

Verfahrenstechnische Biogasanlagenoptimierung am Beispiel einer Co-Vergärung

E. Voß

VE efficiency solutions GmbH, Landesbergen, Deutschland

D. Weichgrebe & K.-H. Rosenwinkel

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, ISAH–Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Hannover, Deutschland

KURZFASSUNG: Co-Vergärungsanlagen vergären Reststoffe aus Industrie, Gewerbe und kommunalen Haushalten mit dem Ziel der Minimierung der organischen Anteile und der Gewinnung von Biogas. Bedingt durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU 2000), (BMU 2004) in Deutschland sind eine Vielzahl von Biogasanlagen diesen Typs entstanden und somit auch ein Ansteigen der Konkurrenz um die „besten“ Inputstoffe zu verzeichnen; mit der Folge eines Preisverfalls der Entsorgungskosten, bis hin zu Inputstoffankäufen. Dieser Trend führt dazu, dass nur noch die Co-Vergärungsanlagen Geld verdienen und sich am Markt behaupten können, die ihre Anaerobiologie optimal und stabil fahren und ihre Technik im Griff haben. Wie Untersuchungen zeigen, gibt es hier allerdings noch großen Nachholbedarf, sowohl in prozess- als auch betriebs-technischer Hinsicht. Die Übertragung des Fachwissens aus der Anaerobtechnologie der Abwasser- und Faulschlammbehandlung hält vermehrt Einzug in die noch junge Branche der Biogastechnologie. In dem folgenden Artikel wird auf einige Punkte dazu eingegangen.

1 EINLEITUNG

In Deutschland wurden im Jahre 2006 insgesamt etwa 70,5 TWh Strom aus erneuerbaren Energien gewonnen. Der Anteil von Biogas daran betrug ca. 6 %. Neben den Anlagen, die ausschließlich mit nachwachsenden Rohstoffen oder mit lediglich einem industriellen Reststoff als Monosubstrat beschickt werden, werden auch Co-Vergärungsanlagen betrieben. Hier können unterschiedliche Substrate aus Industrie, Gewerbe und kommunalen Haushalten zur Energiegewinnung eingesetzt werden. Die Vergütung des eingespeisten Stroms aus der Umwandlung des erzeugten Biogases regelt in Deutschland das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) (BMU 2000), (BMU 2004). In der Förderung wird klar unterschieden zwischen Biogasanlagen, die mit nachwachsenden Rohstoffen arbeiten, sog. NAWARO-Anlagen und solchen, die mit industriellen Reststoffen betrieben werden. Die Vergütungssätze für die NAWARO-Anlagen liegen dabei deutlich höher.

Um mit dem Betrieb der Co-Vergärungsanlagen Gewinne erzielen zu können, erfordert gesteigerter Wettbewerbsdruck bei der Beschaffung der Substrate und damit verbundener Erlöseinbruch eine optimale und stabile Fahrweise.

Ausgangspunkt der hier vorgestellten Untersuchung war die rückläufige Stromproduktion einer etablierten Co-Vergärungsanlage von 30.000 kWh/d im Januar auf etwa 15.000 kWh/d im folgenden Monat Juli (siehe Abb. 1). Ziel der Untersuchung war die verfahrenstechnische Optimierung der Anlage, wobei zunächst die Ursache für die rückläufige Stromproduktion ermittelt werden sollte und anschließend Wege für einen effizienteren und stabileren Betrieb aufzuzeigen waren. Dazu wurde der Einfluss wesentlicher Prozessparameter einzelner Inhaltsstoffe in den verschiedenen Inputmaterialien sowie deren Auswirkungen auf den anaeroben Abbau und damit auf die Stromproduktion untersucht. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse lassen sich generelle Lösungs- und Optimierungsansätze für einen stabilen und energieeffizienten Biogasanlagenbetrieb ableiten.

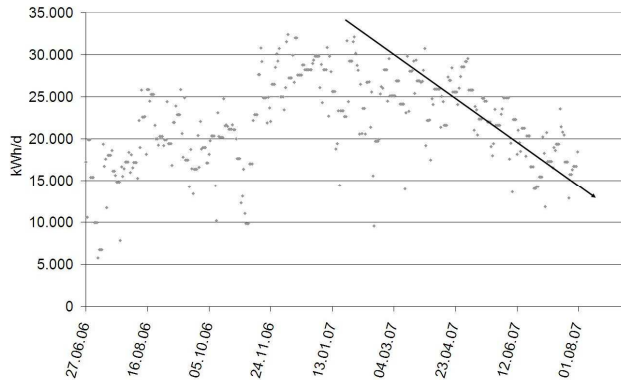


Abb. 1: Tageswerte der Stromproduktion der untersuchten Co-Vergärungsanlage

2 ANLAGENBESCHREIBUNG

Die hier untersuchte Co-Vergärungsanlage besteht aus drei Fermentern mit insgesamt 5.500 m³, einem Nachgärbehälter mit 1.250 m³ sowie einem Endlager mit 5.000 m³. Die Fermenter werden mesophil als Nassvergärungsanlage betrieben.

Der Anlage sind vier Vorlagebehälter unterschiedlicher Größe zur Zwischenlagerung der flüssigen Inputstoffe oder zur Anmischung der festen Inputstoffe vorgeschaltet. Die vergorenen Stoffe werden über eine Hygienisierung gefahren und dem Endlager zugeführt. Das vergorene und hygienisierte Gärsubstrat wird anschließend landwirtschaftlich verwertet. Das in den Fermentern und dem Nachgärbehälter anfallende Biogas wird grob gereinigt, entwässert und in drei Gasmotoren mit einer gesamten elektrischen Leistung von ca. 1,5 MW verstromt. Der erzeugte Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist; die anfallende Wärme wird einem Nahwärmenetz zugeführt und zum Teil für Gebäudebeheizung und Trocknungsanlagen genutzt. Überschüssige Wärme wird über sog. „Tischkühler“ an die Umgebungsluft abgegeben. (Voß, E. 2007)

3 ANLAGENFAHRWEISE UND ANLAGEDATEN

Der Betrieb einer Co-Vergärungsanlage kann erfolgen mit dem Ziel:

- Den größten Teil der Einnahmen aus den Entsorgungserlösen zu erzielen,
- den größten Teil der Einnahmen aus der Stromproduktion zu erzielen,
- aus einer Mischung aus beiden Möglichkeiten.

Wird der Erlös der Anlage hauptsächlich aus den Entsorgungserlösen erzielt, so spielt die Stromproduktion und damit auch die max. Biogasproduktion eine untergeordnete Rolle. Hier werden dann auch Inputstoffe angenommen, die nur einen geringen Energieinhalt haben, oder Stoffe enthalten, die einen hemmenden Einfluss auf die Biologie haben können.

Ist der Haupteinlös der Anlage durch die Einnahme aus der Stromproduktion gegeben, so sind die max. Biogasproduktion und die optimale Verwertung in den Gasmotoren zwingend. Hier ist das Wissen um die Inhaltsstoffe des Inputmaterials und die daraus erzielbaren Biogaserträge existentiell.

Die hier untersuchte Co-Vergärungsanlage erzielt ihren größten Erlösanteil aus der Stromproduktion und ist somit gezwungen, die max. Biogasproduktion zu gewährleisten. Die Praxis zeigte, dass neben der Gülle eine Vielzahl von Inputstoffen zum Teil unregelmäßig eingesetzt wurden, über die es aber nur unzureichende Informationen bezüglich einzelner Inhaltsstoffe und dem möglichen Gasertrag gab. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung wurden entsprechende Futterwertanalysen zur Bestimmung der prozentualen Anteile von Wasser, Rohasche, Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und NfE (stickstofffreie Extraktstoffe) in Auftrag gegeben, um die wesentlichen Inhaltsstoffe zu ermitteln. Aus diesen Angaben lassen sich die theoretischen Biogaserträge und Methananteile errechnen.

Der pH-Wert in den Fermentern liegt mit pH 7,9–8,4 sehr hoch, was in der hohen Pufferkapazität des Gärsubstrates und teilweise auch durch hohe Ammoniumgehalte (NH₄) begründet ist. Hieraus ergeben sich allerdings auch einige Betriebsstörungen, auf die später noch eingegangen wird.

Die Anlage wird mit einer Raumbelastung von ca. 4,2 kg CSB/m³d gefahren. Die CSB-Konzentration in den Fermentern bewegt sich in einem Fenster von 63.000–100.000 mg/l. Die Gesamtkonzentration an organischen Säuren in den Fermentern schwankt zwischen 2.000 und 8.000 mg/l. Es wurden NH₄-N Konzentrationen von 3.800–6.800 mg/l gemessen. Bei einer Verweilzeit von ca. 40 Tagen werden in den Fermentern etwa 18.500 kg CSB/d eliminiert und in ca. 10.500 m³/d Biogas umgewandelt. Der spezifische Energieinhalt des produzierten Biogases auf der Anlage beträgt ca. 6,0 kWh/m³ Biogas.

4 SUBSTRATZUSAMMENSETZUNG

In Tab. 1 sind die analysierten prozentualen Bestandteile der maßgeblichen Inputmaterialien aufgeführt. Man erkennt die unterschiedliche Zusammensetzung der einzelnen Substrate. Die untersuchte Anlage wird mit ca. 15–25 % Gülle als Grundsubstrat gefahren. Über die Aufschlüsselung der Inputmaterialien in die Hauptbestandteile Wasser, Kohlenhydrat, Eiweiß und Fett lassen sich die Mengen an Kohlenstoff, Schwefel und Stickstoff ermitteln, die der Anlage zugeführt werden. Über den Wassergehalt der Inputstoffe lässt sich der Trockensubstanzgehalt (TS) im Fermenter steuern; über den Anteil an Eiweiß lässt sich die Menge an Stickstoff errechnen, die dem Fermenter zugeführt wird. Der Stickstoffgehalt, genauer die Konzentration an gelöstem Ammoniak (NH₃) im Fermenter, spielt für die Aktivität der Anaerobiologie eine wichtige Rolle. Nach entsprechender Umrechnung dienen diese ersten Analysenwerte als erste wichtige Anhaltspunkte, um die richtige Mischung für den Input der Anlage festzulegen.

Tab. 1: Auszug aus der Liste der Inputstoffe (Anteile in % der Originalsubstanz)

Inputmaterial	Wasseranteil	Rohasche	Rohprotein (N x 6,25)	Rohfett	Rohfaser	NfE
Hundefutter (Produktionsfehl- chargen)	24,50	5,50	19,50	8,40	2,30	39,80
Gelantineproduktion (Reststoffe)	86,60	0,30	6,40	5,50	< 0,40	n.n.
Schweinegülle	93,00	0,98	1,26	0,49	1,12	3,15
Rindergülle	93,00	1,40	1,05	0,21	1,47	2,87
Rückstände aus der Rapsölverarbeitung	59,30	6,20	0,70	32,80	0,40	1,00
Lebensmittelreste (flüssig)	91,60	3,10	2,40	2,70	0,00	0,20

Die Futterwertanalyse ermöglicht zudem eine Berechnung der theoretischen Biogaserträge. Diese Aussage ist für den praktischen Betrieb allerdings nur als eine erste Indikation zu sehen. Werden Substrate über längere Zeit in größeren Mengen eingesetzt, so empfiehlt es sich einen Abbauersuch im Labor durchzuführen bzw. durchführen zu lassen.

5 ORGANISCHE SÄUREN

Um einen Überblick über die Zusammensetzung der sich bildenden organischen Säuren im Fermenter zu bekommen, wird auf der untersuchten Co-Vergärungsanlage in unregelmäßigen Abständen die Zusammensetzung der organischen Säuren ionenchromatographisch bestimmt. Abb. 2 zeigt über einen Zeitraum von 31 Wochen die im Fermenter 1 gemessenen organischen Säuren und den pH-Wert. Aus dieser Untersuchung lassen sich einerseits die Verhältnisse der einzelnen Säuren zueinander ablesen und andererseits lässt sich die Gesamtsäurekonzentration bestimmen. Über die hemmende Wirkung auf den Abbauprozess gibt es sowohl bei der Ge-

samsäurekonzentration, wie auch bei der Zusammensetzung der einzelnen Säuren unterschiedliche Aussagen (KTBL/FNR 2007), (Helm 2006), (Neumann & Baumann 2007). Ein angestrebtes Verhältnis von Essigsäure zu Propionsäure von 2:1 wird auf der untersuchten Anlage häufig nicht erreicht.

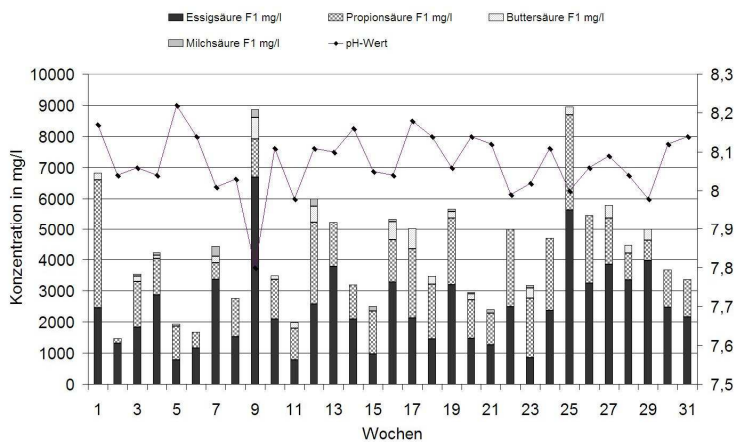


Abb. 2: Konzentration gemessener organischer Säuren und des pH-Werts im Fermenter 1

Mit Gesamtsäurekonzentrationen von über 8.000 mg/l ergeben sich Werte, die eine hemmende Wirkung auf die Anaerobiologie haben (KTBL/FNR 2007). Hier kommt allerdings die große Pufferkapazität, die sich sowohl aus den Carbonaten als auch aus dem NH_3/NH_4 Puffersystem ergibt, dem System zugute und bewahrt die Biologie vor einem zu starken Leistungseinbruch. Um die Säureverhältnisse untereinander und damit den biologischen Abbauprozess besser beobachten zu können, wird zukünftig täglich ein Ionenchromatogramm erstellt.

6 STICKSTOFF

Energiereiches Inputmaterial, welches auch noch einen hohen TS-Gehalt hat, gibt es auf der untersuchten Anlage reichlich, sowohl in Form von Fehlchargen aus der Hundefutterproduktion als auch von Mehlstäuben. Wie Abb. 3 zeigt, haben diese Substrate jedoch den großen Nachteil des hohen Eiweißgehaltes. Über Monate wurden diesen Substraten große Mengen Stickstoff zugeführt, die zu einer schleichenden, kontinuierlichen Hemmung der Biologie und damit zu verminderter Biogasproduktion und Stromproduktion (Abb. 1, Abb. 3) geführt haben. Die hohen Konzentrationen an NH_4 von bis zu 6.000 mg/l bewirken bei gleichzeitig hohen pH-Werten von über pH 8,0 eine für die Biologie stark hemmend wirkende NH_3 -Konzentration. Hemmende Stoffe und deren Einfluss auf den Anaerobprozess sind ausführlich in „Anaerobtechnik“ (Bischoffsberger, et al 2005) beschrieben.

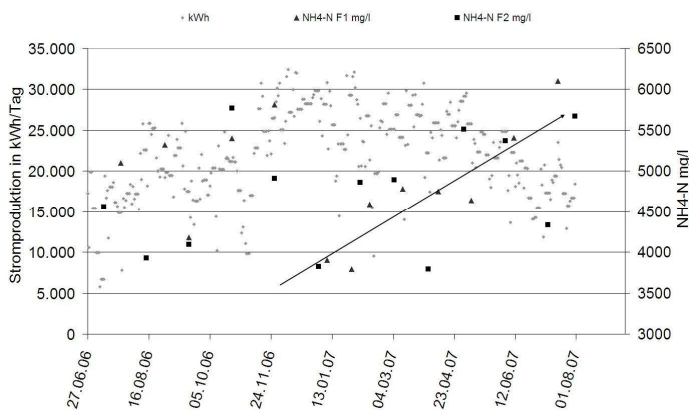


Abb. 3: Verlauf der Stromproduktion und der $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration

Die schnelle Umrechnung auf den Anlagen von NH_4 zu NH_3 kann über folgende Umrechnungsformel erfolgen:

$$[\text{NH}_3] = \frac{[\text{NH}_4]_{\text{Ges}}}{1 + 10^{pKA - pH}} \quad (1)$$

$$pKA = 0,0925 + \frac{2.728,795}{t + 273,15} \quad (\text{mit } t \text{ in } ^\circ\text{C}) \quad (2)$$

Da die Temperatur relativ konstant ist, hat der pH-Wert einen großen Einfluss auf die NH_3 -Konzentration. Als Grenzwert für die NH_4 -Konzentration wird 3.000 mg/l genannt, es wird allerdings darauf hingewiesen, dass nach Adaptionsprozessen auch Werte von 5.000 mg/l toleriert werden (Wellinger 1991), (Rosenwinkel et al. 2006).

Abb. 4 zeigt deutlich den Einfluss der Minderung des Stickstoffeintrages. Nach der Veränderung des Inputs ab Ende August, weg von den eiweißhaltigen Substraten, konnte die Stickstoffkonzentration wieder unter 4.500 mg/l gesenkt werden. Die Biogasproduktion und damit auch die Stromproduktion wurden innerhalb eines Monats wieder auf den ursprünglichen Wert von 30.000 kWh/d gesteigert und damit entsprechend auch der Erlös aus dem Stromverkauf.

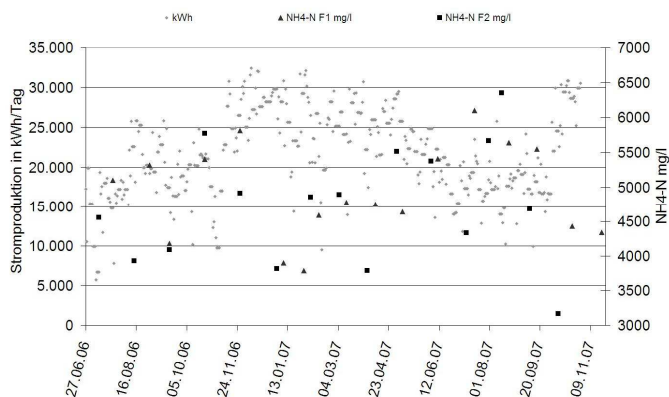


Abb. 4: Stromproduktion nach der Reduzierung der Substrate mit hohen Stickstoffkonzentrationen

7 OPTIMIERUNGSANSÄTZE

Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten den auftretenden Problemen entgegen zu wirken. Durch eine gezielte Untersuchung der Inputmaterialien lassen sich schon im Vorfeld viele Parameter bestimmen. Der TS-Gehalt, die organische Belastung und auch die Gehalte an Stickstoff und Schwefel können bestimmt und die Konzentrationen im Fermenter durch gezielte Fütterung beeinflusst werden. Die Zusammensetzung des Inputstoffs im Hinblick auf Eiweiß, Kohlenhydrat und Fett lässt eine erste Schlussfolgerung über die Abbaugeschwindigkeit und den Abbauweg zu. Hier kann die Zusammensetzung der einzelnen sich bildenden organischen Säuren beeinflusst werden.

Eine entsprechende Fütterungssteuerung, die diese Randbedingungen berücksichtigt optimiert diesen Schritt. Ebenso ist für jeden Inputstoff eine spezifische Berechnung von Kosten und Nutzen zu hinterlegen, die dann bei wechselnden Kosten- oder Erlössituationen in der Beschaffung angepasst werden kann. Neue Stoffe sind vor dem Einsatz in der Anlage zu analysieren und sowohl prozesstechnisch als auch betriebswirtschaftlich zu bewerten. Die technische Ausrüstung auf der Anlage muss eine hohe Verfügbarkeit sicherstellen. Die hier untersuchte Anlage braucht ca. 7.900 Vollastbenutzungsstunden um in den wirtschaftlichen Betrieb zu fahren. Dies ist nur zu schaffen, wenn entsprechende Wartungspläne für die tägliche, wöchentliche und monatliche Wartung vorliegen und auch befolgt werden. Um sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile zu erzielen, sollte auch über die gasdichte Abdeckung des Endlagers (Gärrestlager) mit entsprechender Gasnutzung nachgedacht werden. Das Restgaspotential kann

ca. 3–5 % der Gasausbeute aus dem Biogasprozess ausmachen, bei schlechter Substratnutzung auch mehr (KTBL 2007).

Aus der Untersuchung der hier dargestellten Co-Vergärungsanlage zeigt sich, dass folgende Bereiche der Biogasanlagen im Hinblick auf eine Optimierung bzw. optimierten Betriebes untersucht werden sollten:

- Inputmaterial (Zusammensetzung, Futterwerte, Hemmstoffe),
- Fütterung (Raumbelastung, Stickstoff, TS-Gehalt, hydraulische Belastung, Fütterungsintervalle),
- Fermenter (Rührtechnik, Entschwefelung),
- Analytik (pH, NH₄-N, NH₃, FOS/TAC, organische Säuren, CSB, Hemmstoffe, Spurenelemente, CH₄, CO₂, H₂S),
- Datenanalyse und Bilden von Key Performance Indicators (KPI),
- Gärsubstratlager (Analyse entspricht Düngemittelverordnung),
- Gasverwertung (Wirkungsgrad, Direkteinspeisung).

8 SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Das Wissen, das aus der jahrzehntelangen Erfahrung in der Anaerobtechnik (Bischofsberger et al. 2005) vorhanden ist, muss in die noch junge Branche der Biogastechnologie überführt werden. Aufgrund der Förderung der Biogastechnologie in Deutschland durch den Gesetzgeber, sind in den letzten Jahren ca. 3.500 neue Anlagen gebaut worden und mit dem überarbeiteten EEG geht der Bau neuer Anlagen weiter. Es zeigt sich, dass verfahrenstechnische und technische Optimierungen möglich und nötig sind, um ressourcenschonend Energie aus nachwachsenden Rohstoffen und industriellen Reststoffen zu gewinnen. Das Beispiel der hier untersuchten Co-Vergärungsanlage zeigt, dass der erhöhte analytische Aufwand dennoch einen wirtschaftlichen Nutzen bringt und sich schnell amortisiert. Zwischen der optimalen Fahrweise und der eingeschränkten Fahrweise dieser dargestellten Co-Vergärungsanlage, wie sie zu Beginn der Untersuchungen vorlag, liegt ein Erlösunterschied im Stromertrag von ca. 500.000 €/a. Für einen solchen Betrag lohnt es sich, ein erweitertes Analysenprogramm und begleitende Untersuchungen zu machen oder aufrecht zu erhalten.

Die Möglichkeiten der Optimierung sind noch viel weitgehender als hier kurz dargestellt. Eine wissenschaftliche Begleitung solcher Anlagen ist sinnvoll, da die Probleme zum Teil sehr anlagen- und substratspezifisch sind.

LITERATUR

- Bischofsberger, W., Dichtl, N., Rosenwinkel, K.-H., Seyfried, C. F. & Böhnke, B. (2005) *Anaerobtechnik*. 2. Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2000) *Erneuerbare-Energien-Gesetz*. juris GmbH.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2004) *Erneuerbare-Energien-Gesetz*. juris GmbH.
- Helm, M. (2006) *Biogasanlagen*. Stuttgart, Karlsruhe, Eugen Ulmer KG.
- KTBL/FNR (2007) *Faustzahlen Biogas*. Lokay, Reinheim
- Rosenwinkel, K.-H., Weichgrebe, D., Urban, I., Hinken, L. & Yuceer, S. (2006) *Anaerobic Technologies for Treatment and Energy Production from Industrial and Agricultural Resources – The State of the Art*, The 7th Int. Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, Amsterdam RAI, The Netherlands, Sep. 25–27.
- Neumann, H. & Baumann, T. (2007) Hilfe mein Fermenter streikt!. In: *top agrar*, 9/2007, S. 100–102.
- Voß, E. (2007) *Untersuchungen an zwei großtechnischen Biogasanlagen im Hinblick auf verfahrenstechnische Optimierung*, Wasserwirtschaftliches Kolloquium des ISAH, Leibniz Universität Hannover.
- Wellinger, A. (1991) *Biogas-Handbuch, Grundlagen- Planung- Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen*. Aarau: Verlag Wirtz AG.