Substrateinsatz	3,05 ct/kWh ($H_{i,N}$)	3,05 ct/kWh ($H_{i,N}$)
Gasgestehungskosten Anlagenbetrieb/Wartung	2,44 ct/kWh ($H_{i,N}$)	2,75 ct/kWh ($H_{i,N}$) (+ 0,31 ct)
Gasgestehungskosten Investition und Kapitaldienst	0,92 ct/kWh ($H_{i,N}$)	1,57 ct/kWh ($H_{i,N}$) (+ 0,65 ct)
Gasgestehungskosten Summe	**6,41 ct/kWh ($H_{i,N}$)**	**7,37 ct/kWh ($H_{i,N}$) (+ 0,96 ct)**

2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Kostenübersicht

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl eine tagesdynamische als auch jahresdynamische Gaserzeugung und -abgabe mit Biogasanlagen zu realisieren ist. Hierzu müssen jedoch Anpassungen der Anlagendimensionierung durchgeführt werden und zusätzliche Anlagenteile wie z. B. die Ausweitung der Niederdruckgasspeicherung vorgesehen werden. Die hierdurch steigenden Investitionskosten sowie der in Bezug auf die maximal mögliche Anlagenleistung geringere Auslastungsgrad führen jedoch zu einem Anstieg des Produktionspreises für das erzeugte Biogas.

Gerade bei großen Biogasanlagen, wie sie bei der Gaseinspeisung in der Regel zum Einsatz kommen, resultiert ein maßgeblicher Anteil der Kosten aus dem Ankauf der erforderlichen Einsatzstoffe. Dieser Anteil verändert sich nominell bei einer Dynamisierung der Gasabgabe nicht.

Blickt man auf das Zusammenspiel aller erneuerbaren Energiequellen, ermöglicht das Konzept der Anlagendynamisierung, die für die Wind- und Solarenergie dringend notwendige Regelenergie zur Verfügung zu stellen. Das Konzept der Anlagendynamisierung sollte daher über die ersten, im Rahmen dieses Projekts initiierten Untersuchungen hinaus, dringend weitergehend untersucht werden.

Hinsichtlich eines effizienten Ressourceneinsatzes sollte hierbei insbesondere die biologische Anlagendynamisierung vertieft betrachtet werden, da diese es ermöglichen kann, Energie aus nachwachsenden Rohstoffen gezielt und bedarfsangepasst zu erzeugen. Dieses ist auch mit Bezug auf die konkurrierende Bodennutzung zur Lebensmittelproduktion und zur Energieerzeugung ein anzustrebendes Ziel.

3 Prozessüberwachung von Biogasanlagen

3.1 Effizienzsteigerung durch kontinuierliche Biogasanalyse

Das in Biogasanlagen eingesetzte Verfahren zur anaeroben Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen und organischen Abfällen ist seit langem etabliert und weit verbreitet. Diesem Verfahren liegt eine mehrstufige biologische Prozesskette zugrunde.

Eine der größten noch bestehenden Herausforderungen bei der Nutzung dieses Prozesses ist die Gewährleistung eines stabilen und störungsfreien Anlagenbetriebs und das Erreichen von hohen Umsatzraten und Gasausbeuten aus den eingesetzten Rohstoffen.

Insbesondere große Biogasanlagen werden zur Erreichung dieses Zieles zunehmend mit einer umfassenden und komplexen Prozessüberwachung ausgestattet.

Trotz dieses Trends gelingt es bisher nur unzureichend, die Biogasanlagen automatisiert zu überwachen. Die Ursache dafür liegt darin begründet, dass die Prozessbedingungen in den Anlagen aufgrund der biologischen Prozesse und der variierenden Eigenschaften der eingesetzten Substrate kontinuierlichen Schwankungen unterliegen.

Die sicherste Systemeinschätzung und Ansteuerung der Anlagen wird daher immer noch durch einen erfahrenen und mit der Anlage vertrauten Experten gewährleistet.

Ziel dieses Arbeitspunktes war die Weiterentwicklung des Konzepts eines intelligenten Prozessbeobachters für den anaeroben Vergärungsprozess und die Implementierung des Überwachungsprogramms auf einer PC-Plattform. Die Software sollte es ermöglichen, Messwerte im Microsoft® Excel-Format oder als CSV-Datei (comma seperated values) aus einer bestehenden Prozessüberwachung zu übernehmen und den Prozesszustand einer Ampel zuordnen. Mögliche Zustände hierbei sind „gut“, „überwachungsbedürftig“ und „schlecht“. Die Darstellung der Prozesszustände sowie deren Übertragung auf das Ampelsignal ist in Bild 3-1 und in Bild 3-2 wiedergegeben.

Bild 3-1
Bewertung der Prozesszustände und Übertragung auf ein Ampelsignal

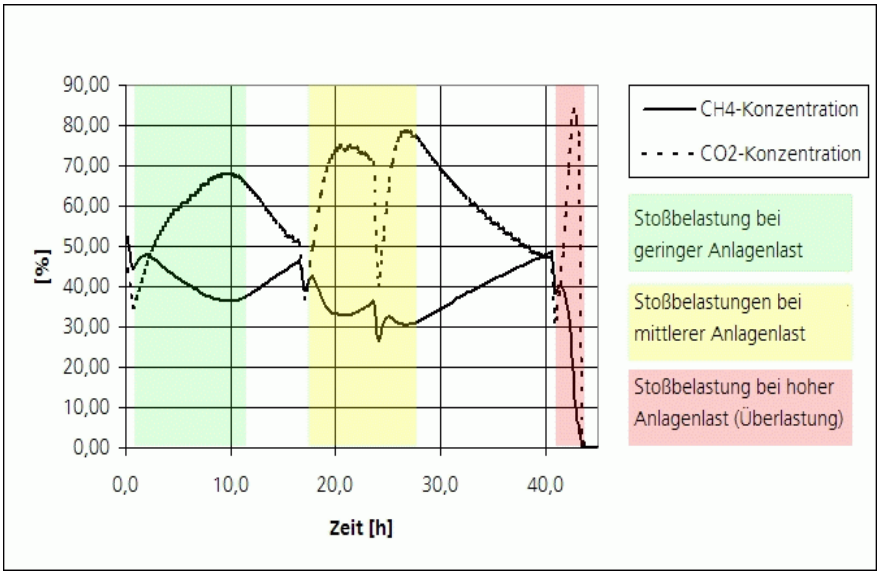
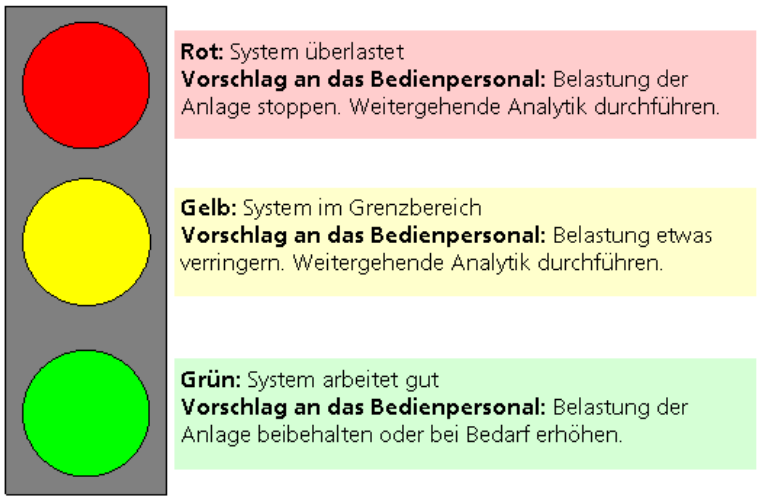


Bild 3-2
Darstellung der Prozesszustände als Ampelsignal



Die Basis für die Bewertung des Prozesszustandes durch den automatisierten Prozessbeobachter bietet die kontinuierliche Erfassung der Biogasmenge, der CH_4- und CO_2-Konzentration, des pH-Wertes und der Temperatur der Gärsubstrate sowie die Änderungen der Messwerte über die Zeit.

Da die meisten landwirtschaftlichen Anlagen im mesophilen Temperaturbereich arbeiten, muss bei diesen Anlagen eine Temperaturregelung vorhanden sein, welche die Temperatur in gewissen Grenzen um das Prozessoptimum einregelt. Da die Temperatur normalerweise in der Nähe des Optimums liegt und größere Schwankungen nur bei einer Fehlfunktion der Regelung oder einem Ausfallen der Heizung zu erwarten sind, wird die Tempera-

tur keinen geeigneten Parameter für die Bewertung des Gesamtprozesses darstellen. Durch das hohe Puffervermögen stellt auch der pH-Wert nur einen unzureichenden Parameter für die Kontrolle des Gärprozesses dar. Zu den relevanten Parametern der Prozessanalyse zählen somit die spezifische Biogasproduktion, die Biogaszusammensetzung sowie die zeitlichen Änderungen. Um ein Ausfallen der Heizung oder der Temperaturregelung sowie eine zu starke Versäuerung des Prozesses dennoch sicher und schnell feststellen zu können, werden die Temperatur und der pH-Wert auch zur Bewertung herangezogen.

Da der Prozessbeobachter auf verschiedenen PC-Plattformen lauffähig sein sollte, wurde er in der plattformunabhängigen Programmiersprache Java implementiert.

3.2 Lösungsansätze

In diesem Abschnitt werden die für die Umsetzung erarbeiteten Ansätze präsentiert, die zur Lösung der gegebenen Aufgabenstellung betrachtet wurden. Aufbauend darauf wird die Wahl eines neuronalen Netzes zur Umsetzung des Prozessbeobachters begründet.

Als erstes ist hier die Stöchiometrie zu nennen. Sie beruht auf dem Massenerhaltungssatz und ist ein grundlegendes mathematisches Hilfsmittel zur Berechnung von quantitativen Informationen in der Chemie. Bei stöchiometrischen Rechnungen wird durch die Stöchiometriematrix eine Menge von Ausgangsstoffen (Edukten) in eine Menge von Produkten überführt. Diese Berechnung lässt sich auch umkehren, so dass man bei der Kenntnis des Produktes die Menge an Edukten bestimmen kann. Würde es gelingen, für den gesamten biochemischen Prozess einer Biogasanlage die Stöchiometriematrix aufzustellen, könnte man anhand der entstandenen Gase die inneren Größen des Prozesses berechnen und diesen bewerten. Da das Aufstellen dieser Matrix aber sehr kompliziert ist und auch noch nicht alle Vorgänge, besonders die Wechselwirkungen der verschiedenen Substanzen untereinander, vollständig erforscht sind, wurde von dieser Möglichkeit abgesehen.

Beim nächsten Lösungsansatz wurde überprüft, ob die Differentialgleichungen eines modellierten anaeroben Abbauprozesses aus einer noch nicht veröffentlichten Dissertation (Fraunhofer UMSICHT) als Basis verwendet werden können. Die Gleichungen wurden für die einzelnen Stufen der anaeroben Vergärung und den Gesamtprozess erstellt. Allerdings wurden dabei die Wechselwirkungen der unterschiedlichen Mikroorganismen untereinander und die reaktionskinetischen Abhängigkeiten nicht berücksichtigt. Da durch diese Differentialgleichungen von vornherein ein ungenaues Prozessmodell gegeben ist, wurde auch von dieser Möglichkeit abgesehen.

Ein weiterer Lösungsansatz ist die Implementierung eines Fuzzy-Systems. In diesem Fall kann das Expertenwissen des Bedieners an der Biogasanlage anhand der Fuzzy-Regeln und der linguistischen Variablen eingebracht werden. Es können bei der Programmierung grundlegende Regeln mit eingefügt werden. Die Fuzzy-Sets, welche von den Prozessparametern abhängig sind,

und spezielle Regeln, die durch die Verfahrenstechnik bestimmt sein können (beispielsweise unterschiedliche Regeln für den pH-Wert bei ein- bzw. zweistufigen Anlagen), müssten dann vom Anlagenbetreiber selbst eingefügt bzw. angepasst werden. Dies würde für den Bediener der Anlage eine Einarbeitung in die Fuzzy-Theorie und möglicherweise lange Versuchsreihen für die Erarbeitung der nötigen Regelbasis bedeuten. Denkbar wäre es, die Fuzzy-Mengen und -Regeln durch genetische Algorithmen anzupassen. Dies gestaltet sich in der Praxis jedoch schwer, da geeignete Rekombinations- und Mutationsoperatoren gefunden werden müssen, welche für das Optimierungsproblem geeignet sind. Werden allgemeine Operatoren verwendet, führt dies zu einer langen Laufzeit des Algorithmus.

Als letzter Lösungsvorschlag soll das künstliche neuronale Netz betrachtet werden. Durch seine universelle Approximationseigenschaft eignet sich dieses sehr gut, um den aktuellen Zustand verschiedener Anlagen zu bewerten. Das Expertenwissen muss beim Training des Netzes mit einfließen. Der Anlagenbediener nimmt dazu zwei Datensätze der Anlage und bewertet diese anhand seines Wissens über den Prozess und die Anlage. Der erste Datensatz wird dann zum Trainieren des Netzes verwendet, der zweite für den Test. Dadurch kann das Expertenwissen des Anlagenbedieners für das Erzeugen impliziter Modelle genutzt werden. Der Bediener der Biogasanlage benötigt also kein spezielles Wissen über das neuronale Netz. Allerdings können ein Lernerfolg und die Generalisierungsfähigkeit bei neuronalen Netzen nicht garantiert werden. Je nach Einstellung der Netzparameter und der Genauigkeit der bewerteten Daten können hier lange Trainingszeiten entstehen. Es muss also darauf geachtet werden, dass die beiden Datensätze exakt nach den gleichen Kriterien bewertet werden, da sonst die Generalisierungsfähigkeit des Netzes nicht geprüft werden kann und das Training unnötig verlängert wird.

3.3 Grundlegende Architektur des Prozessbeobachters

Layering

Unter Layering wird die Trennung der Anwendung in unterschiedliche Schichten (layer) verstanden. In der Softwareentwicklung ist dies eine übliche Technik, um die Komplexität von Systemen zu kapseln und übersichtlicher zu gestalten.

Das bekannteste Schichtenmodell ist das ISO-OSI-Modell (International Standards Organisation – Open System Interconnection), welches sieben Schichten vorsieht. Das Modell dient in erster Linie der Normierung von Netzwerkdiensten, lässt sich aber auch auf andere Systeme anwenden. Die einzelnen Schichten stellen Dienste bereit, die von der darüber liegenden Schicht genutzt werden können. Eine Schicht bietet immer der direkt darüber liegenden Schicht Dienste an und nutzt die Dienste der darunter liegenden Schicht.

Vorteile des Layerings:

- Jede Schicht kann als abgekapselter Teil betrachtet werden. Ohne viel Wissen über die anderen Schichten zu besitzen, kann eine einzelne Schicht abgeändert werden. Beispielsweise kann der Algorithmus einer Applikation geändert werden, ohne das GUI (Graphical User Interface) derselben Applikation zu kennen bzw. abändern zu müssen.

- Eine einzelne Schicht kann durch alternative Implementierungen ausgetauscht werden, solange sie dieselben Dienste zur Verfügung stellt.

- Eine erstellte Schicht kann als Grundlage für die darüber liegenden Schichten verwendet werden.

- Abhängigkeiten zwischen den Schichten können minimiert werden.

- Die Schichten-Architektur bietet eine gute Grundlage für Standardisierungen.

Nachteile des Layerings:

- Schichtenarchitekturen kapseln viele, jedoch nicht alle Problemdomänen gut. Manche Anforderungserweiterungen ziehen oft Änderungen in mehreren Schichten mit sich. Wird in der Eingabemaske einer Applikation ein neuer Parameter hinzugefügt, so müssen die Änderungen nicht nur im User-Interface sondern ebenfalls in der Logik- und eventuell sogar in der Datenschicht, in Form eines zu speichernden Attributs, erfolgen.

- Zusätzliche Schichten können die Performance verschlechtern. In jeder Schicht müssen die Daten, an das in der Schnittstelle definierte Format, transformiert werden, was die Effizienz eines Vorgangs beeinträchtigen kann.

Das Drei-Schichten-Modell

Die am häufigsten verwendete Schichtarchitektur ist die Unterteilung in drei Layer: Presentation-, Logic- und Data layer (Bild 3-3).

Presentation layer:

Das Presentation layer oder auch GUI (Graphical User Interface) ist für die Interaktion zwischen Benutzer und Software zuständig. Dies kann in Form einer simplen Kommandozeilenabfrage, eines textbasierten Menüs oder eines Rich-Clients erfolgen.

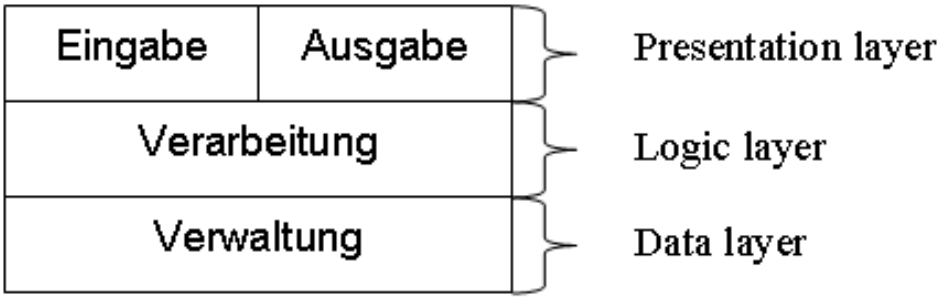
Logic layer:

Das Logic layer ist für die gesamte Logik der Applikation verantwortlich. Dies umfasst Berechungen, Manipulation und Verarbeitung von Ein- und Ausgabedaten, Plausibilitätsprüfungen und generell jede Art von Verarbeitung, welche auf das Problem bezogen ist.

Data layer:

Das Data layer ist für das Laden und Speichern der Daten auf dem System zuständig. Es übernimmt, falls notwendig, die Kommunikation mit anderen Systemen.

Bild 3-3
Drei-Schichten-Architektur



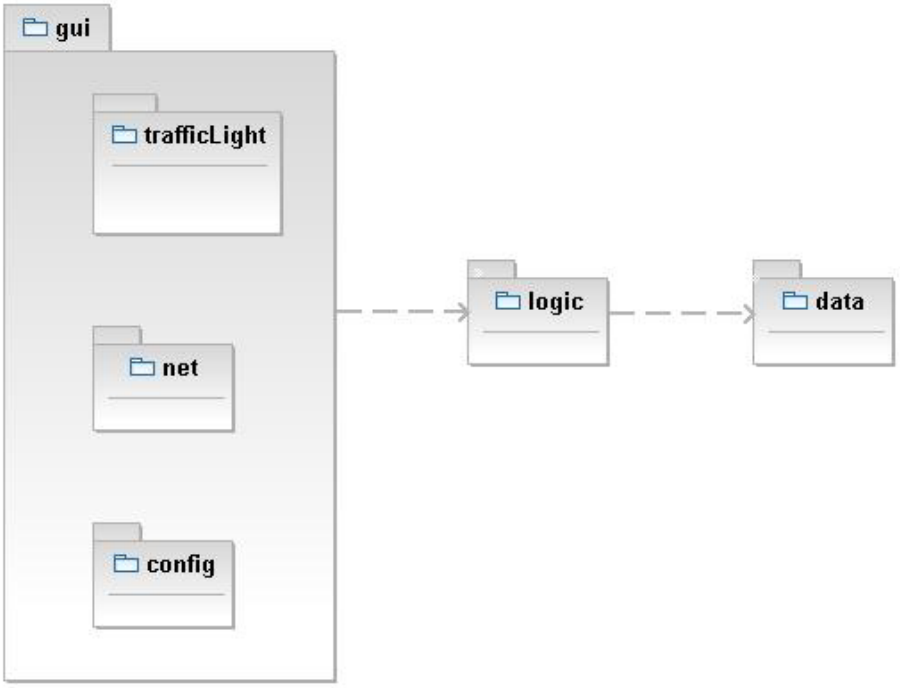
Bei der Betrachtung der einzelnen Schichten und den Beziehungen zwischen ihnen ist es wichtig, auf die Asymmetrie ihrer Beziehungen zu achten: Welche Schicht bietet einen Dienst an und welche Schicht nutzt diesen? In der Drei-Schichten-Architektur arbeitet das Data layer unabhängig von den beiden anderen und bietet Funktionalitäten an, welche vom Logic layer in Anspruch genommen werden. Dieses bedient wiederum das Presentation layer.

Beim Entwurf eines Softwaresystems sollte immer eine Trennung in Schichten erfolgen. Ist die Applikation in ihrer Komplexität sehr gering, so sollte diese Trennung zumindest auf der Ebene der Nutzung von unterschiedlichen Subroutinen bzw. Methoden stattfinden. Sobald das System später komplex wird, kann diese Trennung einfacher verstärkt werden. Das Prinzip, dass innere Schichten nicht von höher liegenden Schichten abhängen dürfen, sollte niemals außer Acht gelassen werden. Im Drei-Schichten-Modell bedeutet dies konkret, dass das Data layer und das Logic layer niemals vom Presentation layer abhängig sein dürfen.

Der intelligente Prozessbeobachter ist nach dem Drei-Schichten-Konzept aufgebaut. Um dieses Konzept auch innerhalb des Projektes zu verdeutli-

chen, werden die drei Schichten in unterschiedlichen Packages angeordnet. Namentlich sind dies die Pakete »*data*«, »*logic*« und »*gui*« (Bild 3-4).

Bild 3-4
Grundlegende Architektur des Prozessbeobachters



3.4 Implementierung des Prozessbeobachters in den Anlagenbetrieb

Ein mit aktuellen Daten angelernter Prozessbeobachter gewährleistet die sichere Prognose des Prozessverlaufs über den Zeitraum, in dem sich die biologischen Eigenschaften des Systems nicht nennenswert verändern, dieser Zeitraum wird bei Biogasanlagen abhängig von der Betriebsweise und den Einsatzstoffen in einem Zeitfenster von vier Wochen bis hin zu mehreren Monaten liegen.

Der Prozessbeobachter macht eine Anlage damit nicht unabhängig von einem erfahrenen Experten, er kann diesen aber sehr effektiv bei der Prozessüberwachung unterstützen, insbesondere kann der Prozessbeobachter dazu beitragen, einen sicheren Anlagenbetrieb während der Abwesenheit des Experten (Urlaubszeit, krankheitsbedingter Ausfall etc.) zu gewährleisten.

Der Prozessbeobachter selbst greift nicht regelnd in den Prozess ein. Anders als bei Steuerungssystemen nimmt der Prozessbeobachter dem Experten daher zu keinem Zeitpunkt die Kontrolle über den Prozess ab. Er gibt je-

doch eine Zustandsbeschreibung des Prozesses, die als Hilfestellung für weitere Maßnahmen dienen kann.

Der Prozessbeobachter für Biogasanlagen wurde als Java™-Applikation implementiert, wodurch er plattformunabhängig lauffähig ist.

Bild 3-5
Eingabemaske des Prozessbeobachters

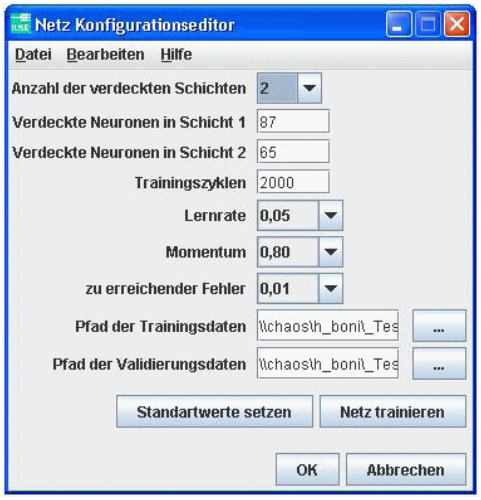
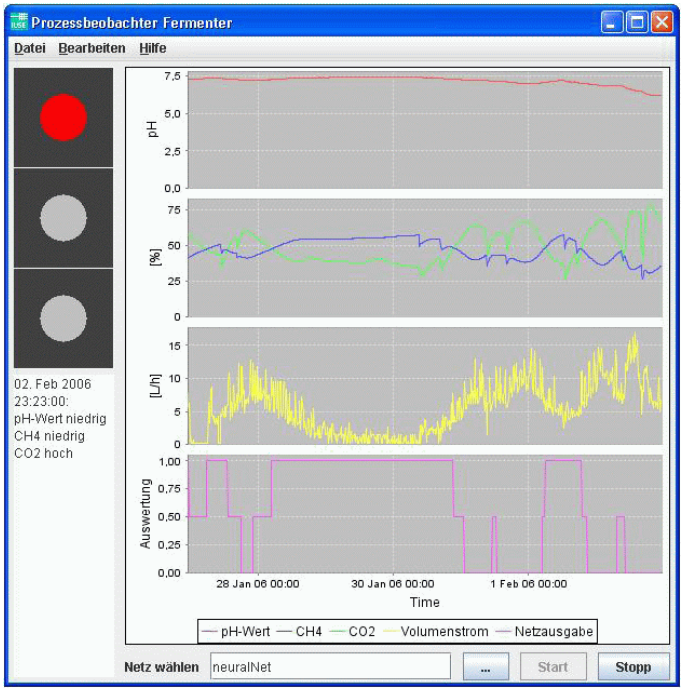


Bild 3-6
Zustandsausgabe des Prozessbeobachters



3.5 Verifikation des Systems mit praktischen Versuchen

Die Vorhersagegenauigkeit des Prozessbeobachters wurde anhand von Messdaten aus einer Laborversuchsanlage und einer halbtechnischen Biogasanlage überprüft. Getestet wurde hierbei mit unterschiedlichen Anlagenbelastungen, begonnen bei sehr niedrigen Belastungswerten.

Bei diesen Versuchen zeigte der Prozessbeobachter eine sehr hohe Vorhersagegenauigkeit, die eine Übereinstimmung von 97 % mit der Prozessbeurteilung des menschlichen Experten aufwies.

3.6 Hauptmerkmale des Prozessbeobachters

- Einfacher Regelaufbau
- Unabhängig von der bestehenden Prozesssteuerung; Messwertübernahme aus dem Microsoft® Excel-Format oder als Comma-Separated-Values (CSV).
- System dient als Hilfestellung für den Anlagenbediener.
- Regelmäßiges Anlernen des Systems ist möglich.
- Vorhersagen über den Prozesszustand (ohne zwischenzeitliches Anlernen) können über einen Zeitraum von mehreren Wochen zuverlässig gegeben werden.

4 Substratvorbehandlung als Maßnahme zur Anlagenoptimierung

In diesem Arbeitspaket wurde untersucht, ob die Anlagendynamisierung durch eine Vorbehandlung der Substrate optimiert werden kann.

Dem zugrunde lag der Ansatz, dass durch eine Substratvorbehandlung die Biogasfreisetzungsgeschwindigkeit aus den Substraten beschleunigt werden kann.

Die Umsetzung dieses Vorhabens ist besonders bei faserreichen, langsam zu hydrolysierenden Substraten, wie z. B. Maissilage, eine anspruchsvolle Aufgabe.

Das Ziel dieses Arbeitspakets bestand darin, durch die Auswertung verschiedener Literaturquellen und der Durchführung von praktischen Versuchen eine Beschleunigung der Biogasproduktion durch unterschiedliche Vorbehandlungsmethoden zu ermitteln.

4.1 Literaturrecherche zur Untersuchung von Substratvorbehandlungsmethoden

In diesem Abschnitt wird ein Einblick über verschiedene Methoden des Substrataufschlusses gegeben. Zunächst wird die Herangehensweise der Recherche beschrieben. Im nachfolgenden Abschnitt werden Ergebnisse unterschiedlicher Versuche dargestellt. Abschließend wird näher auf das Wirkungsprinzip des thermischen und mechanischen Aufschlusses eingegangen.

4.1.1 Übersicht bestehender Aufschlussverfahren

Die bestehenden Aufschlussverfahren können in drei Kategorien unterteilt werden. Es kann zwischen stofflicher, thermischer und mechanischer Vorbehandlung unterschieden werden.

Eine stoffliche Vorbehandlung ist die Zugabe eines Fremdstoffes in den Fermenter, um den Prozess der Gasbildung zu beschleunigen. Hier wird zwischen der Zugabe von Enzymen und der Zugabe von Chemikalien unterschieden. Bei der Zugabe von Enzymen wird versucht, durch die erhöhte Konzentration an Enzymen die Hydrolyse zu beschleunigen. Wird eine Beschleunigung der Hydrolyse erreicht, liegen kurzkettige und leichter umzusetzende Verbindungen vor, und der Gesamtprozess läuft schneller ab.

Das Ziel der chemischen Vorbehandlung lignozellulosehaltiger Stoffe ist die Lösung bzw. die Entfernung der Ligninkrustierung der Zellulose. Ist die Zellulose von einem schützenden Ligninmantel umgeben, ist sie für Enzyme nur schwer bzw. gar nicht zugänglich. Außerdem wird versucht, die schwer angreifbare kristalline Struktur der Zellulose, welche in den meisten Pflanzen zu finden ist, zu zerstören. Je nachdem, welche chemische Vorbehandlung

eingesetzt wird, können auch hochmolekulare Substanzen gelöst und zu niederen Bausteinen zerlegt werden.

Bei der industriellen Aufbereitung von z. B. Holz, Stroh und Zuckerrohr haben sich schon verschiedene chemische Vorbehandlungen bewährt:

- Vorbehandlung mit alkalischen Lösungsmitteln (z. B. NaOH, KOH)
- Vorbehandlung mit sauren Lösungsmitteln (z. B. H_2SO_4, H_3PO_4, HNO_3)
- Vorbehandlung mit Gasen (ClO_2, NO, NO_2, SO_2, O_3)
- Vorbehandlung mit Oxidationsmitteln (z. B. Na_2ClO_2, H_2O_2)
- Vorbehandlung mit Quellmitteln (NaOH, H_2SO_4, $ZnCl_2$, H_3PO_4)

[Möller, 1992].

Aufgrund der speziellen Anforderungen an die Biogaserzeugung und der damit verbundenen Qualität der Milieus der Mikroorganismen, ist die Anzahl der hier verwendbaren Verfahren stark eingegrenzt.

Es kann zwischen zwei Arten der Vorbehandlung durch Wärme unterschieden werden. Zum einen gibt es die Behandlung bei Temperaturen bis 200 °C und zum anderen die Thermodruckhydrolyse (TDH).

Bei der thermischen Vorbehandlung wird ein Druckbehälter verwendet. Hierbei wird das Substrat in einem Autoklaven Temperaturen um die 150 °C und einem erhöhten Druck von ungefähr 6 bar ausgesetzt. Der Zeitraum der Behandlung erstreckt sich meistens über etwa 5 Minuten.

Eine Abart der thermischen Vorbehandlung ist die Thermodruckhydrolyse oder auch Hochdruckdampfentspannung. Hierbei wird das Substrat ebenfalls in einem Druckbehälter erhitzt. Nach Ablauf der Behandlungszeit wird der Behälter explosionsartig entspannt. Durch diese explosionsartige Entspannung des Wasserdampfes innerhalb des Stoffes „platzt“ Material auf und ist so einfacher abzubauen [Schumacher, 2007].

Eine mechanische Vorbehandlung bewirkt im Allgemeinen eine Zerkleinerung des eingesetzten Substrates. Der beabsichtigte Effekt besteht in der Vergrößerung der Oberfläche. Kleinere Partikel haben eine größere Gesamtoberfläche als große Partikel und bieten somit den Enzymen und Mikroorganismen eine größere Angriffsfläche. Hinzu kommt, dass bei großen Partikeln unter Umständen der Kern sehr schwer abzubauen ist. Die äußere Schicht, die z. B. aus schwer abbaubaren Verbindungen besteht, hindert Mikroorganismen daran, mit dem Kern, der möglicherweise aus leicht abbaubaren Substanzen besteht, in Berührung zu gelangen und ihn letztlich in Biogas umzusetzen.

Eine mechanische Vorbehandlung lignozellulosehaltiger Stoffe soll die Oberfläche vergrößern. Dadurch wird die Verzuckerung der Zellulose durch Enzyme oder Mikroorganismen bzw. die Erhöhung des Abbaus, bezogen auf die Gesamttrockensubstanz, beschleunigt. Um Lignozellulose abbauen zu können, muss eine enzymatische Spaltung stattfinden. Dafür ist zwingend der Kontakt zwischen Enzym und Substrat notwendig, was durch eine größere Oberfläche begünstigt wird.

4.1.2 Leistungsfähigkeit der Vorbehandlungsverfahren

Von Möller [Möller, 1992] wurden Versuche unternommen, durch eine chemische Vorbehandlung den Biogasertrag aus Pflanzenspelzen zu steigern. Er verglich zuerst die Wirkung von Schwefelsäure (H_2SO_4) und Natronlauge (NaOH) und entschied sich für weitere Versuche mit Natronlauge.

Um die Wirkung der chemischen Vorbehandlung noch zu steigern, wurden die Proben auch mechanisch und thermisch behandelt. Die Proben wurden in der Natronlauge suspendiert und in einer Rührwerkskugelmühle zerkleinert.

Während der Versuchsreihe wurden Temperatur und Säurekonzentration variiert. Der Temperaturbereich erstreckte sich von 20 - 70 °C.

Die Säurekonzentration wurde von 0 - 0,5 M[1] NaOH variiert. Die Probe wurde 4 - 8 min. in der Rührwerkskugelmühle zerkleinert. Dabei ergab sich je nach Zerkleinerungsdauer eine mittlere Korngröße von x_{50}[2] = 50 - 45 µm. Eine Erhöhung der Zerkleinerungsdauer auf bis zu 16 Minuten brachte keine wesentliche Veränderung der mittleren Korngrößen.

Die vorbehandelten Proben wiesen einen pH-Wert von 10 - 12 auf. Um den pH-Wert auf ein geeignetes Niveau für die weitere Vergärung zu bringen, wurde Hydrolysat zugemischt. Die gesamte Anlage ist in drei Stufen unterteilt. Die erste Stufe besteht aus der chemisch-physikalischen Vorbehandlung in einer Rührwerkskugelmühle. In der zweiten Stufe erfolgt die biologische Hydrolyse mit Pansenorganismen in einem Rührkesselfermenter und als dritter und letzter Schritt folgt die Methanisierung in einem Festbettfermenter.

Bei einer Vorbehandlung der Spelzen mit einer Feststoffmassenkonzentration von c_s = 10 % in der Rührwerkskugelmühle und einer Behandlungstemperatur von 70 °C, konnte bis zu der Zugabe von 0,5 molarer Natronlauge eine Steigerung der Feststofflösung beobachtet werden. Dadurch ergibt sich in der Summe eine verbesserte Methanausbeute, allerdings verschlechtert sich die prozentuale Umsetzung der gelösten Inhaltsstoffe in dem Hydrolysat. Dies ist zurückzuführen auf die Produkte der chemischen Reaktionen von Proteinen und Kohlenhydraten, die auf die Mikroorganismen hemmend und zum Teil auch toxisch wirken. Aufgrund des geringeren Stoffumsatzes in der Methanstufe bleibt eine höhere organische Schmutzfracht zurück. Bei

[1] Im Original steht die veraltete Bezeichnung N, diese wurde jedoch in Mol umgerechnet.
[2] x50 kennzeichnet die Größe, die von 50 % der gemessenen Partikel unterschritten wird.

einer Ausgangsfeststoffkonzentration von 5 % und einer hydraulischen Verweilzeit von 13 Tagen in der Hydrolyse und 5 Tagen in der Methanstufe liegt der zeitlich mittlere Gesamtfeststoffabbau zwischen 70 % (ohne Laugenzugabe) und 83 % (Zugabe von 0,5 molarer Natronlauge). Der CSB-Umsatz in der Methanstufe liegt zwischen 91 und 79 %. Bei der Hydrolyse mit Feststoffrückführung liegt die spezifische Gasausbeute bei 0,45 m³/kgTS.

Durch die Zerkleinerung steigt auch der Eigenbedarf der Anlage. Wird eine Ruhrwerkskugelmühle im Industriemaßstab bei einer Feststoffkonzentration von c_s = 10 % eingesetzt, so liegt der spezifische Energiebedarf bei 0,43 kWh/kgTS.

Bei einer Verwertung des Biogases in einem Blockheizkraftwerk mit einem Wirkungsgrad von η_{el} = 30 % werden 54 % der erzeugten elektrischen Energie für die Zerkleinerung benötigt [Möller, 1992].

Von Schumacher [Schumacher, 2007] wurden mit der sogenannten Thermodruckhydrolyse (TDH) Versuche zur Vorbehandlung von Mais und Triticalen durchgeführt. Dabei wurden zwei Arten von Biomasse behandelt. Die erste Charge war grüne Biomasse, die von Feldhäckslern (1 cm Häckselllänge) geerntet wurde. Die zweite Charge bestand aus vollreifen Triticalen.

Bei der Vergärung von Mais wurden nur leicht höhere Erträge erreicht. Der Unterschied zwischen frischem unbehandeltem Mais und frischem Mais, der mit dem TDH-Verfahren behandelt wurde, liegt bei 7 %. Der Unterschied zwischen den Erträgen von siliertem unbehandelten Mais und siliertem vorbehandelten Mais liegt bei 6 %.

Tabelle 4-1: Spezifische Methanerträge (Nm³ Methan/kg oTS) und prozentuale Unterschiede der vier Vorbehandlungsvarianten für Mais (Batch-Versuch 42 Tage) [Schumacher, 2007]

Substrat	Nm³ CH4/kg oTS	[%]
Mais frisch	0,328	100
Mais frisch, exploded	0,352	107
Mais siliert	0,376	100
Mais siliert, exploded	0,399	106

Bei den Versuchen mit den Triticalen ergaben sich größere Unterschiede in der Gasausbeute. Der Unterschied zwischen der unbehandelten, frischen Triticale und der frischen, behandelten Triticale liegt bei 34 %. Mit 18 % ist der Unterschied zwischen der silierten unbehandelten und silierten behandelten Triticale zwar nur etwa halb so groß, aber dennoch um mehr als das Doppelte größer als bei den Versuchen mit Mais [Schumacher, 2007].

Tabelle 4-2: Spezifische Methanerträge (Nm³ Methan/kg oTS) und prozentuale Unterschiede der vier Vorbehandlungsvarianten teigreifer Triticale (Batch-Versuch 42 Tage) [Schumacher, 2007]

Substrat	Nm³ CH4/kg oTS	[%]
Triticale frisch	0,284	100
Triticale Frisch, exploded	0,382	134
Triticale siliert	0,350	100
Triticale siliert, exploded	0,414	118

Von Schumacher und Oechsner [Schumacher, 2007] wurde neben den oben erwähnten Versuchen mit einer thermischen Vorbehandlung auch die Veränderung des Methanertrags durch eine mechanische Vorbehandlung untersucht. Dabei wurden erst Stroh und Korn der zu untersuchenden Triticale getrennt und dann zerkleinert. In der ersten Variante wurde das Korn gequetscht und das Stroh auf 10 mm gehäckselt. Bei der zweiten Variante wurden das Korn und das Stroh auf 1 mm gemahlen. Diese Varianten waren trockene Aufschlussverfahren. Bei der dritten Variante wurde Korn mit Wasser vermischt und 15 Minuten lang mit einer Dispergiermaschine zerkleinert und vermischt. Das Stroh wurde durch das Thermo-Druck-Aufschluss-Verfahren (TDH) behandelt.

Die Messungen der spezifischen Methanerträge ergaben, dass sich die Ausbeute bei beiden trockenen Aufschlussverfahren kaum unterschied (Tabelle 4-3). Der Ertrag der nass aufbereiteten Probe mit dem Stroh, das mit TDH behandelt wurde, unterscheidet sich auch nur um knapp 5 % von dem der unbehandelten Probe.

Tabelle 4-3: Spezifische Methanerträge (Nm^3 Methan/kg oTS) der drei Vorbehandlungsvarianten von reifer Triticale (Korn + Stroh) am Versuchende nach 42 Tagen

Substrat	Nm³CH4/kg oTS
Triticale unbehandelt	0,284
Korn gequetscht; Stroh gehäckselt	0,330
Korn + Stroh gemahlen	0,325
Korn dispergiert; Stroh exploded	0,348

Einen merkbaren Unterschied gab es bei der Geschwindigkeit der Methanogenese. Schon nach 20 Tagen hatte Variante drei ungefähr soviel Methan erbracht wie die Varianten eins und zwei nach 42 Tagen. Die Ausbeute lag nach 20 Tagen bei 0,327 m³ $CH_4 kg^{-1}$oTS. [Schumacher, 2007]

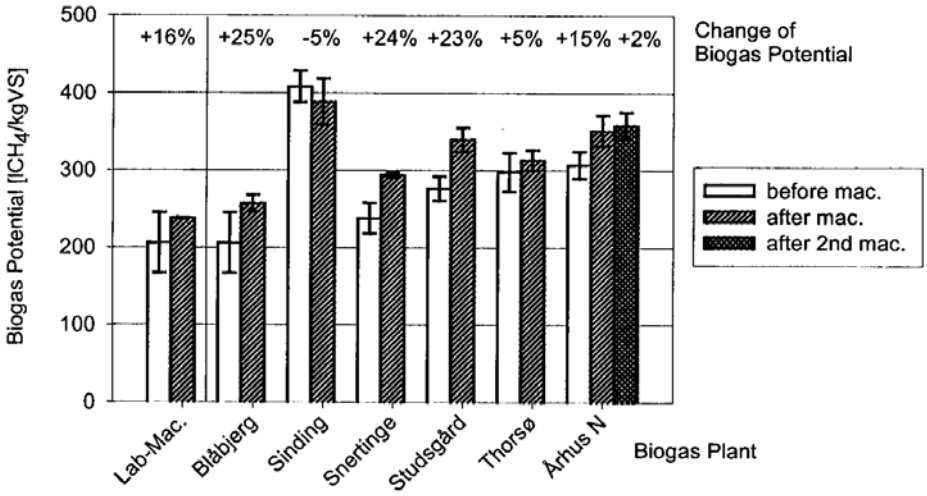
Von Hartmann [Hartmann, 2000] wurde versucht, die Biogasausbeute durch Mazeration von Stallmist zu steigern. Mit Mazeration wird die Zerkleinerung und Homogenisierung eines Feststoff-Flüssigkeits-Gemisches mithilfe einer schnell laufenden Schneidemühle, dem sogenannten Mazerator, beschrieben, so dass am Ende eine Art Brei vorliegt.

Hierbei untersuchte Hartmann drei Verfahrensvarianten. Bei der ersten Variante wurden die Faserstoffe des Mistes mazeriert. Diese Variante wurde noch einmal in zwei Teilversuche unterteilt. Einmal wurde der komplette Mist behandelt und das andere Mal wurden die Fasern vorher abgetrennt. Bei der zweiten Verfahrensvariante wurden die Faserstoffe nach dem Reaktor mazeriert und zurückgeführt. Als dritte Variante wurde das Recyceln der Fasern ohne Behandlung gewählt. Dieses wurde durchgeführt, um die Abbauzeit zu verlängern.

Es wurden zwei Reihen von Batch-Versuchen durchgeführt. Einmal wurde das Biogaspotenzial der ganzen Proben vor und nach der Mazeration untersucht. Im Rahmen der zweiten Reihe wurde das Biogaspotenzial der Faserstoffe bzw. der flüssigen Phase untersucht. Bei diesen Versuchsreihen wurden 1 g VS (Volatile Solids) bzw. 15 ml Flüssigkeit in 100 ml Flaschen gefüllt. Bei der Versuchsreihe mit Proben des kompletten Mistes wurden auf Grund der Inhomogenität jeweils 75 ml in 500 ml-Flaschen gegeben. Alle diese Behälter wurden mit der gleichen Menge an Wasser, Nährmedium und Impfschlamm gefüllt. Der Impfschlamm wurde aus einem thermophil gefahrenen (55 °C) Laborreaktor entnommen, der mit Kuhmist betrieben wurde. Die Flaschen wurden weiterhin mit 100 % N_2 oder 80 % N_2 und 20 % CO_2 begast, um eine anaerobe Umgebung zu gewährleisten, und verschlossen. Weiterhin wurde Na_2S (2 mMol pro Fläschchen) hinzugegeben, um sicherzustellen, dass anaerobe Bedingungen herrschen. Alle Versuche wurden in dreifacher Ausführung angesetzt und zu jedem Versuch wurde zusätzlich ein dreifacher Blindtest angesetzt. Das entstehende Methan wurde von einem Gaschromatographen über 50 Tage aufgezeichnet.

Die Messungen bestätigen, dass das Biogaspotenzial nach der Mazeration höher ist als vorher. Einzige Ausnahme bildet der Standort Sinding, wo die Biogasausbeute nach der Mazeration um 5 % niedriger lag (Bild 4-1). Der Anstieg lag zwischen 2 % in der Anlage Ârhus und 25 % in der Anlage Bläbjerg.

Bild 4-1
Veränderung des Biogaspotenzials nach der Mazeration in Biogasanlagen und nach der Hochgeschwindigkeitsmazeration im Labor ([Hartmann, 2000] S. 149)



Die Proben von den Anlagen in Bläbjerg und Snertinge wurden näher untersucht, um einen Bezug zwischen Biogaspotenzial und Fasergröße festzustellen. Hier zeigten sich keine zwingenden Zusammenhänge. Der Anteil der größten Fasern verringerte sich in Bläbjerg nur leicht von 3 % auf 1 % und die kleinsten Fasern hatten nun einen Anteil von 39 %, während es vorher 41 % waren. Auch in Snertinge veränderte sich der Anteil der kleinsten Fasern nur von 37 % auf 40 % [Hartman, 2000].

Johannsen [Johannsen, 2005] hat in seiner Arbeit Zerkleinerungsversuche mit Maissilage durchgeführt, um Vergleiche zwischen verschiedenen Herstellern von Häckslern und Zerkleinerern ziehen zu können. Der Schwerpunkt der Betrachtung lag auf den Auswirkungen und Unterschieden bei einer anschließenden Vergärung.

Die Gärversuche wurden nach der DIN 38414-Teil 8 durchgeführt. Als Animpfmaterial wurde entgaste Gülle verwendet.

Insgesamt wurden zwei Durchläufe mit Proben aus unterschiedlichen Mahlungen vorgenommen. Für den ersten Durchgang wurden Proben einer einzigen Firma verwendet, während die Proben des zweiten Durchlaufs von zwei unterschiedlichen Firmen stammten, wobei die Maissilage beim ersten Hersteller trocken und bei der zweiten Firma nass gemahlen wurde. Die Proben der Maissilage des zweiten Gärversuchs wurden per Hand in einem Mörser für 5 Minuten bearbeitet. Durch diesen zusätzlichen Aufwand sollte untersucht werden, ob ein höherer Zerkleinerungsgrad den Zellaufschluss steigern und so zu einer höheren Biogasausbeute führen kann.

Nach dem ersten Gärversuch kam Johannsen zu dem Ergebnis, dass sich bei näherer Betrachtung der ersten 14 Tage ein Mehrertrag von 10 % einstellt. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Gasausbeute in den ers-

ten zwei bis fünf Tagen um ca. 20 % steigt und danach normale Werte annimmt.

Beim zweiten Durchlauf wurde festgestellt, dass der Gasertrag der zerkleinerten Maissilage dem der unbehandelten Silage gleicht. Hier sticht jedoch die mit dem Mörser bearbeitete Silageprobe mit einem Gasmehrertrag von 7 % hervor.

Wird die Probe der zweiten Firma betrachtet, ergab sich nach 20 Tagen ein Mehrertrag von etwa 8 %, der nach weiteren 10 Tagen auf ca. 5 % abfiel. Die Maissilage, die mit dem Mörser vorbehandelt wurde, erzielte einen Mehrertrag von 15 %.

Johannsen kommt zu dem Schluss, dass ein Mehrertrag von 15% an Gas im Technikum in der Praxis einem Mehrertrag von 7 - 8 % gleich kommt, da bei einer Biogasanlage im öffentlichen Betrieb andere Parameter, wie eine intakte Biologie der Anlage, hinzukommen.

4.2 Ausgewählte Aufschlussverfahren

4.2.1 Thermische Vorbehandlung

Zu den Auswirkungen einer thermischen Behandlung von nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo) zur Biogaserzeugung wurden keine Untersuchungen gefunden. Deswegen beziehen sich die weiteren Ausführungen auf Untersuchungen eines thermischen Aufschlusses von Klärschlamm.

Es existieren verschiedene Möglichkeiten der thermischen Vorbehandlung. Die Erhitzung kann in einem Autoklaven erfolgen. Der Vorteil hier liegt in der Möglichkeit, durch den Wasserdampf einen guten Wärmeübergang zu erreichen. Durch den erhöhten Druck sind auch Temperaturen von deutlich über 100 °C zu erreichen.

Eine andere Methode ist die »trockene« Erwärmung. Hierbei werden externe Wärmequellen eingesetzt, um das Substrat zu erwärmen. Denkbar ist auch der Einsatz von Infrarotstrahlern. Vorteil dieses Verfahrens ist die einfache Realisierbarkeit, da im Gegensatz zu einer „nassen“ Erwärmung überschüssiges Wasser nicht mehr abgeschieden werden muss.

Von Bougier et al. [Bougier, 2007] wurde eine Absenkung der Kohlenhydratkonzentration nach einer thermischen Behandlung beobachtet. Das führte zu dem Schluss, dass Kohlenhydrate bei hohen Temperaturen degenerieren. Die Einzelteile der komplexen Kohlenhydrate sind von Mikroorganismen leichter abzubauen, womit die Steigerung der Biogasproduktion erklärt werden kann.

Hinzu kommt eine Erhöhung des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB). Es wurden Steigerungen von bis zu 20 % beobachtet. Der chemische Sauerstoffbedarf ist ein Maß für die oxidierbaren Stoffe. Es kann davon ausgegan-

gen werden, dass im Klärschlamm überwiegend organische Verbindungen vorliegen. Analog zum Klärschlamm führt eine thermische Behandlung von Substraten wahrscheinlich dazu, dass organische Stoffe „ausgekocht“ werden. Diese Stoffe müssen dann nicht mehr aus dem Substrat herausgelöst werden, sondern liegen in wässriger Lösung vor und können von den Mikroorganismen direkt umgesetzt werden.

Ein weiterer Effekt, der beobachtet wurde, ist eine Veränderung in der Struktur des Klärschlammes. Der Klärschlamm wurde flüssiger und es wurde mehr Wasser freigesetzt. Übertragen auf die Behandlung von Substraten könnte das bedeuten, dass die Nährstoffe des Substrates zum Teil in Lösung gehen und somit leicht für die Mikroorganismen zu erreichen und abzubauen sind.

Zu ähnlichen Schlüssen kommt Battenberg [Battenberg, 2000]. Durch Hitze können Zellen bzw. Klärschlämme aufgeschlossen und den Mikroorganismen zugänglich gemacht werden. Polymere Schlamminhaltsstoffe werden thermisch hydrolysiert. Battenberg führt an, dass bei Temperaturen ab 150 °C schwer abbaubare Verbindungen entstehen können, welche den Abbau hemmen. Bei Temperaturen über 175 °C können toxische Stoffe gebildet werden, die den anaeroben Abbau hemmen. Erreichen die Temperaturen ein Niveau von mehr als 200 °C, bilden sich vermehrt Melanoide, welche den Anteil an Stoffen, die nicht abgebaut werden können, erhöhen und den mikrobiellen Abbau hemmen. Melanoide sind Produkte der Maillard-Reaktion. Diese Stoffe und ihre hemmende Wirkung wurden ebenfalls von Möller [Möller, 1992] beobachtet.

4.2.2 Mechanische Vorbehandlung

Der mechanische Aufschluss von Maissilage ist ebenso wie der thermische Aufschluss bislang noch nicht umfassend erforscht. Auf dem Gebiet der Klärschlammbehandlung wurden allerdings viele Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt.

Durch eine mechanische Zerkleinerung wird die Oberfläche eines Substrates vergrößert. Die Zellinhaltstoffe werden in einem nachfolgenden biologischen Abbauprozess besser verfügbar und eine Beschleunigung des Abbaus wird möglich gemacht [Kopp, 1997].

Laut Nickel et al. [Nickel, 2003] „kann die zum Aufschluss notwendige mechanische Energie in Form von Druck-, Translations- oder Rotationsenergie zur Verfügung gestellt werden“. Zellen oder feste Körper setzen jeder Art von mechanischer Verformung einen Widerstand entgegen. Wird die Zerreißfestigkeit des Substrates überstrapaziert, kommt es zu einer Zerstörung der Zellhüllen und die Inhaltstoffe der Zellen werden freigesetzt [Kampen, 2005, Nickel, 2003, Battenberg, 2000].

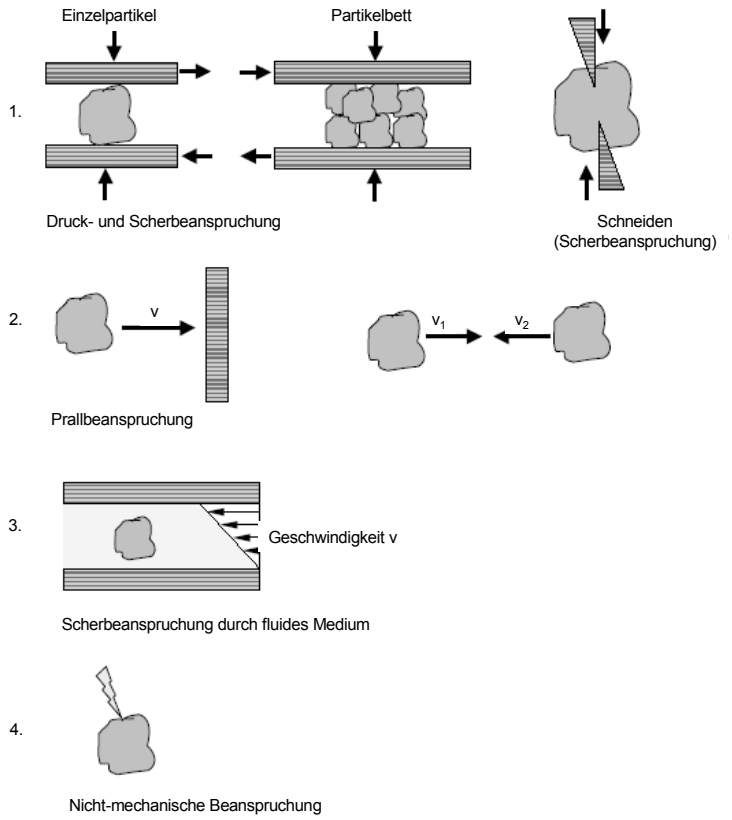
Die mechanische Aufschlussmethode wird verwendet, wenn die Produkte intrazellulär vorliegen und nicht die Möglichkeit besteht, durch die Zellwand hindurch zu diffundieren. Laut Kampen und Michel kann zwischen vier Be-

anspruchungsmethoden unterschieden werden, die in Bild 4-2 dargestellt werden [Kampen, 2005].

Durch Untersuchungen zur mechanischen Aufschlussmethode wurde gezeigt, dass für den Klärschlammaufschluss speziell Hochdruckhomogenisatoren (HDH), Rührwerkskugelmühlen (RWKM) und Ultraschallhomogenisatoren geeignet sind [Kopp, 1997, Battenberg, 2000].

Hochdruckhomogenisatoren werden vermehrt in der Lebensmitteltechnologie eingesetzt, wo sie zur Herstellung stabiler Emulsionen verwendet werden, z. B. zur Homogenisierung von Milch. Sie gehören zu den Strömungsdispergiermaschinen und arbeiten nach dem Druckentspannungsprinzip. Hochdruckhomogenisatoren bestehen aus einer Hochdruckkolbenpumpe und einem nachgeschalteten Homogenisierventil. Die Suspension, die homogenisiert werden soll, wird durch die Pumpe beschleunigt und im Ventil wieder komprimiert. Durch diesen Ablauf entstehen bei der Entspannung im Homogenisierventil Dampfblasen (Kavitation). Durch die Kavitation werden energiereiche Stoßwellen freigesetzt, durch welche die Zellwände aufgebrochen werden [Battenberg, 2000].

Bild 4-2
Hauptbeanspruchungsarten von Partikeln in der Zerkleinerungstechnik [Kampen, 2005]



Ebenso zur Desintegration von Mikroorganismen und Klärschlämmen eignen sich Rührwerkskugelmühlen (RWKM). Sie bestehen aus einem konisch oder zylindrisch angeordneten Mahlbehälter in vertikaler oder horizontaler Ausführung, in den ein elektrisch angetriebener Motor hineinragt. Rührwerkskugelmühlen können laut Battenberg »sowohl absatzweise als auch im Durchfluss mit kontinuierlicher Mahlkörperabtrennung betrieben werden« [Battenberg, 2000]. Verwendet werden für den Aufschluss Kugeln aus Glas, Keramik oder Stahl. Durch die Kugeln treten Scherspannungen am Mahlgut auf, die zum Zellaufschluss führen [Battenberg, 2000, Nickel, 2003, Kampen, 2005].

Ultraschallhomogenisatoren bestehen aus einem Generator, einem Keramikkristall und einer Sonotrode. Der Generator stellt hochfrequente Wechselspannung im Bereich von 15 - 40 kHz zur Verfügung. Der Keramikkristall besteht aus piezoelektrischem Material und wandelt die elektrischen Impulse in mechanische Schwingungen um. Die Sonotrode, ein schallabstrahlender Körper, überträgt diese Schwingungen an das Medium. Die Sonotrode verursacht Kavitationsblasen. Zerfallen diese Kavitationsblasen, entstehen hohe Energiedichten, die zum Zerfall der Zellwände führen [Kampen, 2005, Battenberg, 2000].

4.3 Praktische Versuche zur Beschleunigung der Biogasproduktion durch den Einsatz von Zellaufschlussverfahren

Die Literaturrecherche zu den bereits vorhandenen und teilweise erprobten Zellaufschlussverfahren wurde in dem Projekt durch eigene Versuche ergänzt. Hierbei wurde abweichend von den bisher an anderen Forschungsstellen durchgeführten Versuchen der Fokus auf die Dynamisierung des Biogasprozesses gelegt und insbesondere die Geschwindigkeit der Gasfreisetzung betrachtet, die mittels der eingesetzten Aufschlussverfahren erzielt werden kann.

4.3.1 Methoden und Versuchsdurchführung

Die Gasfreisetzungsgeschwindigkeiten wurden in Batch-Gärtests ermittelt. Ein Batch-Gärtest kann bei organischen Feststoffen oder Flüssigkeiten angewendet werden. Mit diesem Gärverfahren ist es u. a. möglich, den maximalen Biogasertrag und die anaerobe biologische Abbaubarkeit eines Substrates oder Substratgemisches zu untersuchen. Darüber hinaus können mit diesem Verfahren Untersuchungen zur Geschwindigkeit des anaeroben Abbaus eines Substrates durchgeführt werden [VDI, 2004].

Für die Untersuchungen war es zunächst wichtig, von der als Substrat eingesetzten Maissilage die Trockenmasse (TS) und die organische Trockenmasse (oTS) zu bestimmen. Die Bestimmung der organischen Trockensubstanz und der Trockensubstanz erfolgte gemäß der DIN-Normen EN 12879 und EN 12880.

Die Gärversuche wurden unter praxisnahen Bedingungen angesetzt. Sie können entweder unter mesophilen Temperaturbedingungen oder bei einigen Substraten auch unter thermophilen Bedingungen erfolgen. Um stabile Temperaturen gewährleisten zu können, besteht die Möglichkeit, Klima-

kammern zu verwenden. Eine Alternative dazu stellt ein Wasserbad mit entsprechender Temperatur dar [VDI, 2004]. Bei den hier beschriebenen Versuchen wurden die Gärversuche im Technikum in einer modifizierten Sauna im mesophilen Temperaturbereich bei 38 °C durchgeführt.

Die Versuche und der Versuchsaufbau wurden nach DIN 38414-8 mit Hilfe von Eudiometer-Messapparaturen durchgeführt.

Die Batch-Gärversuche und die Blindproben wurden in Doppelansätzen durchgeführt. Bei einer Blindprobe wird nur der Klärschlamm vergoren, um die von dem Klärschlamm produzierte Gasmenge zu erhalten. Bei der Auswertung der Ergebnisse wird später die gebildete Biogasmenge der Blindprobe von den mit Substrat vergorenen Proben abgezogen, um sich ein Bild über die insgesamt produzierte Menge an Biogas machen zu können.

Für die durchgeführten Versuche wurde ein Impfschlamm aus einer kommunalen Kläranlage eingesetzt. Ein Impfschlamm ist ausgefaulter Schlamm. Dem Impfschlamm wird stetig eine geringe Menge an Rohschlamm zugegeben. So wird der Impfschlamm biologisch aktiv gehalten [DIN, 1985]. Solche Schlämme haben den Vorteil, dass sie mit unterschiedlichsten Substanzen in Berührung gekommen sind. Aus diesem Grund ist Animpfmaterial aus einer Kläranlage einem künstlich in einem Labor gezüchteten Schlamm vorzuziehen, da dieser nicht einer so großen Vielfalt von Substanzen ausgesetzt war [VDI, 2004].

Bei den durchgeführten Versuchen wurde als Sperrflüssigkeit eine Lauge (NaOH in Lösung) verwendet, um den reinen Methanertrag bestimmen zu können. Das saure CO_2 wird dabei in der Natronlauge absorbiert und neutralisiert.

Für die Bestimmung des oTS-Gehalts werden aus beiden Probenansätzen die Mittelwerte gebildet. Der Gehalt der organischen Trockensubstanz entspricht nach der Berechnung einem Wert von 96,7 %.

4.3.2 Mechanischer Aufschluss

Für die Gärversuche wurde die Maissilage in verschiedene Probengrößen gehäckselt. Ausgehend von der unbehandelten Silage, die eine mittlere Häcksellänge von 9,5 mm aufwies, wurden die Proben für die Versuche bis auf Häcksellängen von ca. 2,8 mm zerkleinert.

Tabelle 4-4: Versuchsdaten der mechanischen Vorbehandlung

Getestete Fraktionen	Häcksellänge [mm]	Aufschlussdauer im Laborhäcksler [s]
Mais unbehandelt	9,5	0
Mais – fein	2,8	120
Mais – mittel 1	4,0	60
Mais – mittel 2	4,5	20
Mais – grob	7,2	10

Die Gärversuche mit den Proben des mechanischen Aufschlusses wurden nach ca. 50 Tagen abgebrochen, da nach diesem Zeitraum keine Methanproduktion mehr zu erkennen war.

4.3.3 Thermischer Aufschluss

Für den thermischen Aufschluss wurde die Maissilage unzerkleinert in einem Kocher erhitzt. Die Erhitzungsdauern und Temperaturen der thermischen Vorbehandlung sind in der nachfolgenden Tabelle 4-5 dargestellt.

Tabelle 4-5: Versuchsdaten der thermischen Vorbehandlung

Getestete Maischarge	Behandlungstemperatur [°C]	Aufschlussdauer [min]
1	-	-
2	70	5
3	70	10
4	70	15
5	100	5
6	100	10
7	100	15

Neben den thermisch vorbehandelten Proben werden für den Ansatz Proben der unbehandelten Maissilage und Blindproben benötigt. Insgesamt wurden bei diesem Versuch analog zum mechanischen Aufschluss von jeder Charge zwei Proben ausgewertet.

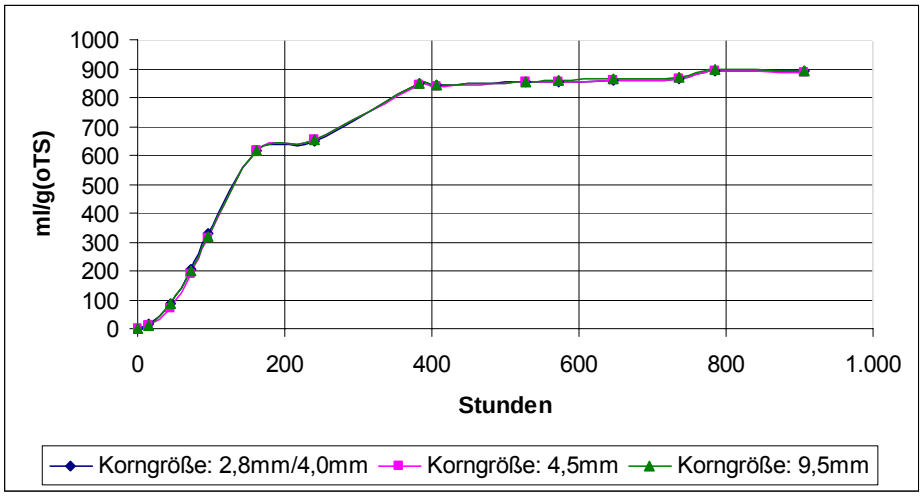
Die Gärversuche der Proben mit der thermischen Vorbehandlung wurden nach 40 Tagen abgebrochen, da nach diesem Zeitraum keine Methanproduktion mehr zu erkennen war.

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Mechanischer Aufschluss

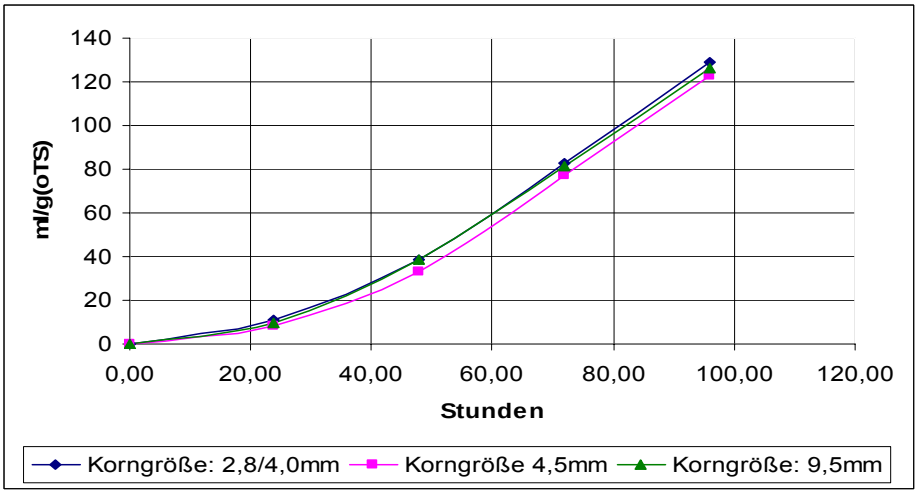
Über den gesamten Verlauf betrachtet unterscheiden sich die Erträge der Versuchsreihen nur gering. Nach ca. 900 Stunden (~38 Tage) lagen die Erträge der aufgeschlossenen Proben nur maximal 1,5 % über denen der unbehandelten Proben (Bild 4-3).

Bild 4-3
Verlauf der Biogasproduktion ausgewählter mechanisch behandelter Proben über den Versuchszeitraum



Auch die Betrachtung der ersten vier Tage zeigte kaum reproduzierbare Unterschiede in der Gasfreisetzungsgeschwindigkeit. Durch die Anwendung einer mechanischen Zerkleinerung lässt sich der Prozess der Anlagendynamisierung somit nicht nennenswert unterstützen.

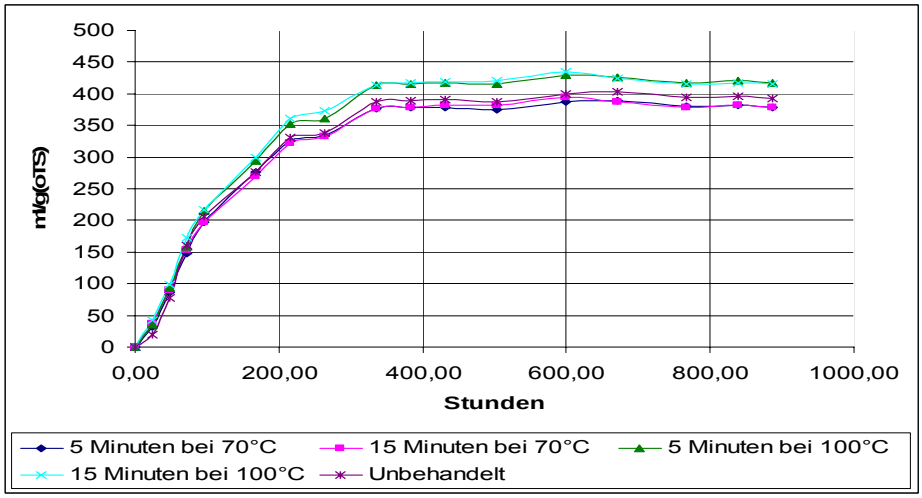
Bild 4-4
Verlauf der Biogasproduktion der mechanisch behandelten Proben über einen Zeitraum von 96 h



4.4.2 Thermischer Aufschluss

Bei der Betrachtung der thermisch aufgeschlossenen Proben ist ein etwas größerer Unterschied zu erkennen. Nach ca. 37 Tagen lagen die Erträge der bei 100 °C behandelten Proben über den Erträgen der anderen Proben (Bild 4-5). Von der unbehandelten Probe unterscheiden sich die Proben im Gesamtertrag um ca. 5 % (15 Minuten bei 100 °C)

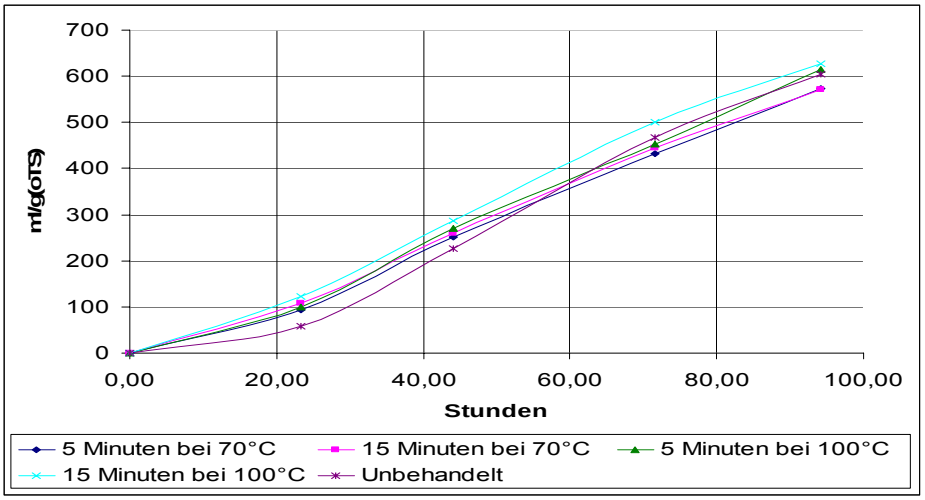
Bild 4-5
Verlauf der Biogasproduktion ausgewählter thermisch behandelter Proben



Auch bei den thermisch aufgeschlossenen Proben wurden die ersten vier Tage genauer betrachtet, um eine Aussage über die Dynamisierung des Prozesses durch die Vorbehandlung treffen zu können (Bild 4-6). Nach 96 Stunden konnte bei den auf 100 °C erhitzten Proben im Mittel ebenfalls eine um ca. 5 % höhere Methanbildung festgestellt werden.

Die bei 70 °C aufgeschlossenen Proben wichen in Ihrer Gasfreisetzungsgeschwindigkeit jedoch nicht von den unbehandelten Proben ab.

Bild 4-6
Verlauf der Biogasproduktion ausgewählter thermisch behandelter Proben übet einen Zeitraum von 96 h



4.4.3 Kosten der Aufschlussverfahren und Bewertung

Die Aufschlussversuche, die zur Anlagendynamisierung beitragen sollen, zeigten insgesamt nur eine geringe bzw. keine Beschleunigung des Prozesses. Dieses Bild deckt sich mit den Ergebnissen der Literaturrecherchen. Hier konnten zwar bei einigen Versuchen sehr deutliche Ertragssteigerungen identifiziert werden, in der Summe wurde jedoch auch eher ein geringes Ertragssteigerungspotenzial durch Vorbehandlungsverfahren identifiziert.

Hinsichtlich des Ertragssteigerungspotenzials kann daher davon ausgegangen werden, dass nach dem bisherigen Stand des Wissens eine Substratvorbehandlung unter besonderen Voraussetzungen durchaus ein Ertragssteigerungspotenzial besitzt, welches in Einzelfällen sogar sehr deutlich ausfallen kann. In den meisten Fällen sind die reproduzierbaren Ertragssteigerungen jedoch eher gering (2 - 8 %).

Diesen Steigerungen steht jedoch gegenüber, dass für den Aufschluss zum einen eine zusätzliche Investition für die Anschaffung der Aufschlussapparatur getätigt und zum anderen Energie für den Aufschluss aufgewendet werden muss. Die Kosten für eine Substratvorbehandlung liegen damit schnell über dem Gewinn, der durch den Mehrertrag erzielt werden kann.

In Tabelle 4-6 ist für einige Aufschlussverfahren berechnet, wie hoch der Gewinn durch den Aufschluss ausfällt, wenn lediglich die für den Aufschluss erforderlichen Energiekosten abgezogen werden.

Tabelle 4-6: Tatsächliche Ertragssteigerung verschiedener Aufschlussverfahren

Aufschlussverfahren	Ertragssteigerung [%]	Ertragssteigerung abzüglich Energieaufwand für den Aufschluss [%]
Maissilage großtechnisch gehäckselt (von 10 mm auf ca. 7 mm)	2	-4
Maissilage thermisch aufgeschlossen 100 °C	5	1,9
Maissilage thermisch aufgeschlossen 130 °C	7	2,3

Die Tabelle zeigt, dass die tatsächlich durch Aufschlussverfahren erzielbaren Ertragssteigerungen eher gering sind. Es muss jedoch hinzugefügt werden, dass innerhalb dieses Projektes nur einige ausgewählte Verfahren eingehender betrachtet wurden. Der Einsatz von Aufschlussverfahren kann daher nicht generell als positiv bzw. negativ bewertet werden, sondern ist immer im Einzelfall zu prüfen. Hierbei müssen neben den rein energetischen Aspekten auch immer noch weitere Punkte in die Bewertung mit einbezogen werden. Diese sind unter anderem der für den Aufschluss erforderliche Investitionsbedarf und der zusätzliche Personalaufwand, aber auch Betriebsverbesserungen, wie z. B. die Verminderung des Rührenergieaufwands aufgrund einer Viskositätserniedrigung oder die Verminderung von Sink- und Schwimmschichten in den Fermentern.

5 Literaturverzeichnis

[Amon, 2003] Amon, T.; Kryvoruchko, V.; Amon, B.; Moitzi, G.; Buga, S.; Lyson D.; Hackl, E.; Jeremic, D.; Zollitsch, W.; Pötsch, E.: Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Kleegras, Forschungsprojekt Nr. 1249 GZ 24.002/59-IIA1/01, Endbericht, Juli, 2003

[Battenberg, 2000] Battenberg, S.: Mikrobiologische Untersuchungen zum verbesserten Abbau von Schlamm aus Abwasserreinigungsanlagen durch Aufschluss, Dissertation, TU Braunschweig, 2000

[Besgen, 2005] Besgen, S.: Energie- und Stoffumsetzung in Biogasanlagen – Ergebnisse messtechnischer Untersuchungen an landwirtschaftlichen Biogasanlagen im Rheinland, Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität, 2005

[BMVEL, 2004] Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft [HRSG.]: Handreichung – Biogasgewinnung und -nutzung, Leipzig: tangram documents, 2004

[DIN, 1985] DIN 38414-8: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Bestimmung des Faulverhaltens (S8), Beuth Verlag, Juni, 1985

[EN, 01/2] DIN EN 12879: Charakterisierung von Schlämmen – Bestimmung des Glühverlustes und der Trockenmasse, Beuth Verlag, Februar, 2001

[FNR, 2001] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial, in: Gülzower Fachgespräche: Band 15, Weimar, 2000

[Johannsen, 2005] Johannsen, S.: Vergleichende Untersuchungen von Aufschlussverfahren für Mais-Silage zur Verwendung in der Biogasanlage, Diplomarbeit, Fachhochschule Flensburg, 2005

[Kampen, 2005] Kampen, I. Einfluss der Zellaufschlussmethode auf die Expanded Bed Chromatographie, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2005

[Kopp, 1997] Kopp, J.; Müller, J.; Dichtl, N.; Lehne, G.; Schwedes, J.; Battenberg, S.; Näveke, R.; Scheminski, A.; Krull, R.; Hempel, D.C.: Anaerober Abbau mechanisch aufgeschlossener Schlämme, in: 12. ZAF-Seminar „Klärschlammbehandlung und -entsorgung – Erfahrungen und Perspektiven“, Braunschweig, 1997, Tagungsband S. 77-98

[KTBL, 2005] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, in: Positionspapier, Januar, 2005

[Möller, 1992] Möller, M.: Chemisch-physikalischer Aufschluss von Biertreber als Vorbehandlung zur anaeroben Fermentation zu Biogas, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992

[Mshandete, 2006] Mshandete, A. et al.: Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste, in: Renewable Energy, Nr. 31, 2006, S. 2385-2392

[Nickel, 2003] Nickel, K.; Neis, U.: Klärschlammdesintegration – Überblick über verschiedene Verfahren, Hamburg, 2003

[Schumacher, 2007] Schumacher, B.; Oechsner, H.: Aufbereitung von Nachwachsenden Rohstoffen zur Optimierung der Biogasausbeute, in: Biogas 2007-Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 1983, S. 157-168

[VDI, 2004] VDI 4630: Vergärung organischer Stoffe, VDI-Richtlinien, Beuth Verlag, 2004