

Mathias Effenberger, Andreas Buschmann, Josef Schober und Djordje Djatkov

# Webbasierte Schwachstellenanalyse an landwirtschaftlichen Biogasanlagen

Eine suboptimale Dimensionierung oder ein ineffizienter Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen haben negative Umweltwirkungen und eine mangelhafte Wirtschaftlichkeit zur Folge. Wir stellen hier eine Bewertungsmethode vor, mit der eine betriebsindividuelle Schwachstellenanalyse und eine vergleichende Bewertung von Biogasanlagen möglich werden. Die Methode kombiniert Elemente aus Fuzzy-Sets und Expertensystemen, um Biogasanlagen hinsichtlich verschiedener Kriterien zu bewerten. Die Bewertungsergebnisse für einzelne Anlagen und die Rangfolge in einem Anlagenvergleich sind hierbei unabhängig von der jeweiligen Stichprobe, da die einzelnen Kriterien auf Basis des Standes von Wissenschaft und Technik bewertet werden. Um den Bewertungsalgorithmus einem breiteren Nutzerkreis verfügbar zu machen, wurde die Web-Anwendung „Biogas Doc“ entwickelt, mit welcher die erforderlichen Informationen zur Anlagenkonfiguration sowie die Daten zum Betriebsergebnis der Biogasanlage strukturiert erfasst und dargestellt werden können. Mit der Anwendung kann der Nutzer prinzipiell auch die Auswirkungen von Repowering-Maßnahmen oder Änderungen bei den Einsatzstoffen auf wichtige Leistungskennwerte der Biogasanlage simulieren und damit zuverlässiger planen.

eingereicht 27. Dezember 2013

akzeptiert 13. März 2014

## Schlüsselwörter

Anlagentechnik, Benchmarking, Biogas, Schwachstellenanalyse

## Keywords

Systems engineering, benchmarking, biogas, weak point analysis

## Abstract

Effenberger, Mathias; Buschmann, Andreas; Schober, Josef and Djatkov, Djordje

Web-based weak point analysis for agricultural biogas plants

Landtechnik 69(2), 2014, pp. 90–96, 3 figures, 3 tables, 13 references

Faulty dimensioning or inefficient operation of biogas plants in agriculture can lead to negative impacts on the environment and poor profitability. In this paper we present a method for weak-point analysis and comparative assessment of biogas plants in agriculture. This method combines fuzzy sets and expert system elements in order to assess biogas plants with respect to different performance criteria. Since these criteria are evaluated on the basis of the state-of-the-art, the assessment results are independent of the individual sample. From this method, we also developed a web based application called “Biogas Doc” which can be used to display and evaluate data on biogas plant configuration and performance in a systematic fashion. Potentially, this application can also be used to simulate the effects of refurbishment or the selection of input materials on main performance figures, and thus allow for more reliable planning.

■ Biogasanlagen sind komplexe biologisch-verfahrenstechnische Systeme. Bauweisen und Konzepte landwirtschaftlicher Biogasanlagen sind zudem sehr divers. Aus Datenerhebungen in der Praxis ist bekannt, dass die Anlagen teilweise nicht optimal dimensioniert oder betrieben werden [1]. Dies kann ne-

gative Umweltwirkungen und eine mangelhafte Wirtschaftlichkeit zur Folge haben.

Um die Leistungsfähigkeit verschiedener Biogasanlagen reproduzierbar zu bewerten und vergleichbar zu machen, bedarf es eines Systems eindeutig definierter Kennzahlen [2] sowie einer geeigneten Methodik für deren Auswertung. Als Unterstützung für Betreiber von Biogasanlagen sind einzelne Web-Anwendungen verfügbar, die eine gewisse Anzahl an Kennzahlen auswerten können. Zu nennen sind hier insbesondere der „Biogasrechner“ der Firma Weltec Biopower GmbH, der „Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas“ vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) und das „Biogas-Benchmark-System“ der ARGE Kompost & Biogas Österreich (ARGE). Das KTBL bietet seinen „Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas“ zur kosten- und registrierungsfreien Nutzung an. Das System der ARGE ist hingegen ausschließlich deren Mitgliedern vorbehalten. Die Web-Anwendung von Weltec Biopower wird als Vorabservice für weitergehende, kostenpflichtige Beratungsleistungen angeboten.

Unser Ziel war es, über die existierenden Anwendungen hinaus eine betriebsindividuelle Schwachstellenanalyse und eine vergleichende Bewertung von Biogasanlagen zu ermöglichen und eine Beratungshilfe für die landwirtschaftliche Praxis bereitzustellen. Im Folgenden stellen wir die von uns entwickelte Bewertungsmethode sowie die Beratungshilfe vor und erläutern deren Gebrauch anhand von Beispielen aus dem Biogas-Monitoring der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft.

## Material und Methoden

Die von uns entwickelte Bewertungsmethode kombiniert Elemente aus Fuzzy-Sets und Expertensystemen, um Biogasanlagen hinsichtlich technischer, ökologischer und ökonomischer Kriterien zu bewerten [3; 4]. Im vorliegenden Artikel werden nur die verfahrenstechnischen Kriterien betrachtet. In dieser Kategorie werden vier Kennzahlen ausgewertet.

### Relative Biogasausbeute

Der gemessene Biogasertrag im Verhältnis zum potenziellen Biogasertrag definiert die relative Biogasausbeute. Der potenzielle Biogasertrag wird gemäß dem „Futterwert-Modell“ abgeschätzt: Hierzu werden die zugeführte Masse an den organischen Hauptbestandteilen („Weender-Fractionen“) der Einsatzstoffe (Rohfaser, stickstofffreie Extraktstoffe, Rohprotein und Rohfett) mit Verdauungskoeffizienten aus Fütterungsversuchen mit Rindern und Durchschnittswerten für die spezifischen Biogasausbeuten der Fraktionen multipliziert [5; 6; 7]. Liegen keine Analysenwerte der Einsatzstoffe vor, wird mit Standardwerten gerechnet [8]. Vorteile dieser Vorgehensweise sind, dass solche Standardwerte für zahlreiche Einsatzstoffe verfügbar sind und die Schätzung des potenziellen Biogasertrags zusätzlich an die tatsächliche Zusammensetzung der Einsatzstoffe angepasst werden kann. Nachteil dieser Methode ist die systematische Unterschätzung der potenziellen Biogaserträge aufgrund der zu geringen Verdauungskoeffizienten. Referierte „Verdauungskoeffizien-

ten“ einzelner Einsatzstoffe für volltechnische Biogasanlagen sind jedoch bisher nicht verfügbar.

### Methanproduktivität

Als Methanproduktivität wird der normierte Methanertrag je Kubikmeter Gärvolumen und Tag in  $\text{m}^3_{\text{N}} (\text{m}^3 \text{d})^{-1}$  bezeichnet.

### Arbeitsausnutzung BHKW

Die Arbeitsausnutzung BHKW entspricht der gemessenen Jahresstromproduktion in Relation zur potenziellen Stromproduktion bei Nennleistung und 100 % Verfügbarkeit.

### Netto-Nutzungsgrad Methan

Die Summe aus extern verwertbarer elektrischer und thermischer Energie in Relation zum Brennwert des Methanertrags ergibt den Netto-Nutzungsgrad Methan.

### Beschreibung der Bewertungsmethode

Um ein Benchmarking im weiteren Sinne anhand von Referenzpunkten durchführen zu können, müssen die Bewertungsergebnisse für einzelne Anlagen und die Rangfolge in einem Anlagenvergleich unabhängig von der jeweiligen Stichprobe sein. Hierfür wurden vier Effizienzklassen festgelegt: sehr gut, gut, ausreichend und ungenügend. Die Einstufung in die Effizienzklassen ist wie folgt zu interpretieren:

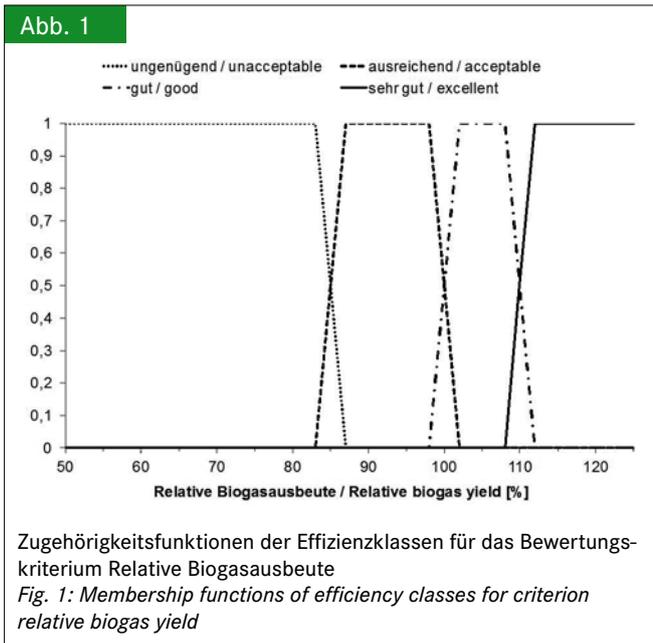
- sehr gut – Verbesserung praktisch kaum mehr möglich
- gut – Verbesserung möglich, nicht unbedingt erforderlich
- ausreichend – Verbesserung empfohlen
- ungenügend – Verbesserung unbedingt erforderlich

Die Festlegung der Effizienzklassen für die einzelnen Bewertungskriterien erfolgte auf Basis des Standes von Wissenschaft und Technik. Hierfür wurden die Ergebnisse aus dem bundesweiten Biogas-Messprogramm der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. sowie aus dem Biogas-Monitoring der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft ausgewertet [1; 9; 10; 11; 12].

Die Methode liefert insgesamt sieben Bewertungen in den vier Effizienzklassen: für jeweils zwei Kriterien in den beiden Kategorien „Biogasproduktion“ und „Biogasverwertung“, plus die zusammenfassende Bewertung in diesen beiden Kategorien, plus die Gesamtbewertung in der Kategorie „Technik“ ( $4 + 2 + 1 = 7$ ). Um bei der Zusammenfassung der Kriterien eine Kompensation zu verhindern, wurde ein Regelwerk verfasst [13]. Für die Zusammenfassung zweier Kriterien in vier Effizienzklassen sind jeweils sechzehn Regeln erforderlich.

Für die quantitative Bewertung werden Effizienzwerte zwischen 0 und 100 berechnet. Hierfür werden die auf den jeweiligen Wertebereich normierten Ausprägungen der Bewertungskriterien (Kennwerte) sowie die Zugehörigkeitsfunktionen der Effizienzklassen fuzzyfiziert. Durch die Fuzzy-Kennzahlen wird die Messgenauigkeit der Bewertungskriterien abgebildet. Anschließend wird die Kompatibilität der einzelnen Fuzzy-Kennzahlen mit den vier Fuzzy-Effizienzklassen für den gesamten jeweiligen Regelsatz ermittelt. Die Fuzzy-Zahl für die Gesamtbewertung der jeweiligen Kategorie errechnet sich als Summe

Abb. 1



der Fuzzy-Zahlen aus allen 16 Regeln. Das genaue Vorgehen ist in [3] beschrieben. Anhand der resultierenden Effizienzwerte können die Anlagen in eine Rangfolge gebracht werden.

Für die Effizienzklassen wurden trapezförmige Zugehörigkeitsfunktionen definiert. **Abbildung 1** zeigt beispielhaft die Zugehörigkeitsfunktion für das Kriterium „relative Biogasausbeute“. Hierbei wurde berücksichtigt, dass die nach dem oben dargestellten Verfahren berechneten potenziellen Biogaserträge die tatsächlich beobachteten Erträge in der Regel deutlich unterschätzen.

Die Effizienzklassen für den Netto-Nutzungsgrad Methan werden in Abhängigkeit von Nennleistung, Typ und Alter (Betriebsstunden) des Motors dynamisch berechnet. Nähere Details zu den Effizienzklassen finden sich in [13]. Wenn technologische Entwicklungen oder politische Zielsetzungen dies verlangen, können jederzeit Anpassungen vorgenommen werden, beispielsweise für die Arbeitsausnutzung entsprechend der Erfordernisse der bedarfsgerechten Stromerzeugung aus Biogas.

Um den Bewertungsalgorithmus einem breiteren Nutzerkreis verfügbar zu machen, wurde die Web-Anwendung „Biogas Doc“ entwickelt. Mit der Anwendung können die erforderlichen Informationen zur Anlagenkonfiguration sowie die Daten zum Betriebsergebnis der Biogasanlage strukturiert erfasst und dargestellt werden. Die Zugangsdaten zur Web-Anwendung können beim korrespondierenden Autor erfragt werden.

Der Biogas Doc besteht derzeit aus zwei Modulen: dem „Anlagenreport“ sowie der „Effizienzbewertung“. Im Anlagenreport werden die eingegebenen Daten und Informationen strukturiert dargestellt und vor dem Hintergrund von Richtwerten und der guten fachlichen Praxis eingeordnet bzw. plausibilisiert. Neben den Kriterien für die Effizienzbewertung wird eine Reihe weiterer wichtiger Kennzahlen berechnet. In der Effizienzbewertung werden die Bewertungsergebnisse für die drei Kategorien „Biogasproduktion“, „Biogasverwertung“ und „Technik“ ausgegeben. Schwachstellen werden auf diese Weise sofort deutlich.

**Anwendung der Schwachstellenanalyse**

Im Folgenden wird die Anwendung der webbasierten Schwachstellenanalyse anhand von drei Biogasanlagen erläutert, die im Rahmen des Biogas-Monitorings der Bayerischen Landes-

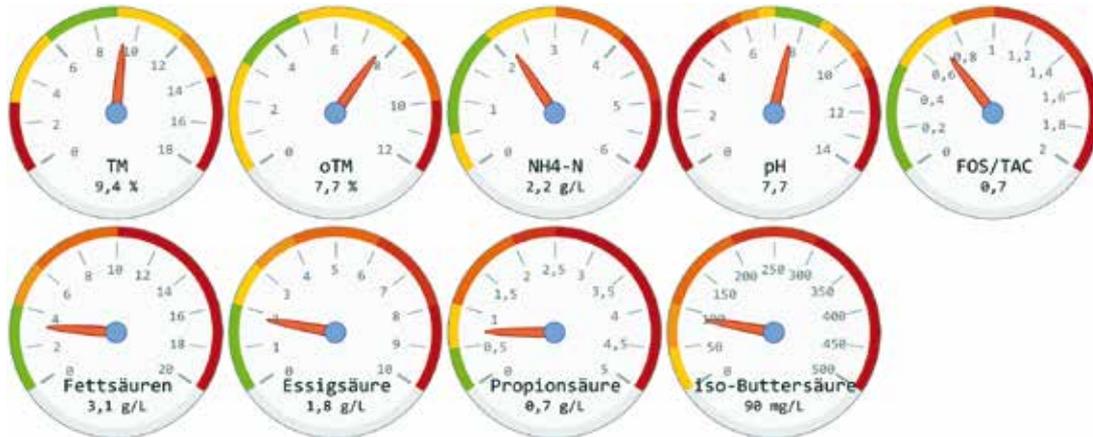
Tab. 1

Kurzbeschreibung der untersuchten landwirtschaftlichen Biogasanlagen  
 Table 1: Basic characteristics of assessed agricultural biogas plants

Kennung/ID	Einheit/Unit	7-1	7-2	10-1	10-2	14
Inbetriebnahmejahr / Year of commissioning		2005	2009	2004	2009	2009
Gesamt-Gärraum / Overall digester volume	m <sup>3</sup>	3 015	4 020	1 540	1 540	1 600
Anzahl Prozessstufen / Number of process stages		2	3	2	2	2
Einsatzstoffe: NawaRo Input materials: plant biomass		MS GS GR-GPS CCM	MS GS WKS	MS GS R-GPS WK	MS GS R-GPS WK CCM	GS MS GR-GPS CCM
Einsatzstoffe: tierische Exkremente Input materials: animal manure		MVG RM HTK	MVG HTK	SG RM	SG	MVG RM
Installierte elektrische Leistung Installed electrical power	kW	329	855	280	350	76
Spezifische installierte elektrische Leistung Specific electrical power	kW m <sup>-3</sup>	0,11	0,21	0,18	0,23	0,048
BHKW (Anzahl, Typ) / CHPU (Number, type)		1 GO	2 GO	2 ZS	1 GO, 1 ZS	2 GO

BHKW: Blockheizkraftwerk / CHPU: combined heat-and-power unit; CCM: Corn-Cob-Mix; GO: Gas-Otto-Motor / gas engine; GPS: Ganzpflanzensilage / whole crop silage; GR: Grünroggen / green rye; GS: Grassilage / grass silage; HTK: Hühnertrockenkot / chicken manure; MS: Maissilage / maize crop silage; MVG: Milchviehgülle / liquid dairy cattle manure; R: Roggen / rye; RM: Rindermist / solid cattle manure; SG: Schweinegülle / liquid pig manure; ZS: Zündstrahlmotor / pilot-injection engine; W: Weizen / wheat; WK: Weizenkörner / wheat kernels; WKS: Weizenkörnerschrot / ground wheat kernels

Abb. 2



Anlagenreport zu den Prozessindikatoren im Gärgemisch aus Fermenter 1 von Biogasanlage 7 für den ersten Beobachtungszeitraum (TM: Trockenmasse, oTM: organische Trockenmasse,  $\text{NH}_4\text{-N}$ : ammoniakalischer Stickstoff, FOS: flüchtige organische Säuren, TAC: Alkalinität)  
 Fig. 2: Report on process indicators in samples from primary digester 1 of biogas plant 7 for the first observation period (TM: dry matter, oTM: organic dry matter,  $\text{NH}_4\text{-N}$ : ammoniacal nitrogen, FOS: volatile organic acids, TAC: total alkalinity, Fettsäuren: volatile fatty acids, Essigsäure: acetic acid, Propionsäure: propionic acid, iso-Buttersäure: iso-butyric acid)

anstalt für Landwirtschaft jeweils über mehrere Jahre intensiv beobachtet wurden. An den Anlagen 7 und 10 wurden im Laufe der Beobachtung Repowering-Maßnahmen durchgeführt (**Tabelle 1**). Diese Anlagen sind typische NawaRo-Biogasanlagen, wie sie in den Jahren nach der ersten Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) errichtet und betrieben wurden. Anlage 14 wurde als Beispiel für eine Hof-Biogasanlage, die hauptsächlich Gülle und Mist aus der eigenen Milchviehhaltung sowie zusätzlich Energiepflanzen von betriebseigenen Flächen einsetzt, mit in die Darstellung aufgenommen. Die Beobachtungszeiträume für die folgenden Auswertungen umfassen Zeitreihen von eineinhalb bis zwei Jahren. Die Kennwerte

wurden jeweils als Mittelwerte über den gesamten Beobachtungszeitraum berechnet (**Tabelle 2**).

### Biogasanlage 7

Die Mittelwerte von 17 Proben aus dem Hauptgärbehälter der Anlage 7 liegen im unkritischen Bereich (grün bis gelb) (**Abbildung 2**). Über den ersten Beobachtungszeitraum erhielt die Anlage in der Kategorie „Biogasproduktion“ eine ausreichende und in der Kategorie „Biogasverwertung“ eine ungenügende Bewertung (**Tabelle 3**, 7-1). Grund für die nur ausreichende Bewertung der Biogasproduktion ist die relativ geringe Methanproduktivität des großzügig dimensionierten Gärraums.

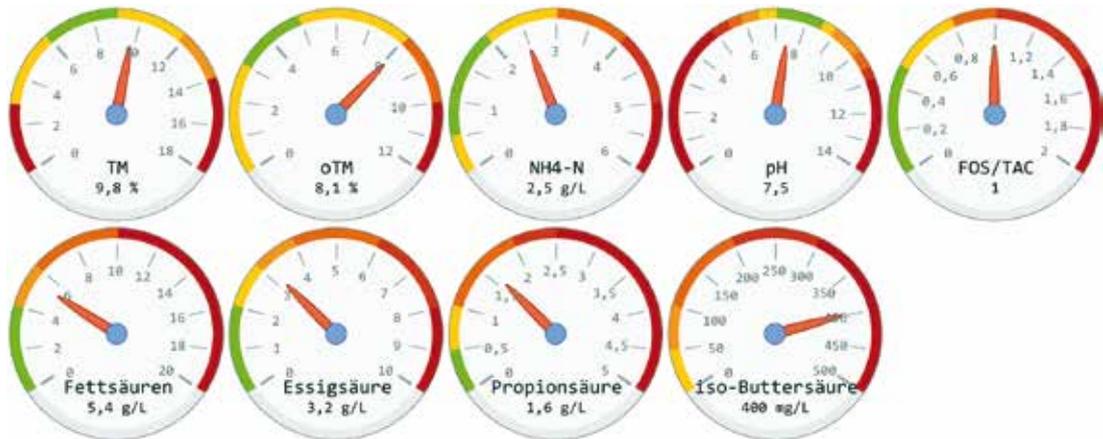
Tab. 2

Ausgewählte verfahrenstechnische Kennwerte der untersuchten Biogasanlagen

Table 2: Selected characteristic figures for assessed biogas plants

Kennung / ID	Einheit/Unit	7-1	7-2	10-1	10-2	14
Biogasausbeute/Biogas yield	$\text{m}^3_{\text{N}} \text{ t oTM}^{-1}$	698	523	744	746	637
Methanausbeute/Methane yield	$\text{m}^3_{\text{N}} \text{ t oTM}^{-1}$	380	280	384	385	342
Biogasausbeute/Biogas yield	$\text{m}^3_{\text{N}} \text{ t FM}^{-1}$	188	130	167	162	84
Relative Biogasausbeute/Relative biogas yield	%	120	90	129	125	133
Methanproduktivität/Methane productivity	$\text{m}^3_{\text{N}} (\text{m}^3 \text{ d})^{-1}$	0,7	0,9	1,0	1,1	0,4
Stromausbeute/Electricity yield	$\text{kWh t FM}^{-1}$	346	250	359	345	146
Spezifischer Strombedarf/Specific electricity demand	$\text{kWh t FM}^{-1}$	32	21	16	16	15
Elektrischer Nutzungsgrad/Electrical utilization ratio	%	33,9	35,9	33,6	35,6	32,4
Thermischer Nutzungsgrad/Thermal utilization ratio	%	5,8	32,2	5,5	23,9	43,2
Anteil Eigenstrombedarf/Own electricity demand	%	9,1	8,5	4,4	4,5	9,9
Anteil Eigenwärmebedarf/Own heat demand	%	8,8	13,3	17,2	11,6	29,5
Netto-Nutzungsgrad Methanenergie Net utilization ratio of methane heating value	%	32,5	57,7	47,4	63,7	59,2
Gesamt-Arbeitsausnutzung BHKW Overall utilization ratio of CHPU	%	97,8	61,0	89,7	86,0	100,3

Abb. 3



Anlagenreport zu den Prozessindikatoren im Gärgemisch aus Fermenter 1 von Biogasanlage 7 für den zweiten Beobachtungszeitraum  
 Fig. 3: Report on process indicators in samples from primary digester 1 of biogas plant 7 for the second observation period

Die Note ungenügend für die Biogasverwertung rührt von der fehlenden Wärmenutzung her, die im verwendeten Regelwerk großes Gewicht erhält. Insgesamt ergab sich für Anlage 7 eine ungenügende Bewertung, da die Methode darauf ausgerichtet ist, eine Kompensation zwischen den beiden Bewertungskategorien auszuschließen.

Auf dieser Anlage wurden dann folgende Maßnahmen ergriffen (**Tabelle 1**):

- Umwidmung des bisherigen (beheizbaren) Gärrestlagers mit Gaserfassung als dritte Prozessstufe (zweiter Nachgärbehälter); hierdurch Erweiterung des Gärraums um ein Drittel
- Neubau eines Gärrestlagers ohne Gaserfassung mit einem Volumen von 2 280 m<sup>3</sup>
- Installation eines Satelliten-BHKW mit 526 kW elektrischer Nennleistung auf dem Gelände eines Wärmekunden (Industriebetrieb), das über eine Leitung mit Biogas von der Anlage versorgt wird; hierdurch Erweiterung der elektri-

schen BHKW-Kapazität um den Faktor 2,6 bzw. annähernde Verdoppelung der spezifischen installierten elektrischen BHKW-Leistung

- Steigerung des Massenanteils von Gülle im Mix der Einsatzstoffe von 6 auf 32 % zur Realisierung des Gülle-Bonus gemäß EEG 2009

Um das Satelliten-BHKW, dessen Wärmeproduktion am Standort vollständig verwertet wird, auszulasten, musste die Raumbelastung der Anlage deutlich erhöht werden. Mit einem Wert von 4,1 kg oTM (m<sup>3</sup> d)<sup>-1</sup> war diese – bezogen auf den Gesamtgärraum – dann zwar nicht außergewöhnlich hoch, die beiden Hauptgärbehälter schienen jedoch bereits an ihre Belastungsgrenze zu stoßen.

**Abbildung 3** zeigt, dass wichtige Prozessindikatoren in Proben aus den Hauptgärbehältern sich im Mittel deutlich in Richtung eines kritischen Niveaus verändert hatten. Insbesondere das Konzentrationsniveau der iso-Buttersäure deutete auf das Risiko einer Destabilisierung des Gärprozesses hin.

Tab. 3

Ergebnisse der Effizienzbewertung für die untersuchten Biogasanlagen  
 Table 3: Assessment results for the selected biogas plants

Kennung/ID	7-1	7-2	10-1	10-2	14
Biogasproduktion <i>Biogas production</i>	ausreichend <i>acceptable</i>	ungenügend <i>unacceptable</i>	sehr gut <i>excellent</i>	sehr gut <i>excellent</i>	ausreichend <i>acceptable</i>
Effizienzwert <i>Efficiency score</i>	37,5	13,8	87,4	86,2	37,5
Biogasverwertung <i>Biogas utilization</i>	ungenügend <i>unacceptable</i>	gut <i>good</i>	ausreichend <i>acceptable</i>	gut <i>good</i>	sehr gut <i>excellent</i>
Effizienzwert <i>Efficiency score</i>	13,8	51,4	26,3	62,5	75,9
Gesamtbewertung <i>Overall assessment</i>	ungenügend <i>unacceptable</i>	ungenügend <i>unacceptable</i>	ausreichend <i>acceptable</i>	gut <i>good</i>	ausreichend <i>acceptable</i>
Effizienzwert <i>Efficiency score</i>	12,7	13,8	27,1	62,5	37,5

Der Anlagenbetreiber musste daher auch von einer weiteren Steigerung der Beschickung absehen, obwohl beide BHKW noch erhebliche Kapazitätsreserven aufwiesen. Während das Satelliten-BHKW eine Arbeitsausnutzung von etwas über 90 % erreichte, lag diese für das BHKW am Standort der Biogasanlage lediglich bei 66 %.

Die Bewertung der Anlage in der Kategorie „Biogasproduktion“ verschlechterte sich nach ungenügend, da die relative Biogasausbeute deutlich zurückging – ein weiterer Hinweis darauf, dass der Gärprozess nicht effizient arbeitete (**Tabelle 3**, 7-2). Demgegenüber brachte die vollständige Nutzung der Wärmeabgabe des Satelliten-BHKW nun die Note gut für die Biogasverwertung. Zusammenfassend ergab sich eine marginal bessere Bewertung für den zweiten Beobachtungszeitraum von Anlage 7.

### Biogasanlage 10

Diese Biogasanlage erhielt in der ersten Beobachtungsperiode die Note sehr gut für die Biogasproduktion und die Note ausreichend für die Biogasverwertung (**Tabelle 3**, 10-1). Die erzielte Biogasausbeute war hoch, während die Methanproduktivität auf zufriedenstellendem Niveau lag. Es gab keine Hinweise auf eine Beeinträchtigung der Gärbiologie. Da die für Externe verfügbare Wärme nur zu einem kleineren Anteil genutzt wurde, fiel die Note für die Biogasverwertung trotz einer hervorragenden Arbeitsausnutzung von 96 % und eines sehr niedrigen Eigenstrombedarfsanteils von 4,4 % nicht besser aus. Zusammenfassend ergab sich eine ausreichende Bewertung.

Im weiteren Verlauf der Beobachtung ergriff der Betriebsleiter aus betriebswirtschaftlichen Erwägungen heraus folgende „Repowering-Maßnahmen“ (**Tabelle 1**):

- Austausch des älteren und kleineren BHKW durch ein neues BHKW mit Gas-Otto-Motor und 150 kW elektrischer Nennleistung
- Installation eines Aggregats zur Desintegration des Fermenterinhaltendes durch Ultraschall
- Anschluss mehrerer Wärmeabnehmer; hierdurch Steigerung des externen Wärmenutzungsgrades von 14 auf 49 %
- Zusätzlicher Einsatz von CCM

Die Erhöhung der Raumbelastung war zwar anhand der Prozessindikatoren in Proben aus dem Hauptgärbehälter erkennbar, kritische Werte traten jedoch nicht auf. Der sehr gute Effizienzwert in der Kategorie „Biogasproduktion“ verringerte sich aufgrund der etwas geringeren relativen Biogasausbeute in der zweiten Beobachtungsperiode nur geringfügig (**Tabelle 3**, 10-2). Durch den Ausbau des Wärmeabsatzes konnte für die Biogasverwertung nun die Note gut erreicht werden, obwohl die Arbeitsausnutzung um 10 % abnahm. Grund hierfür war, dass der Fermenter zur Entfernung eines Sedimentkörpers vorübergehend stillgelegt und entleert werden musste.

Der auf die Frischmassezufuhr bezogene Strombedarf der Anlage veränderte sich durch die Repowering-Maßnahmen nicht, was auf die Erhöhung des Gülleanteils zurückgeführt werden kann. Es kann vermutet, aber anhand der vorliegenden Daten aus dem Monitoring nicht nachgewiesen werden, dass

die Ultraschallintegration einen positiven Effekt auf die Abbaukinetik hatte: Während sich die hydraulische Verweilzeit im Gärraum um ca. 14 % reduzierte, blieben die Biogas- und Methanausbeuten aus der organischen Trockensubstanz stabil (**Tabelle 2**). Die zusammenfassende Bewertung von Anlage 10 ergab für die zweite Beobachtungsperiode die Note gut und damit eine erhebliche Verbesserung gegenüber dem Referenzzeitraum. Die Anlage erreichte die mit Abstand beste Bewertung unter den vorgestellten Beispielen.

### Biogasanlage 14

Diese Anlage unterschied sich mit einem Gülleanteil von ca. 75 % der eingesetzten Frischmasse deutlich von den beiden anderen hier diskutierten Betrieben. Die organische Belastung des Gärraums lag mit einem Wert von ca. 1,0 kg oTM (m<sup>3</sup> d)<sup>-1</sup> auch für eine güllebetonte Biogasanlage auf sehr niedrigem Niveau. Die relative Biogasausbeute war sehr gut, die Methanproduktivität natürlich sehr niedrig. Daher ergibt sich für die Kategorie „Biogasproduktion“ eine ausreichende Bewertung (**Tabelle 3**). Es ist allerdings klar, dass dies für diese Anlage keine kritische Schwachstelle darstellt, da die Einsatzstoffe betriebsintern äußerst kostengünstig zur Verfügung gestellt werden können und auch die Investitionskosten für die Anlage vergleichsweise gering waren.

Da ein Großteil der verfügbaren BHKW-Wärme verwertet wurde, ergab sich für die Biogasverwertung eine sehr gute Note. Der errechnete Wert für die Arbeitsausnutzung von 100,3 % lässt darauf schließen, dass die Angaben des Betreibers bzw. Herstellers zur Nennleistung der Motoren fehlerhaft waren. Die nur ausreichende zusammenfassende Bewertung resultiert wieder aus dem verwendeten Regelwerk.

### Schlussfolgerungen

Unsere Methode ermöglicht eine absolute und vergleichende Bewertung der technischen Effizienz von Biogasanlagen ohne Kompensationseffekte und unter Einbeziehung von Expertenwissen. Mit der zugehörigen Web-Anwendung können Anlagenbetreiber und deren Berater wichtige Kennwerte von Biogasanlagen in strukturierter Form auswerten. Der Anlagenreport gibt zusätzlich Interpretationshilfen für einzelne Kennwerte und Prozessindikatoren. Die Effizienzbewertung offenbart die Schwachstellen der Anlage und ermöglicht einen Vergleich verschiedener Biogasanlagen. Hinsichtlich des verwendeten Bewertungskriteriums „Relative Biogasausbeute“ besteht Verbesserungsbedarf, da nach der verwendeten Referenzmethode die potenzielle Biogasausbeute deutlich unterschätzt wird. Ein alternativer, physikalisch fundierter Ansatz für die Bewertung der Energieausbeute aus den Einsatzstoffen könnte die Verwendung von Brennwertanalysen sein, die allerdings bisher in der Branche sehr wenig verbreitet sind.

Unsere Anwendung will einen erfahrenen Fachberater nicht ersetzen, sondern dem Betreiber ein besseres, systematisches Verständnis des Status und der Schwachstellen seiner Biogasanlage verschaffen. Somit können Beratungsgespräche zielori-

entiert durchgeführt werden. Voraussetzung für die Nutzbarkeit der Anwendung ist, dass ausreichende und valide Daten von der Biogasanlage zur Verfügung stehen.

Das in der Methode verwendete Regelwerk enthält eine subjektive Komponente. Für die Interpretation der Bewertungsergebnisse sind jedoch auch die individuellen Präferenzen des Nutzers von Bedeutung. Eine Weiterentwicklung der Anwendung könnte darin bestehen, dem Nutzer bestimmte Möglichkeiten zu geben, das Regelwerk selbst an seine Präferenzen anzupassen. Allerdings ginge damit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse für verschiedene Anlagen verloren.

Mit der Anwendung kann der Nutzer prinzipiell auch die Auswirkungen von Repowering-Maßnahmen oder Änderungen bei den Einsatzstoffen auf wichtige Leistungskennwerte der Biogasanlage simulieren und damit zuverlässiger planen. Als weiteres Modul soll die Methode der Ursachenforschung umgesetzt werden, welche auf Basis zusätzlicher Kennzahlen und Eigenschaften der Biogasanlage die Effizienzbewertung spezifiziert, hieraus die wahrscheinlichsten Ursachen für vorhandene Schwachstellen ableitet und Verbesserungsmaßnahmen vorschlägt.

### Literatur

- [1] FNR (2009): Bundes-Messprogramm Biogas II – 61 Biogasanlagen im Vergleich. Gülzow, Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
- [2] Strobl, M.; Keymer, U. (2006): Technische und ökonomische Kennzahlen landwirtschaftlicher Biogasanlagen. *Landtechnik* 61(5), S. 266–267
- [3] Djatkov, Dj.; Effenberger, M.; Martinov, M. (2012): Development of a method for assessing the performance of agricultural biogas plants. 40<sup>th</sup> Actual Tasks on Agricultural Engineering, 21.–24.2.2012, Opatija, Kroatien, pp. 557–567
- [4] Djatkov, Dj.; Effenberger, M.; Lehner, A.; Martinov, M.; Tesic, M.; Gronauer, A. (2012): New method for assessing the performance of agricultural biogas plants. *Renewable Energy* 40(1), pp. 104–112
- [5] DLG: Datenbank Futtermittel. <http://datenbank.futtermittel.net/>, Zugriff am 6.3.2014
- [6] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft LfL (Hg.) (2013): Gruber-Tabelle zur Fütterung der Milchkühe, Zuchtrinder, Schafe, Ziegen. [http://www.lfl.bayern.de/cms07/publikationen/informationen/d\\_36967](http://www.lfl.bayern.de/cms07/publikationen/informationen/d_36967), Zugriff am 6.3.2014
- [7] Baserga, U. (1998): Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen. FAT-Berichte Nr. 512, Tänikon
- [8] Keymer, U.; Schilcher, A. (2003): Biogasanlagen: Berechnung der Gasausbeute von Kosubstraten. <http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/031560/index.php>, Zugriff am 6.3.2014
- [9] Effenberger, M.; Kissel, R.; Lehner, A.; Gronauer, A. (2008): Verfahrenstechnische Bewertung landwirtschaftlicher Biogasanlagen – Auslastung und energetische Effizienz. *Landtechnik* 63(5), S. 290–292
- [10] Effenberger, M.; Bachmaier, H.; Kränsel, E.; Lehner, A.; Gronauer, A. (2010): Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern. Hg. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Schriftenreihe 1/2010
- [11] Bachmaier, H.; Ebertseder, F.; Effenberger, M.; Kissel, R.; Rivera Gracia, E.; Gronauer, A. (2011): Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern – Fortsetzung 2008–2010. Hg. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Schriftenreihe 5/2011
- [12] Ebertseder, F.; Kissel, R.; Lehner, A.; Rivera Gracia, E.; Bachmaier, H.; Effenberger, M. (2012): Monitoring und Dokumentation von Praxis-Biogasanlagen. Hg. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Schriftenreihe 8/2012
- [13] Djatkov, Dj. M. (2013): Razvoj metode za ocenu efikasnosti rada poljoprivrednih biogas postrojenja primenom fazi logike i ekspertskih sistema (Development of a method for assessing the efficiency of agricultural biogas plants using fuzzy logic and expert systems). Dissertation, Fakultät für Technische Wissenschaften, Universität Novi Sad, <http://www.doiserbia.nb.rs/phd/university.aspx?theseid=NS20130923DJATKOV>, Zugriff am 6.3.2014

### Autoren

**Dr.-Ing. Mathias Effenberger** ist Leiter der Arbeitsgruppe „Technikfolgenabschätzung“ am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. **Andreas Buschmann** ist Mitarbeiter in dieser Arbeitsgruppe. **Josef Schober** ist als fachlicher Koordinator des Projektteams „LandSchaft Energie“ an den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten in Bayern am selben Institut tätig. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Vöttinger Str. 36, 85354 Freising, Internet: [www.lfl.bayern.de/ilt/umwelttechnik](http://www.lfl.bayern.de/ilt/umwelttechnik), E-Mail: [mathias.effenberger@lfl.bayern.de](mailto:mathias.effenberger@lfl.bayern.de)

**Dr. Djordje Djatkov** ist Assistent am Lehrstuhl für Biosystemtechnik der Universität Novi Sad, Fakultät der technischen Wissenschaften, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbien.

### Danksagung

Die Arbeiten wurden ermöglicht durch die finanzielle Förderung des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten sowie des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD).