

# Nachhaltige Intensivierung von Energiefruchtfolgen

BIOGAS-EXPERT-Verbund prüft standortgerechte Anbausysteme

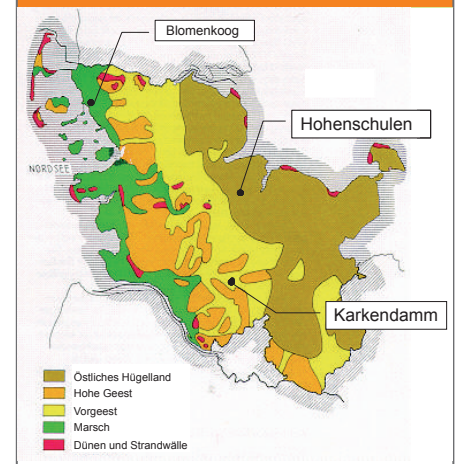
Im Jahr 2011 wurden in Deutschland auf circa 800.000 ha Energiepflanzen für die Biogasproduktion angebaut, wobei, bedingt durch sein hohes Ertragspotenzial, Silomais den Anbau mit einem Anteil von circa 75 Prozent klar dominiert. Dies führt – zumindest lokal – zu mehr Maisanbau in Monokultur oder Fruchtfolgen mit einem hohen Silomaisanteil sowie zu einer Ausdehnung des Maisanbaus auf für den Mais eher untypische Standorte. Im öffentlichen Diskurs wird die Zunahme der Maisanbaufläche kritisch betrachtet. Es stellt sich die Frage nach der Notwendigkeit von alternativen Pflanzenanbausystemen für die Biogasproduktion.

Babette Wienforth u. a., Kiel

Im Rahmen des Verbundprojekts BIOGAS-EXPERT wurden an der agrar- und ernährungswissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel unterschiedliche Anbausysteme für die Biogasproduktion geprüft. Auf drei für die Naturräume Schleswig-Holsteins typischen Standorten (Hohenschulen (HS) im Hügelland, Karkendamm (KD) in der Geest und Blumenkoog in der Marsch) wurden mehrjährige Feldversuche angelegt (Abb. 1). Auf dem sandig-lehmigen Standort Hohenschulen wurde Silomais in Monokultur (FF1), eine Fruchtfolge aus Mais, Weizen zur GPS-Nutzung und Welschem

Weidelgras als zweischnittige Winterzwischenfrucht (FF2) sowie eine Fruchtfolge aus Mais, Weizen zur Druschnutzung und Senf als Winterzwischenfrucht (FF3) geprüft (Tab. 1). Auf dem leicht humosen Sandstandort Karkendamm wurde eine Maismonokultur (FF1) mit einem Deutsch-Weidelgras-Bestand in 4-Schnitt-Nutzung (FF4) verglichen. Auf dem Marschstandort wurden die Anbausysteme FF1, FF2 sowie FF4 analysiert. Darüber hinaus wurde die Wirkung unterschiedlicher Stickstoffdüngerformen (mineralisch (KAS), Biogasgärrückstände (Mix) und in HS Schweinegülle (SG) bzw.

Abb. 1: 3 repräsentative Versuchsstandorte der Landschaftsräume Östliches Hügelland (Hohenschulen), Geest (Karkendamm) und Marsch (Blumenkoog)



in KD Rindergülle (RG)) in vier Dünge-stufen (N1–N4) getestet (Tab. 2 und Tab. 3). Untersucht wurden die Ertragsleistungen der Anbausysteme, der spezifische Methanertrag der jeweiligen Substrate sowie düngungsbezogene Lachgas- und Ammoniakemissionen und die N-Konzentration im Sickerwasser. Die gewonnenen Daten ermöglichten die Ermittlung der Energie- und Treibhausgasbilanzen der Biogasproduktion sowie Abschätzungen des Treibhausgasminderungspotenzials.

## Ertragsleistung

Die Maismonokultur (FF1) erzielte auf den beiden Standorten KD und HS bei

**Tab. 1: Die geprüften Energiepflanzenanbausysteme in Hohenschulen und Karkendamm**

| Anbausysteme | Hauptfrucht 1   | Hauptfrucht 2                            | Zwischenfrucht                                   |
|--------------|---|--|--|
| FF1          | Silomais in Monokultur (Ronaldino, S240)                  |  |  |
| FF2          | Silomais (Salgado, S200)                                  | Winterweizen für GPS-Nutzung (Biscay)    | Welsches Weidelgras in 2-Schnitt-Nutzung (Gisel) |
| FF3          | Silomais (Ronaldino, S240)                                | Winterweizen für Körner-nutzung (Biscay) | Senf (Accent)                                    |
| FF4          | Deutsches Weidelgras in 4-Schnitt-Nutzung (Fennema, Edda) |  |  |

**Tab. 2: Stickstoffdüngungsstufen (N1–N4) der geprüften Kulturen**

|    | Kulturart        |                    |                     |                      |
|----|------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
|    | Mais             | Winterweizen       | Welsches Weidelgras | Deutsches Weidelgras |
| N1 | 0/0 <sup>1</sup> | 0/0/0 <sup>2</sup> | 0/0 <sup>3</sup>    | 0/0/0/0 <sup>4</sup> |
| N2 | 60/60            | 40/40/040          | 80/80               | 60/60/40/0           |
| N3 | 120/120          | 80/80/80           | 80/80               | 120/80/80/40         |
| N4 | 180/180          | 120/120/120        | 80/80               | 160/140/120/60       |

Ausbringtermine:  
<sup>1</sup> – vor Aussaat/4 Wochen nach Aussaat  
<sup>2</sup> – Beginn Frühjahrswachstum/Schoßen/Ährenschieben  
<sup>3</sup> – nach Aussaat/Beginn Frühjahrswachstum  
<sup>4</sup> – Beginn Frühjahrswachstum/nach 1. Aufwuchs/nach 2. Aufwuchs/nach 3. Aufwuchs



Versuchsanlage Hohenschulen



Versuchsanlage Karkendamm

Fotos: Autorin

ausreichend hoher Stickstoffversorgung mit 16,8 bzw. 18,4 t TM ha<sup>-1</sup> die höchsten Biomasseerträge (Abb. 2). Das Ertragsniveau des Deutschen Weidelgrases in 4-Schnitt-Nutzung (FF4) lag auf dem futterbaulich geprägten, fakultativen Grünlandstandort deutlich unter dem der Maismonokultur. Der von der Maismonokultur in HS erzielte Biomasseertrag lag deutlich über dem des Anbausystems mit Senf (FF3), aber nur leicht über dem des Anbausystems mit Welschem Weidelgras (FF2). Das niedrige Ertragsniveau von FF3 ist hauptsächlich auf den Verbleib des Weizenstrohs und der Senfbiomasse auf der Fläche zurückzuführen. Außerdem trugen außergewöhnlich niedrige Weizenerträge (3. Weizen in Folge sowie hohe Niederschläge zur Blüte und Abreife) zu den niedrigen Gesamterträgen von FF2 und FF3 bei. Zudem erreichte die in FF2 angebaute frühe Maissorte (S200) im Vergleich zur in FF3 und FF1 angebauten mittelfrühen Maissorte (S240) ein deutlich niedrigeres Ertragsniveau, was darauf hindeutet, dass das standortspezifische Ertragspotenzial von Mais nicht ausgeschöpft wurde.

Der Vorteil einer nahezu ganzjährigen und somit höheren Strahlungsaufnahme der Fruchtfolgen FF2 und FF3 im Vergleich zur Maismonokultur konnte jedoch nicht in einen höheren Biomasseertrag umgesetzt werden, was vor allem an einer generell niedrigeren potenziellen Lichtnutzungseffizienz der C3-Pflanzen im Vergleich zur C4-Pflanze Mais liegt. Vermutungen, dass die hohe Effizienz des Mais durch suboptimale Standortbedingungen (geringe Temperaturen) überkompensiert wird, konnten somit für den Standort HS nicht bestätigt werden. Auf

dem Marschstandort hingegen erzielte das Anbausystem FF2 die höchsten Biomasseerträge, während die Maismonokultur vor allem aufgrund der langsamen Bodenerwärmung im Frühjahr ein hohes Ertragsrisiko aufwies.

Hinsichtlich der spezifischen Methanerträge (I<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> TM) zeigten sich

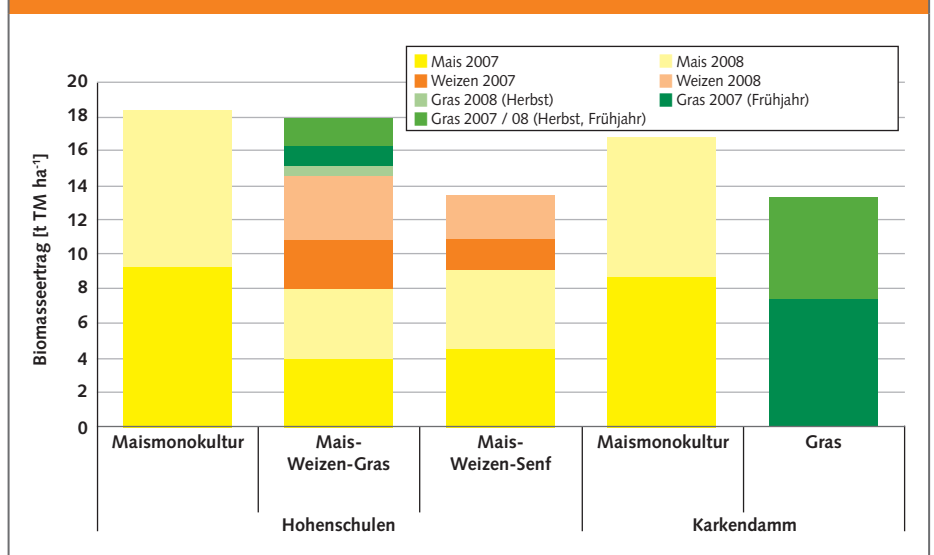
keine Effekte der Düngerform bzw. Düngemenge und nur geringe Unterschiede zwischen den Kulturen (Mais: 350 I<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> TM, Weizen: 340 I<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> TM, Gras 290–330 I<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> TM in Abh. des Aufwuchses). Der Methanhektarertrag (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>) wurde somit hauptsächlich durch den Biomasseertrag determiniert

Tab. 3: Kenndaten der verwendeten organischen Dünger: Biogaseärrrest (Mix), Schweinegülle (SG) und Rindergülle (RG)

Standardabweichung in Klammern

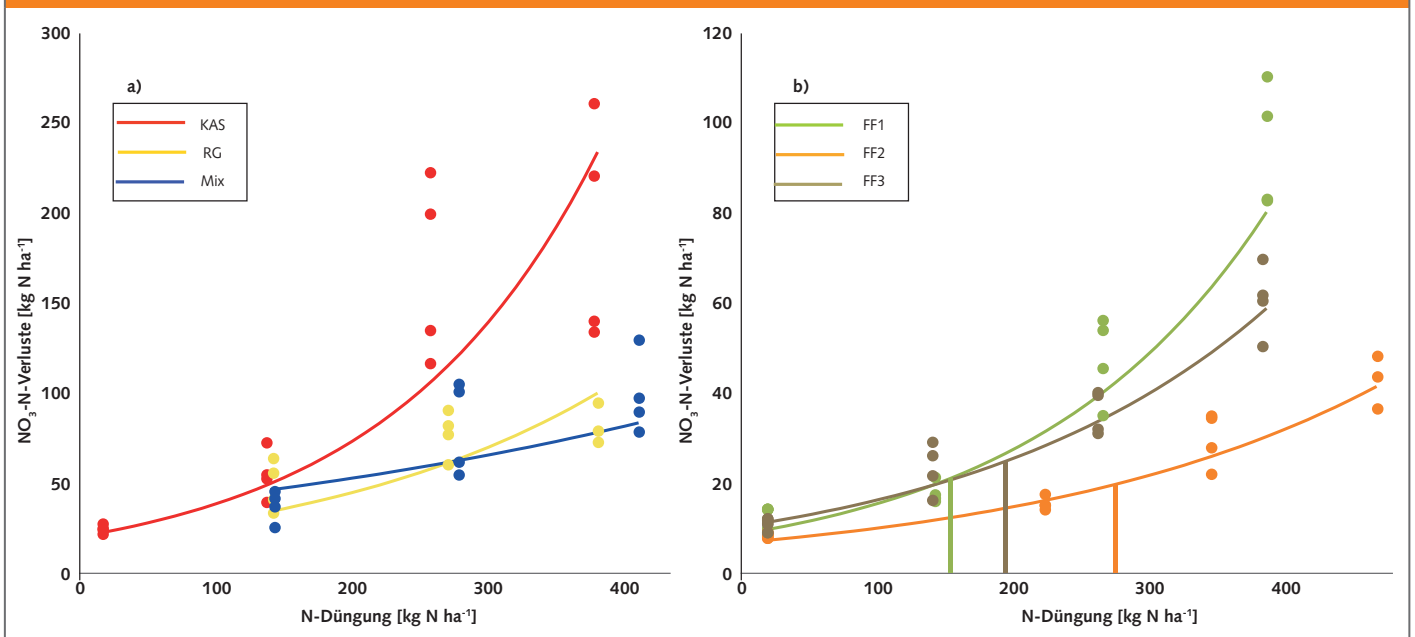
| Düngerform | N-Konzentration [kg m <sup>-3</sup> ] | NH <sub>4</sub> -N-Konzentration [kg m <sup>-3</sup> ] | Prozent NH <sub>4</sub> -N am Gesamt-N [%] | C/N        | pH-Wert   |
|------------|---------------------------------------|--|--|------------|-----------|
| Mix        | 3.62 (0.38)                           | 1.91 (0.21)  | 53.0 (3.6)                                 | 6.6 (0.4)  | 7.7 (0.1) |
| SG         | 3.95 (0.33)                           | 2.80 (0.23)  | 71.0 (5.3)                                 | 7.8 (1.4)  | 7.2 (0.3) |
| RG         | 3.18 (0.42)                           | 1.72 (0.17)  | 55.1 (7.7)                                 | 11.2 (1.4) | 7.1 (0.2) |

Abb. 2: Biomasseerträge der Anbausysteme auf den Versuchsstandorten Hohenschulen und Karkendamm im Mittel der Versuchsjahre bei mineralischer Stickstoffdüngung unter nicht limitierter Stickstoffversorgung (N3)



**Abb. 3: Nitrat-N-Verluste (kg NO<sub>3</sub>-N ha<sup>-1</sup>) in Abhängigkeit des Gesamt-N-Inputs (a) in Maismonokultur am Standort Karkendamm für unterschiedliche N-Düngereformen in der Auswaschungsperiode 2007/08 und (b) für die Anbausysteme FF1, FF2 und FF3 am Standort Hohenschulen im Mittel über alle N-Düngerformen**

Die vertikalen Linien geben das optimale N-Düngungsniveau zur Erreichung maximaler Erträge an



und die kalkulierten Methanhektarerträge der Anbausysteme (4,125 bis 6,750 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>) wiesen eine vergleichbare Rangfolge und Abstufung auf wie die Biomasseerträge.

**N-Bedarf und Düngerverwertung**

Von allen geprüften Anbausystemen zeichnete sich die Maismonokultur durch den geringsten N-Bedarf zur Erzielung des Maximalertrages aus. So benötigten das Grünland und Anbausystem FF2 bei mineralischer Düngung (KAS) mit 300 bzw. 267 kg N ha<sup>-1</sup> eine mehr als doppelt so hohe Stickstoffmenge

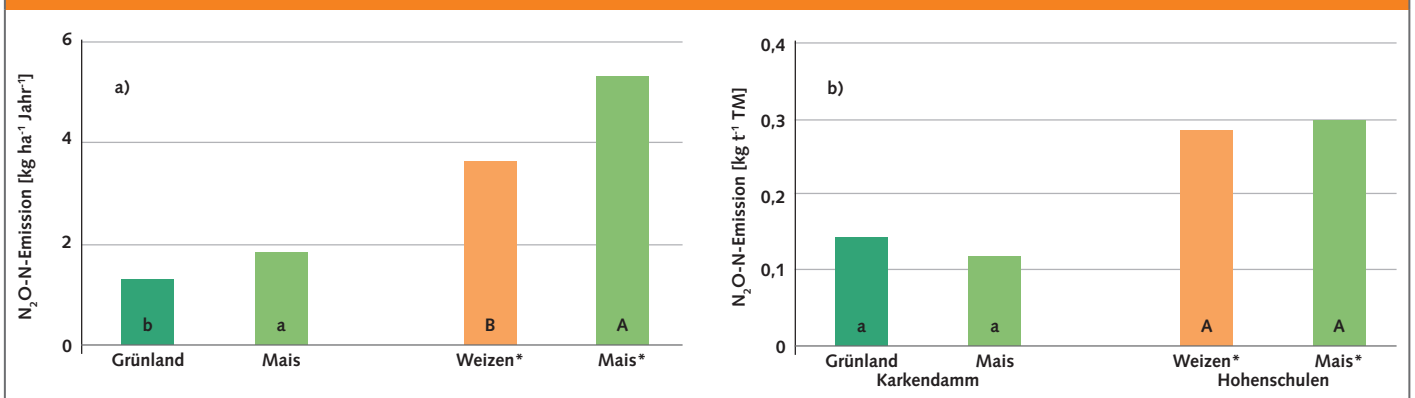
im Vergleich zu FF1 (135 kg N ha<sup>-1</sup> in KD, 124 kg N ha<sup>-1</sup> in HS), was auf eine höhere N-Nutzungseffizienz von Mais zurückzuführen ist.

Was den relativen N-Düngerwert (relativer N-Düngerwert =  $\frac{NUE_{organisch}}{NUE_{mineralisch}}$ , und  $NUE = \frac{(N\text{-Aufnahme der Variante} - N\text{-Aufnahme der Kontrolle})}{(\text{Gesamt-N-Düngungsmenge})}$ ) der organischen N-Dünger betrifft, zeigte sich sowohl in der Maismonokultur an beiden Standorten als auch im Grünland eine Überlegenheit der Gärrestapplikation (HS-FF1: 0.98, KD-FF1: 0.75, KD-FF4: 0.65) im Vergleich zur Düngung mit Rinder- oder Schweinegülle (HS-FF1: 0.75, KD-FF1: 0.57, KD-FF4: 0.62), während

in FF2 Schweinegülle einen höheren N-Düngerwert (0.98 vs. 0.87) aufwies. Die höhere Düngewirkung des Gärrestes in der Maismonokultur bzw. im Grünland erscheint überraschend angesichts des geringeren Ammonium-N-Anteils des Gärrestes, wird aber vermutlich bedingt durch das engere C/N-Verhältnis (weniger N-Festlegung) des Gärrestes (Tab. 3). Der geringere Düngerwert des Gärrestes in FF2 ist auf eine unterschiedliche Dynamik der N-Aufnahme von Mais und Weizen zurückzuführen. Während der hohe N-Bedarf von Weizen im Frühjahr/ Frühlommer über den hohen Ammoniumgehalt der Schweinegülle abgedeckt wird, kann Mais den aus der Minerali-

**Abb. 4: (a) Mittlere jährliche (März bis März) flächenbezogene Lachgasemission (kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>) und (b) mittlere produktbezogene Lachgasemission (kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> TM) in Abhängigkeit von Standort und Kulturart.**

\* inklusive Nachfrucht. Die Unterschiede zwischen den Kulturarten wurden je Standort geprüft (große und kleine Buchstaben). Der Standortunterschied (nicht dargestellt) war signifikant (< 0,05)





sation während der Vegetationsperiode freigesetzten Stickstoff zusätzlich nutzen.

### N-Verluste

Die Reduktion von N-Verlusten kann für die Steigerung der Düngernutzungseffizienz von großer Bedeutung sein und spielt bei der Verminderung von Umweltschäden eine entscheidende Rolle. Ammoniak-Emissionen ( $\text{NH}_3$ ) verschlechtern die Luftqualität und sind indirekt klimawirksam. Nitrat-Auswaschung ( $\text{NO}_3$ ) kann neben der Eutrophierung von Grund- und Oberflächengewässern zu einer Re-Emission von klimarelevanten Gasen führen. Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ist das wichtigste direkt wirkende Klimagas, das in der Pflanzenproduktion entsteht.

### Kulturarten- und Anbausystemvergleich

Im Kulturarten- bzw. im Anbausystemvergleich zeigte sich, dass der Mais im Vergleich zu Gras und Weizen durch die Möglichkeit einer sofortigen Einarbeitung der ausgebrachten Dünger und zum Teil durch eine durch die Bodenbearbeitung verbesserte Infiltration die niedrigsten  $\text{NH}_3$ -Emissionen aufwies. Da eine Einarbeitung im Grünland und im Weizen aufgrund der Ausbringung mittels Schleppschauch nicht möglich war, lagen die  $\text{NH}_3$ -Emissionen unweigerlich höher als im Mais. Eine Injektion der organischen Dünger kann zwar die  $\text{NH}_3$ -Verluste um mehr als 50 Prozent reduzieren, jedoch sind potenzielle negative Nebeneffekte zu berücksichtigen, wie z. B. der Anstieg des Treibstoffbedarfs oder das Risiko erhöhter Lachgas-Emissionen.

Die  $\text{NO}_3$ -Auswaschung am Standort Hohenschulen wies bei optimaler N-Düngung für alle drei untersuchten Anbausysteme ein ähnliches Niveau auf (Abb. 3b). Bei Überdüngung hingegen stiegen die potenziellen Auswaschungsverluste in der Maismonokultur um ein Vielfaches im Vergleich zu den Fruchtfolgen (FF2 und FF3) an. Am Standort Karkendamm führte der Maisanbau unabhängig vom Düngungsniveau immer zu deutlich höheren Nitratfrachten als die Kultivierung von Grünland ( $< 5 \text{ kg N ha}^{-1}$ ).

Unter Mais wurde mehr  $\text{N}_2\text{O}$  pro ha emittiert als unter Grünland oder Weizen (Abb. 4a), was vermutlich mit höheren  $\text{N}_{\text{min}}$ -Werten und höheren Bodenwassergehalten unter Mais in den Versuchsjahren, besonders im späten Frühjahr, zu begründen ist. Bezogen auf die Pro-



$\text{N}_2\text{O}$ -Messung, Closed-Chamber-Methode



$\text{NH}_3$ -Messung, Dräger-Tube-Methode

dukteinheit ( $\text{kg TM}$ ) hingegen waren die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen von Mais vergleichbar zu Weizen und etwas geringer als diejenigen von Grünland.

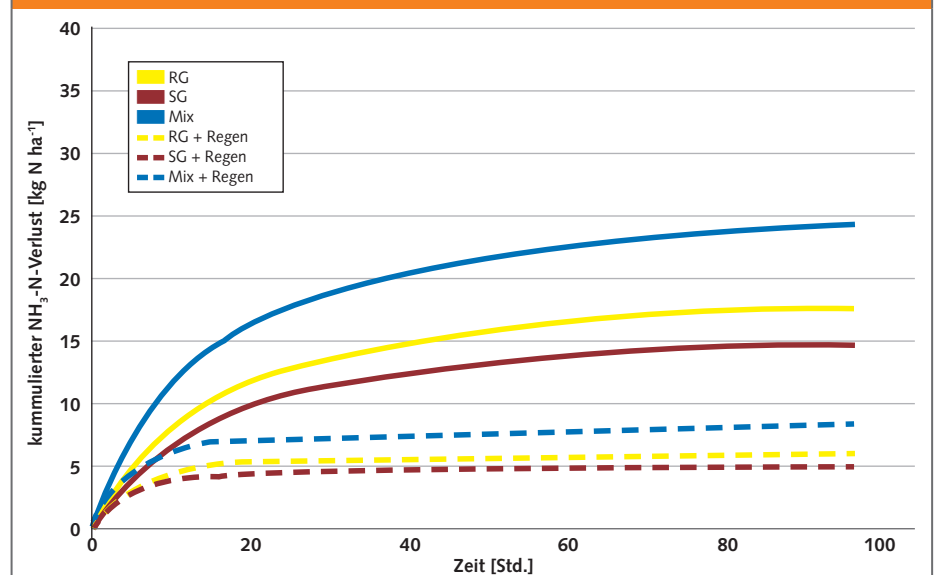
### Vergleich der Düngemittel

Sowohl im Feldversuch als auch in Modellrechnungen (Abb. 5) zeichnete sich der Biogasgärrest durch höchste Ammoniakverluste (circa  $25 \text{ kg N ha}^{-1}$  nach 100 Std.) aus, was auf den deutlich höheren pH-Wert des Gärrests zurückzuführen ist (Tab. 3). Die höheren Verluste

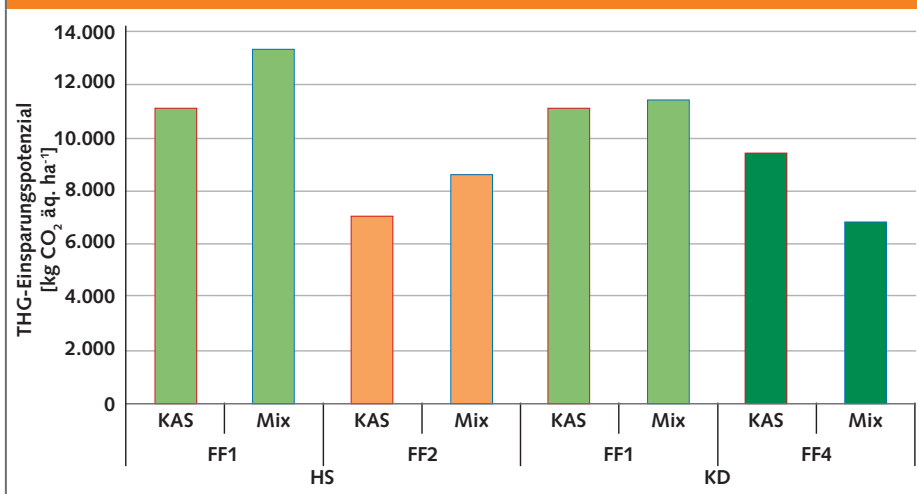
der Rindergülle im Vergleich zur Schweinegülle liegen in der höheren Viskosität der Rindergülle begründet. Die Ammonium-Konzentrationen der geprüften organischen Düngemittel beeinflussten die  $\text{NH}_3$ -Emissionen weniger stark als zunächst angenommen.

Bezüglich der  $\text{NO}_3$ -Auswaschung konnten unter Mais, wie zu erwarten, starke Düngemittelleffekte mit deutlich höheren Verlusten bei KAS-Düngung im Vergleich zu den organischen Düngern festgestellt werden (Abb. 3a). Un-

**Abb. 5: Simulierte Ammoniak-Verluste nach Ausbringung unterschiedlicher organischer Wirtschaftsdünger (Rindergülle (RG), Schweinegülle (SG) und Biogasgärrest (Mix)) unter identischen Ausbringungsbedingungen, mit und ohne Regenereignis. Angenommen wurde eine Schleppschauchausbringung in Höhe von  $120 \text{ kg N ha}^{-1}$  auf unbewachsenen Boden**



**Abb. 6: Treibhausgas(THG)einsparungspotenzial angegeben in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub> äq.) [kg CO<sub>2</sub> äq. ha<sup>-1</sup>] bei optimaler N-Versorgung zur Erreichung eines maximalen Netto-Energiegewinns in Abhängigkeit von Standort und N-Düngeform, im Mittel über 2 Jahre**



ter Grünland hingegen hatte die Düngerform keinen Einfluss auf die Höhe der Auswaschungs-Verluste.

Bezüglich der kumulierten Lachgasemissionen konnte kein Düngemiteleinfluss abgesichert werden. Die Versuchsergebnisse wiesen aber auf potenziell höhere N<sub>2</sub>O-Emissionspotenziale der organischen Düngemittel im Vergleich zu KAS in Kombination mit hohen Bodenwassergehalten hin.

### Standortvergleich

Bezüglich der NH<sub>3</sub>-Emission waren die Standortunterschiede hauptsächlich über unterschiedliche Windgeschwindigkeiten zu begründen und führte zu den höchsten Emissionen auf dem Marschstandort.

Unterschiedliche Bodentexturen resultierten unter Mais in großen Standorteffekten bezüglich der Nitrat-N-Austräge, welche bei N-Übersorgung bis zu 80 kg N ha<sup>-1</sup> (HS) bzw. 250 kg N ha<sup>-1</sup> (KD) anstiegen.

Auch die N<sub>2</sub>O-Verluste unterschieden sich deutlich im Standortvergleich (Abb. 4) und waren auf dem sandig-lehmigen Standort HS unter Mais bis zu dreifach höher als auf dem Sandstandort KD. Dies ist zurückzuführen auf die höheren Bodenwasserhalte, welche den wichtigsten Prozess bei der Entstehung von N<sub>2</sub>O, die Denitrifikation, begünstigen.

### Treibhausgaseinsparungspotenzial

Zur Abschätzung des Einsparungspotenzials an Treibhausgasen (THG) von

Energiepflanzen-Anbausystemen wurde eine THG-Bilanzierung durchgeführt. Hierbei wurde die Entstehung von Treibhausgasen bei der Pflanzenproduktion, dem Transport und der Lagerung sowie durch Konversionsverluste, direkte und indirekte N<sub>2</sub>O-Emissionen, Humusgehaltsänderung im Boden (Annahmen nach VDLUFA) und Methanschlupf berücksichtigt und mit der Freisetzung von THG bei der Erzeugung derselben Energiemenge über fossile Energieträger verglichen. Die Maismonokultur erzielte an beiden Standorten bei optimaler N-Düngung das höchste THG-Einsparungspotenzial (Abb. 6). Die höheren Biomasserträge der Maismonokultur konnten die negative Humusbilanz sowie die höheren flächenbezogenen N<sub>2</sub>O-Emissionen überkompensieren. Eine positive Humusbilanz des Grünlandes (+600 kg Humus-C ha<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup>) ist auch ursächlich für ein THG-Einsparpotenzial, welches auf gleichem Niveau liegt wie Anbausystem FF2, obwohl Grünland deutlich geringere Methanhektarerträge realisierte.

Organische N-Düngemittel zeichneten sich für die Maismonokultur an beiden Standorten und für das Anbausystem FF2 am Standort HS durch ein höheres THG-Einsparungspotenzial im Vergleich zur mineralischen N-Düngung aus, was auf einen geringeren Energieaufwand und damit verbundene CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Düngerproduktion zurückzuführen ist. Bei der Nutzung von Grünland zur Biogaserzeugung war ein umgekehrter Effekt zu beobachten. Die Applikation organischer Dünger führte zu einer geringeren THG-Einsparung als eine Mineraldüngung. Dies ist begründet

in der deutlich geringeren N-Düngewirkung und folglich Biomassebildung bei organischer Düngung. Die dokumentierten THG-Einsparungspotenziale der Anbausysteme übersteigen, außer FF2 bei Mineraldüngung (48 Prozent), alle die ab 2017 von der Biomassekraftstoff- bzw. Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung geforderten Minderungspotenziale von 50 Prozent. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass das Ertragspotenzial in der landwirtschaftlichen Praxis um bis zu 20 Prozent hinter den Erträgen auf Feldversuchsniveau zurückliegt.

*Als Co-Autoren wirkten mit: Sandra Claus, Klaus Dittert, Dirk Gericke, Eberhard Hartung, Antje Herrmann, Henning Kage, Kang Ni, Susanne Ohl, Andreas Pacholski, Robert Quakernack, Mehmet Senbayram, Klaus Sieling, Nikolai Svoboda, Friedhelm Taube, Anna Techow.*

*Alle Autoren waren zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeiten Mitglieder der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der CAU Kiel. <<*

### Fazit

Im Sinne einer nachhaltigen Intensivierung sind neben der Produktivität und ökonomischen Effizienz von Energiepflanzenproduktionssystemen auch Umwelteffekte, wie beispielsweise Nitrat-Auswaschung, Ammoniakemission und Emission klimarelevanter Gase, zu berücksichtigen. Diese teilweise konträren Zielsetzungen können nicht auf allen Standorten gleichermaßen im Optimum erreicht werden. Daher gilt es, die Intensität der Landnutzung und das Potenzial für die Bereitstellung von Umweltleistungen („ecosystem services“) für den jeweiligen Standort bzw. die Region abzuwägen. Eine standortgerechte Wahl von Anbausystemen ist eine entscheidende Maßnahme, um ein angemessenes Produktionsniveau unter Berücksichtigung von Umwelteffekten zu erzielen.

### KONTAKT

**Dr. Babette Wienforth**

Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Abteilung für Acker- und Pflanzenbau  
Christian-Albrechts-Universität, Kiel  
Telefon: 0431 8801844  
wienforth@pflanzenbau.uni-kiel.de