

## **Energieeffizienz der Biogasproduktion in den drei Landschaftsräumen Schleswig-Holsteins**

S. Claus<sup>1</sup>, B. Wienforth<sup>2</sup>, A. Techow<sup>1</sup>, R. Quackernack<sup>2</sup>, A. Pacholski<sup>2</sup>, F. Taube<sup>1</sup>, K. Sieling<sup>2</sup>, H. Kage<sup>2</sup>, A. Herrmann<sup>1</sup>

CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL,  
Hermann-Rodewald-Straße 9, 24118 Kiel

<sup>1</sup>INSTITUT FÜR PFLANZENBAU U. -ZÜCHTUNG, GRÜNLAND UND FUTTERBAU/ÖKOL. LANDBAU

<sup>2</sup>INSTITUT FÜR PFLANZENBAU U. -ZÜCHTUNG, ACKER- UND PFLANZENBAU  
sclaus@email.uni-kiel.de

### **1. Einleitung und Problemstellung**

In Deutschland besteht seit Inkrafttreten des "Erneuerbare-Energien-Gesetzes" (EEG) und insbesondere seit dessen Novellierung im Jahr 2004 ein verstärkter Trend zur Installation von Biogasanlagen. Parallel dazu fand eine Ausdehnung des Anbaus von Silomais statt, welcher die Substratbereitstellung dominiert. So wurden im Jahr 2011 bundesweit ca. 600 000 ha Silomais für die Biogasproduktion angebaut. In Schleswig-Holstein umfasste die Gesamt-Silomaisanbaufläche 194.400 ha, wovon ca. 50% für die Biogasproduktion eingesetzt wurden. Der Maisanteil an der Ackerfläche betrug im Landesmittel 29%, regional sind jedoch Werte bis über 70% dokumentiert. Die Nutzung von Grünlandaufwüchsen zur Biogaserzeugung ist in der Praxis von geringer Bedeutung. Potentielle negative Effekte, die aus dem Maisanbau resultieren können, umfassen die Stickstoffauswaschung, Ammoniak- und Lachgas-Emissionen bei der Lagerung und Ausbringung von Gärresten, Bodenerosion und Humusabbau, sowie Verlust an Biodiversität. Daneben ist die Substratproduktion zur Biogaserzeugung häufig durch einen hohen Einsatz an fossilen Brennstoffen gekennzeichnet, wodurch sowohl die Energie- als auch die Treibhausgasbilanz negativ beeinflusst werden. Obwohl in Deutschland verschiedene Studien zur Ökobilanzierung der Biogasproduktion durchgeführt wurden (PLÖCHL et al. 2009, PLÖCHL & SCHULZ 2006, PROCHNOW et al. 2009, WBA 2009, BUTTERBACH-BAHL et al. 2010), stehen Daten für Nord-Deutschland, insbesondere in Bezug auf Energie- und Treibhausgasbilanzen nur in sehr begrenztem Umfang zur Verfügung. Ziel dieser Untersuchung war es daher, Energiebilanzen für die Biogasproduktion in Schleswig-Holstein zu erstellen und aufzuzeigen, welche Energieeffizienzen erzielt werden können, wenn die Bereitstellung der Substrate auf Basis von an Boden- und Klimaverhältnisse angepasste Anbausysteme erfolgt.

### **2. Material und Methoden**

Die Studie basiert auf einem 2-jährigen Feldversuch, der auf drei Versuchsstandorten der Universität Kiel im Rahmen des Verbundprojektes Biogas-Expert durchgeführt wurde: Hohenschulen (HS), Karkendamm (KD) und Blumenkoog (BK). Der Standort Hohenschulen liegt im östlichen Hügelland Schleswig-Holsteins und weist eine durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge von 750 mm auf. Die durchschnittliche Tagestemperatur liegt bei 8,3° C. Der Boden kann als lessivierte Braunerde von lehmiger Sandstruktur klassifiziert werden. Der Standort Karkendamm ist in dem Landschaftsraum Geest angesiedelt. Die jährliche Niederschlagsmenge in liegt

im Mittel bei 760 mm bei einer durchschnittlichen Tagestemperatur von 8,8 °C. Bei dem Boden handelt es sich um einen Gley-Podsol von sandiger Sandstruktur. Der Standort Blumenkoog liegt an der Westküste Schleswig-Holsteins im Landschaftsraum Marsch und weist eine durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge von 830 mm auf. Die durchschnittliche Tagestemperatur liegt bei 8,7 °C. Der Boden kann als Kalkmarsch von schluffig toniger Struktur klassifiziert werden.

Es wurden insgesamt vier Anbausysteme untersucht: Mais-Monokultur (FF1), eine Energiefruchtfolge (FF2) bestehend aus Mais-GPS Winterweizen-Welsches Weidelgras als Zwischenfrucht in Hohenschulen; Mais-Monokultur (FF1) und Deutsches Weidelgras (Ackergras, 4 Schnitte) (FF4) in Karkendamm, sowie Mais-Monokultur (FF1), Mais-GPS Winterweizen-Welsches Weidelgras (FF2) als Zwischenfrucht und Deutsches Weidelgras (Ackergras, 4 Schnitte) (FF4) im Blumenkoog. Hier muss jedoch angemerkt werden, dass im ersten Versuchsjahr am Standort Blumenkoog nicht, wie geplant, Winterweizen sondern ein Sommerweizen etabliert werden musste, da aufgrund ungünstiger Witterungsbedingungen die Vorfrucht Mais nicht zeitgerecht geerntet werden konnte. Neben dem Einfluss der Kulturart wurde der Einfluss von N-Düngertyp und N-Menge auf die Ertragsleistung und Umwelteffekte untersucht. Die verwendeten Düngertypen waren KAS und Biogas-Gärrest aus Kofermentation. Die N-Menge wurde in Abhängigkeit der Kulturart variiert, wobei an den Standorten Hohenschulen und Karkendamm jeweils 0, 120, 240, 360 kg ha<sup>-1</sup> zu Weizen und Mais appliziert wurden, sowie 0, 160, 320, 480 kg ha<sup>-1</sup> (4 Gaben) zu Deutschem Weidelgras. Am Standort Blumenkoog wurden 0,150, 200 kg ha<sup>-1</sup> zu Mais, 0,180, 240 kg ha<sup>-1</sup> zu Sommerweizen, 0, 240, 320 kg ha<sup>-1</sup> zu Winterweizen und 0, 360, 480 kg ha<sup>-1</sup> in vier Gaben zu Deutschem Weidelgras.

Für die Erstellung der Energiebilanz wurde nach HÜLSBERGEN et al. (2001) nur der direkte und indirekte Energieinput in Form von Dieselkraftstoff, Heizöl, Schmierstoffen, Maschinen und Arbeitsgebäuden berücksichtigt. Der Dieserverbrauch basiert auf der Berechnung über multiple Regression unter Berücksichtigung der Feldgröße (20 ha), Bodenart, und Hof-Feld Entfernung (8 km). Die zugrunde liegenden Daten wurden der Datenbank des KTBL (KTBL 2011) entnommen. Da die Konversion zu Biogas ebenfalls in die Energiebilanz eingeht, ist der indirekte Energieaufwand für Lagerungsprozesse in Form von Silobau und Herstellung der PE-Folie mit einbezogen worden. Die Berechnung des Primärenergiebedarfs zur Bereitstellung von landwirtschaftlichen Maschinen erfolgte nach GAILLARD (1997), basierend auf Daten des KTBL (2011) und SCHOLZ (1995). Die Umrechnung zur Ermittlung des indirekten Energieinputs der landwirtschaftlichen Betriebsmittel wurde basierend auf den Werten von CLAUS et al. (2011) durchgeführt.

Für die Konversion zu Biogas wurde ein 500 kW KWK-Kraftwerk mit einer elektrischen Effizienz von 40% und einer thermischen Effizienz von 41.5% angenommen worden. Der Eigenwärmebedarf wurde mit 20% der produzierten Wärme angesetzt und der Eigenenergiebedarf mit 7.5% der produzierten Elektrizität. Die Kalkulation des Energieoutputs (outputel, outputth, Nährstoffe) basiert auf dem Methanbildungspotenzial von Mais, GPS-Weizen und Gras, welche in einem weiteren Teilprojekt des Biogas-Expert Projektes untersucht worden sind. Der Energiegehalt des Outputs wurde über die Umrechnung von Methan in MJ ha<sup>-1</sup> anhand des Heizwertes von Methan (35,9 MJ m<sup>-3</sup>) (KTBL 2006) bestimmt.

Das Verhältnis von N-Input zum gesamten Energieinput bzw. -output wurde für die Standorte Hohenschulen und Karkendamm unter Annahme einer Exponentialfunktion (Energieinput) bzw. einer linear-Plateau Funktion (Energieoutput) ermittelt. Der Nettoenergieoutput wurde für alle Standorte mittels Subtraktion des Inputs vom Gesamtoutput errechnet.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

Der Vergleich der Mais-Monokultur und der Energiefruchtfolge am Standort Hohenschulen, sowie der Mais-Monokultur und dem Deutschem Weidelgras (4-Schnittnutzung) am Standort Karkendamm zeigt eine deutliche Überlegenheit der Mais-Monokultur bezüglich des Energieoutputs von 26.3 bis 52.5 GJ ha<sup>-1</sup> (siehe Tab. 1). Dies kann auf die höheren Trockenmasseerträge des Maises zurückgeführt werden. Einschränkend muss angemerkt werden, dass der Winterweizen in der Fruchtfolge auf Hohenschulen im ersten Versuchsjahr Vorfruchtbedingt einen Minderertrag erzielte. Für den Standort Blumenkoog belegt der Vergleich der Anbausysteme eine ähnliche Situation. Der Energieoutput der Maismonokultur liegt jedoch mit Werten von 108,9 GJ ha<sup>-1</sup> für KAS und 105,4 GJ ha<sup>-1</sup> für den Gärrest um 12 bis 31 GJ ha<sup>-1</sup> unter den im Hügelland bzw. in der Geest erzielten Erträge. Dies kann auf die für den Mais ungünstigeren Standortbedingungen in der Marsch zurückgeführt werden, bedingt durch eine langsamere Erwärmung des Bodens im Frühjahr, periodisch auftretende Frühjahrstrockenheiten sowie Phasen mit Staunässe in der späten Vegetationsperiode. Zusätzlich ist anzumerken, dass an diesem für den Maisanbau marginalen Standort, der Mais ein deutlich erhöhtes Ertragsrisiko aufweist. Der Versuch wurde insgesamt über 4 Jahre (2008-2011) durchgeführt, von denen jedoch nur zwei Jahre (2009-2010) in die Ökobilanzierung einfließen. Im Jahr 2008 war ein kompletter Ertragsverlust für den Mais zu verzeichnen, bedingt durch eine starke Frühjahrstrockenheit, welche das Auflaufen des Maises stark einschränkte. Die Mais-Weizen-Gras Fruchtfolge erzielte einen deutlich geringeren Energieoutput im Vergleich zur Mais-Monokultur. Dies ist hauptsächlich darin begründet, dass im Herbst 2008 witterungsbedingt kein Winterweizen etabliert werden konnte und der Sommerweizen einen deutlich geringeren Ertrag aufwies, was ebenfalls ein höheres Ertragsrisiko für dieses Anbausystem belegt. Darüber hinaus konnte standortbedingt das Welsche Weidelgras nur über einen Herbstschnitt genutzt werden. Im Gegensatz zur Maismonokultur war das Ackergras in der Marsch im Vergleich zur Geest durch eine höhere Ertragsleistung bei gleichzeitig hoher Ertragsstabilität gekennzeichnet. An allen Standorten wies das über Gärrest versorgte Ackergras einen deutlich geringeren Energieoutput auf als die mineralisch gedüngte Variante, was durch höhere NH<sub>3</sub>-Emissionen (Quakernack et al., 2011) und geringere N-Düngewirkung des Gärrestes im Gras zu erklären ist. Der Vergleich von Mais-Monokultur und Deutschem Weidelgras (4-Schnittnutzung) am Standort Blumenkoog zeigt, wie am Standort Karkendamm, eine deutliche Überlegenheit der Mais-Monokultur bezüglich des Energieoutputs von 10 bis 41 GJ ha<sup>-1</sup> (siehe Tab. 1). Dies kann auf die relativ hohen Trockenmasseerträge des Maises und eine höhere spezifische Methanausbeute zurückgeführt werden, und ist in der Gärrestvariante zusätzlich durch die geringere N-Düngewirkung des Gärrestes bedingt.

**Tab. 1:** Energieoutput, -input und Nettoenergiegewinn ( $\text{GJ ha}^{-1}$ ) bei dem für Maximierung von Ertrag und Nettoenergiegewinn erforderlichen N-Input (N-Opt.;  $\text{kg N ha}^{-1}$ )

Anbau-system	Stand-ort	KAS				Gärrest			
		N-Opt.	Ener-gieOut-put	Energie Input	Netto-Energie	N-Opt.	Ener-gieOut-put	Energie Input	Netto-Energie
		$\text{kg N ha}^{-1}$	$\text{GJ ha}^{-1}$	$\text{GJ ha}^{-1}$	$\text{GJ ha}^{-1}$	$\text{kg N ha}^{-1}$	$\text{GJ ha}^{-1}$	$\text{GJ ha}^{-1}$	$\text{GJ ha}^{-1}$
FF1	HS	148	133,0	38,5	94,5	132	136,3	34,8	101,5
FF2	HS	231	112,8	46,9	65,9	268	117,7	42,7	75,0
FF1	KD	142	121,0	33,5	87,5	246	125,7	32,2	93,5
FF4	KD	290	99,0	42,3	56,7	336	69,6	28,8	40,8
FF1	BK	150	108,9	32,5	76,4	152	105,4	26,8	78,6
FF2	BK	230	98,8	36,6	62,1	245	85,1	27,8	57,3
FF4	BK	360	98,5	43,2	55,2	360	64,5	26,4	38,1

Bei Betrachtung des Energieinputs für den Standort Blumenkoog zeigt sich, dass die Energiefruchtfolge und das Deutsche Weidelgras höhere Werte aufweisen als die Mais-Monokultur. Dies liegt darin begründet, dass Mais insgesamt weniger Feldarbeitsschritte und einen geringeren N-Input als Weizen und Gras erforderte. Der Vergleich der N-Düngertypen (KAS und Biogas-Gärrest) zeigt an allen Standorten für den Energieinput relativ geringe Unterschiede. Generell verursacht eine mineralische N-Versorgung jedoch einen höheren Energiebedarf. Der Grund hierfür liegt in der Herstellungsenergie, die für die verschiedenen Düngertypen aufgewendet werden muss, und welche für den Gärrest mit  $11,6 \text{ MJ m}^{-1}$  (HÄUSSERMANN & DÖHLER 2010) deutlich geringer ist als für KAS mit  $39,65 \text{ MJ kg}^{-1}$  (PATYK & REINHARDT 1997).

Aus den für Energieout- und -input getroffenen Ausführungen folgt, dass bezüglich des Nettoenergieoutputs die Maismonokultur im Hügelland und in der Geest für beide Düngevarianten eine Überlegenheit zu den anderen untersuchten Anbausystemen aufweist. Auch in der Marsch weist die Maismonokultur in den beiden Versuchsjahren eine höhere Vorzüglichkeit als die Fruchtfolge ( $\Delta 15\text{-}20 \text{ GJ ha}^{-1}$ ) und das Gras auf. Selbst unter der Annahme, dass im ersten Versuchsjahr anstatt des Sommerweizens ein Winterweizen etabliert worden wäre, bleibt der Nettoenergieertrag der Fruchtfolge hinter der Maismonokultur zurück. Neben dem Nettoenergieoutput kann die Effizienzbewertung der Energieerzeugung aus Biogas auch über das Verhältnis von Energieoutput zu -input erfolgen. Für die untersuchten Standorte und Anbausysteme variierte das Output/Input-Verhältnis von 2,2 (Grünland, BK, KAS) bis 3,9 (Maismono, alle Standorte, Gärrest). Maismonokultur sowie Gärrestdüngung resultierten bei gegebenem Standort jeweils in der höchsten Energieeffizienz.

#### 4. Schlussfolgerungen

Der Nettoenergieertrag sowie das Energieoutput/-input Verhältnis dokumentieren einen deutlichen Effekt von Standort, Anbausystem und N-Düngeform. Eine Ausschöpfung des Energieertragspotentials alleinig mittels Nährstoffversorgung über Gärrest, im Sinne geschlossener Nährstoffkreisläufe, ist für verschiedene Anbausysteme nicht möglich, wie beispielsweise die Ergebnisse für das Ackergras sowie die Energiefruchtfolge am Standort Blumenkoog belegen. Ein Einsatz mineralischer N-

Düngung erhöht zwar den Energieinput, kann aber über den positiven Ertragseffekt auf das Gras überkompensiert werden. Dies verschärft jedoch die N-Problematik in Regionen mit hoher Anlagendichte.

Eine umfassende Bewertung von Anbausystemen im regionalen Kontext erfordert daher die Berücksichtigung weiterer Umweltwirkungen, wie die Klimawirksamkeit, das Eutrophierungs- und Versauerungspotential. In einem nächsten Schritt wird basierend auf den hier präsentierten Ergebnissen und unter Berücksichtigung der in den Versuchen quantifizierten Lachgasemission eine CO<sub>2</sub>-Bilanz angefertigt, um daraus folgend Rückschlüsse auf das CO<sub>2</sub>-Minderungspotential der untersuchten N-Düngelformen und Anbausysteme zu ziehen.

## Literatur

- BUTTERBACH-BAHL, K., LEIBLE, L., KÄLBER, S., KAPPLER & KIESE, G.R. (2010): Treibhausgasbilanz nachwachsender Rohstoffe - Eine wissenschaftliche Kurzdarstellung.
- CLAUS, S., WIENFORTH, B., SIELING, K., KAGE, H., TAUBE F. & HERRMANN, A. (2011): Energiebilanz im Lebenszyklus der Biogasproduktion aus Energiepflanzen unter den Anbaubedingungen Schleswig-Holsteins. In: Kalzendorf, C. & Riehl, G. (ed.): Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, Band 12, 128-133.
- GAILLARD, G., HAUSHEER, J. & CRETTEAZ, P. (1997): Umweltinventar der landwirtschaftlichen Inputs im Pflanzenbau. Daten für die Erstellung von Energie- und Ökobilanzen der Landwirtschaft. FAT Schriftenreihe 46, Tech. Rep., Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwissenschaft und Landwirtschaft, Tänikon, Ettenhausen, 1997.
- HÜLSBERGEN, K., FEIL, B., BIERMANN, S., RATHKE G., KALK W. & DIEPENBROCK W. (2001): A method of energy balancing in crop production and its application in a long term fertilizer trial. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 86, 303-321.
- KTBL (2011): KTBL-Datenbank Kalkulationsdaten: Pflanzenproduktion, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL). URL <http://www.ktbl.de>.
- KTBL (2006): Energiepflanzen. Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL). Darmstadt.
- PLÖCHL, M., HEIERMANN, M., LINKE, B. & SCHELLE, H. (2009): Biogas Crops Part II: Ecological Benefit of Using Field Crops for Anaerobic Digestion, *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal* XI (1086).
- PLÖCHL, M. und SCHULZ, M. (2006): Ökologische Bewertung der Biogaserszeugung und -nutzung, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg, Potsdam-Bornim, 3. überarbeitete Auflage, 49–52.
- PROCHNOW, A., HEIERMANN, M., PLÖCHL, M., LINKE, B., IDLER, C., AMON, T. & HOBBS, P. J. (2009): Bioenergy from permanent grassland – a review: 1. Biogas. *Bioresource Technology* 100, 4931–44.
- QUAKERNACK, R., PACHOLSKI, A., TECHOW, A., HERRMANN, A., TAUBE, F. & KAGE, H. (2011): Ammonia volatilization and yield response of energy crops after fertilization with biogas residues in a coastal marsh of Northern Germany. *Agriculture, Ecosystems and Environment*.  
Doi:10.1016/j.agee.2011.05.030.
- SCHOLZ, V. (1995): Energiebilanz für Festbrennstoffe. Forschungsbericht , 95/3, Tech. Rep., ATB Potsdam-Bornim, 1995.
- WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT AGRARPOLITIK BEIM BMELV (WBA) (2009): Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung -Empfehlungen an die Politik, Tech. Rep. November, 2007.