

Mathias Effenberger, Rainer Kissel, Andreas Lehner und Andreas Gronauer, Freising

Verfahrenstechnische Bewertung landwirtschaftlicher Biogasanlagen

Auslastung und energetische Effizienz

Es wurden verfahrenstechnische Kennzahlen sechs neuerer Biogasanlagen (BGA) ermittelt und deren Auslastung und energetische Effizienz analysiert. In allen BGA kamen nachwachsende Rohstoffe in Kombination mit Gülle oder Mist zum Einsatz. Bei einer spezifischen elektrischen Nennleistung zwischen 0,09 und 0,25 kW pro m³ Gärraum (Nutzvolumen) erzielten die BGA Ausnutzungsgrade zwischen 88 und 98%. Die Kombination dieser beiden Kennzahlen kann als erster Anhaltspunkt für eine Beurteilung der Prozessstabilität und Funktionalität einer BGA herangezogen werden. Der Anteil der externen Nutzung betrug 0 bis etwa 46% der anfallenden Wärme.

Dr.-Ing. Mathias Effenberger, Dipl.-Ing. (FH) Rainer Kissel und Dipl.-Ing. agr. Andreas Lehner sind wissenschaftliche Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Biogastechnologie und Reststoffmanagement (Leitung: Dr. agr. Andreas Gronauer) am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayer. Landesanstalt für Landwirtschaft, Vöttinger Str. 36, 85354 Freising; e-mail: mathias.effenberger@LfL.bayern.de. Die Arbeiten wurden vom Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten sowie von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. finanziell gefördert.

Schlüsselwörter

Biogas, Effizienz, Anlagentechnik, nachwachsende Rohstoffe, Wirtschaftsdünger

Keywords

Biogas, efficiency, technology, renewable primary products, animal manure

Literatur

Literaturhinweise finden sich unter LT 08524 über Internet www.landtechnik-net.de/literatur.htm.

Der Markt für Biogasanlagen (BGA) in der Landwirtschaft hat sich in den vergangenen Jahren sehr dynamisch entwickelt. Auslöser hierfür war die Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahr 2004, mit der die Einspeisevergütung für Strom aus Biogas, das aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt wird, deutlich erhöht wurde. In den Folgejahren 2005 und 2006 wurden in Deutschland 1450 neue Biogasanlagen zur Biogaserzeugung hauptsächlich aus Energiepflanzen errichtet. Dies entspricht einem Zuwachs von 71 % im Vergleich zu Ende 2004. Im Jahr 2007 kam der Boom im Anlagenbau auf Grund rasant gestiegener Agrar-Rohstoffpreise zum Erliegen. Die zweite Novelle des EEG in diesem Jahr wird aller Voraussicht nach das Wachstum des Biogasmarktes erneut beleben, wobei die Vergärung von Gülle und Mist wieder eine größere Bedeutung erlangen wird.

Stand in der Vergangenheit in erster Linie die eingespeiste Strommenge im Mittelpunkt, so muss für einen wirtschaftlichen und umweltverträglichen Anlagenbetrieb stets der gesamte Nutzungsgrad der im Biogas enthaltenen Energie maximiert werden. Auf Basis umfangreicher Datenerhebungen werden in diesem Beitrag verfahrenstechnische Kennzahlen ausgewählter neuerer Biogasanlagen vorgestellt und es wird die Effizienz der Biogasproduktion und -verwertung in diesen Anlagen analysiert. Hiermit sollen Anlagenbetreiber und potenzielle Investoren für die Thematik sensibilisiert werden.

Anlagenbeschreibung und Methodik

Für die vorliegende Arbeit wurden sechs Biogasanlagen ausgewählt, die in den Jahren 2002 bis 2006 in Betrieb gingen. In allen Anlagen kommen nachwachsende Rohstoffe in Kombination mit Gülle oder Mist zum Einsatz (Tab. 1).

In allen untersuchten BGA wird der Gärprozess im oberen mesophilen Bereich betrieben. Das Biogas wird in Blockheizkraftwerken mit Hubkolbenmotoren verwertet. Anlagen A, D und F verfügen über stehende zylindrische Gärbehälter als erste Prozessstufe, Anlagen B, C und E über liegende quaderförmige Reaktoren. Soweit vorhanden ist die zweite Prozessstufe überall als stehender zylindrischer Gärbehälter ausgeführt. Bezüglich der spezifischen installierten elektrischen Leistung ergibt sich eine Bandbreite zwischen 0,09 und 0,25 kW pro m³ Gärraum (Nutzvolumen).

Um die Betriebsergebnisse von BGA unterschiedlicher Größe und Konzeption korrekt bewerten und miteinander vergleichen zu können, ist ein einheitliches Datenmodell und die Festlegung geeigneter Kennzahlen erforderlich [1]. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die erhobenen Messdaten zur Ermittlung relevanter Kenngrößen. Diese stellen nur einen Teil der auf den BGA erhobenen Daten dar. Der dieser Analyse zu Grunde liegende Beobachtungszeitraum erstreckte sich je nach Anlage über 215 bis 455 Tage. Alle abgeleiteten Kennwerte wurden

Tab. 1: Stammdaten der untersuchten Biogasanlagen

Table 1: Characteristics of the investigated biogas plants

Anlagen ID		A	B	C	D	E	F
Jahr der Inbetriebnahme		2005	2005	2002	2004	2006	2004
Anzahl Prozessstufen		2	2	2	2	1	2
Gesamt-Nutzvolumen*	m ³	3600	2800	3200	3800	2100	2100
Gesamt-Lagervolumen	m ³	1200	2400	4800	1500	3000	2300
Mittlere Prozesstemperatur							
Fermenter	°C	43	42	41	42	42	43
BHKW Motortyp		G	G	G	ZS	G	ZS
Elektrische Nennleistung	kW	329	347	526	580	526	250
Spez. elektr. Nennleistung	kW•m ⁻³	0,09	0,12	0,16	0,15	0,25	0,12
Thermische Nennleistung	kW	447	432	633	600	567	230

*) Summe der Nutzvolumina aller Prozessstufen (ohne Gärrestlager); ZS: Zündstrahl-Motor; G: Gas-Otto-Motor

Tab. 2: Beschreibung der relevanten Messgrößen Table 2: Description of measuring parameters

Messgröße	Einheit	Messintervall	Messvorrichtung
Masse der Einsatzstoffe	t	Tag	Wägezellen; dynamisches Wägesystem
Volumen der Einsatzstoffe	m ³	Tag	magnetisch-induktiver Durchflussmesser; Pumpenlaufzeit
Trockenrückstand der Einsatzstoffe	%	Monat	Waage, Trockenschrank
Glührückstand der Einsatzstoffe	%	Monat	Waage, Muffelofen
Biogas-Volumenstrom	m ³ •h ⁻¹	kontinuierlich	strömungsmechanischer Durchflussmesser
Biogastemperatur	°C	kontinuierlich	PT100
Biogasdruck	hPa	kontinuierlich	Druckmessumformer
Biogas-Massestrom	kg•h ⁻¹	kontinuierlich	thermischer Massestrommesser
Biogas-Methanengehalt	Vol.-%	1-2 Stunden	IR-Sensor
Biogas-Kohlendioxidgehalt	Vol.-%	1-2 Stunden	IR-Sensor
Biogas-Sauerstoffgehalt	Vol.-%	1-2 Stunden	elektrochemischer Sensor
Brutto-Strom BHKW	kWh	kontinuierlich	Stromzähler Generatorklemmen
Brutto-Wärme BHKW	kWh	kontinuierlich	Wärmemengenzähler
Strombedarf BGA	kWh	kontinuierlich	Stromzähler Gesamtanlage oder Stromaufnahme Einzelaggregate
Wärmeabsatz	kWh	kontinuierlich	Wärmemengenzähler

als Durchschnittswert über diesen Beobachtungszeitraum errechnet.

Zur vergleichenden Einordnung wurden die ermittelten Biogas- und Methanerträge mit projizierten Werten auf Basis der Richtwerte des KTBL verglichen (Tab. 3). Der „Netto-Nutzungsgrad Biogasenergie“ bezeichnet den Anteil der für Fremdnutzer bereit gestellten elektrischen und thermischen Energie am Brennwert des gemessenen Methanertrags.

Ergebnisse und Diskussion

NebenMaissilage, welche nach wie vor das mengenmäßig überwiegende Substrat in landwirtschaftlichen Biogasanlagen darstellt, kommen als nachwachsende Rohstoffe Getreide-Ganzpflanzensilage (GPS), Grassilage sowie Körnerschrot zur Vergärung. Diejenigen drei Anlagen, die Trockenkot verwerten, erreichen naturgemäß im Mittel einen deutlich höheren Trockensubstanzgehalt im Mix der Einsatzstoffe als die Anlagen mit Güllezufuhr. Diese drei Anlagen verfügen über liegende Reaktoren in der ersten Prozessstufe, da sich mit diesem Reaktortyp dieses trockene und heterogene Material relativ funktionssicher vergären lässt. Anlage E mit der höchsten mittleren Raumbelastung ist die einzige einstufige Anlage (Tab. 3).

Mit Ausnahme von Anlage A liegen die ermittelten Biogas- und Methanerausbeuten über den Erwartungswerten. Im Falle von Anlage B (und eventuell E) erreicht die Abweichung unrealistisch hohe Werte, was auf eine fehlerbehaftete Biogasmengenmessung sowie die hohe Variabilität der Zusammensetzung des Hähnchenmistes zurückgeführt werden kann. Insgesamt erscheinen die verwendeten Richtwerte angesichts der Messergebnisse als eher konservativ.

Werden höhere Massenanteile an Gülle

eingesetzt, so bleibt die Biogausausbeute deutlich unter 200 Nm³ pro t Frischmasse. Während die auf die Frischmasse bezogenen Biogas- und Methanerausbeuten der ausgewählten Anlagen gut vergleichbar sind, erscheinen die Werte der Biogas- oder Methanerausbeute aus der organischen Trockensubstanz für die Anlage F und insbesondere E sehr hoch. Für Anlage E lässt sich eine Überschätzung des Biogasertrags vermuten, da hier der elektrische Nutzungsgrad zu niedrig erscheint. Potenzielle Fehler der Bio-

Tab. 3: Kennzahlen für die Biogasproduktion

Table 3: Characteristic values of biogas production

Anlagen ID		A	B	C	D	E	F
Auswertungszeitraum	d	215	385	455	365	378	406
Einsatzstoffe (Massenanteile)		R-Gülle (30 %) MS (42 %) GS (16 %) GPS (10 %) sonstige (2 %)	H-Mist (16 %) MS (49 %) Wasser (35 %)	H-Mist (20 %) MS (55 %) GPS (11 %) Schrot (13 %) sonstige (1 %)	R-Gülle/ S-Gülle (47 %) MS (44 %) GS (1 %) GPS (3 %) Schrot (4 %)	P-Mist (5 %) MS (83 %) GPS (6 %) LKS (3 %) Schrot (2 %)	R-Gülle (26 %) MS (64 %) GS (1 %) GPS (9 %)
Gesamtmasse der Einsatzstoffe (ohne Wasser)	t	6.403	6.614	12.444	17.937	10.238	6.141
Durchschnittlicher TS-Gehalt der Einsatzstoffe	%	21	40	41	19	31	21
Ges.Raumbelast.	kg oTS•(m ³ •d) ⁻¹	2,1	2,4	3,0	2,7	4,0	1,6
Projektion Biogasertrag*	Nm ³	908.706	1.218.910	2.144.376	2.297.018	2.036.885	902.401
Gemessener Biogasertrag	Nm ³	865.933	1.751.726	2.446.904	2.457.369	2.416.193	964.163
Abweichung	%	-4,7	43,7	14,1	7,0	18,6	6,8
Projektion Methanertrag*	Nm ³	478.054	631.132	1.122.005	1.204.906	1.060.644	470.671
Gemessener Methanertrag	Nm ³	454.500	915.909	1.226.226	1.253.796	1.249.049	521.999
Abweichung	%	-4,9	45,1	9,3	4,1	17,8	10,9
Biogausausbeute	Nm ³ •t ⁻¹	135	265	197	137	236	157
	Nl•kg oTS ⁻¹	624	664	464	716	780	753
Methanerausbeute	Nm ³ •t ⁻¹	71	138	99	69,9	122	85
	Nl•kg oTS ⁻¹	328	347	232	366	405	408
Methanproduktivität	Nm ³ •(m ³ •d) ⁻¹	0,70	0,85	0,69	0,90	1,57	0,60
Stromausbeute	kWh•t ⁻¹	448	443	339	280	441	317

*) basierend auf Richtwerten gemäß [2]; R-Gülle: Rindergülle; S-Gülle: Schweinegülle; H-Mist: Hähnchenmist; P-Mist: Putenmist; MS: Maissilage; LKS: Lieschkolbensilage; GS: Grassilage; GPS: Getreide-Ganzpflanzensilage

gasmengenmessung lassen sich umgehen, wenn man den Stromertrag auf Basis der zugeführten Frischmasse berechnet (Tab. 4).

Der elektrische Nutzungsgrad entspricht definitionsgemäß dem elektrischen Wirkungsgrad, wird hier aber nicht als solcher bezeichnet, da dieser Wert über solch lange Beobachtungszeiträume nicht streng nach den Vorgaben der einschlägigen DIN ermittelt werden kann. Die zu geringen Werte für Anlage B und E resultieren wie oben erwähnt sehr wahrscheinlich aus einer systematischen Überschätzung der Gasmenge. Alle sechs untersuchten BGA erreichen ordentliche bis hervorragende elektrische Ausnutzungsgrade von nahezu 90 bis deutlich über 95 % in Bezug auf die Nennleistung der Motoren, womit bereits eine gute Grundlage für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb gegeben ist (Tab. 4).

Hinsichtlich des Anteils des Stromeigenbedarfs an der Stromproduktion unterscheiden sich Anlage E mit 5,4 und Anlage A mit 9,1 % am deutlichsten. Anlage E liegt hier auf Grund der fehlenden zweiten Stufe am günstigsten, in Anlage A macht sich der Strombedarf der auf die vier Behälter verteilten sechs Stabmixer mit relativ langen Laufzeiten bemerkbar.

Trägt man den erreichten elektrischen Ausnutzungsgrad über der spezifischen installierten Leistung der BGA auf, so lassen

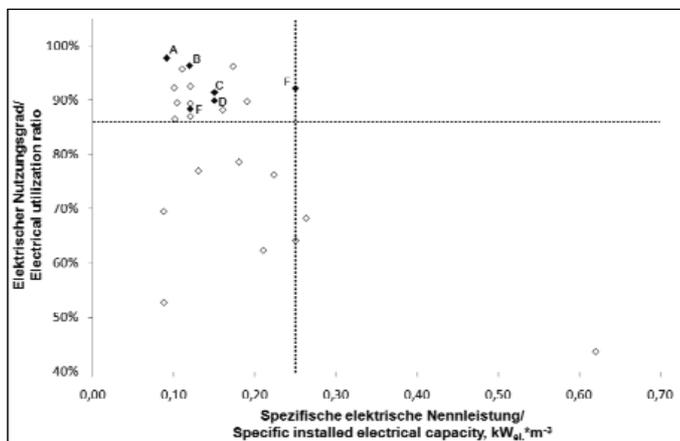
sich gewisse Rückschlüsse auf die Stabilität und die Leistungsgrenzen des Vergärungsprozesses ziehen. In *Bild 1* sind diese Daten für 25 BGA dargestellt, die einem vergleichbaren Messprogramm unterzogen wurden.

In die Grafik wurden zwei Linien eingezeichnet, die als „Effizienzgrenze“ (waagrecht) und „Kapazitätsgrenze“ (senkrecht) bezeichnet werden können. Die „Effizienzgrenze“ schneidet die Ordinate bei einem Wert des elektrischen Ausnutzungsgrades von 86 %, entsprechend etwa 7500 theoretischen Volllaststunden. Tatsächlich sollte gerade bei wirtschaftlich engen Rahmenbedingungen eine Auslastung von mindestens 90 % angestrebt werden. Die „Kapazitätsgrenze“ schneidet die Abszisse bei einem Wert von $0,25 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$. Dieser Wert markiert ausgehend von den vorliegenden Daten von 25 Praxisanlagen diejenige spezifische elektrische Nennleistung, die auf dem derzeitigen Stand der Technik landwirtschaftlicher Biogasanlagen aus nachwachsenden Rohstoffen und tierischen Fäkalien erreicht werden kann. Bei Anlagen, die in den durch diese beiden Linien abgegrenzten, linken unteren Bereich der Grafik fallen, liegt wahrscheinlich eine Hemmung des anaeroben Abbauprozesses oder ein anderer funktionaler Mangel vor („Problembereich“). Anlagen, die rechts der „Kapazitätsgrenze“ und unterhalb der „Effizienzgrenze“ zu liegen kommen, sind nach derzeitigem Stand der Technik zu ehrgeizig dimensioniert („Entwicklungsbereich“). Der obere rechte Bereich der Grafik kann als „Innovationsbereich“ bezeichnet werden. Die sechs in diesem Artikel diskutierten Anlagen können nach dieser einfachen und einseitig auf der Betrachtung der elektrischen Ausnutzung basierenden Kategorisierung alle im „Effizienzbereich“ eingeordnet werden.

Die verfügbaren Daten zur Nutzung der thermischen Energie auf den BGA sind lückenhaft, da nicht auf allen Anlagen Wärmemengenzähler für die verschiedenen Verbraucher installiert werden konnten (*Tab. 4*). Von allen Anlagen waren jedoch die extern

Bild 1: Spezifische installierte elektrische Leistung und erreichter Ausnutzungsgrad von 25 landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Bayern

Fig. 1: Specific rated electrical capacity and electrical utilization ratio of 25 agricultural biogas plants in Bavaria



verwerteten Wärmemengen verfügbar, so dass der relative Anteil der externen Wärmenutzung berechnet werden konnte. Konnte die mittlere thermische Leistungsabgabe nicht gemessen werden, so wurde diese ausgehend von der thermischen Nennleistung und dem Ausnutzungsgrad des Motors geschätzt. Der Anteil der extern genutzten Wärme zeigt eine große Bandbreite von 0 bis etwa 46 % der anfallenden Wärme. In Anbetracht des vergleichsweise geringen Wärmeeigenbedarfs, der für 25 untersuchte BGA im Höchstfall 30 % erreichte, ergibt sich daraus ein erhebliches Potenzial an thermischer Energie, die derzeit verschwendet wird. Dabei wird klar, dass ein hoher Wärmenutzungsanteil über das gesamte Jahr hinweg nur mit einer Kombination aus Heizwärmeversorgung und Trocknungsanlagen erzielt wird. Hingegen ist die saisonal mehr oder weniger unabhängige Lieferung von Prozesswärme an Gewerbebetriebe bisher kaum verbreitet.

Das positive Bild der elektrischen Auslastung der BGA trübt sich ein, wenn der Netto-Nutzungsgrad der Biogasenergie auf Basis des Brennwertes des gewonnenen Methangases betrachtet wird (*Tab. 4*). Nur zwei der sechs vorgestellten Anlagen kommen hier über 50 % hinaus, während die BGA ohne Wärmeverwertung verfahrensbedingt zwei Drittel der Biogasenergie ungenutzt in die Atmosphäre entlassen. Das Bild verdüstert sich weiter, wenn im Rahmen einer umfassenderen energetischen Bilanzierung auch der Energieeinsatz für die Bereitstellung der nachwachsenden Rohstoffe berücksichtigt wird.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Im vorliegenden Artikel wurden Ergebnisse eines umfangreichen Messprogramms auf landwirtschaftlichen BGA hinsichtlich der erzielten Methanausbeute, der Auslastung des Blockheizkraftwerkes und der effektiven Nutzung der mit dem Biogas bereit gestellten Energie vorgestellt. Die in den Anlagen erzielten Biogas- und Methanausbeuten überschritten in den meisten Fällen die gängigen Richtwerte. Allerdings muss die Messung der Biogasmenge neben der Erfassung der Masse der Einsatzstoffe als häufigste systematische Fehlerquelle bei der Ermittlung verfahrenstechnischer Kennzahlen gelten.

In allen vorgestellten Anlagen war die elektrische Auslastung befriedigend bis sehr gut, was auf einen stabilen Gärprozess und eine solide Betriebsführung schließen lässt. Der erzielte elektrische Ausnutzungsgrad war bis zu einem Niveau von $\sim 0,25 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$ nicht abhängig von dem zur Verfügung stehenden Gärraum, teilweise aber von der Reaktorbauart. Die Kombination dieser beiden Werte kann daher in diesem Bereich für eine erste Beurteilung der Prozessstabilität und Funktionalität einer BGA herangezogen werden. Anlagen mit einem deutlich knapper dimensionierten Gärraum sind für die Vergärung landwirtschaftlicher Roh- und Reststoffe noch nicht Stand der Technik. Für eine deutliche Steigerung der Leistungsdichte der Vergärungsanlagen in der Landwirtschaft ist noch Entwicklungsarbeit zu leisten. Gleichzeitig besteht aber auch Bedarf an einer Verbesserung der Prozessstabilität in BGA herkömmlicher Dimensionierung.

Die Auswertung des Netto-Nutzungsgrades bei der Verwertung der Biogasenergie zeigt ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung bei der Wärmenutzung. Um den Netto-Nutzungsgrad der Verwertung des Biogases ganzjährig auf über 50 % zu steigern, ist allerdings ein durchdachtes Konzept erforderlich.

Abschließend bleibt hervorzuheben, dass die hier vorgestellten Ansätze zur Bewertung des Betriebserfolgs von Biogasanlagen nur Teilaspekte darstellen. Sie sind durch weitere verfahrenstechnische, ökonomische und ökologische Kriterien zu ergänzen.

Tab. 4: Kennzahlen für die Biogasverwertung

Table 4: Characteristic values of biogas utilization

Anlagen ID		A	B	C	D	E	F
Auswertungszeitraum	d	215	385	455	365	378	0
Elektrischer Nutzungsgrad	%	37,3	33,8	43,7	37,5	35,2	39,2
Mittl. elektr. Leistungsabgabe	kW	327	335	481	573	515	222
Spez. elektr. Leistungsabgabe	$\text{kW}\cdot\text{m}^{-3}$	0,09	0,12	0,15	0,13	0,23	0,11
Elektrischer Ausnutzungsgrad	%	97,7	96,4	91,5	89,9	92,2	88,4
Anteil Stromeigenverbrauch	%	9,1	7,0	7,2	7,5	5,4	6,7
Mittl. therm. Leistungsabgabe	kW	415	416	518	n.v.	n.v.	n.v.
Externe verwertete therm. Leistung	kW	0	143	222	285	186	47
Wärmeeigenbedarf Fermenterheizung	%	12,3	n.v.	10,7	n.v.	n.v.	n.v.
Anteil externer Wärmenutzung	%	0	34,4	42,9	45,6	32,8	20,2
Abwärmeanteil	%	87,7	n.v.	41,2	n.v.	n.v.	n.v.
Netto-Nutzungsgrad Biogasenergie	%	33,9	46,0	60,8	57,6	48,8	49,8
n.v.: nicht verfügbar							

Literatur

Bücher sind mit • gezeichnet

- [1] *Strobl, M., und U. Keymer*: Technische und ökonomische Kennzahlen landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Landtechnik 61 (2006), H. 5, S. 266-267
- [2] • *KTBL*: Gasausbeuten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. KTBL, Darmstadt, 2005