

# **Energiebilanz im Lebenszyklus der Biogasproduktion aus Energiepflanzen unter den Anbaubedingungen Schleswig-Holsteins**

S. Claus<sup>a</sup>, B. Wienforth<sup>b</sup>, K. Sieling<sup>b</sup>, H. Kage<sup>b</sup>, F. Taube<sup>a</sup> und A. Herrmann<sup>a</sup>

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hermann-Rodewald-Straße 9, D-24118 Kiel <sup>a</sup>Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Abt. Grünland u. Futterbau/ Ökologischer Landbau

<sup>b</sup>Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Abt. Acker- und Pflanzenbau

## **Einleitung und Problemstellung**

Die Biogasproduktion in Deutschland basiert im Wesentlichen auf der Grundlage von Mais und zeigt im Verlauf der letzten Jahre einen zunehmenden Trend zu Großanlagen. Im Bundesland Schleswig-Holstein lag die Zahl der Biogasanlagen zuletzt bei ca. 500 mit einer installierten elektrischen Gesamtleistung von 125 MW (FACHVERBAND BIOGAS, 2010), ein Trend der durch das im Jahr 2009 novellierte Erneuerbare-Energien Gesetz weiter gefördert wurde. Aufgrund möglicher Umweltwirkungen wie beispielsweise Stickstoffauswaschungen, Ammoniak- und Lachgas-Emissionen sowie einem hohen Einsatz an fossiler Energie zur Energiepflanzenproduktion wurde in jüngerer Zeit jedoch auch Kritik laut. Die gestiegene Anlagendichte und -größe führt zu längeren Transportwegen für Gärsubstrate und Gärreste und kann daher aufgrund des erhöhten Ausstoßes von Treibhausgasen (THG) negative Auswirkungen auf das Klima haben. Zusätzlich befindet sich ein Großteil der in Schleswig-Holstein angesiedelten Bioagasanlagen in der hohen Geest, wo aufgrund der leichten, sandigen Böden ein hohes Nitratauswaschungspotential besteht.

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 begrenzt zur Verfügung. Ziel der vorliegenden Studie war es daher, in einem ersten Schritt eine Energiebilanzierung für die Biogasproduktion in Schleswig-Holstein in Abhängigkeit von Fruchtfolge sowie N-Düngerart und -menge für die gesamte Prozesskette von Pflanzenproduktion über Ernte, Transport und Konversion zu Biogas durchzuführen und zu bewerten.

## Material und Methoden

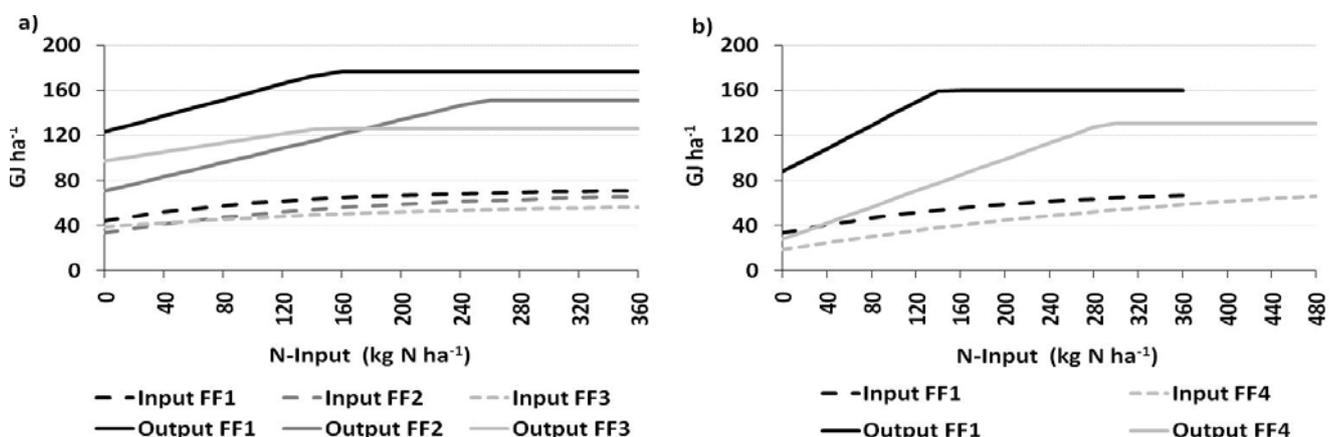
Die Studie basiert auf einem 2-jährigen Feldversuch, der auf zwei Versuchsgütern der Universität Kiel (Hohenschulen (HS) und Karkendamm (KD)) im Rahmen des Verbundprojektes Biogas-Expert durchgeführt wurde: Die Niederschlagsmenge in Hohenschulen liegt im jährlichen Mittel bei 750 mm, die durchschnittliche Tagestemperatur liegt bei 8,3 °C. Der Boden kann als lessivierte Braunerde (Ss) klassifiziert werden. Die jährliche Niederschlagsmenge in Karkendamm liegt im Mittel bei 844 mm mit einer Jahresmitteltemperatur von 8,3 °C. Dieser Boden kann als Gley-Podsol (Sl) klassifiziert werden. Insgesamt wurden vier Fruchtfolgen untersucht: Mais-Monokultur, Mais - GPS-Weizen - Welsches Weidelgras, Mais -Winterweizen -Senf am Standort Hohenschulen; sowie Mais-Monokultur und Deutsches Weidelgras in 4-Schnitt-Nutzung in Karkendamm. Neben dem Einfluss der Fruchtfolge wurde der Einfluss von N-Düngertyp und -menge auf die Methanausbeute analysiert: KAS und Biogas-Gärrest aus Kofermentation wurden in Hohenschulen und Karkendamm ausgebracht, sowie zusätzlich Schweinegülle in Hohenschulen und Rindergülle in Karkendamm. Die N-Menge wurde in Abhängigkeit der Kulturart variiert, wobei jeweils 0, 120, 240, 360 kg ha<sup>-1</sup> auf zwei Gaben verteilt zu Weizen und Mais gegeben wurden, sowie 0, 160, 320, 480 kg ha<sup>-1</sup> auf vier Gaben zu Deutschem Weidelgras.

Für die Erstellung der Energiebilanz ist nach HÜLSBERGEN et al. (2001) nur der direkte und indirekte Energieinput in Form von Dieselkraftstoff, Heizöl, Schmierstoffen, Maschinen und Arbeitsgebäuden berücksichtigt worden. 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 ist nach GAILLARD (1997) basierend auf Daten des KTBL (2011) und SCHOLZ & KAULFUß (1995) erfolgt. Die Umrechnung zur Ermittlung des indirekten Energieinputs der landwirtschaftlichen Betriebsmittel wurde mit Hilfe der folgenden Umrechnungsfaktoren durchgeführt: Diesel und Schmieröl 42 MJ l<sup>-1</sup> (GAILLARD ET AL. 1997), Mineraldünger (KAS) 39,65 MJ kg<sup>-1</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 11,45 MJ kg<sup>-1</sup>, K<sub>2</sub>O 8,23 MJ kg<sup>-1</sup> (PATYK & REINHARDT 1997), Kalk 1,8 MJ kg<sup>-1</sup> (KALK ET AL. 1995), Gülle und Biogas Gärrest 11,6 MJ m<sup>-3</sup> (HÄUSSERMANN & DÖHLER 2010), Herbizide 288 MJ kg<sup>-1</sup> (GREEN 1987), Saatgut Gras 12,2 MJ kg<sup>-1</sup>, Saatgut Senf 8,4 MJ kg<sup>-1</sup> (VDLUFA 2001), Saatgut Weizen 4,5

MJ kg<sup>-1</sup>, Saatgut Mais 3,4 MJ kg<sup>-1</sup> (DIEPENBROCK ET AL. 1997), Silofolie 8,4 MJ m<sup>-2</sup>, Silo 4200 MJ m<sup>2</sup> (SCHOLZ & KAULFUß 1995). Für die Konversion zu Biogas wurde ein 500 kWh KWK-Kraftwerk mit einer elektrischen Effizienz von 40% und einer thermischen Effizienz von 41.5% angenommen. Der Eigenwärmebedarf wurde mit 20% der produzierten Wärme angesetzt und der Eigenenergiebedarf mit 7.5% der produzierten Elektrizität. Die Berechnung des Energieoutputs (output<sub>el</sub>, output<sub>th</sub>, Nährstoffe) basiert auf dem Methan-Bildungspotenzial von Mais, GPS-Weizen und Gras, welche in einem früheren 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)) ermittelt. Die Analyse der Beziehung zwischen N-Input und Energieinput bzw. -output wurde mittels der Prozedur NLIN des Statistikprogrammpaketes SAS Version 9.2 (SAS Institute, Cary, NC) unter Annahme einer Exponentialfunktion für den Input und einer linear-Plateau Funktion für den Output durchgeführt. Die Ermittlung des Nettoenergieoutputs erfolgte über die Subtraktion des Inputs vom Output.

## Ergebnisse und Diskussion

Der Vergleich zwischen den Fruchtfolgen Mais-Monokultur (FF1), Mais – GPS-Weizen – Welsches Weidelgras (FF2) und Mais – Weizen – Senf (FF3) auf dem Standort Hohenschulen (HS), sowie zwischen Mais-Monokultur und Deutschem Weidelgras in 4-Schnitt-Nutzung (Abb. 1 a & b) zeigt, dass Mais-Monokultur einen deutlich höheren Energieoutput aufweist als die anderen geprüften Fruchtfolgen. Dies kann auf die höheren Trockenmasseerträge von Mais zurückgeführt werden.

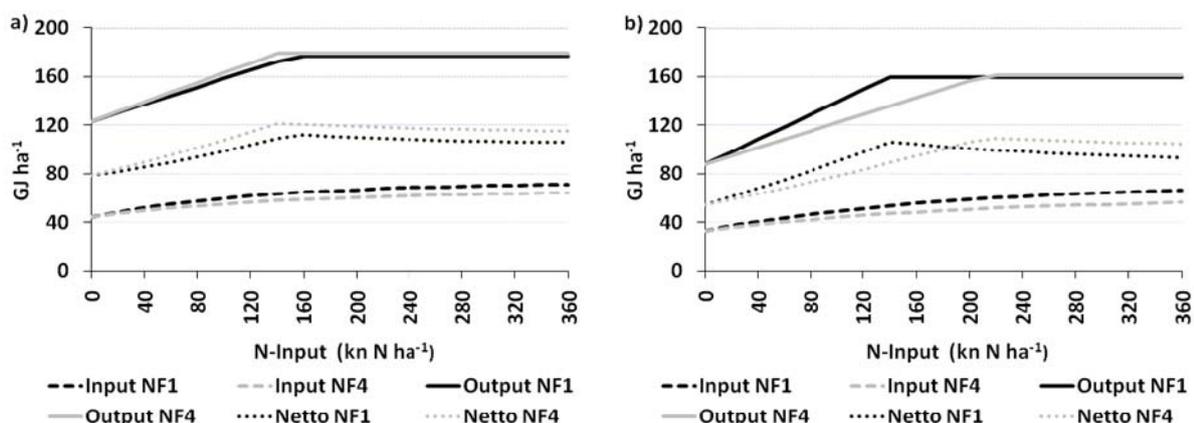


**Abb. 1:** Beziehung zwischen N-Input (kg N ha<sup>-1</sup>) und Energieoutput (GJ ha<sup>-1</sup>) bzw. Energieinput (GJ ha<sup>-1</sup>) in Abhängigkeit der Fruchtfolge, bei Düngung mit KAS. FF1 = Mais-Monokultur, FF2 = Mais-GPS-Weizen–Welsches Weidelgras, FF3 = Mais–Weizen–Senf, FF4 = Grünland in 4-Schnitt-Nutzung, a) = Standort Hohenschulen, b) = Standort Karkendamm.

**Tab. 2:** Nettoenergiegewinn (Netto; GJ ha<sup>-1</sup>) und Input/Output-Verhältnis (In/Out) bei dem für Ertragsmaximierung erforderlichen N-Input (N-Optimum; kg N ha<sup>-1</sup>) für FF1 = Mais-Monokultur, FF2 = Mais-GPS-Weizen–Welsches Weidelgras, FF3 = Mais– Weizen–Senf, FF4 = Grünland in 4-Schnitt-Nutzung bei Düngung mit KAS und Gärrest.

Fruchtfolge	Standort	N-Optimum KAS	Netto KAS	In/Out KAS	N-Optimum Gärrest	Netto Gärrest	In/Out Gärrest
FF1	HS	151	112,6	2,8	140	121,5	2,1
FF2	HS	255	89,1	2,4	328	102,7	2,8
FF3	HS	145	76,5	2,5	381	76,3	2,6
FF1	KD	140	106	3,0	211	109,6	3,1
FF4	KD	289	77,8	2,5	569	75,2	2,4

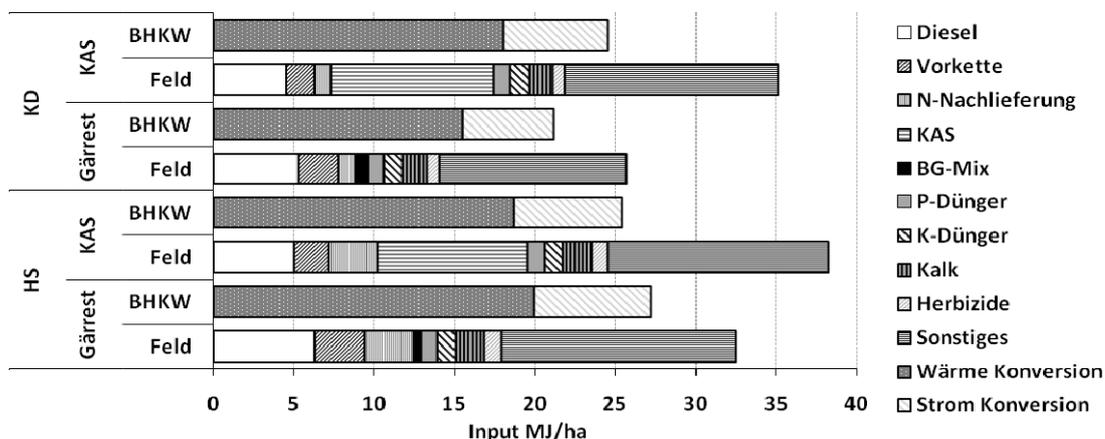
Bei Betrachtung des Energieinputs wird deutlich, dass die Fruchtfolgen FF2, FF3 und FF4 leicht höhere Werte aufweisen als FF1. Dies hat auf die Nettoenergiebilanz jedoch keinen Einfluss, da der Energieoutput nicht durch den Input überkompensiert wird, und FF1, wie schon beim Output, in allen Düngeregimen (KAS und Düngung mit Gärrest) auch bei der Nettoenergie die höchsten Erträge erzielt (Tab. 2), was auch mit den Ergebnissen von GERIN ET AL. (2008) übereinstimmt. Der an allen Standorten höhere Input für FF1 lässt sich mit dem Eigenwärme- und Eigenenergiebedarf bei der Konversion zu Biogas begründen. Dieser leitet sich vom Output ab, und ist für FF1 deutlich höher als für die anderen Fruchtfolgen. In der Bilanz wird er jedoch dem Energieinput zugerechnet, was einen höheren Input für FF1 zur Folge hat. Nichtsdestotrotz ist das Input/Output-Verhältnis mit Werten von 2,4–3,1 deutlich positiv, wie auch bei EDER ET AL. (2009) beschrieben. Der Vergleich der N-Düngertypen (KAS und Gärrest) zeigt für die mineralisch gedüngten Varianten einen tendenziell höheren



**Abb. 2:** Beziehung zwischen N-Input (kg ha<sup>-1</sup>) und Energieoutput (GJ ha<sup>-1</sup>), Energieinput (GJ ha<sup>-1</sup>) bzw. Nettoenergiegewinn in Abhängigkeit der N-Form für Mais-Monokultur (FF1). NF1 = KAS, NF2 = Gärrest aus Kofermentation, a) = Standort Hohenschulen b) = Standort Karkendamm

Energieinput auf (Abb. 2a & b). Deutlich wird jedoch, dass der Input bei KAS (NF 1) höhere Werte aufweist als für den Gärrest (NF2). Dies ist in dem hohen Energiebedarf für die Herstellung des mineralischen N-Düngers begründet (Abb. 3).

Dies spiegelt sich auch in der Nettoenergiebilanz (Abb. 2) wieder, welche eine höhere Vorzüglichkeit für Gärrest aufzeigt, jedoch nur in Hohenschulen. Am Standort Karkendamm resultiert Gärrestapplikation in einem höheren Nettoenergiegewinn als Mineraldüngung, jedoch ist das Düngeroptimum der Mineraldüngung mit  $140 \text{ kg N ha}^{-1}$  deutlich niedriger als das von Gärrest mit  $211 \text{ kg N ha}^{-1}$ .



**Abb. 3:** Komponenten des Inputs für FF1. Dargestellt für Feldarbeit (Feld) und Konversion zu Biogas (BHKW) auf den Standorten Hohenschulen (HS) und Karkendamm (KD).

### Schlussfolgerungen

Der Nettoenergieertrag differiert unter Berücksichtigung des Düngeroptimums zwischen den verschiedenen Düngerformen von  $75,2 - 112,6 \text{ GJ ha}^{-1}$ . Der Einsatz von Mineraldünger hat einen deutlichen Einfluss auf den Energieinput und damit den Nettoenergiegewinn. Der Effekt der Fruchtfolge auf den Nettoenergieertrag ist weniger deutlich ausgeprägt. Die Untersuchung dokumentiert weiterhin ein geringeres N-Düngeroptimum für die Mais-Monokultur und damit auch ein günstigeres Input/Output-Verhältnis. In einem nächsten Schritt wird ableitend aus diesen Ergebnissen und unter Berücksichtigung der Lachgasemission eine  $\text{CO}_2$ -Bilanz angefertigt, um daraus folgend Rückschlüsse auf das  $\text{CO}_2$ -Minderungspotential der untersuchten N-Düngerformen und Fruchtfolgen zu ziehen.

### Literatur

BUTTERBACH-BAHL, K., LEIBLE, L., KÄLBER, S., KAPPLER, KIESE, G. R. (2010): Treibhausgasbilanz nachwachsender Rohstoffe - Eine wissenschaftliche Kurzdarstellung.

- DIEPENBROCK W., PELZER B., RADTKE J. (1995): Energiebilanz im Ackerbaubetrieb. Arbeitspapier 211. KTBL- Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GMBH, Münster-Hiltrup.
- EDER B., PAPST C., DARNHOFER B., EDER J., SCHMID H., HÜLSBERGEN K.J. (2009): Energie- und CO<sub>2</sub>- Bilanz für Silomais zur Biogaserzeugung vom Anbau bis zur Stromeinspeisung. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (ed.): Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009 - Band 3, Freising, 717-719.
- FACHVERBAND BIOGAS E.V. (2010): Biogas Branchenzahlen 2010, URL [http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE Branchenzahlen](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE%20Branchenzahlen).
- GAILLARD, G., HAUSHEER, J., CRETTEZ, 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.
- GERIN P., Vlieggen F., JOSSART J. (2008): Energy and CO<sub>2</sub> balance of maize and grass as energy crops for anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 99, 2620-2627.
- GREEN, M. (1987): Energy in pesticide manufacture, distribution and use. In: Hensel, Z.R. (ed.), Energy in Plant Nutrition and Pest Control. Elsevier, Amsterdam, 165–177.
- HÄUSSERMANN U., DÖHLER H. (2010): Modellierung von Kohlenstoffdioxid-, Lachgas-, und Methanemissionen, Energieaufwand und Kosten verschiedener Düngestrategien. In: KTBL (ed.): Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden. KTBL-Schrift 483, Darmstadt, S. 221-228
- 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.
- KALK, W. D., BIERMANN, S., HÜLSBERGEN, K. J. (1995): Standort und betriebsbezogene Stoff- und Energiebilanzen zur Charakterisierung der Landnutzungsintensität. Forschungsbericht 1995/10 des Institutes für Agrartechnik Bornim e.V.
- 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.
- PATYK, A., REINHARDT, G. A. (1997) Düngemittel-, Energie und Stoffstrombilanzen, Viehweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden.
- 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. SCHULZ, M. (2006): Ökologische Bewertung der Biogaserzeugung 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 (21), 4931-4944.
- SCHOLWIN, F., MICHEL, J., SCHRÖDER, G., MARTIN, K. (2006): Analyse einer Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen. Institut für Energetik und Umwelt.
- 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.
- VDLUFA (2001): Grundsätze von Energiebilanzen in der Landwirtschaft. Grünstentwurf. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.