



# 沼气工程与技术

## Biogas Engineering and Application

第3卷

Volume 3

董仁杰 [奥]伯恩哈特·蓝宁阁 主编

Edited by: Prof. Dr. DONG Renjie

Prof. Dr. Bernhard Raninger



中国农业大学出版社  
China Agricultural University Press

# Vorteile einer effizienten Prozesskontrolle von Biogasanlagen (Übersetzung aus dem Englischen)

A. Scheck, R. Binder<sup>\*</sup>, M. Charatjan<sup>\*</sup>, B. Rühl<sup>\*\*</sup>

*Betreiber; <sup>\*</sup>Binder GmbH, 89081 Ulm; <sup>\*\*</sup>Biogasservice Rühl, 89143 Blaubeuren*

Zusammenfassung: In diesem Artikel wird die Entwicklung und Testung einer Software zur verbesserten Prozessteuerung von Biogasanlagen vorgestellt, die sowohl eingesetztes Substrat spart, die Prozessstabilität verbessert, Überfütterung vermeidet und die Volllastzeiten der BHKW's durch eine geschickte Steuerung der zwischengespeicherten Gasmenge erhöht. Ermöglicht wird dies durch eine einfache, genaue und zuverlässige Gasmess- und Analysetechnik.

## BENEFITS OF AN EFFICIENT PROCESS CONTROL SYSTEM FOR BIOGAS PLANTS

A. Scheck, R. Binder<sup>\*</sup>, M. Charatjan<sup>\*</sup>, B. Rühl<sup>\*\*</sup>

*Operator of the biogas plant, <sup>\*</sup>Binder GmbH, Buchbrunnenweg 18, 89081 Ulm, Germany; <sup>\*\*</sup>Biogasservice Rühl, Albstr. 44, 89143 Blaubeuren, Germany*

### EXECUTIVE SUMMARY:

---

This article presents the development and testing of software to improve the process control system for biogas plants (digesters) to achieve substrate savings, improve process stability, avoid overfeeding and increase the CHPs full load operation periods by employing smart control methods to adjust the buffered gas volumes. This is made possible by simple, accurate and reliable gas flow measurement and (gas) analysis technology.

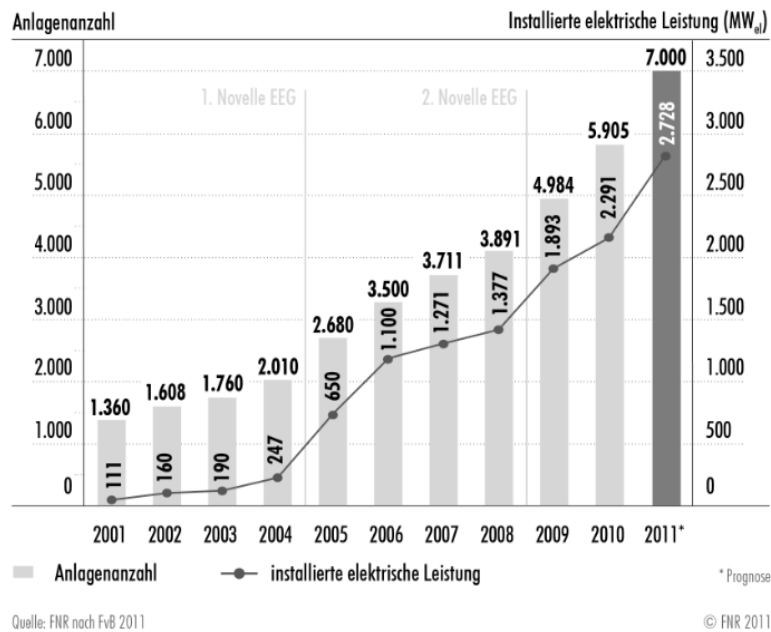
---

## 1 Einleitung

Die Nutzung erneuerbarer Energien ist in der EU und besonders in Deutschland erwünscht und wird entsprechend politisch gefördert. Dazu zählt neben der Nutzung von Solar-, Wind- und Geothermischer Energie auch die Energie aus Biogas, welches aus organischen Abfällen (Gülle, Mist und Biomasse) und Energiepflanzen (nachwachsenden Rohstoffen) erzeugt werden kann. Dieser Markt wächst vor allem im europäischen und asiatischen Ausland rasant, während in Deutschland die wirtschaftlich sinnvollen Kapazitäten fast ausgeschöpft sind. Grafik 1 zeigt die Entwicklung der Anzahl der errichteten Biogasanlagen in Deutschland in den letzten 10 Jahren.

Deutschland ist in der Biogastechnologie führend und besitzt eine langjährige Erfahrung im Betrieb von Biogasanlagen. Neben der Verstromung vor Ort gewinnen die Aufbereitung zu Biomethan und die Einspeisung ins Erdgasnetz zunehmend an Bedeutung.

Steigende Rohstoffpreise, sinkende Einspeisevergütungen, notwendige Investitionen wegen gesetzlicher Anforderungen an die Betriebssicherheit, gestiegene Anforderungen an die Gasqualität durch neue effizientere BHKW's und Forderungen von Versicherungsgesellschaften hinsichtlich Nachweis von Prozessparametern zwingen jedoch die Betreiber, die Anlage effizienter zu betreiben und die Prozesse zu optimieren. Wird dahingehend nicht investiert, kann eine Biogasanlage in Deutschland mittelfristig nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden.



**Abbildung 1: Entwicklung Anlagenanzahl und installierte elektrische Leistung in Deutschland<sup>[1]</sup>**

Dazu gehört die Nutzung weiterer möglicher Substrate, eine Erhöhung der Gasausbeute, eine Erhöhung der Raumauslastung, die Verringerung von Fackelaufzeiten und Speichermöglichkeiten, wenn die Energie nicht ins Stromnetz eingespeist werden kann. Dies kann aber nur dann erfolgreich realisiert werden, wenn sämtliche Faktoren, die auf den Betrieb einwirken erfasst und die Hauptprozessparameter gemessen und in die Prozesssteuerung einbezogen werden. Der Biogasmarkt ist auf eine weitere Prozessverbesserung, auf innovative, zuverlässige und genaue (Feld)Messtechnik und modellbasierte Optimierungsmethoden angewiesen.

Eine einfache Erhöhung der zugeführten Substratmenge ist nicht unbegrenzt möglich, da die Gefahr einer Überfütterung besteht, d.h. es zu schnell zu viel Säuren produziert werden, der pH-Wert auf einen für die methanbildenden Bakterien zu tiefen Wert absinkt und den Prozess nach dem Erschöpfen des Puffervermögens völlig zum Erliegen bringen kann. Bestimmte Stoffe wie Schwefelwasserstoff oder Ammoniak aus den protein- und fettreichen Substraten sind in höheren Konzentrationen für einige wichtige Mikroorganismengruppen toxisch und können den Prozess hemmen.<sup>[2]</sup>

Da Ammoniak leicht wasserlöslich ist, kann durch eine entsprechende Trocknung des Gases und Kondensat- abführung die Belastung im Biogas wesentlich reduziert werden.<sup>[3]</sup>

Währenddessen dem Schwefelwasserstoffanteil in der Vergangenheit eher wenig Aufmerksamkeit entgegengebracht wurde, ist die Reinigung des Biogases von Schwefelwasserstoff inzwischen ein fester Bestandteil bei Biogasanlagen. Trotzdem werden noch viele Biogasanlagen heute schon nicht mehr nach dem derzeitigen Stand der Technik betrieben, denn

- Standzeiten von sechs Jahren für eine Anlage wegen Korrosion durch H<sub>2</sub>S kann nicht rentabel sein
- Standzeiten von unter einem Jahr von Aktivkohlefiltern sind auch nicht rentabel
- Monatliche Ölwechsel bei den Gasmotoren wegen der Versäuerung durch H<sub>2</sub>S sind nicht rentabel (auch wenn einige Motorenhersteller einen Betrieb mit 500 ppm H<sub>2</sub>S erlauben, ist doch ein Betrieb bei niedrigeren Konzentrationen und dadurch geringeren Verbrauch von Öl wesentlich sinnvoller)

## 2. Generelle Verfahren und Methoden

### 2.1. Biogasanlagensteuerung – Stand der Technik

#### 2.1.1. Fütterungsstrategie

Die Anlagenauslegung erfolgt über substrattypische Verweilzeiten, Raumbelastungen und Raum-Zeit-

Ausbeute. Der Eigenenergiebedarf an Wärme kann bei lokaler Verbrennung immer gedeckt werden. Überschüssige Wärme wird oft nicht vollständig oder in andere Energieformen überführt und dadurch genutzt.

Die Fermenter werden derzeit meist in zeitlich festen Abständen, zwischen 1-4x täglich gefüttert. Schwankende Gärprozesse durch schwankende Substratqualität führen zu einer relativ geringen möglichen Raumbelastung (Vermeidung von Überfütterung) und zum Abfackeln von überschüssigem Biogas.

Sinkt die Gasproduktion unbemerkt unter eine bestimmte Menge, kann das BHKW nicht mehr Volllast laufen. Somit wird weniger elektrische Energie erzeugt und mit dem Netzbetreiber abgerechnet. Es entsteht ein Umsatzverlust, der durch keine Maßnahme rückgängig gemacht werden kann. Sinkt die Gasmenge bedingt durch ein biologisches Problem plötzlich, kann es sogar zum Abschalten des BHKW's kommen. Dann kann der 100%-ige Ausfall der Energieeinspeisung sogar für mehrere Stunden große Einnahmenverluste bedeuten.

Selbst Großanlagen mit mehreren Fermentern messen häufig nur die Gasmenge in einer Sammelleitung und nicht einzeln an jedem Fermenter. Beginnende Probleme können so u.U. nicht rechtzeitig erkannt und eine Prozessoptimierung eines jeden einzelnen Fermenter kann so nicht durchgeführt werden.

Eine Prozessoptimierung ist entweder über Messung von Prozessparametern in der Flüssigphase (pH, Säurekapazität, ...) oder der Gasphase (Menge und Qualität) oder eine Kombination aus beiden möglich. Die Nutzung und Aussagefähigkeit des pH-Wertes ohne zusätzliche Kenntnis der Pufferkapazität ist umstritten, wenn auch der pH-Wert mit einfachen Mitteln gemessen werden kann. Eleganter ist der Weg über die Gasmenge und Gasqualität, wenn daraus Rückschlüsse auf den Prozess gezogen werden und dieser entsprechend beeinflusst wird.

Während kleine Biogasanlagen bis 75 kW weitestgehend von einzelnen Landwirten betrieben werden können, benötigen größere Anlagen immer noch zusätzlich eine prozessbiologische Betreuung [4], auf die auch bei einer automatisierten optimierten Fütterung und optimierten biologischen Schwefelentfernung nicht verzichtet werden kann.

### 2.1.2. Schwefelwasserstoffentfernung aus dem Biogas

Da Schwefelwasserstoff ein farbloses, brennfähiges und stark giftiges Gas mit charakteristischem Geruch nach faulen Eiern (allerdings nur bei niedrigen Konzentrationen) ist, erfordert es besondere Arbeitsschutzmaßnahmen. In feuchtem Biogas kann es aber auch stark korrosiv wirken und durch Schäden an den Bauwerken kurze Standzeiten und hohe Wartungskosten verursachen. Eine Reduzierung der H<sub>2</sub>S-Konzentration ist somit zwingend für einen wirtschaftlichen Betrieb erforderlich. Es werden im Wesentlichen folgende Schädigungsarten unterschieden:

*Die schwache Korrosion:* Kondensiert der Wasserdampf an kalten Stellen in der Biogasanlage, so löst sich darin auch das H<sub>2</sub>S und bildet mit dem Wasser eine saure und korrosive wirkende Lösung. Diese Säure korrodiert alle metallischen Bauteile (z.B. Rohrleitungen, Schrauben, Nägel und Verbindungen) oder greift den Beton an und zerstört diesen.

*Die Versäuerung des Motoröls:* Schwefelwasserstoff wird mit dem Methan im Motor verbrannt. Aus H<sub>2</sub>S und Sauerstoff entsteht bei der Verbrennung Schwefeldioxid (= SO<sub>2</sub>), der ebenfalls gasförmig ist, sich gut löst und eine sehr saure und korrosive Wirkung hat. Durch das SO<sub>2</sub> wird das Motoröl sauer und dessen Wirksamkeit zerstört. In sehr kurzer Zeit können dadurch metallische Oberflächen im Verbrennungsmotor korrodieren und zerstört werden.

*Die starke Korrosion durch Schwefelsäure:* Eine weitere chemische Reaktion tritt ein, wenn durch unvollkommener oder gezielt geringer Sauerstoffzufuhr aus H<sub>2</sub>S elementarer Schwefel entsteht. Dieser reagiert mit Wasser und Sauerstoff zu Schwefelsäure H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

*Korrosion zementgebundener Baustoffe:* Die so entstandene Schwefelsäure und die zuvor genannte schwefelige Säure können bei Konzentrationen von > 0,5 ppm H<sub>2</sub>S Abtragungsraten des Betons von 0,5 bis 10 mm pro Jahr bewirken. Bei extremen Bedingungen sind schon 20 mm Abtragung festgestellt worden. [5]

Es gibt derzeit kein mathematisches Modell, welches die sich in einer Biogasanlage einstellende Schwefel-

wasserstoffkonzentration zuverlässig vorhersagen kann. Dies wäre jedoch sehr wichtig, soll die zu installierende Luftentschwefelung richtig dimensioniert werden. Der wichtigste Parameter für die Beurteilung der Luftentschwefelung ist der Sauerstoffverbrauch, der die Aktivität der entschwefelnden Mikroorganismen aufzeigt. Die Funktionalität der Luftentschwefelung hängt von den folgenden Bedingungen ab:

- ausreichende Sauerstoffzufuhr in Bereiche, in denen entschwefelt werden soll,
- ausreichend Besiedlungsfläche für die entschwefelnden Mikroorganismen,
- Nährstoffzufuhr zu den entschwefelnden Mikroorganismen (Kontakt zum Substrat),
- ausreichende Verweilzeit des Sauerstoffs in der Entschwefelungszone.

Nur wenn alle Parameter in den entsprechenden Größenordnungen eingehalten werden, kann das Verfahren zufriedenstellend funktionieren. Das bedeutet, dass mindestens 0,5-bis 1,5-mal so viel Sauerstoff zuzuführen ist, wie H<sub>2</sub>S umgewandelt werden soll.<sup>[6]</sup>

Typische Verfahren zur H<sub>2</sub>S-Entfernung sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

**Tabelle 1: Überblick über alternative Technologien der Biogaseschwefelung<sup>[3]</sup>**

Verfahren	Interne biologische Schwefelung	Externe biologische Schwefelung	Ent-Adsorption	Nasse Gaswäsche	Dosierung von Eisensalze
Wirkprinzip	mikrobiologisch	mikrobiologisch	chemisch-physikalisch	chemisch-physikalisch	chemische Fällung
Technische Realisierung	Einblasen von Luft in den Fermenter	Entschwefelung in externem biologischen Reaktor mit Lufteinblasung	Adsorption an Aktivkohle oder eisenhaltigen Massen	an Leitung oder Waschlösung bei gleichzeitiger Zugabe	durch Zugabe von Eisenchlorid bzw. -sulfat in das Substrat
Produkt der Umwandlung	H <sub>2</sub> S-Schwefelige Säure, Elementarschwefel	Schwefelige Säure, Elementarschwefel		Schwefelsäure, Elementarschwefel	Eisensulfid

Die interne Entschwefelung durch Lufteinblasung ist mit weniger als 1.000 € einmaligen Investitionskosten das preiswerteste und mit Abstand am häufigsten eingesetzte Verfahren. Der finanzielle Vorteil wird jedoch durch prozesstechnische Nachteile relativiert. In vielen Fällen ist die Entschwefelungsleistung unzureichend, es kommt zu erhöhten H<sub>2</sub>S-Konzentrationen im Verbrennungsgas. Ursachen dafür sind unzureichende O<sub>2</sub>-Konzentrationen und zu geringe Besiedlungsflächen für die schwefelwasserstoffumwandelnden Bakterien im Gasraum des Fermenters. Trotzdem besitzt das Verfahren ein sehr hohes Nutzungspotenzial. Es lässt sich sowohl ausschließlich als auch in Kombination mit anderen Verfahren zur Entschwefelung einsetzen. Dieses Verfahren verfügt deshalb über das größte Optimierungspotenzial.

In Sachsen wird zum Beispiel die biologischen Schwefelentfernung durch Lufteinblasung in 96% der Anlagen genutzt, wobei in nur 33% der Biogasanlagen ausschließlich biologisch. In 37,5% der Anlagen werden zusätzlich Eisensalze dosiert und/oder in 12,5% der Anlagen ist eine zusätzliche Aktivkohleentschwefelung installiert.<sup>[7]</sup>

Die Grundvoraussetzungen für eine Optimierung der Biogaseschwefelung sind gesicherte Kenntnisse über die in der Anlage ablaufenden Prozesse und deren Einflussgrößen (Anlagenanalyse). Die Strategie zur Optimierung der Luftentschwefelung basiert auf einer quasi-kontinuierlichen Überwachung der Schwefelwasserstoffkonzentration und des Sauerstoffverbrauchs/ der Sauerstoffkonzentration im Biogasstrom. Basierend auf dieser Datenbasis kann der betreuende Biologe Ursachen für eine ungenügende Reinigungsleistung systematisch eingrenzen und bis zu einem gewissen Grad ausschließen.

Auch in<sup>[3]</sup> wird dringend angeraten, zumindest täglich das Biogas vor dem BHKW zu analysieren, um die Funktion der Reinigungsmaßnahmen zu überwachen. Bei Anlagen mit zeitlich ungleichmäßig verteilter Fütterung sollte sogar häufiger gemessen werden und die Analysestation mit Grenzwertüberwachung und

Alarmierung ausgestattet sein. Auf eine regelmäßige Kalibrierung der Sensoren ist generell zu achten.

## 2.2. Hauptziele des Projektes

Basierend auf dem Stand der Technik und Erfordernissen zur Effizienzsteigerung von Biogasanlagen sollte eine Prozesskontrolle entwickelt werden, die es ermöglicht:

- den/die Fermenter je nach Bedarf der Biogas-Verbraucher zu beschicken,
- Gärprozessschwankungen besser zu dämpfen und die Anlage dadurch mit einer höhere Raumbelastung betreiben zu können,
- Verbraucher zeitabhängig ansteuern zu können,
- Abwärmeverteilung und –nutzung besser zu regeln und
- Korrosionsprozesse im Motor, an den Behältern und metallischen Oberflächen zu reduzieren, indem die H<sub>2</sub>S-Konzentration mittels optimierter zeitgesteuerter Lufteinblasung gezielt reduziert wird

Die Software zur Prozesssteuerung wurde über mehrere Monate in einer einfach aufgebauten, typischen Biogasanlage (Gülle + NawaRo) getestet. Daneben wurden alle Hauptparameter wie z.B. die aktuell produzierte Gasmassestrom, Gasqualität und derzeit vorrätige gespeicherte Gasmenge gemessen, erfasst, ausgewertet und dokumentiert.

## 2.3. Beschreibung der Messtechnik zur Erfassung der erforderlichen Prozessdaten

### 2.3.1. Verfahren zur Biogasmengenmessung

Gemäß DIN 1343 <sup>[8]</sup> ist der Kubikmeter bei Normbedingungen definiert bei: Standarddruck  $p_n$  von 1,01325 bar, rel. Feuchte von 0 % (trockenes Gas) und einer Standardtemperatur von  $T_n = 273,15 \text{ K}$  ( $t_n = 0 \text{ °C}$ ).

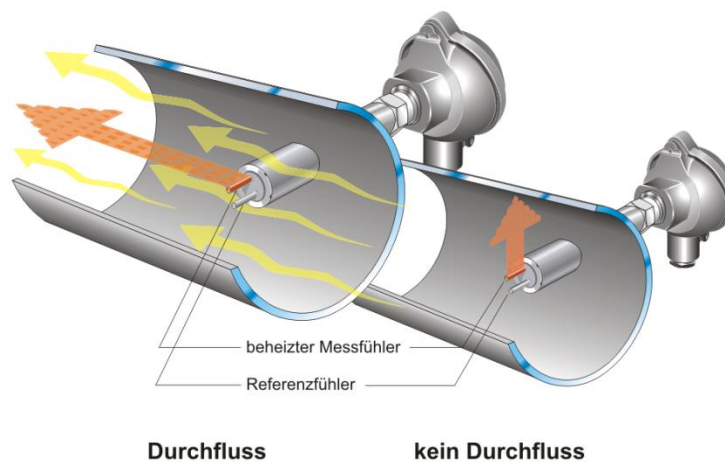
Es sind verschiedene Verfahren zur Gasmengenmessung wie z.B. Blenden, mechanische Zähler, Wirbelzähler und Ultraschallmessgeräte wie eben auch thermische Gasmengenmessgeräte verfügbar. Mit Ausnahme des thermischen Zählers bestimmen alle anderen Messinstrumente den Volumenstrom bei Betriebsbedingungen und erfordern somit zumindest eine Druck- und Temperaturkompensation. Somit sind nicht nur drei Sensoren erforderlich, jeder Sensor hat seinen eigenen Messfehler (welche sich letztendlich aufsummieren) und eine Ausfallwahrscheinlichkeit. Weiterhin verschlechtert sich die Messgenauigkeit, wenn sich die Gaszusammensetzung bzw. die Gasdichte ändern. Derzeit bestimmen alle am Markt befindlichen Geräte die feuchte Biogasmenge inklusive dem Wasserdampfanteil, d.h. auch wenn Druck und Temperatur kompensiert werden entspricht das Ergebnis nicht den Normbedingungen der DIN <sup>[8]</sup>.

Thermische Gasmassezähler eignen sich für diese Anwendung im Vergleich zu allen anderen Messverfahren besonders gut, da sie die feuchte Gasmenge direkt bei Normdruck und –temperatur ermitteln und auch bei sehr kleinen Gasgeschwindigkeiten sehr genau sind. Somit sind die Druck- und Temperaturkompensation wie bei anderen Messverfahren hier nicht erforderlich. Der Sensor besteht aus zwei PT100-Widerständen: einer wird mit einer konstanten Leistung beheizt und der zweite wird als Referenz genutzt und ermittelt direkt die Gastemperatur. Die absorbierte Wärmemenge wird durch die Heizleistung bestimmt. Der Gasmassestrom kann nach Gleichung (1) berechnet werden, wobei  $\Delta Q$  die vom Gasstrom absorbierte Wärmemenge darstellt,  $q_M$  den berechneten Gasmassestrom,  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität des Gases (Gasgemisches) und  $\Delta T$  die sich einstellende Temperaturdifferenz:

$$\Delta Q = q_M * c_p * \Delta T \quad (1)$$

Der Einbau des thermischen Sensors ist sehr einfach und die Kosten sind gering. Die Ausfallwahrscheinlichkeit von nur einem Sensor ist viel geringer, um den Gasmassestrom zu messen als bei Verwendung von drei Messinstrumenten.

Das hier genutzte Gasmassmessgerät COMBIMASS<sup>®</sup> der Fa. Binder ist das einzige Kompaktgerät, welches die Gastemperatur im Biogas misst und direkt im Sensorkopf die trockene Gasmenge ohne weitere Sensoren oder Auswertelektronik berechnet und überträgt.



**Abbildung 2: Funktionsprinzip thermische Gasmassmessung**

Auch Einbauorte direkt nach dem Fermenter stellen kein Problem für den thermischen Sensor dar, weil er komplett im gasberührenden Bereich aus einem hochwertigen Edelstahl gefertigt ist. An diesen Orten ist das Biogas zu 100% wasserdampfgesättigt, d.h. allein basierend auf der Gastemperatur kann der Wasserdampfanteil berechnet und kompensiert werden. Somit ist eine Messung des trockenen Biogasmassstroms bei Normbedingungen, wie in <sup>[8]</sup> definiert, möglich.

### 2.3.2. Feldmessgeräte für Biogasanalyse

Für die Analyse von Rohbiogas sind vor allem Feldgeräte mit Nutzung von IR-Kanälen und elektrochemischen Zellen im Einsatz. Hochgenaue Laborgeräte (GCMS,..) werden meist nur auf großen Anlagen mit Biomethanaufbereitungsstufen genutzt, um die Qualität des ins Erdgasnetz eingespeisten Biomethans abrechnungsfähig zu überwachen.

In der folgenden Tabelle sind die unterschiedlichen Verfahren zur Analyse der Gasbestandteile und deren Eignung aufgeführt (10- sehr gut geeignet, 0- gar nicht geeignet)

**Table 2: Verschiedene Messverfahren und deren Eignung für Biogasbestandteile**

Verfahren	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Infrarotabsorption (IR)	10	10	0	0	7	0	10
Elektrochemische Sensoren	0	2	10	10	7	6	0
Wärmeleitfähigkeit	10	10	10	0	10	10	10
Kapazitive Sensoren	0	0	0	0	0	0	8
Paramagnetische Sensoren	0	0	10	0	0	0	0
Gaschromatografie	10	10	10	10	10	10	10

Es gibt verschiedene mobile Analysegeräte und stationäre Analysensysteme auf dem Markt.

In diesem Projekt wird ein stationäres System des Herstellers Binder verwendet. CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> werden über IR analysiert, O<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>S mit Hilfe von elektrochemischen Sensoren. Flexible Analysezyklen (können einfach vom Betreiber geändert werden) ermöglichen es, die Häufigkeit der Gasanalyse an die Prozessbedingungen anzupassen, um somit die Prozesseffizienz verbessern zu können.



1. Anzeige Gasmengensignale; 2. Anlagensteuerung; 3. Visualisierung Anlagensteuerung auf dem PC  
4. COMBIMASS® Gasanalyseschrank; 5. COMBIMASS® Komponenten zur Gaskonditionierung

**Abbildung 3: Foto der gesamten Vor-Ort-Steuerung**

### 3. Beschreibung der Biogasanlage

#### 3.1. Details

Die Biogasanlage wurde im Jahr 2006 errichtet und besteht aus einem Fermenter (1.000 m<sup>3</sup> Volumen), einem Nachgärer (1.000 m<sup>3</sup> Volumen), einem Endlager (1.200 m<sup>3</sup> Volumen) sowie einem externen Gasspeicher. Substrat wird nur in den Hauptgärer eingebracht. Die Rührwerke in allen drei Behältern sind zeitgesteuert. Pro Jahr werden etwa 5.300 t Substrat eingebracht, davon 1.600 t Gülle, 3.700 t Silage (40% Mais, 30% Gras, 30% Ganzpflanzen). Das installierte BHKW hat eine elektrische Nennleistung von 170 kW. Die anfallende Wärme wird sowohl zur Beheizung der Fermenter als auch zum Heizen der Wohnhäuser, einer kleinen Familienschlachtereier und der Rest zur Holz Trocknung genutzt. Ein intelligentes automatisiertes Wärmenutzungskonzept gewährleistet, dass immer zuerst die Wärmeversorgung der Fermenter und danach die der Wohnhäuser sichergestellt wird.

Jeder Fermenter hat eine Gasmengenmessung und eine Gasentnahmestelle für die Analyse. Die Analysestation analysiert nacheinander die Gaszusammensetzung der Fermenter und der Sammelleitung. Die Signale der Gasmengenmessgeräte werden in die Analysestation eingelesen und dort mit der aktuellen Gaszusammensetzung korrigiert.

Die Daten von allen Anlagenkomponenten werden über die SPS in die Leitwarte übertragen, visualisiert und gespeichert. Bei Über-/ Unterschreiten von Grenzwerten werden Alarmer per SMS übertragen. Fernwartung und Fernbedienung der Anlage sind über Internet oder I-Phone möglich.

#### 3.2. Beschreibung der SPS-basierten Software zur Prozesssteuerung

##### 3.2.1. Fütterungsstrategie

Es wurde eine Software (mit passender Hardware) entwickelt und seit etwa 2 Jahren getestet, welche den Füllgrad des Gasspeichers dahingehend optimiert, dass

1. das der Füllstand im Gasspeicher sich im Normalbetrieb zwischen einem definierten minimalen und maximalen Wert befindet und somit
2. das BHKW möglichst immer unter Vollastbedingungen läuft,
3. die Fackel im normalen Betrieb niemals läuft und
4. bei bevorstehenden geplanten Wartungszyklen die Gasproduktion gezielt gedrosselt werden kann, um Substrat einzusparen (ökonomisch) und Fackelaufzeiten zu minimieren (Umweltbelastung).

Im Falle von Über- /Unterschreitung von Grenzwerten bezüglich Gasmenge und Gasqualität erfolgt eine Benachrichtigung des Betreibers per SMS – bei Totaleinbruch der Biologie geht automatisch eine E-Mail an den betreuenden Biologen.



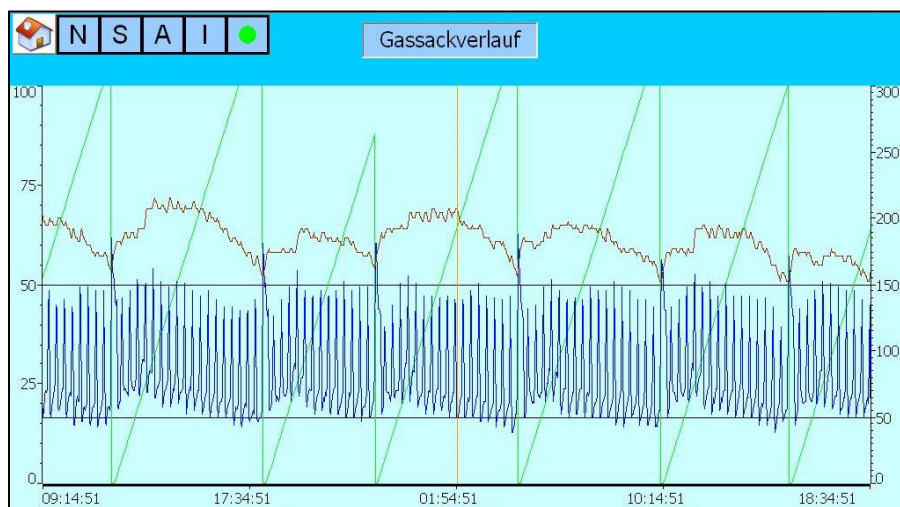
Basis für die Regelung des Gasspeicherfüllstandes ist die Kenntnis von Prozessparametern wie aktuell produzierte Gasmenge und aktuelle Methankonzentration. Eine Kopplung der Software mit einer Gasanalysestation und einer Biogasmengenmessung ist dazu erforderlich. In Abhängigkeit der Größe der Verbraucher (BHKW, Boiler etc.) kann dann der erforderliche Massestrom Methan und daraus resultierend die dazu benötigte Biogasmenge ermittelt werden.

Desweiteren wurde ein Satz von logischen Wenn-Dann-regeln und deren Verknüpfung entwickelt. Im Normalbetrieb muss nach der Fütterung eine Mindestzeit ablaufen, während dieser auf jeden Fall nicht erneut gefüttert werden kann (Überfütterungsschutz). Nach Ablauf dieser Zeit wird nur dann erneut gefüttert, wenn der Füllstand den Sollwert unterschreitet. Liegt der Füllstand oberhalb des Sollwertes, wird die Sperrzeit 1 abgewartet. Ist der obere Sollwert unterschritten, wird die Fütterung gestartet. Liegt der Füllstand oberhalb des oberen Sollwertes, wird die Sperrzeit 2 abgewartet. Ist die Obergrenze unterschritten, wird die Fütterung gestartet.

Überfütterungsschutz: Unterschreitet der Füllstand den Sollwert, wird ein Timer gestartet. Nach Ablauf des Timers verschiebt sich der Sollwert auf den unteren Sollwert, wenn ein bestimmter Grenzwert an Gasproduktion überschritten wird.

Auf der Basis der bekannten Prozessparameter wie aktuelle Gasmenge, aktuelle Methankonzentration, aktueller Gasverbrauch und Befüllgrad des Gasspeichers konnte eine SPS-basierte Software entwickelt und getestet werden.

Nunmehr wird nur dann dem Fermenter der Versuchsbiogasanlage neues Substrat zugeführt, wenn ff. Bedingungen erfüllt sind: Gasspeicher weniger als 45% gefüllt oder die Fermenterproduktion geringer als 67 Nm<sup>3</sup>/h. Alle Soll- und Grenzwerte werden auf der Basis anlagenspezifischer Parameter festgelegt und in einer Adaptionsphase angepasst. Das folgende Bild zeigt einen Screenshot der Versuchsbiogasanlage mit der installierten Software mit den unterschiedlich langen Zeitabständen zwischen zwei Fütterungszyklen (in grün).



**Abbildung 4: Bildschirmkopie mit den Prozessparametern Fütterungszyklen (grün), aktuelle Gasproduktion (blau) und Füllgrad des Gasspeichers (braun)**

Die aktuelle Gasproduktion schwankt in Abhängigkeit vom Rührerbetrieb stark (hohe Gasmenge - Rührwerk ist an, geringe Gasmenge - Rührwerk ist aus), der Mittelwert korreliert jedoch sehr gut mit den Fütterungszyklen.

### 3.2.2. Biologische H<sub>2</sub>S-Entfernung

Es soll eine Software (mit passender Hardware) entwickelt und getestet werden, welche die biologische Schwefelentfernung dahingehend optimiert, dass

1. die H<sub>2</sub>S-Konzentration im Rohbiogas möglichst gering sein soll und
2. aus Sicherheitsgründen eine bestimmte Sauerstoffkonzentration nicht überschritten werden soll

Die vorhandenen Lüfter werden meist nur im AN/AUS-Betrieb betrieben und können nicht geregelt werden. Über eine manuelle Drosselung lässt sich die Luftmenge um 10-15% reduzieren. Meist befindet sich nur am Hauptgärer ein Lüfter, eher selten am Nachgärer und eigentlich nie am Gärrestlager. Die optimale Sauerstoffkonzentration im Rohbiogas liegt bei etwa 0,8 Vol.-%.

Ausgangspunkt für die Regelung der H<sub>2</sub>S-Konzentration im Gas ist ein im Normalbetrieb immer laufender Lüfter, der kontinuierlich eine identische Luftmenge in den Fermenter einbringt. Auch das Regelsystem für die biologische Schwefelentfernung besteht aus einer Verknüpfung von mehreren logischen Wenn-Rann-Regeln (Fuzzy-Logik-System): Wenn die H<sub>2</sub>S-Konzentration unter einen definierten minimalen Wert fällt, wird der Lüfter ausgeschaltet. Steigt die H<sub>2</sub>S-Konzentration bei ausgeschaltetem Lüfter innerhalb der nächsten 24 Stunden auf nicht mehr als einen zweiten Grenzwert an, wird eine Alarmmeldung „Kontaktaufnahme zum betreuenden Biologen“ ausgegeben.

Steigt die Sauerstoffkonzentration über den oberen Grenzwert an, wird der Lüfter ausgeschaltet. Steigt die Sauerstoffkonzentration danach trotzdem weiter auf Werte über 2 Vol.-% an, wird ein Alarm „Anlage prüfen“ generiert, da dann z.B. eine Undichtigkeit an einer Rohrleitung, an einem Flansch oder anderen Teilen vorliegen kann und im schlimmsten Fall ein explosionsfähiges Gasgemisch entstehen kann. Sinkt die Sauerstoffkonzentration unter einen Minimalwert an oder steigt die H<sub>2</sub>S-Konzentration auf über einen dritten Grenzwert an, wird der Lüfter wieder eingeschaltet.

Alle Grenzwerte sind anlagenbezogen und werden nach eingehender Analyse der Situation festgelegt.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1. Detaillierte Ergebnisse an der Versuchsanlage

Durch den Einsatz der Software zur optimierten Substrateinbringung konnten die BHKW-Volllaststunden von 92 auf über 98% gesteigert werden. Die Auslastung der BHKW's wurde seit Inbetriebnahme der Biogasanlage aufgezeichnet und ist in folgendem Diagramm dargestellt:

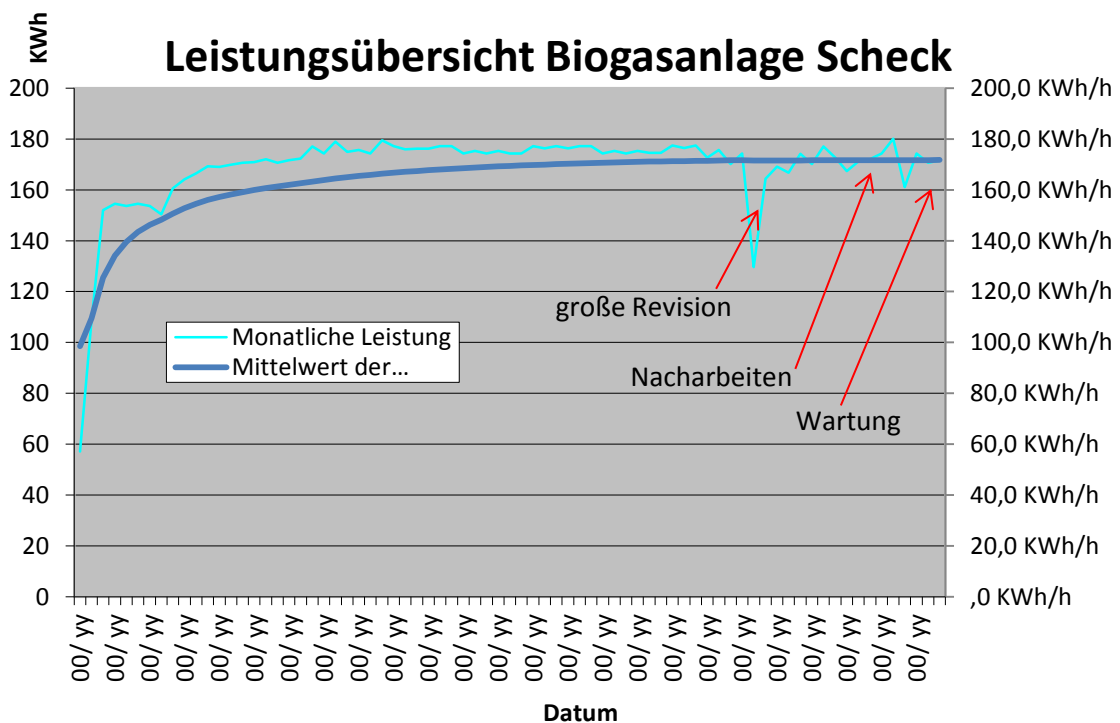


Abbildung 5: Überblick der BHKW-Auslastung der Versuchsanlage

Bedingt durch die verbesserte Prozessüberwachung konnten auch günstigere Rohstoffe eingesetzt werden. Die Grasmenge und der Festmistanteil konnten deutlich erhöht werden im Vergleich zu konventionellen Anlagen.

Die Biogasausbeute pro eingesetzte Rohstoffmenge konnte deutlich verbessert werden. Trotz identischer Leistungsabgabe konnte die eingesetzte Substratmenge um 1,5 t je Tag (10%) reduziert werden. Die produzierte Biogasmenge konnte so gesteuert werden, dass im normalen betrieb die Fackel nie läuft, es jedoch auch keinen Ausfall des BHKW's gab, weil der Gasspeicher leer war. Vor geplanten Revisionen wurde die Fütterung bzw. der Füllstand des Gasspeichers so angepasst, dass die Fackeln kaum überschüssiges Gas verbrennen mussten. Somit wurde zusätzlich Substrat eingespart und die Umweltbelastung reduziert.

Durch die Optimierung der Rührzyklen in den einzelnen Fermentern konnte der eigenstromverbrauch parallel reduziert werden.

Durch den Einsatz der Software zur biologischen Entschwefelung wurde die H<sub>2</sub>S-Konzentration auf dem niedrigst möglichen Stand mit dem verfügbaren Lüfter gehalten, Motoröl geschont, Austauschzyklen reduziert und Materialschäden am BHKW somit soweit möglich vermieden.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Projektes wurden für eine Einzelbiogasanlage im Maßstab 1:1 eine Software zur verbesserten Fütterung und eine Software zur Verringerung der H<sub>2</sub>S-Konzentration entwickelt und getestet. Dabei wurden zwei Sätze (Sets) von logischen Wenn-Dann-Regeln entwickelt und miteinander verknüpft. Die Schaltparameter wurden anlagenspezifisch ermittelt.

Weitere notwendige Arbeiten sind nun die Verallgemeinerung der Zusammenhänge, d.h. aus den anlagenspezifischen Kennzahlen müssen allgemeine Zusammenhänge und Kennzahlen geschaffen werden. Außerdem muss noch festgelegt werden, welche INPUT-Parameter der Kunde selbst vorgeben und ändern kann und welche nur durch den Fachmann eingestellt und geändert werden dürfen.

Für größere und komplexere Anlagen mit mehreren Fermentern bzw. für Fermenter mit integriertem Gasspeicher (flexible Membrane - Foliendächer) erfordern eine Erweiterung der Software.

Das Softwaremodul zur biologischen Schwefelentfernung ist auch auf mehrere Fermenter und für frequenzgerelte Lüfter zu erweitern.

## Referenzen

<http://www.nachwachsenderohstoffe.de>

Bericht für die Arbeitsgruppe III des „Biogas Forum Bayern“ Nr. III-3/2010 unter <http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen>

VDI/ DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 3 (2010): Emissionsminderung II, VDI 3475: Biogasanlagen in der Landwirtschaft. Vergärung von Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger, Blatt 4

<http://www.biomasse-nutzung.de>

<http://www.h-2-s.de>

Polster A.; Brummack J. ( ): Preiswerte Biogasentschwefelung an Sekundärrohstoffen; Projektinformation TU Dresden, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik

Jäkel, K.: Der Schwefel muss raus 2/2007, dlz agrarmagazin gefunden unter <http://www.biogas-infoboard.de>

DIN1343:1990-01: Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen; Begriffe und Werte