

Energetische Bewertung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen mithilfe des mittleren Brennstoffausnutzungsgrades

Elmar Fischer, Jan Postel, Florian Ehrendreich, Michael Nelles

Biogasanlagen stellen Kraftwerksprozesse dar, die mit energietechnischen Methoden bilanzierbar sind. Dazu werden standardmäßig erfasste Betriebsdaten von Biogasanlagen sowie der Brennwert der Substrate benötigt, um den Brennstoffausnutzungsgrad zu berechnen. Die vier untersuchten landwirtschaftlichen Biogasanlagen zeigen einen mittleren Brennstoffausnutzungsgrad von bis zu 40,5%. Durch Korrektur des Energiepotenzials auf den anaerob nutzbaren Anteil können Anlagen mit schlecht abbaubaren Substraten mit Anlagen, die leicht abbaubare Substrate vergären, verglichen werden. Vorrangig ist der Ansatz zur regelmäßigen Betriebskontrolle, der Identifikation von Verlusten und der Bewertung von Umbaumaßnahmen geeignet.

Schlüsselwörter

Biogas, Energietechnik, Nutzungsgrad, Benchmark, Brennwert

Mit der Optimierung des Biogasanlagenbetriebs haben sich eine Vielzahl von empirischen Untersuchungen befasst. Die dabei identifizierten Herausforderungen sind: die Substratausnutzung, die externe Wärmenutzung und Optimierungsmaßnahmen im Betriebsablauf (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. 2005, GEHRIG 2007, FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. 2009, WINTERBERG et al. 2012; WIRTH und HARTMANN 2013). In der Biogastechnik sind verschiedene Bewertungsansätze etabliert, welche die Biogasanlage im Sinne einer energetischen und ökologischen Bewertung in eine Nutzungskette einbinden (HAVUKAINEN et al. 2014). Die übliche Bewertung des Biogasanlagenbetriebs unter technischen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten wird energietechnischen Erfordernissen nicht gerecht. Dabei kann jede Biogasanlage mithilfe von nationalen und internationalen Standards wie ein Kraftwerksprozess betrachtet werden (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2014).

Der Betrieb von Biogasanlagen in Deutschland ist auf eine Maximierung der Volllaststundenzahl ausgelegt. Der erforderliche Substratbedarf wird mithilfe von Gasertragsrichtwerten und den Wirkungsgraden der Konversionsaggregate abgeschätzt (MITTERLEITNER o. J., EDER und SCHULZ 2007, FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. 2013, KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. 2013). Die erforderliche Substratmenge m im Nennzeitraum T_N – in der Regel 1 Jahr – lässt sich mithilfe der Gleichung 1 abschätzen.

$$m_{sub,FM} = \frac{P_N \cdot T_N}{Y_{BG} \cdot \varphi_{CH_4} \cdot H_{i,CH_4} \cdot \eta_{el}} \quad (Gl. 1)$$

m	Substratmenge [t_{FM}/a]
P_N	elektrische Nennleistung des Konversionsaggregates [kW]
T_N	Nennzeitraum [h/a]
Y_{BG}	Biogasertrag [$m^3_{i,N}/t_{FM}$]
φ_{CH_4}	Methangehalt [Vol.-%]
H_{i,CH_4}	Heizwert Methan [$kWh/m^3_{i,N}$]
η_{el}	elektrischer Wirkungsgrad des Konversionsaggregates [%]

Durch die in Deutschland bevorzugte Einspeisung von Strom dient die elektrische Arbeit als indirekte Auslegungsgröße. Für Biogasanlagen, die Regelenergie bereitstellen, funktioniert dieses Modell nicht, da die zeitliche Trennung von Produktion und Konversion nicht mit der Gleichung 1 erfasst wird. Eine Langzeitkontrolle und Optimierung der Leistungsparameter für die Regelenergiebereitstellung ist daher erschwert (DJATKOV et al. 2014, MAUKY et al. 2015).

Ein weiteres Hindernis für die Effizienzbewertung ist die Verwendung von Biogasausbeuten, da sie keine absolute Bezugsgröße darstellen. Einen Anhaltspunkt für einen absoluten Bezug gibt die erstmals durch SYMONS und BUSWELL (1933) aufgestellte stöchiometrische Gleichung 2. Mit ihrer Hilfe kann die spezifische Gasmenge und -zusammensetzung in Bezug auf die Hauptkomponenten Methan und Kohlendioxid abgeschätzt werden (SYMONS und BUSWELL 1933, REINHOLD 2005, LINKE et al. 2006, MÄHNERT et al. 2007, MÄHNERT 2007).



Wendet man Gleichung 2 auf eine gewöhnliche Maissilage an, erhält man einen stöchiometrischen Gasertrag von $303,6 m^3 t_{FM}^{-1}$. Der Richtwert für den Biogasertrag beträgt $216 m^3 t_{FM}^{-1}$ (KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. 2013), was einem Abbaugrad von nur 71,2% entspricht. Die restlichen 28,8% stellen ungenutztes Biogaspotenzial dar, ohne dass der Richtwert darüber Auskunft gibt. Um die Qualität einer Betriebskontrolle durch einen Bilanzierungsansatz zu verbessern, erscheint es sinnvoll einen absoluten Bezugswert zu verwenden. Unlängst wurde von EFFENBERGER et al. (2014) die Möglichkeit der brennwertbasierten Bilanzierung von Biogasanlagen als vorteilhaft herausgestellt. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, muss jedoch eine zuverlässige Abschätzung des Brennwertes von Biomassen erfolgen. Da eine detaillierte Analyse sämtlicher Energieflüsse einen instrumentellen und zeitlichen Aufwand zur Folge hat, ist dieser Ansatz für den Anlagenbetreiber nicht selbst durchzuführen (FISCHER et al. 2015). Mit der vorliegenden Studie wird ein weiterentwickelter Ansatz vorgestellt, der als erste Stufe einer kontinuierlichen Betriebskontrolle von Biogasanlagen realisiert werden kann. Zentraler Punkt ist das Verhältnis von Aufwand zum Nutzen, also die Effizienz des Prozesses in Form eines Nutzungsgrades. Die gewonnene Kenngröße charakterisiert das Maß der Nutzenergieauskopplung in einem Nennzeitraum.

Methodisches Vorgehen

Die Biogasanlage wird im rein technologischen Sinne betrachtet. Folglich finden energetische Aufwendungen der vor- und nachgelagerten Prozesse sowie Klimaeffekte, exergetische Bewertungen beziehungsweise die Allokation der chemisch gebundenen Substratenergie auf die Zielenergieströme keine Anwendung. Frühere Untersuchungen verfahren bereits ähnlich, sie beschränken den Bilanzierungsrahmen dabei aber auf den technischen Pfad zur Konversion von Rohbiogas (WEGENER et al. 2007). Damit der Ausnutzungsgrad der eingesetzten Substrate Berücksichtigung findet, umfasst die Systemgrenze (Abbildung 1) alle baulichen und technischen Anlagen, die rein zur Erzeugung und Verwertung des Biogases dienen.

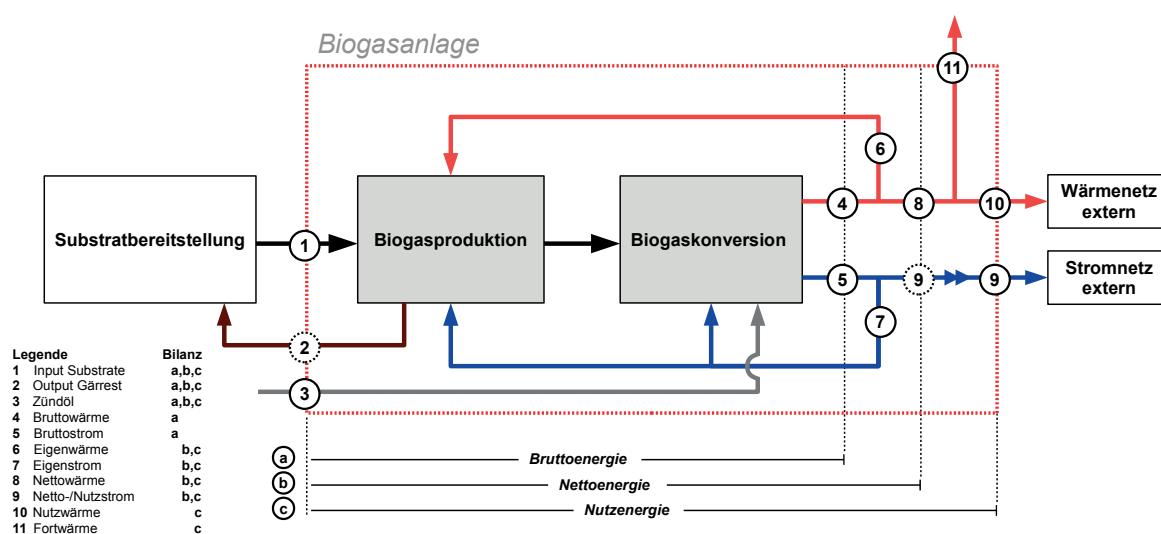


Abbildung 1: Die Bilanzgrenzen des Biogasprozesses bei Bewertung der Brutto-, Netto- und Nutzenergie

In der Energietechnik werden Wirkungsgrade als beschreibende Maßzahl für die Effizienz definiert (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2014). Als Zielenergien einer konventionellen Biogasanlage sind die in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugte elektrische und die thermische Arbeit zu nennen. Als Aufwendung wird die im Substrat gebundene chemische Energie betrachtet, die vereinfachend als kontinuierlicher Energiestrom angenommen wird und somit die Angabe der Substrateistung P_{sub} bezeichnet (FISCHER et al. 2015). Die Substrateistung ist demnach das Produkt aus Substratmassenstrom \dot{m} und dem substratspezifischem Brennwert H_s . Hierbei werden auch Hilfsstoffe der Biogasproduktion wie Rapsöl, Heizöl EL oder Biodiesel berücksichtigt. In diesem Sinne können Substrate und Hilfsstoffe als Primärenergieträger angesehen und entsprechend als Brennstoff bezeichnet werden. Der mittlere Gesamtwirkungsgrad wird als mittlerer Brennstoffausnutzungsgrad $\bar{\omega}$ bezeichnet, welcher als „Quotient aus allen in einem bestimmten Zeitraum nutzbar abgegebenen Energien und der gesamten zugeführten Energie“ definiert ist (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2014) (Gleichung 3). Als „nutzbar abgegeben“ wird nur der Anteil der Energie angesehen, der tatsächlich in das Strom- und Wärmenetz eingespeist wird. Diese Betrachtungsweise weicht von der üblichen Sicht ab, welche die Nettoenergien ohne Berücksichtigung von Eigenbedarf und Grad der Wärmenutzung zur Grundlage nimmt. Der betrachtete Zeitraum schließt alle Pausen-, Stillstands-, Leerlauf-, Anfahr- und Abfahrzeiten mit ein. Als einheitlicher Bezugszeitraum wird nicht die Lebensdauer der Anlage, sondern ein Betriebsjahr

verwendet. Mit dieser Kenngröße ist die Effizienz der Energieumwandlung in der Gesamtanlage bewertbar.

$$\bar{\omega} = \frac{W_{el,netto} + Q_{nutz}}{\sum m_i \cdot H_{S,i}} \quad (\text{Gl. 3})$$

$\bar{\omega}$	mittlerer Brennstoffausnutzungsgrad [-]
$W_{el,netto}$	Nettostrommenge [kWh]
Q_{nutz}	Nettowärmemenge (genutzte Wärmemenge) [kWh]
m_i	Substratmenge [t_{TS}]
$H_{S,i}$	spezifischer Brennwert [kWh/ t_{TS}]

Zur Analyse der energetischen Effizienz im Biogasanlagenbetrieb wird der Brennstoffausnutzungsgrad weiter differenziert. Zunächst wird die Kapazitätzahl K eingeführt (Gleichung 4). Sie wird als Verhältniskennzahl zwischen der Nenn- und der Substrateistung der Inputmaterialien angegeben und ist dimensionslos.

$$K = \frac{P_N + \dot{Q}_N}{\sum \dot{m}_i \cdot H_{S,i}} \quad (\text{Gl. 4})$$

K	Kapazitätzahl [-]
P_N	elektrische Nennleistung [kW]
\dot{Q}_N	thermische Nennleistung [kW]
\dot{m}_i	Massenstrom eines Inputstoffs [t_{TS}/h]
$H_{S,i}$	spezifischer Brennwert eines Inputstoffs [kWh/ t_{TS}]

Die zweite Kennzahl ist die Arbeitsausnutzung, welche das Verhältnis der erreichten Strom- und Wärmeproduktion zur maximal möglichen Energieauskopplung beschreibt. Während die VDI-Richtlinie 4661 die Bruttoenergien zur Berechnung heranzieht, stellt die Arbeitsausnutzung im hier entwickelten Bewertungsansatz das Verhältnis aus tatsächlich zur externen Nutzung abgegebenen Energiemengen zu den theoretisch produzierbaren Zielenergiemengen in einem wählbaren Zeitraum dar. Damit werden nicht nur Teillast- und Stillstandszeiten, sondern auch die im Biogasanlagenbetrieb wichtigen Faktoren Eigenenergiebedarf und externe Wärmenutzung berücksichtigt. Somit kann die Arbeitsausnutzung in dieser Betrachtung mithilfe der Gleichung 5 berechnet werden.

$$n_A = \frac{W_{el,netto} + Q_{nutz}}{(P_N + \dot{Q}_N) \cdot T_N} \quad (\text{Gl. 5})$$

n_A	Arbeitsausnutzung [-]
$W_{el,netto}$	Nettostrom [kWh]
Q_{nutz}	Nettowärme (genutzte Wärme) [kWh]
P_N	elektrische Nennleistung [kW]
\dot{Q}_N	thermische Nennleistung [kW]
T_N	Nennzeit (Kalenderzeit) [a]

Aus dem Produkt von Kapazitätzahl und Arbeitsausnutzung ergibt sich wiederum der mittlere Brennstoffausnutzungsgrad (Gleichung 6).

$$\bar{\omega} = K \cdot n_A \tag{Gl. 6}$$

- $\bar{\omega}$ mittlerer Brennstoffausnutzungsgrad [-]
- K Kapazitätzahl [-]
- n_A Arbeitsausnutzung [-]

Die beschriebene Methodik ermöglicht eine einfache grafische Darstellung der Effizienz. Der Anlagenstatus lässt sich in eine Grafik eintragen, wobei die über dem Koordinatenursprung aufgespannte Fläche den mittleren Brennstoffausnutzungsgrad markiert (Abbildung 2). Ein Wert von $\bar{\omega}_1 = 1$ kann nicht überschritten werden, sodass bei Kapazitätzahlen größer 1 die Arbeitsausnutzung den anti-proportionalen Wert annimmt.

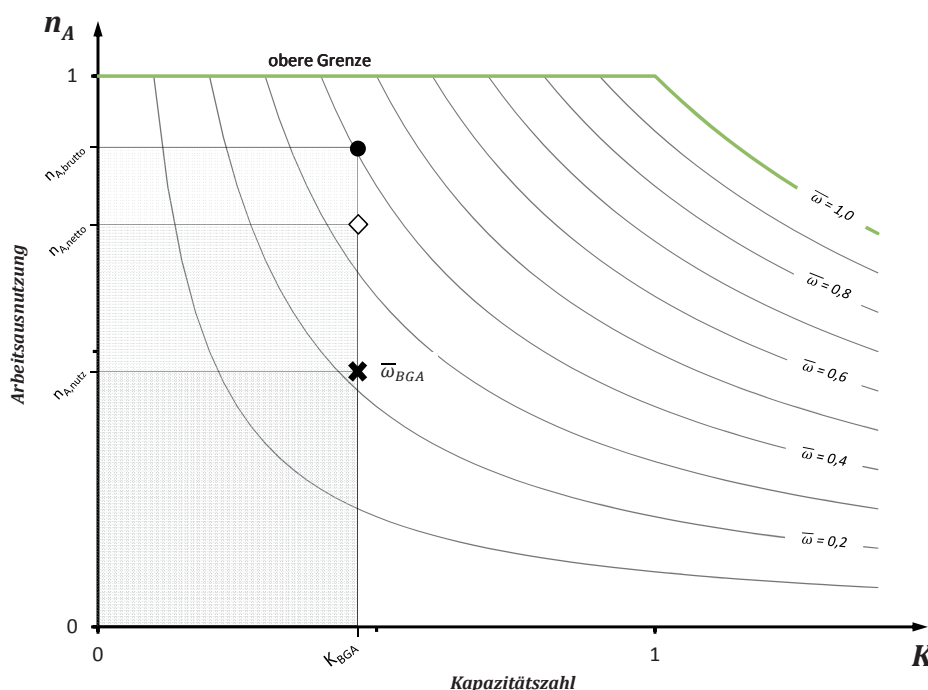


Abbildung 2: Schematische Darstellung des mittleren Brennstoffausnutzungsgrades sowie der Netto- und Bruttoenergieausbeute

Der mittlere Brennstoffausnutzungsgrad wird umso dichter an der Bruttoenergieausbeute liegen, desto geringer die Eigenenergiebedarfe sind und desto höher der Grad der Wärmenutzung ausfällt. Bei unterschiedlicher Kapazitätzahl und Arbeitsausnutzung ist eine Betrachtung der Fläche hilfreich. Eine größere Fläche steht dabei für einen höheren mittleren Brennstoffausnutzungsgrad. In Abbildung 3 ist demnach $\bar{\omega}_1 < \bar{\omega}_2 = \bar{\omega}_3$.

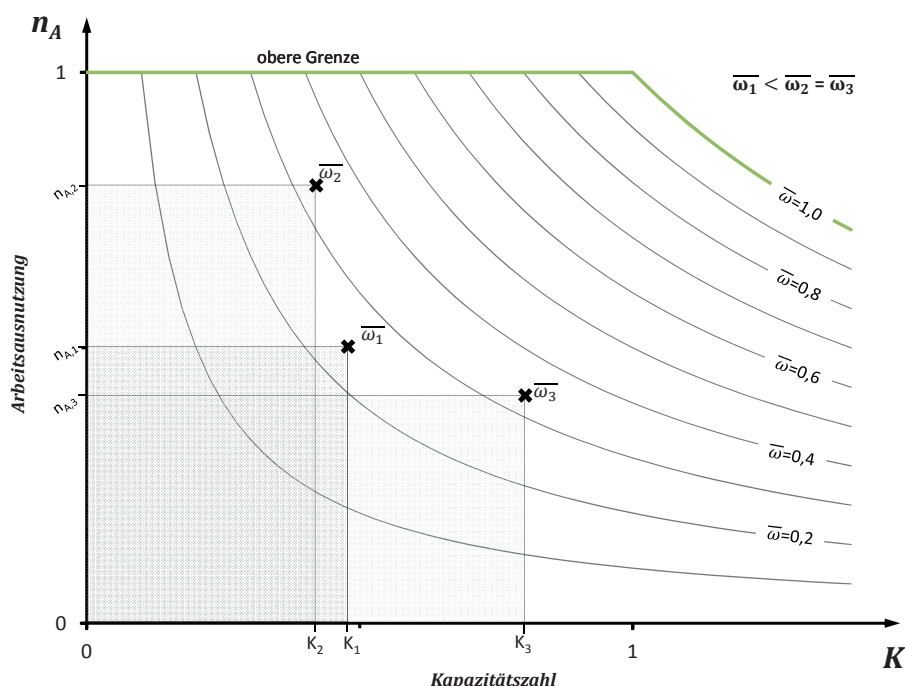


Abbildung 3: Schematische Darstellung des mittleren Brennstoffausnutzungsgrades bei unterschiedlicher Kapazitätzahl und Arbeitsausnutzung

Eine Erhöhung der Kapazitätzahl kann zum Beispiel durch Einsparungen bei den Substraten oder infolge einer Erhöhung der BHKW-Leistung zustande kommen. In der Praxis bestimmt die Arbeitsausnutzung die Änderung des mittleren Brennstoffausnutzungsgrades maßgeblich. Sie kann zum Beispiel durch die Erhöhung der Verfügbarkeit der Anlage, vor allem aber durch eine höhere Abwärmenutzung gesteigert werden.

Korrektur der Kapazitätzahl

Die unterschiedliche Abbaubarkeit von Substraten erschwert den direkten Vergleich von Anlagen. Durch Verwendung des Fermentationsquotienten nach WEISSBACH (2008) kann der mittlere Brennstoffausnutzungsgrad substratspezifisch auf den anaerob nutzbaren Energieanteil eingeschränkt werden. Der Fermentationsquotient definiert den Anteil der anaerob abbaubaren Organik. Das Energiepotenzial der nicht abbaubaren Organik wird mithilfe eines Korrekturfaktors f_{an} vom spezifischen Brennwert des Substrats nach Gleichung 7 abgezogen.

$$H_{s,korr} = f_{an} \cdot H_{s,oTS} \tag{Gl. 7}$$

- $H_{s,korr}$ spezifischer Brennwert [kJ/kg_{FoTS}]
- f_{an} Korrekturfaktor [kg_{FoTS}/kg_{oTS}]
- $H_{s,oTS}$ spezifischer Brennwert [kJ/kg_{oTS}]

Der Korrekturfaktor berechnet sich auf Basis des oTS-bezogenen Brennwertes abzüglich des nicht abbaubaren Anteils nach Gleichung 8. Die nicht abbaubare Fraktion wird vereinfachend als Lignin, mit einem maximalen Brennwert von 25,6 MJ/kg, angenommen (RAVEENDRAN und GANESH 1996, KIENZLE et al. 2001, SHENG und AZEVEDO 2005).

$$f_{an} = \frac{H_{S,oTS} - (1 - FQ) \cdot H_{S,noTS}}{H_{S,oTS}} \quad (\text{Gl. 8})$$

f_{an}	Korrekturfaktor [$\text{kg}_{\text{FoTS}}/\text{kg}_{\text{oTS}}$]
FQ	Fermentationsquotient [-]
$H_{S,oTS}$	spezifischer Brennwert [$\text{kJ}/\text{kg}_{\text{oTS}}$]
$H_{S,noTS}$	spezifischer Brennwert Lignin [$\text{kJ}/\text{kg}_{\text{TS}}$]

Bestimmung von Brennwerten

Die Erhebung von Brennwertdaten erfolgte an landwirtschaftlichen Biogasanlagen der Region Westsachsen. Alle Anlagen werden mit Gülle und nachwachsenden Rohstoffen betrieben. Die Hauptsubstrate stellen vorwiegend Rindergülle und Maissilage dar. Weitere Substrate wie Schweinegülle, Pferdemist, Siloabdeckmaterial und verschiedene Silagen wurden ebenfalls untersucht und in der Zusammenfassung der jeweiligen Stoffklasse berücksichtigt. Die Bestimmung erfolgte mittels Bombenkalorimetrie nach DIN EN 14918 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 2010). Für einige Substrate standen Literaturdaten aus den Biomassedatenbanken Phyllis 2 und BIOBIB zur Verfügung (HOFBAUER 1997, ENERGY RESEARCH CENTRE OF THE NETHERLANDS 2012), die anhand eines empirisch bestimmten, nichtlinearen Modells eine Berechnung des Brennwertes auf der Basis von Elementaranalysen ermöglichten (Gleichung 9). Das Modell stützt sich auf die Anteile für Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff der Trockensubstanz (FRIEDL et al. 2005).

$$HHV = 3.55C^2 - 232C - 2230H + 51.2C \cdot H + 131N + 20,600 \quad (\text{Gl. 9})$$

Zur Bildung von Richtwerten wurden ähnliche Substrate zusammengefasst und verfügbare Daten aus der Literatur ergänzt. Dabei werden die Substrate in die Stoffklassen Exkrememente, Energiepflanzen und Gärsubstrate differenziert. Innerhalb der Stoffklassen können Einzelsubstrate wie zum Beispiel Maissilage selektiert und separat ausgewertet werden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Zusammenstellung von Brennwerten ausgewählter Einzelsubstrate und Stoffklassen anhand eigener Messungen und Literaturdaten

Substrat bzw. Stoffklasse	Anzahl Datensätze/ eigene Messung	Mittlerer Brennwert H_s		Zusätzliche Quellen ³⁾	
		[-]	[kJ/kg _{TS}]		[kJ/kg _{oTS}]
Mais/Maissilage	13/7		18.245 ± 459	18.976 ± 444	1,2,6,7
Getreide/GPS	8/4		18.157 ± 322	20.309 ± 800	1
Rasen/Gras/Grassilage	5/5		18.232 ± 461	20.454 ± 589	1
Energiepflanzen allgemein ¹⁾	32/23		18.215 ± 427	19.518 ± 1.016	1,2,6,7
Rindergülle	8/5		17.216 ± 1.382	22.342 ± 1.603	3,4,5
Rindermist	5/5		17.758 ± 560	21.114 ± 1.026	-
Exkrementen allgemein ²⁾	14/9		17.005 ± 1.638	22.452 ± 1.797	3,4,5
Gärsubstrat	17/15		16.557 ± 1.188	22.478 ± 733	1

¹⁾ Umfasst Einzelproben weiterer Substrate wie Luzernesilage und diverse Futterreste, keine Zuckerrüben.

²⁾ Enthält auch Werte für Schweinegülle.

³⁾ 1 SUTTER (2013)

2 PFEIFER und OBERBERGER (2007)

3 SWEETEN et al. (1986)

4 ANNAMALAI et al. (1987)

5 YOUNG und PIAN (2003)

6 D'JESÚS et al. (2006)

7 HOFBAUER (1997)

Die Stoffklasse Energiepflanzen zeigt eine sehr geringe Schwankungsbreite der Mess- und Literaturwerte. Im Mittel kann der Brennwert für Maissilage mit 18.245 ± 459 kJ/kg_{TS} beziffert werden. Die ebenfalls häufig eingesetzten Substrate Grassilage und Getreide-Ganzpflanzensilage liegen bei Brennwerten von 18.157 ± 322 kJ/kg_{TS} bzw. 18.232 ± 461 kJ/kg_{TS} sehr eng zusammen. Die grafische Darstellung in Abbildung 4 zeigt die unterschiedlichen Mittelwerte und Schwankungsbreiten. Da die Ergebnisse der Brennwertmessungen bei Exkrementen nicht normalverteilt sind und der Mittelwert durch Ausreißer verzerrt werden kann, ist der Medianwert ebenfalls zu beachten.

Unter Berücksichtigung einzelner Proben mit zusätzlichen Substraten wie beispielsweise einer Silage-Schicht zur Abdeckung der übrigen Silage und Luzernesilage ergibt sich für Energiepflanzen allgemein mit 18.215 ± 427 kJ/kg_{TS} ein robuster Richtwert, der gegenüber den Einzelsubstraten keine nennenswerte Abweichung zeigt. Die Schwankungsbreite wird bei der Betrachtung von Rindergülle größer, da die Homogenität der Stoffklasse deutlich geringer ausfällt. Festmist weist ähnliche Brennwerte wie Energiepflanzen auf, die Wertebereiche überschneiden sich deutlich, was sich auf die Anreicherung des Mists mit Stroh und Futterresten zurückführen lässt. Zur Durchführung detaillierter Energieflussanalysen wurden auch Gärsubstrate aus großtechnischen Anlagen und Laborfermentern untersucht (FISCHER et al. 2015). Die erhebliche Schwankungsbreite ist der Verschiedenartigkeit der Substrate und den unterschiedlichen Aschegehalten geschuldet. Der Bezug des Brennwertes auf die organische Trockensubstanz zeigt eine deutliche Zunahme des Brennwertes hin zu den Gärsubstraten. Diese Beobachtung wurde bereits von BORN und CASARETTO (2012) gemacht und für die Bestimmung von Abbaugraden zur ökonomischen Optimierung des Biogasanlagenbetriebs genutzt.

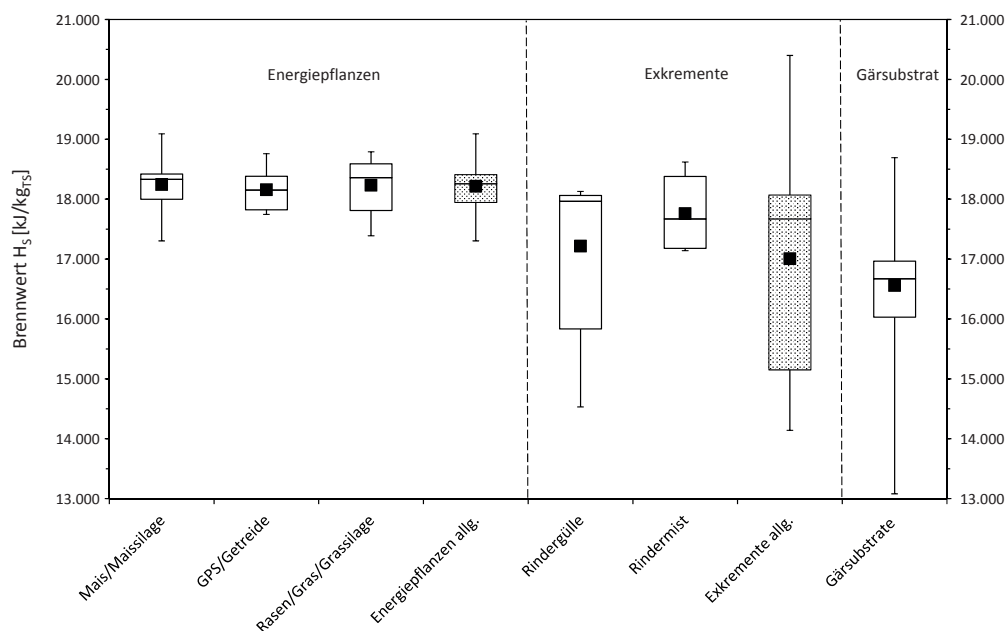


Abbildung 4: Schwankungsbreiten, Medianwerte (Strich in der Box) und Mittelwerte (schwarzer Punkt) der Brennwertdaten bei Bezug auf die Trockensubstanz

Anlagenvergleich

Das Modell des mittleren Brennstoffausnutzungsgrades wird auf vier Biogasanlagen der Region Westsachsen angewendet. Alle Anlagen sind direkt an landwirtschaftliche Betriebe angegliedert und setzen als Hauptsubstrat Rindergülle ein. Als weiteres ertragsbestimmendes Substrat kommt Maissilage zum Einsatz, ferner werden andere Energiepflanzen in veränderlichen Anteilen vergoren. Der Aufbau ist bei drei von vier Anlagen im Prinzip identisch, die Biogaserzeugung besteht aus Hauptfermenter, Nachgärer und Gärrestlager, sie unterscheiden sich hauptsächlich durch Anzahl und Typ der Konversionsaggregate. Die vierte Anlage besteht auf der Produktionsseite aus einem Hauptfermenter, die Gärrestlager sind hier als offene Becken ausgeführt. Die BGA 1 und 2 verfügen über jeweils ein Gas-Otto-BHKW, während BGA 3 und 4 eine Kombination von Zündstrahl- und Gas-Otto-BHKW betreiben. Das eingesetzte Zündöl (Heizöl EL) wird der Substratleistung zugerechnet. Die Zündölanteile an der Stromproduktion betragen im langjährigen Mittel einer untersuchten Anlage (BGA 4) circa 3,5%. Die Anwendung des Berechnungsmodells erfolgt exemplarisch für ein volles Betriebsjahr. Wartungsintervalle, Ausfälle, saisonale Substratumstellungen und Änderungen der Wärmeabnahme wirken sich dementsprechend auf die Kapazitätzahl und die Arbeitsausnutzung aus. Die Berechnung des mittleren Brennstoffausnutzungsgrades erfolgt auf Basis der nutzbar abgegebenen Energien, zudem werden Netto- und Bruttoenergieausbeuten berechnet (Tabelle 2).

Tabelle 2: Biogasanlagenkenndaten sowie Brutto-, Netto- und Nutzenergieauskopplung im Vergleichszeitraum $T_N = 1a$

	Einheit	BGA 1	BGA 2	BGA 3	BGA 4
P_N	[kW]	360	537	550	530
\dot{Q}_N	[kW]	427	452	556	550
P_{sub}	[kW]	2.225	2.098	2.048 ¹⁾	2.248 ¹⁾
$\sum m_{NawaRo}$	[t]	3.600	8.883	7.172	7.363
$\sum m_{Exkremente}$	[t]	35.552	8.460	15.425	10.400
$(P_N + \dot{Q}_N) \cdot T_N$	[kWh]	6.889.930	8.662.465	9.668.560	9.460.800
$W_{el,brutto}$	[kWh]	2.653.853	4.459.743	4.341.640	4.390.713
$W_{el,netto}$	[kWh]	2.343.086	4.137.953	3.977.647	4.039.456
Q_{brutto}	[kWh]	3.122.180	3.747.683	4.377.120	4.556.400
Q_{netto}	[kWh]	2.520.235	2.863.484	3.549.502	3.417.300
Q_{nutz}	[kWh]	1.161.945	37.872	3.291.181	640.634
Bruttoenergieausbeute					
K	[-]	0,35	0,47	0,54	0,48
$n_{A,brutto}$	[-]	0,84	0,95	0,90	0,95
$\bar{\omega}_{brutto}$	[-]	0,296	0,447	0,486	0,454
Nettoenergieausbeute					
K	[-]	0,35	0,47	0,54	0,48
$n_{A,netto}$	[-]	0,71	0,81	0,78	0,79
$\bar{\omega}_{netto}$	[-]	0,249	0,381	0,420	0,379
Nutzenergie – Brennstoffausnutzungsgrad					
K	[-]	0,35	0,47	0,54	0,48
n_A	[-]	0,51	0,48	0,75	0,49
$\bar{\omega}_{BGA}$	[-]	0,180	0,227	0,405	0,238

¹⁾ Zündöleinsatz berücksichtigt.

Die vier Anlagen weisen mittlere Bruttoenergieausbeuten von 0,296 bis 0,486 auf. Es kann also maximal knapp die Hälfte des zugeführten Primärenergiepotenzials in die Zielenergien Strom und Wärme überführt werden. Dabei wird deutlich, dass die BGA 1 mit dem höchsten Gülleanteil die geringste Kapazitätzahl erreicht. Ein Zusammenhang zwischen dem substratabhängigen Biogasertrag und einer niedrigen Kapazitätzahl ist naheliegend, was letztlich den Einsatz hoher Güllemengen in Biogasanlagen systematisch benachteiligt. Der praktische Vergleich der BGA 3 und 4 zeigt aber, dass bei Betrachtung der Bruttoenergieausbeutegrade daraus keine eindeutige Regel abgeleitet werden kann. Die beiden BGA zeigen auch auf, welchen Einfluss der Grad der Wärmenutzung auf den mittleren Brennstoffausnutzungsgrad haben kann. Da die BGA 3 fast die gesamte verfügbare Abwärme abgibt, ist die Differenz zwischen Nettoenergieausbeute und mittlerem Brennstoffausnutzungsgrad sehr gering. Um die Betriebsergebnisse der Anlagen einordnen zu können, wurden insgesamt 12 BGA mit ähnlichem Substratspektrum aus den Biogasmessprogrammen (BMP) gleichermaßen bilanziert. Auswahlkriterien waren die Verfügbarkeit der notwendigen Daten sowie ein möglichst hoher Anteil an Rindergülle und Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen. Die elektrische Nennleistung der Anlagen weist Werte zwischen 48 und 806 kW auf. Für die Anlagen aus dem Messprogramm 1 wurde

keine Nutzwärmemenge dokumentiert, was entsprechende Auswirkungen auf den mittleren Brennstoffausnutzungsgrad hat. Die Ergebnisse der vergleichenden Betrachtung sind Abbildung 5 grafisch dargestellt.

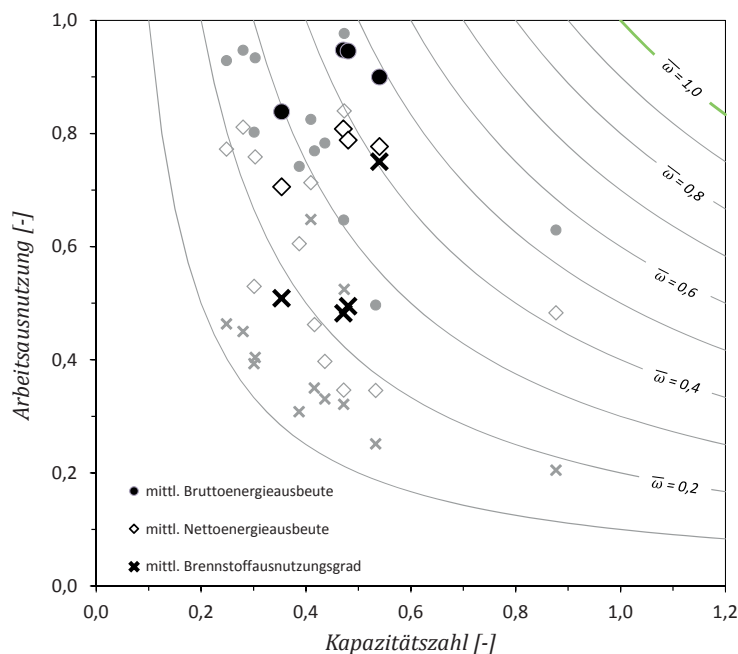


Abbildung 5: Brennstoffausnutzungsgrade der vier untersuchten landwirtschaftlichen Biogasanlagen (schwarz) im Vergleich mit ähnlichen Biogasanlagen der BMP 1 und 2 (grau) (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. 2005, 2009)

Der mittlere Brennstoffausnutzungsgrad der untersuchten landwirtschaftlichen Biogasanlagen beträgt zwischen 0,180 und 0,405, im Vergleich zu 0,119 bis 0,265 bei ähnlichen Anlagen der beiden BMP. Die tendenziell älteren und einfacher konstruierten BGA des ersten Messprogramms weisen durchgehend Brennstoffausnutzungsgrade von weniger als 0,2 auf, obwohl die Brutto-Arbeitsausnutzung teils sehr hohe Werte bis 0,977 annimmt. Hauptsächlich ist dies auf fehlende Wärmenutzungen zurück zu führen. Die mit Gülleanteil betriebenen Anlagen des zweiten Messprogramms zeigen mittlere Brennstoffausnutzungsgrade bis 0,265. Reine NawaRo-Anlagen erreichen auf Basis von Daten von 7 Biogasanlagen aus dem zweiten BMP Werte zwischen 0,232 und 0,348, die Bruttoenergieausbeute kann Werte von 0,598 (BMP 2/51) erreichen. Somit liegen die von uns betrachteten BGA bezüglich des Brennstoffausnutzungsgrades – mit Ausnahme der BGA 3 – im Erwartungsbereich. Das Bild bestätigt sich bei Betrachtung der Kapazitätzahlen, die mit einer Ausnahme im Bereich zwischen 0,25 und 0,53 liegen. Der hohe Wert einer BGA von 0,88 (BMP 1/26) deutet in Kombination mit der geringen Arbeitsausnutzung auf erhebliche technische und biologische Leistungsreserven der Anlage hin. Diese Vermutung wird durch die höchste Bruttoenergieausbeute aller betrachteten BGA von 0,553 gestützt (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. 2005, 2009).

Anaerob nutzbares Energiepotenzial

Für die hier betrachteten Einsatzstoffe liegen die Fermentationsquotienten und die Brennwertdaten vor (Tabelle 3).

Tabelle 3: Fermentationsquotienten nach WEISSBACH (2008) und überschlägige Korrektur des Brennerts auf den anaerob abbaubaren Anteil. Im Falle der Wertebereiche für den Fermentationsquotienten von Mais, GPS und Gras erfolgt die Korrektur auf Basis der oberen Werte (Mindestwerte in Klammern)

Substrat/Stoffklasse	FQ [-]	$H_{s,TS}$ [kJ/kg _{TS}]	$H_{s,oTS}$ [kJ/kg _{oTS}]	f_{an} [-]	$H_{s,korr}$ [kJ/kg _{FoTS}]
Maissilage	(0,78) 0,8	18.245	18.976	0,730	13.322
GPS	(0,68) 0,86	18.157	20.309	0,824	14.953
Rasen/Gras	(0,56) 0,86	18.232	20.454	0,825	15.037
Energiepflanzen allg. ¹⁾	0,77	18.215	19.518	0,698	12.720
Rindergülle	0,5	17.216	22.342	0,427	7.353
Rindermist	0,595	17.758	21.114	0,509	9.038
Exkrememente allg.	0,55	17.005	22.452	0,487	8.280
Nicht abbaubare oTS	-	-	25.600		

¹⁾ Umfasst auch Zuckerrübe, Luzerne und Stroh (Gerste, Weizen).

Die Korrektur der Brennerte bezweckt, dass das Energiepotenzial der tierischen Exkrememente dem Methanpotenzial angepasst wird und somit eine Gleichstellung zwischen Substraten unterschiedlicher Abbaubarkeit bewirkt (Abbildung 6).

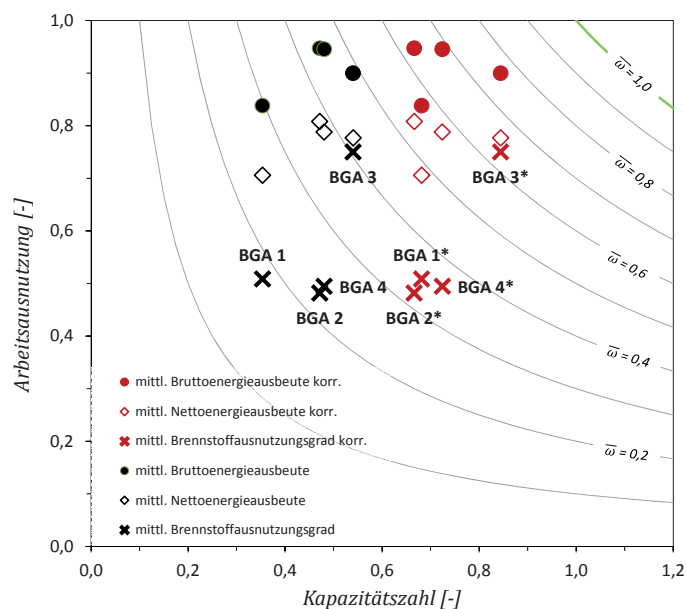


Abbildung 6: Brennstoffausnutzungsgrade der vier untersuchten Anlagen ohne (schwarz) bzw. mit (rot) Korrektur des Brennerts auf den anaerob nutzbaren Anteil

Die Korrektur wirkt sich ausschließlich auf die Kapazitätzahl aus, deren korrigierte Werte zwischen 0,67 und 0,84 betragen. Der Brennstoffausnutzungsgrad der BGA 1 verbessert sich gegenüber den anderen Anlagen mit geringeren Gülleanteilen überdurchschnittlich von 0,180 auf 0,347. Ein direkter Vergleich mit den Anlagen der BMP ist nicht möglich, da für eine substratspezifische Korrektur die Information zu den Trockensubstanzgehalten fehlt.

Diskussion

Die Betrachtung nimmt grundsätzlich den Blickwinkel der energietechnischen Bewertung des Biogasanlagenbetriebs ein, wie sie auch für thermochemische Prozesse beschrieben wurde (WIESE 2007). Da biologische Konversionsprozesse relativ langsam ablaufen, die Mikroorganismen Energie für ihren Stoffwechsel benötigen und grundsätzlich mehr wasserhaltige Brennstoffe verwendet werden, sind Biogasanlagen hinsichtlich des erzielbaren Wirkungsgrades gegenüber anderen Kraftwerkstechnologien tendenziell im Nachteil. Daher sind geringe Brennstoffausnutzungsgrade für bestimmte Substratkonzepte kein Mangel der Technologie und von nachgeordnetem Interesse.

Der Brennwert der Biogassubstrate stellt eine leicht zugängliche und objektive Bewertungsgrundlage für landwirtschaftliche Biogasanlagen dar. Das maximale Potenzial und Tendenzen sind auch für Dritte, die nicht über Kenntnisse zur Biogaserzeugung und -nutzung verfügen, klar erkennbar. Neben der technischen Bedeutung ist der Bezug zu den thermodynamischen Prozessen im Fermenter leicht herstellbar. Gegenüber den üblichen Gasertragsrichtwerten, die zur Auslegung einer Anlage gut geeignet sind, bietet der Brennwert die Chance globale Verluste im Betrieb zu erkennen.

Wird eine Biogasanlage technisch modifiziert, kann der Erfolg der Maßnahme leicht durch die Änderung des Brennstoffausnutzungsgrades überprüft und quantifiziert werden. Eine Sonderstellung nehmen hier Anlagen zur Bereitstellung von Regelenergie ein: Die Kapazitätzahl einer solchen Anlage kann im Gegensatz zum Brennstoffausnutzungsgrad auch Werte annehmen, die deutlich größer als 1 sind.

Die Bestimmung von Brennwerten für landwirtschaftliche Substrate bietet Orientierungswerte, die das Energiepotenzial mit einer hohen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bestimmen. Die Standardabweichung liegt für die nachwachsenden Rohstoffe insgesamt bei 2,34 % und für die tierischen Exkremamente bei 8,13 %. Da für die tierischen Exkremamente eine höhere Abweichung und eine kleinere Grundgesamtheit vorliegen, wird die Bestimmung des Brennwertes im Einzelfall – wie auch für Reststoffe oder Abfälle – empfohlen.

Die von WEISSBACH (2008) etablierte Einteilung der Organik in anaerob nutzbare und nicht nutzbare Fraktionen wird hier auf das Energiepotenzial übertragen. Die Korrektur des Brennwertes wirkt sich nur auf die Kapazitätzahl aus, weswegen substratbedingte Unterschiede bezüglich des Eigenenergiebedarfs nicht ausgeglichen werden.

Mithilfe des hier vorgestellten Modells des Brennstoffausnutzungsgrades sind eine Kontrolle des laufenden Anlagenbetriebs und ein Vergleich zwischen Anlagen möglich, der von den bisherigen agrartechnisch geprägten Bewertungsgrundlagen abweicht. Vorteilhaft ist der Bezug aller Zielenergien und der erfassten Eigenbedarfe auf die zugeführte Substratenergie. Die separate kennzahlbasierte Betrachtung der Gasproduktion und Gasverwertung, wie in verschiedenen anderen Arbeiten praktiziert, wird hier nicht angewendet. Vielmehr wird eine globale Kennzahl ausgewiesen, die den gesamten technologischen Prozess der Biogaserzeugung und -verwertung umschließt. Eine eindeutige Charakterisierung der spezifischen Effizienz der Gasproduktion und Gasverwertung kann der Brenn-

stoffausnutzungsgrad nicht liefern. Hier sind multikriterielle Bewertungsverfahren mit separater Betrachtung von Fermentation und Konversion sowie eine beliebig erweiterbare Skala von Einflussfaktoren im Vorteil. Mit dem von uns vorgestellten Ansatz soll vielmehr eine erste Bestandsaufnahme einer Anlage ermöglicht werden, die den Einsatz von stärker differenzierenden Methoden als weiteren Schritt eines systematischen Vorgehens versteht. Denkbar wäre eine integrierte Verwendung des Brennstoffausnutzungsgrades als ein Bewertungsmaßstab innerhalb anderer Methoden, welche die technische Effizienz um (sozio)ökonomische und ökologische Aspekte ergänzen (BERGLUND und BÖRJESSON 2006, GERIN et al. 2008, MADLENER et al. 2009, PÖSCHL et al. 2010, BORN und CASARETTO 2012, DJATKOV et al. 2014, EFFENBERGER et al. 2014).

Schlussfolgerungen

Die vorgestellte Betrachtung des mittleren Brennstoffausnutzungsgrades von Biogasanlagen stellt ein Konzept vor, welches die globale Bewertung des Biogasanlagenbetriebs durch Verzicht auf biogasspezifische Richtwerte und Verwendung von robusten Kenngrößen vereinfacht. Die in den BMP evaluierten Anlagen erreichen Brennstoffausnutzungsgrade bis 34,8 % bei reiner Energiepflanzenvergärung, gegenüber 18,0 bis 40,5 % bei eigenen Untersuchungen. Für die Bewertung sehr unterschiedlicher Anlagen kann eine Korrektur des Brennwertes mithilfe des Fermentationsquotienten nach Weißbach vorgenommen werden. Im Falle von Repowering-Maßnahmen, die den Eigenenergiebedarf oder die Nutzenergieauskopplung verbessern, kann der dreistufige Bezug auf die Brutto-, Netto und Nutzenergie zu einem fundierten Vergleich genutzt werden. Das am Beispiel der Vor-Ort-Verstromung entwickelte Konzept ist zukunftssicher und gleichermaßen auf Anlagen zur Biomethanbereitstellung wie auch für den flexibilisierten Anlagenbetrieb geeignet.

Literatur

- Annamalai, K.; Ibrahim, M.Y.; Sweeten, J.M. (1987): Experimental Studies on Combustion of Cattle Manure in a Fluidized Bed Combustor. *Journal of Energy Resources Technology* 109(2), pp. 49–57, <http://dx.doi.org/10.1115/1.3231324>
- Berglund, M.; Börjesson, P. (2006): Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas-production. *Biomass and Bioenergy* 30(3), pp. 254–266
- Born, J.; Casaretto, R. (2012): Die theoretischen 100 Prozent geernteter Energie. *BIOGAS Journal* 15(2), S. 88–91
- Deutsches Institut für Normung (2010): Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Heizwertes, Berlin (DIN EN 14918:2010-04), DIN EN 14918:2010-04
- Djatkov, D.; Effenberger, M.; Martinov, M. (2014): Method for assessing and improving the efficiency of agricultural biogas plants based on fuzzy logic and expert systems. *Applied Energy* 134, pp. 163–175, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.021>
- D'Jesús, P.; Boukis, N.; Kraushaar-Czarnetzki, B.; Dinjus, E. (2006): Gasification of corn and clover grass in supercritical water. *Fuel* 85(7–8), pp. 1032–1038, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2005.10.022>
- Eder, B.; Schulz, H. (2007): *Biogas-Praxis. Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit, Stufen bei Freiburg*, Ökobuch-Verlag
- Effenberger, M.; Buschmann, A.; Schober, J.; Djatkov, D. (2014): Webbasierte Schwachstellenanalyse an landwirtschaftlichen Biogasanlagen. *Landtechnik* 69(2), S. 90–96, <http://dx.doi.org/10.1515/lt.2014.177>
- Energy research Centre of the Netherlands (2012): Phyllis 2 - Database for biomass and waste. <https://www.ecn.nl/phyllis2>, Zugriff am 12.05.2015

- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hg.) (2005): Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. Gülzow, Eigenverlag
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hg.) (2009): Biogas-Messprogramm II. 61 Biogasanlagen im Vergleich. Gülzow, Eigenverlag
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hg.) (2013): Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung. Gülzow, Eigenverlag, 6. Aufl.
- Fischer, E.; Postel, J.; Liebetrau, J.; Nelles, M. (2015): Wirkungs- und Nutzungsgrade der landwirtschaftlichen Biogas-erzeugung aus nachwachsenden Rohstoffe und Gülle. VGB PowerTech 95(1/2), S. 68–73
- Friedl, A.; Padouvas, E.; Rotter, H.; Varmuza, K. (2005): Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta* 544(1-2), pp. 191–198, <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2005.01.041>
- Gehrig, S. (2007): Güllefreie Vergärung von Mischsubstraten aus Energiepflanzen am Beispiel der Pilotbiogasanlage Oberrjesa, Göttingen, Sierke
- Gerin, P.A.; Vliegen, F.; Jossart, J.-M. (2008): Energy and CO₂ balance of maize and grass as energy crops for anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 99(7), S. 2620–2627
- Havukainen, J.; Uusitalo, V.; Niskanen, A.; Kapustina, V.; Horttanainen, M. (2014): Evaluation of methods for estimating energy performance of biogas production. *Renewable Energy* (66), pp. 232–240
- Hofbauer, H. (1997): BIOBIB - A Database for biofuels. <http://www.vt.tuwien.ac.at/biobib/>, Zugriff am 04.06.2015
- Kienzle, E.; Schrag, I.; Butterwick, R.; Opitz, B. (2001): Calculation of gross energy in pet foods: new data on heat combustion and fibre analysis in a selection of foods for dogs and cats. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 85(5-6), pp. 148–157, <http://dx.doi.org/10.1046/j.1439-0396.2001.00311.x>
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (Hg.) (2013): Faustzahlen Biogas, Darmstadt, KTBL, 3. Aufl.
- Linke, B.; Mähnert, P.; Heiermann, M.; Mumme, J. (2006): Grundlagen und Verfahren der Biogasgewinnung. In: *Biogas in der Landwirtschaft. Leitfaden für Landwirte und Investoren im Land Brandenburg*. Hg. Energietechnologie Initiative Brandenburg ETI, Potsdam, S. 13–25
- Madlener, R.; Antunes, C. H.; Dias, L. C. (2009): Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research* 197(3), pp. 1084–1094, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.12.051>
- Mähnert, P. (2007): Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle. Dissertation, Humboldt-Universität Berlin
- Mähnert, P.; Linke, B.; Vollmer, G.-R. (2007): Eine Gleichung für die Biogasausbeute. *Erneuerbare Energien* 17(6), S. 78–81
- Mauky, E.; Jacobi, H. F.; Liebetrau, J.; Nelles, M. (2015): Flexible biogas production for demand-driven energy supply – feeding strategies and types of substrates. *Bioresource Technology* 178, pp. 262–269, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.123>
- Mitterleitner, H. (o. J.): Inputmaterialien für die Biogaserzeugung. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Landtechnik, Weihenstephan
- Pfeifer, J.; Obernberger, I. (2007): Technological Evaluation of an agricultural biogas chp plant as well as definition of guiding values for the improved design and operation. In: *From research to market development. 15th European Biomass Conference & Exhibition, proceedings of the international conference held in Berlin, Germany, 7–11 May 2007*, Ed. Maniatis, K., Florence, ETA-Renewable Energies, pp. 1864–1868
- Pöschl, M.; Ward, S.; Owende, P. (2010): Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy* 87(11), pp. 3305–3321
- Raveendran, K.; Ganesh, A. (1996): Heating value of biomass and biomass pyrolysis products. *Fuel* 75(15), pp. 1715–1720
- Reinhold, G. (2005): Genau bilanzieren. Masse- und Trockensubstanzabbau in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. *Neue Landwirtschaft* (12), S. 68–72

- Sheng, C.; Azevedo, J.L.T. (2005): Estimating the higher heating value of biomass from basic analysis data. *Biomass and Bioenergy* 28, pp. 499–507
- Sutter, R. (2013): Analyse und Bewertung der Einflussgrößen auf die Optimierung der Rohbiogasproduktion hinsichtlich der Konstanz von Biogasqualität und-menge. Dissertation, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät Rostock
- Sweeten, J. M.; Korenberg, J.; LePori, W. A.; Annamalai, K.; Parnell, C. B. (1986): Combustion of cattle feedlot manure for energy production. *Energy in Agriculture* 5(1), pp. 55–72, [http://dx.doi.org/10.1016/0167-5826\(86\)90006-9](http://dx.doi.org/10.1016/0167-5826(86)90006-9)
- Symons, G. E.; Buswell, A. M. (1933): The Methane Fermentation of Carbohydrates. *Journal of the American Chemical Society* 55(5), pp. 2028–2036
- Verein Deutscher Ingenieure (2014): Energiekenngrößen – Grundlagen – Methodik. Richtlinie VDI 4661:2014-08, Berlin, Beuth Verlag
- Wegener, J.-K.; Lücke, W.; Heinzemann, J. (2007): Optimaler Verwendungszweck von Biogas unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes in Deutschland. *Agricultural Engineering Research* 13(4), S. 129–140
- Weißbach, F. (2008): Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. *Landtechnik* 63(6), S. 356–358, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2008.880>
- Wiese, L. (2007): Energetische, exergetische und ökonomische Evaluierung der thermochemischen Vergasung zur Stromerzeugung aus Biomasse. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg
- Winterberg, R.; Fischer, E.; Postel, J.; Rensberg, N.; Daniel-Gromke, J.; Stinner, W.; Böker, H. (2012): Empfehlungen zur Auslegung, zum Betrieb und zur Optimierung von Biogasanlagen. Ergebnisse einer Untersuchung in der Altmark. Ergebniskurzfassung des Projekts Repowering landwirtschaftlicher Biogasanlagen in der Altmark, Biederitz/Leipzig/Stendal
- Wirth, B.; Hartmann, S. (2013): Die Bewertung von Wärmenutzungskonzepten für Biogasanlagen. *Landtechnik* 68(3), S. 202–208, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2013.229>
- Young, L.; Pian, C. C. (2003): High-temperature, air-blown gasification of dairy-farm wastes for energy production. *Energy* 28(7), pp. 655–672, [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00004-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00004-5)

Autoren

Elmar Fischer war wissenschaftlicher Mitarbeiter und Arbeitsgruppenleiter am DBFZ, **Jan Postel** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am DBFZ, **Florian Ehrendreich** ist ehemaliger Student der Arbeitsgruppe am DBFZ und **Prof. Dr. mont. Michael Nelles** ist wissenschaftlicher Geschäftsführer des DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrums gGmbH, Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig, E-Mail: jan.postel@dbfz.de.

Hinweise

Die Versuche wurden durch eine Förderung der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FKZ: 22400912) aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft ermöglicht.