

Steigerung des Biogasertrages durch die Zugabe von Pflanzenkohle

Stimulation of Biogas production by adding Biochar

Jan-Markus Rödger, Waldemar Ganagin, Andreas Krieg, Christian Roth und Achim Loewen

Dipl. Wi.-Ing.

Jan-Markus Rödger

Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Life Cycle Assessment und thermische Konversion, Vorstandsmitglied und stellvertretender Leiter des Fachausschusses Biokohle im ANS e.V.

M.Eng.-M.Sc.

Waldemar Ganagin

Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich der Verfahrensoptimierung des Biogasprozesses

Dipl.-Ing. agr.

Andreas Krieg

Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich der Verfahrensoptimierung des Biogasprozesses und Gründungsmitglied des Fachverbandes Biogas e.V.

B.Sc. Christian Roth

Agrarwissenschaftler und wissenschaftliche Hilfskraft im Bereich der Biogaserzeugung

Prof. Dr.-Ing.

Achim Loewen

Leiter des Fachgebietes Nachhaltige Energie- und Umwelttechnik NEUTec seit 2006 und Professor für Energietechnik und Umweltmanagement

Zusammenfassung

Ein Instrument zur aktiven Kohlendioxidausschleusung aus der Atmosphäre ist die sogenannte Pflanzenkohle. Durch eine thermochemische Biomassebehandlung (Pyrolyse) wird der gebundene Kohlenstoff stabilisiert und lässt sich somit dauerhaft der Atmosphäre entziehen. Das erzeugte Produkt (Pflanzenkohle) kann vor allem auf landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt werden. Erste Analysen zeigen, dass sich dieser Einsatz betriebswirtschaftlich jedoch noch nicht rentiert. Daher müssen weitere Einsatzmöglichkeiten entlang der landwirtschaftlichen Kaskade, in denen ein zusätzlicher Ertrag generiert werden kann, identifiziert werden.

Eine dieser Möglichkeiten ist die Nutzung der Pflanzenkohle als Additiv im Biogasprozess. Verschiedene internationale Forschungsinstitute haben durch das Beimischen der Pflanzenkohle einen erhöhten Gasertrag messen können. Unter anderem soll die Akkumulation von Methanogenen sowie die erhöhte Aufwuchsfläche die mikrobielle Funktionalität unterstützen und somit ein erhöhter Gasertrag erzielt werden.

Die hier vorgestellte Analyse ging der Frage nach, welcher Einsatzort im Fermentationsprozess (Hauptfermenter bzw. Nachgärer) am sinnvollsten bzgl. der Gaserträge ist. Durch die Zugabe der Pflanzenkohle in den Hauptfermenter konnten etwa 9 % mehr Methan über insgesamt 91 Tage erzeugt werden. Die Untersuchung im Nachgärer wurde in zwei unterschiedlichen Varianten durchgeführt und so auch der Einfluss der Oberfläche (große Kohlepartikel) untersucht. Die Zugabe der ursprünglichen Pflanzenkohle führte zu einem Mehrertrag von gut 13 %, und durch die großen Kohlepartikel konnte sogar 24 % mehr Methan erzeugt werden.

Abstract

One instrument to withdraw carbon dioxide from the atmosphere is the so called Biochar. Through photosynthesis and a thermochemical biomass treatment (pyrolysis) the bound carbon will be stabilized and thereby stored permanently. The product (biochar) is intended to be mainly used as soil enhancer on arable land. Early analyses indicate no economic feasibility yet. Therefore new ways of utilization need to be identified along the agricultural value chain to generate additional earnings.

One option is the application of biochar as an additive within the biogas process. Different international research institutes were able to measure an increase in biogas production due to the biochar addition. One reason might be accumulation of methanogenic bacteria as well as the increase of the surface area to improve the microbial functionality which leads to additional gas production.

The study presented here investigated the optimal process stage within the fermentation process (main digester or secondary fermenter) to add the biochar and thereby improve the gas production. By adding biochar to the main digester an increase in gas production of approximately 9 % over a time span of 91 days was measured. To analyse the effect within the secondary fermenter two different approaches were tested. The effect of the surface area was assessed by comparing the influence of original biochar and large char particles. The original Biochar led to an increase of more than 13 % and the large particles even enhanced methane production by 24 % over 91 days.

1. Einführung

Der Klimawandel und der damit notwendige Umstieg auf eine kohlenstoffarme Energieerzeugung führen zu verschiedensten Ansätzen in der Forschung. Eine zusätzliche Option ist die aktive Senkung der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre, da diese schon deutlich über den 350 ppm [1] liegt, die zur Sicherstellung des 2 °C-Ziels des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) angenommen wird [2].

Ein aktueller Ansatz zur aktiven CO₂-Ausschleusung ist die sogenannte Pflanzenkohle. Durch eine thermochemische Behandlung (Pyrolyse) unter Sauerstoffmangel wird der gebundene Kohlenstoff in der Biomasse stabilisiert und kann somit dauerhaft der Atmosphäre entzogen werden. Das Produkt (Pflanzenkohle) ist gekennzeichnet durch seine poröse und feste Struktur sowie durch seinen hohen Kohlestoffanteil und kann unter anderem in Böden eingesetzt werden.

Dies wurde zum ersten Mal durch die Entdeckung der „Terra Preta do Indio“-Böden im Amazonasgebiet beobachtet, wo eine bodenverbessernde Wirkung durch die Pflanzenkohle festgestellt wurde [3]. Weltweit wurden daraufhin Feldversuche auf ackerbaulich genutzten Flächen durchgeführt und der Einsatz zeigte im Mittel eine Ertragssteigerung von 10 % [4] sowie ein Potenzial zur dauerhaften Kohlenstoffspeicherung in Böden [5].

Die Kohle weist jedoch unterschiedliche Eigenschaften auf. Die Stabilitäten der Pflanzenkohle unterscheiden sich in Abhängigkeit vom eingesetzten Substrat [6] und von den Prozessbedingungen der Pyrolyse [7]. So zeigen verschiedene Studien einen Zeitraum von 500–1500 Jahren, in dem die Kohle nicht abgebaut wird [8] [5]. Ein zusätzlicher positiver Effekt ist die erhöhte Nährstoffeffizienz, da die Kohle als Puffer dient und eine Auswaschung der Pflanzennährstoffe verhindert [9]. Die physikalischen Bodeneigenschaften, wie z. B. Wasserhaltekapazität oder Durchlüftung, können vor allem bei Böden mit geringen Bodenpunkten verbessert werden [10]. Durch die hohe spezifische Oberfläche der Kohlen (>300 m² g⁻¹) kann ein besseres Habitat für Mikroorganismen geschaffen und das Bodenleben gefördert werden [9] [11]. Um eine gleichbleibende Qualität der Pflanzenkohle zu gewährleisten, wurde im Jahr 2012 das Europäische Pflanzenkohle-Zertifikat (EBC) von führenden Anwendern und Wissenschaftler entwickelt. Dieses beschreibt Mindeststandards bzgl. der chemischen Zusammensetzung und Produktion, um den gefahrlosen Einsatz in der Landwirtschaft unter Berücksichtigung der nationalen und internationalen Verordnungen zu garantieren.

Inzwischen konnten schon mindestens 40 Einsatzgebiete der Pflanzenkohle identifiziert werden [12], als Substitut oder auch als Additiv. So kann die Pflanzenkohle aufgrund des hohen Heizwertes auch zur Energieerzeugung, u. a. in Kohlekraftwerken, eingesetzt werden [13]. Die ist jedoch hinsichtlich des primären Ziels der aktiven Kohlendioxidausschleusung aus der Atmosphäre nicht zielführend. Daher sollte die Pflanzenkohle als Additiv für den Boden oder in anderen Anwendungen, in denen sie nicht wieder oxidiert wird, genutzt werden.

2. Nutzung in der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette

Hinsichtlich des Einsatzes in Landwirtschaft ist von Nachteil, dass pflanzenverfügbare Nährstoffe bei der Aufbringung der reinen Pflanzenkohle gebunden werden und es zu kurzfristigen Ertragsminderungen kommen kann [14] [15].

Dies lässt sich durch die Beladung der Bindungsplätze mit Nährstoffmolekülen (der sogenannten Aktivierung) verhindern, indem die Pflanzenkohle mit nährstoffreichen Substraten, wie z. B. Gülle oder Gärreste, über einen gewissen Zeitraum vermischt wird. Dadurch „altert“ die Kohle und die Kationenaustauschkapazität des Bodens wird erhöht [16] [17]. Allerdings können die hohen Anschaffungskosten der Pflanzenkohle mittelfristig nicht alleine durch Einsparungen an mineralischem Dünger und durch Ertragssteigerung gedeckt werden [18]. Daher ist es aus unternehmerischer Sicht wünschenswert den Einsatz von Pflanzenkohle in einem möglichst frühen Stadium der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette zu überprüfen, z. B. als Einstreu oder als Zugabe im Silierungsprozess, um zusätzliche Erträge zu generieren. Eine weitere Option ist der Einsatz in Biogasanlagen ein großes Potenzial für den breitflächigen Einsatz von Pflanzenkohle. Kumar et al. hat bereits im Jahr 1987 eine signifikante Erhöhung der Gasproduktion um 17 % bzw. 34,7 % bei der Mischung von Gülle und Holzkohle im Batch- bzw. semikontinuierlichen Fermenter beobachtet [19]. Um die Wirkung der Pflanzenkohle zu maximieren, sollte im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung der optimale Einsatz in modernen Biogasanlagen mit Hauptfermenter und Nachgärer bestimmt werden.

Durch Kombination der Prozesse Biomasseverkohlung und Biogaserzeugung (vgl. Abbildung 1) könnten Synergieeffekte erzielt werden, die eine vielversprechende Grundlage für ein effizienteres Nährstoff-, Kohlenstoff- sowie Kosten- und Energiemanagement bilden.

Die Störanfälligkeit des Biogasprozesses, insbesondere an dessen Leistungsgrenzen, erfordert den Einsatz von verschiedenen Additiven bzw. Hilfsstoffen. So ist die Zugabe von teuren Spurenelementen, vor allem in der Monovergärung, nicht mehr wegzudenken. Der Einsatz von pH-Wert stabilisierenden Stoffen ist ebenfalls bei akuter Prozessstörung (Übersäuerung) weit verbreitet. Der Einsatz der Pflanzenkohle zur Verbesserung der Prozessbiologie im Biogasprozess wird in Fachkreisen inzwischen ebenfalls diskutiert.

Untersuchungen der Universität Souphanouvong in Laos [20] zeigten eine deutliche Steigerung der Bio-

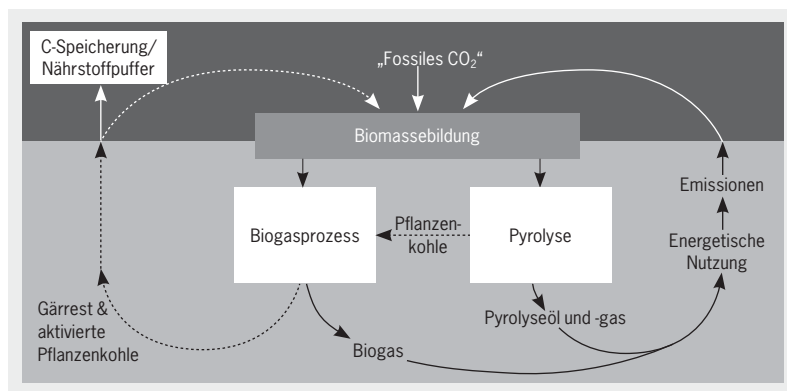


Abbildung 1
Kombination der Technologiepfade Pyrolyse und Fermentation zur Verbesserung der Energie- und Nährstoffeffizienz

gasproduktion durch den Einsatz von Pflanzenkohle in der Vergärung. In den Untersuchungen von Namura et al. der Osaka Prefecture University in Japan [21] wurden die positiven Effekte durch die Immobilisierung und Akkumulation von Methanogenen an biogener Kohle aus Bambus wissenschaftlich nachgewiesen. Eine naheliegende Erklärung für die Verbesserung der Biogasproduktion liefert die Untersuchung der Technischen Universität Graz in Zusammenarbeit mit der IPUS Mineral- & Umwelttechnologie GmbH [22], in der der Einfluss der Migulatorpartikel auf den Biogasprozess untersucht wurde. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Schaffung einer spezifischen Aufwuchsfläche zu einer Erweiterung der mikrobiellen Funktionalität und damit der mikrobiellen Diversität im Gärssystem führt.

Der positive Einfluss der Pflanzenkohle während des Fermentationsprozesses könnte auch noch weitere Gründe haben. So kann ähnlich wie die Aktivkohle auch die Pflanzenkohle als Molekularfilter dienen und die Stör- bzw. Hemm-substanzen aufnehmen, wodurch der Biogasprozess stabilisiert wird. Eine vorübergehende Aufnahme von einigen Metaboliten, wie überschüssige organische Säuren, NH_4^+ oder H_2S , die in hohen Konzentrationen für den Prozess schädlich sein können, ist ebenfalls denkbar.

Der relativ hohe Anteil an mineralischen Bestandteilen der Pflanzenkohle könnte durch den Einsatz im Fermenter die Versorgung der Mikroorganismen mit essentiellen Mikronährstoffen sichern. Der mineralische Anteil, also der Ascheanteil, kann in Anhängigkeit von der eingesetzten Biomasse stark variieren und bis zu 50 % betragen [10]. Zwar liegen die Mineralien ungelöst vor, können allerdings durch Konzentrationsgefälle dissoziiert werden und in bioverfügbare Formen übergehen [23]. Dieser Aspekt wird derzeit an der HAWK gezielt untersucht.

3. Material und Methoden

Basierend auf den aktuellen Ansätzen in der Biogasforschung wurde im ersten Schritt eine geeignete Darreichungsform, Einsatzmenge sowie ein geeigneter Typ der Pflanzenkohle bestimmt. Des Weiteren gilt es, bei der Versuchsplanung den optimalen Einsatzort entlang der Biogasprozesskette (Hauptfermenter oder

Der relativ hohe Anteil an mineralischen Bestandteilen der Pflanzenkohle könnte durch den Einsatz im Fermenter die Versorgung der Mikroorganismen mit essentiellen Mikronährstoffen sichern.

Nachgärer) und einen repräsentativen Substratmix zu bestimmen. Ein weiterer entscheidender Punkt ist die Festlegung der Versuchsdauer, da bei üblichen Biogasertragsversuchen ca. 30–40 Tage angesetzt werden. Um das Potenzial im Nachgärer zu ermitteln, ist jedoch ein längerer Zeitraum wünschenswert. Daher wurde im Rahmen dieser Untersuchungen der Gasertrag über 91 Tage analysiert.

Aufgrund der unsicheren rechtlichen Rahmenbedingungen beim Einsatz von Pflanzenkohle auf landwirtschaftlichen Flächen werden als Ausgangssubstrat Holzhackschnitzel, die bei ca. 550 °C über 2 Stunden pyrolysiert werden, ausgewählt. Es ist zu beachten, dass aktuell nur Kohlen aus chemisch unbehandeltem Holz gemäß Düngemittelverordnung (DüMV,

Tabelle 7.1.10) als Bodenzusatzstoff zugelassen sind. In der Schweiz wurde hingegen der Einsatz zertifizierter Pflanzenkohle nach den Richtlinien des Europäischen Pflanzenkohle Zertifikates (EBC) am 23. April 2013 durch das Bundesamt für Landwirtschaft genehmigt.

3.1 Voruntersuchungen

Die Bestimmung der optimal einzubringenden Pflanzenkohlenmenge wurde in zwei Schritten vorgenommen. Zuerst wurden die hygrokopischen Eigenschaften der Pflanzenkohle untersucht. Es wurden drei Varianten mit 1 %, 2,5 % und 5 % Beimischungsquote in Bezug auf die verwendete Wassermenge angesetzt. Dabei stellt sich die 2,5 % Mischung als die geeignetste Variante bzgl. des Mischungsverhaltens heraus. Bei der 1 %-Mischung haben sich fast alle Partikel am Boden abgesetzt wohingegen bei der 5 % Variante ein großer Teil, vor allem nicht vollständig karbonisiertes Substrat, an der Oberfläche schwamm. In Folge dessen wurde die Pflanzenkohle auf unkarbonisierte Bestandteile untersucht und diese aussortiert. Daraufhin wurden Auswirkungen der Pflanzenkohle auf die Viskosität des Fermenterinhalt betrachtet. Durch das hydrophile Verhalten der Kohle könnte die Rührfähigkeit in der Praxis beeinträchtigt werden. Die 5 %-Mischung führte zu einem zähflüssigen Gärsubstrat, wodurch die Rührbarkeit verschlechtert wird bzw. ein zusätzlicher Energieaufwand nötig ist. Somit wurde eine Beimischungsquote von höchstens

2,5 % bezogen auf die eingesetzte Frischmasse gewählt.

3.2 Versuchsplanung

Um das Potenzial von Pflanzenkohle im Biogasfermenter zu analysieren, sollten möglichst praxisnahe und auf den Einfluss der Pflanzenkohle zielende Varianten gewählt werden. Maßgeblich sind bei der Auslegung der Varianten folgende Fragestellungen:

- ◆ Kann die Pflanzenkohle einen zusätzlichen Gasertrag generieren?
- ◆ Ist der Einsatz eher im Hauptfermenter bzw. Nachgärer sinnvoll?
- ◆ Wie entwickelt sich die Gaskinetik im Vergleich zur Null-Probe während des Versuches?
- ◆ Welche Gasqualitäten können durch den Einsatz erreicht werden?
- ◆ Fungiert die Pflanzenkohle als Habitat für die Mikroorganismen?

Daher wurden nach den Vorgaben der VDI RL 4630 folgende Varianten gewählt, wobei darauf zu achten ist, dass das Verhältnis von oTS-Substrat zu oTS-Impf-schlamm < 0,5 auch bei Einsatz von Pflanzenkohle eingehalten wird.

1. [GR] Gärrest (Impfmateriale, Null-Probe)
2. [GR/MS] Gärrest und Mais (Hauptfermenter)
3. [GR/MS/BC] Gärrest, Mais und Pflanzenkohle (Hauptfermenter)
4. [GR/BC] Gärrest und Pflanzenkohle (Nachgärer)
5. [GR/BC13] Gärrest und Pflanzenkohle gesiebt (>13mm) (Nachgärer)

3.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Um eine möglichst hohe Praxisrelevanz der hier durchgeführten Versuche zu erreichen wurde der Einsatz der Pflanzenkohle in Hauptfermenter und Nachgärer sowie eine relevante Kombination aus Maissilage und Gärrest untersucht. Die Analysen wurden in 15 Batch-Fermentern (HDPE-Fässer) á 30 l Füllvolumen gemäß der VDI-Richtlinie 4630 durchgeführt und jeder Fermenter mit 20 l Impfmateriale (Gärrest aus einer landwirtschaftlichen Biogasanlage) gefüllt. In Variante 2 und 3 wurden zusätzlich 366 g frische Maissilage und in Variante 3 zusätzlich 500 g Pflanzenkohle beigemischt, um einen Hauptfermenter zu simulieren. In Variante 4 soll durch Einsatz von 500 g Pflanzenkohle und Gärrest ein Nachgärer abgebildet werden. Die Variante 5 entspricht der Variante 4, wobei die Pflanzenkohle vorher nach ISO DIN EN 15149 in einem Lochsieb sortiert und nur große Kohlepartikel (>13mm) in den Fermenter eingebracht wurden. Der Anteil der großen Partikel hängt vom Ausgangssubstrat und dessen Vorbehandlung ab und beträgt nur zwischen 0,5–1,2 Massen-% der hier eingesetzten originären Pflanzenkohle. Für den Rest müssten andere Nutzungsmöglichkeiten diskutiert werden.

Bezogen auf die gesamte Frischmasse beträgt der Anteil der Pflanzenkohle im Mittel in Variante 3 2,39 % und bei den Varianten 4 und 5 jeweils 2,43 %. Um eine Prozessüberlastung zu vermeiden wird gemäß der VDI-Richtlinie 4630 ein Verhältnis von oTS_{Substrat} zu $oTS_{\text{Impf-schlamm}} \leq 0,5$ angestrebt; dieses liegt hier zwischen 0,11

In der Schweiz wurde der Einsatz zertifizierter Pflanzenkohle nach den Richtlinien des Europäischen Pflanzenkohle Zertifikates (EBC) am 23. April 2013 genehmigt.

Tabelle 1
Zusammensetzung der Varianten basierend auf Analysen der einzelnen Substrate

	Einheit	(1) GR	(2) GR/MS	(3)*GR/MC/BC	(4), (5)* GR/BC
Gärrest	[kg _{FM}]	20,00	20,00	20,00	20,00
Maissilage	[kg _{FM}]	–	0,36	0,36	–
Pflanzenkohle	[kg _{FM}]	–	–	0,50	0,50
Trockensubstanz	[%FM]	7,17	7,64	9,58	9,16
Org. Trockensubstanz	[%TS]	76,63	78,15	79,55	78,48
Org. Kohlenstoff	[%TS]	37,73	38,14	44,67	44,78
Stickstoff	[%TS]	3,70	3,49	2,83	2,95
pH-Wert	[–]	8,00	7,64	7,96	8,47
oTS Substr./oTS Impfsch.		–	0,11	0,44	0,34

*unterscheidet sich zu (4) in der Partikelgröße (>13 mm) Kohle

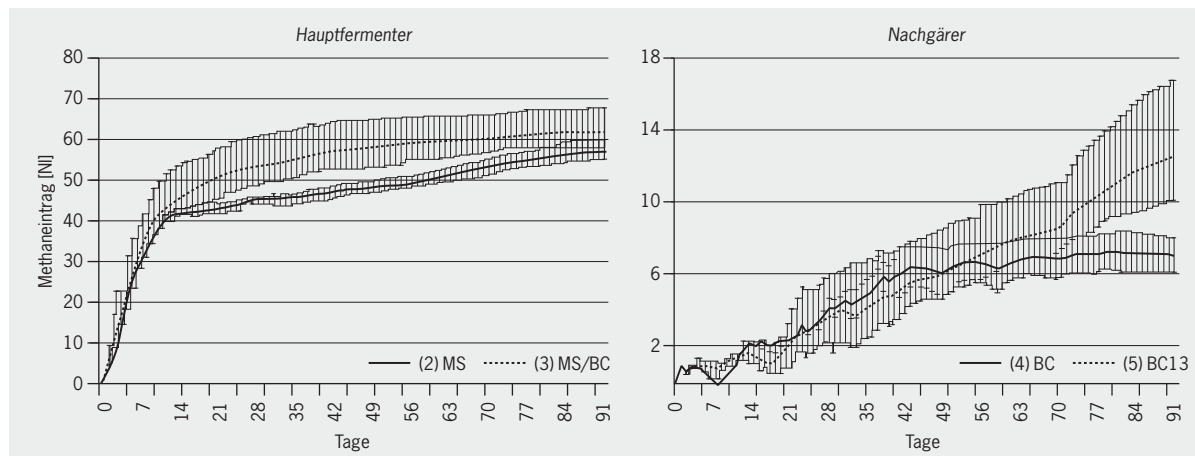


Abbildung 2
Links: Kumulierter Gasertrag der Maissilage mit und ohne Pflanzenkohle im Hauptfermenter; Rechts: kumulierter Mehrerertrag durch den Einsatz von Pflanzenkohle im Nachgärer

und 0,44. Die Eigenschaften des genutzten Impfmateri- als bzw. der Maissilage, wie z. B. Trockensubstanz oder Aschegehalt, entsprechen den üblichen Richtwerten für diese Stoffe (siehe Tabelle 1). Die Zusammensetzung der jeweils eingesetzten Substratmische wurde auf Basis der Einzelanalysen der eingesetzten Frischmassen berechnet.

Die einzelnen Substrate werden vor dem Eintrag in die Fermenter homogenisiert um eine möglichst hohe statistische Sicherheit zu erreichen. Eine tägliche Gasmessung ist in den ersten 4 Wochen vorgesehen. Nach der VDI-Richtlinie bzw. VDLUFA sind 25 Tage Vergärung ausreichend zur Ermittlung des Gaspotenzials, jedoch wird in diesem Ansatz über insgesamt 91 Tage das Potenzial ermittelt um die langfristigen Effekte der Kohlepartikel zu identifizieren. Die Fässer werden unter mesophilen Bedingungen ($37\pm 2^\circ\text{C}$) gelagert und nach jeder Gasmessung per Hand geschüttelt, um eine vollständige Durchmischung, vor allem bzgl. der Kohlepartikel, zu garantieren. Das Biogas wird in Säcken gesammelt und seine Menge und Zusammensetzung (CH_4 , CO_2 , H_2S , O_2) erfasst. Ab der vierten Woche wird aufgrund des zu erwartenden geringeren Gasertrages in 3-Tages-Intervallen gemessen.

4. Ergebnisse

Die durchgeführten Gasertragsuntersuchungen zeigen ähnliche Tendenzen wie die bisher publizierten Ergebnisse von Kumar et. al und Inthapanya et al. [19] [20]. Variante 1 und 2 verlaufen gemäß den Vergleichs-Ertragsdaten vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) und der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) [24] [25]. In allen Versuchen mit Pflanzenkohle konnte über den gesamten Zeitraum von 91 Tagen ein Mehrerertrag gemessen werden (siehe Abbildung 2). Die Simulation des Hauptfermenters wurde anhand Variante 2 und 3 durchgeführt. Dabei konnte die zweite Variante mit Mais und ohne Pflanzenkohle einen kumulierten Methanertrag von ca. 57 NI erzielen. Durch die Zugabe von Pflanzenkohle (Variante 3) konnte ein zusätzlicher Mehrerertrag von 8,89 % gemessen werden. Vor allem die Entwicklung des spezifischen Mehrerertrages über die Zeit ist zu beachten. Unter Berücksichtigung der üblichen Verweilzeiten der Substrate von 40–45 Tagen [24] kann

durch die Zugabe von Pflanzenkohle genau in diesem Zeitraum der höchste Mehrerertrag erzielt werden. Dadurch könnte vor allem diese Variante für die Praxis von hohem Interesse sein.

In Tabelle 2 sind die Methanerträge bezogen auf die eingesetzte organische Trockensubstanz des Mais dargestellt. Dabei wird angenommen, dass die organische Substanz der Kohle anaerob nicht abgebaut wird [26]. Der Abbau der Maissilage im Hauptfermenter (siehe Tabelle 2) entspricht dem normalen Verlauf der Gasbildungskurve nach VDI RL 4630 und es werden über die 91 Tage ca. 90 % der oTS abgebaut (rechnerisch über kumulierte Methanmenge ermittelt). Durch die Zugabe der Pflanzenkohle kann bereits nach 18 Tagen ein Mehrerertrag von 18,93 % erreicht werden und nach 40 Tagen wird das größte Delta von 21,70 % erzielt. Bis zum Ende der Versuchsreihe verringert sich der Mehrerertrag und beträgt lediglich 8,89 %. Dieser Verlauf spricht für einen besonderen Einfluss auf die Abbaukinetik von leicht abbaubarer organischer Substanz durch den Eintrag von Pflanzenkohle.

Die Gasertragsanalyse für den Nachgärer zeigt ebenfalls ein positives Ergebnis. So konnte die Beimischung von Pflanzenkohle (Variante 4) sowie gesiebter Pflanzenkohle (Variante 5) zum Gärrest durch einen Mehrerertrag überzeugen. Anfangs konnte ein ähnlicher positiver Verlauf dieser Varianten über die ersten 25 Tage analysiert werden. Bezogen auf die organische Trockensubstanz des Gärrestes könnte in den ersten 8 Tagen sogar eine leichte Hemmung stattgefunden haben, da teilweise geringere Methanerträge erzielt wurden (vgl. Abbildung 2). Jedoch ist die Varianz der Messergebnisse sehr hoch, sodass dieses zukünftig genauer zu analysieren ist. Die Variante 5 erzeugt ca. 2,68 % weniger Methan bis zum 40. Versuchstag im Vergleich

d	Hauptfermenter		Delta [$\Delta\%$ zu MS]
	MS	MS/BC	
	[NI $\text{CH}_4/\text{kg}_{\text{oTS}}$]		
25	377	449	18,93
40	398	485	21,70
60	431	508	17,81
91	488	532	8,89

Tabelle 2
Vergleich des spezifischen Mehrerertrages durch die Zugabe von Mais mit der Kombination Pflanzenkohle und Mais

Tabelle 3
Relativer Mehrertrag durch die Zugabe von Pflanzenkohle bzw. gesiebter Pflanzenkohle zum Gärrest

d	Nachgärer	
	BC [Δ% zu GR]	BC13 [Δ% zu GR]
25	12,78	13,51
40	17,34	14,66
60	15,13	17,90
91	13,59	24,03

zur Variante 4 (GR/BC), wobei diese bis zu diesem Zeitpunkt bereits 17,34 % mehr Methan erzeugen konnte (siehe Tabelle 3). Interessant ist die insbesondere für Nachgärer übliche längere Verweilzeit. Ab dem 40. Versuchstag konnte ein stetiger Anstieg der Methanproduktion der Variante 5 im Vergleich zur originären Pflanzenkohle gemessen werden. So erreicht diese Variante am Ende des Versuches einen Mehrertrag von 24,03 % im Vergleich zur Variante 4 mit 13,59 %.

5. Diskussion

5.1 Thesen zur Verbesserung des Biogasertrages

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen eindeutig eine Verbesserung der Biogasproduktion bzw. einen signifikanten Mehrertrag gegenüber der Referenzlinie. Durch die Zugabe der Pflanzenkohle werden sowohl eine bessere Substratausnutzung im Hauptfermenter als auch eine deutlich höhere Ausschöpfung des Gärrestpotenzials erreicht. Dieser Effekt ist bei allen drei Varianten, bei denen Pflanzenkohle eingesetzt wurde, zu erkennen. Allerdings sind die Wirkungsmechanismen der Pflanzenkohlen im Gärprozess hinsichtlich der Ertragsverbesserung zurzeit noch nicht eindeutig geklärt. Zum einen könnte der Mehrertrag entgegen der Annahme zumindest teilweise aus dem Eigenabbau der Pflanzenkohle stammen und zum anderen durch die positive Beeinflussung des Habitats für Mikroorganismen bedingt sein.

Die Literaturrecherche sowie eigene Untersuchungen zeigen allerdings, dass der Mehrertrag durch anaeroben Kohlenstoffabbau der Pflanzenkohle weitestgehend ausgeschlossen werden kann. Die Untersuchungen zur Stabilität unterschiedlich aufbereiteter Biomasse an der HAWK bescheinigen der Pflanzenkohle (aus Treibsel) eine hohe Stabilität, da eine geringe Atmungsaktivität (AT4) identifiziert wurde [26]. Die Bestimmung des gelösten organischen Kohlenstoffes durch das Eluieren zeigt mit 61 mg/l DOC ebenfalls einen sehr geringen Anteil, der für die Vergärung mobilisierbar wäre [26]. Daher ist zu vermuten, dass nur der flüchtige und lösliche Bestandteil der Kohle unter anaeroben Bedingungen zu Biogas umgesetzt werden kann. Der rechnerisch ermittelte Mehrertrag aus biologisch abbaubaren Kohlenstoff liegt so bei etwa 0,56 l CH₄/kg der eingesetzten Pflanzenkohle (FM). Damit wäre der Mehrertrag durch den Eigenabbau der Pflanzenkohle zu vernachlässigen.

Naheliegender ist deshalb die Erklärung, dass durch die Vergrößerung der spezifischen Aufwuchsfläche eine leistungsstärkere Biozönose syntropher Mikro-

organismen entsteht. So zusätzlich geschaffene Lebensräume im Fermenter führen zu besserem Austausch sowie effektiverem und schnellerem Abbau der Substrate und Metaboliten. Die Mikroorganismen sind dabei in der Matrix der Pflanzenkohle geschützt und dadurch geringeren Scherkräften ausgesetzt, die die Biozönosen durch das ständige Rühren des Fermenterinhaltens immer wieder zerstören.

Eine andere mögliche Erklärung liefert die Fähigkeit der Pflanzenkohle, ähnlich der der Aktivkohle, Schadstoffe aufzunehmen und damit die Hemmeffekte der Biologie zu reduzieren. Diese These wird durch den Einsatz der Pflanzenkohle als Futtermittelzusatz in der Viehhaltung gestärkt [27]. Die Aktivkohle, als sogenanntes Adsorbens, wird als Zusatzstoff mit toxinbindender Wirkung in der Tier- und Humanmedizin eingesetzt, um Giftstoffe aus dem Magen-Darm-Trakt zu entfernen.

Eine verbesserte Versorgung der Mikroorganismen mit essentiell wichtigen Spurenelementen könnte ebenfalls ein Grund für die Gasertragsteigerung sein. Spurenelemente sind Gärhilfsstoffe, die an Biogasanlagen eingesetzt werden, um die mikrobiologischen Prozesse zu fördern. Sollte sich in weiteren Untersuchungen der Effekt der besseren Mikronährstoffversorgung durch die Pflanzenkohle bestätigen, können daraus auch ökonomische Vorteile ergeben. Um die Wirkungsmechanismen der Pflanzenkohle im anaeroben Gärsystem besser zu verstehen, sind weitere Forschungsprojekte seitens der HAWK geplant.

5.2 Zukunft des Kaskadenansatzes

Wie eingangs schon erwähnt sollte aus Kostengründen versucht werden, die positiven Effekte der Pflanzenkohle nacheinander in verschiedenen Anwendungen zu nutzen. Dies würde direkte (Erlöse) und indirekte (Einsparungen) Erträge generieren, die die Verwendung von Pflanzenkohle fördern könnten. Durch organische Düngestoffe wird in der Landwirtschaft ein, wenn auch unvollständiger, Kohlenstoff- und Nährstoffkreislauf geschaffen. Dieser kann modifiziert werden, um vorteilhaft Kohlenstoff im Boden anzureichern.

Es stellt sich die Frage, an welcher Stelle aus betriebswirtschaftlicher Sicht der Einsatz von Pflanzenkohle vorteilhaft ist oder gar mehrfachen Nutzen liefert. Im vorliegenden Kontext spannt sich der Bogen der Möglichkeiten vom Tierfutter- bzw. Nahrungsmittelzusatz über die Biogasgewinnung aus Stallung, organischen Abfällen sowie aus Energiepflanzen und den Einsatz von Gärresten als organische Düngestoffe bis hin zur erneuten Biomassebildung. Eine umfassende Übersicht der Nutzungsmöglichkeiten wird von H.-P. Schmidt gegeben [12]. Für die hier vorgestellte Prozesskette ergeben sich zusammenfassend folgende Anwendungen:

- als Zusatz zu Futtermitteln, sowie als Nahrungsmittelergänzung,
- als Promotor bei der Konservierung (Silierung) von Energiepflanzen sowie der Biogasgewinnung
- als vielfältiges Adsorbens in der Gülle- und Gärrestbehandlung, und nicht zuletzt als
- Mittel zur Verbesserung der Ackerbodenqualität.

Durch die Zugabe der Pflanzenkohle werden sowohl eine bessere Substratausnutzung im Hauptfermenter als auch eine deutlich höhere Ausschöpfung des Gärrestpotenzials erreicht.

Im Einzelnen, obwohl teilweise schon untersucht, sind folgende systemische Fragen noch ungeklärt:

- ◆ Lässt sich aus der Verkettung der Anwendungen im vorliegenden Kontext tatsächlich ein mehrfacher Nutzen ziehen, der jeweils monetär bewertbar ist?
- ◆ Sind Unterschiede in Wirkungsweise und Nutzen von Pflanzenkohle bei verschiedenen Verdauungssystemen (Monogastrier, Wiederkäuer, Geflügel) sowie den verschiedenen Energiepflanzen (Süßgräser, Knollen- und Wurzelfrüchte), Pflanzenteile bzw. physiologischen Status festzustellen?
- ◆ Wie wirken sich verschiedene Verkettungen der Einzelanwendungen auf den Gesamtnutzen aus?

So ist bislang noch unklar, ob die unbestritten positiven Wirkungen der Pflanzenkohle in der Tierernährung nachfolgend sich auch bei der Vergärung der Ausscheidungen dieser Tiere auswirken. D. h., in wie weit lassen sich die positiven Wirkungen der Pflanzenkohle nach der Nutzung als Tierfuttermittelzusatz auch in der nachfolgenden Vergärung des Stallungsnachweises. Ferner liegen noch keine Erkenntnisse über die Verbesserung des Silierergebnisses verschiedener Energiepflanzen bei Einsatz von Pflanzenkohle sowie über die Wirkung auf die nachfolgende Vergärung vor. Hier sei die Hypothese aufgestellt, dass substratspezifische Faktoren sowie die Kinetik der Säurebildung die Wirkung(en) der zugesetzten Pflanzenkohle determinieren.

Im Grunde müsste der Frage nachgegangen werden, ob ein einmaliger Einsatz zu Beginn der Nahrungs- und Energieerzeugung und eine damit verbundene Durchschleusung durch die Prozesskette einen höheren Gesamtnutzen aufzeigt als eine mehrmalige Verwendung bzw. Einbringung in einzelnen Prozessen.

Literatur

- [1] Hansen, J., et al. Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? The Open Atmospheric Science Journal 2, 2008. S. 217-231.
- [2] IPCC. Summary for Policymakers. R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow O. Edenhofer. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. 2011.
- [3] Glaser, Bruno, Haumaier, L, Guggenberger, G und Zech, W. 'Terra preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics: Naturwissenschaften 88 (1) 37-41, 2001.
- [4] Jeffrey, Simon, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment. 144, 2011, S. 175-187.
- [5] Lehmann, Johannes, et al. Biochar for Environmental management - Science and Technology. Johannes Lehmann und Stephen Joseph. London: Earthscan, 2009. S. 183-205.
- [6] Singh, N, et al. Fire-derived organic carbon in soil turns over on a centennial scale. Biogeosciences. 9, 2012, S. 2847-2857.
- [7] Brownsort, Peter. Biomass Pyrolysis Processes: Review of Scope, Control and Variability. Edinburgh : UK Biochar Research Center, 2009.
- [8] Hammond, J. und Shackley, S. Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK: Energy Policy (39), 2011. S. 2646-2655.
- [9] Steiner, C, Glaser, B und WG, Teixeira. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferrasol amended with compost and charcoal. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 171, 2008 (6), S. 893-899.
- [10] Libra, Judy a., et al. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. s.l. : Biofuels 2(1), 2011. S. 89-124. ISSN 1759-7269.
- [11] Kolb, SE, Fermanich, KJ und Dornbush, ME. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils. SSSAJ. 73, 2009 (4), S. 1173-1181.
- [12] Schmidt, Hans-Peter. 55 Anwendungen von Pflanzenkohle. Ithaka - Journal für Terroir, Biodiversität und Klimafarming. [Online] 29. Dezember 2012. www.ithaka-journal.net.
- [13] Quicker, Peter und Schulten, Marc. Biokohle: Erzeugung und technische Einsatzmöglichkeiten. Müll und Abfall. 2012 (9).
- [14] van Zwieten, L, Kimber, S und Morris, S. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste in agronomic performance and soil fertility. Plant Soil. 2010 (1), S. 235-246.
- [15] Steiner, C., Teixeira, M. und Zech, W. Soil respiration curves as soil fertility indicators in perennial central Amazonian plantations treated with charcoal, and mineral or organic fertilizers: Tropical Science 47(4), 2007. S. 218-230.
- [16] Sparkes, J. und Stoutjesdijk, P. Biochar: implications for agricultural productivity. Canberra: ABAREAS Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences, 2011. S. Technical Report 11.6.
- [17] Steiner, C., et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. Plant Soil. 291, 2007, S. 275-290.
- [18] Shackley, S., et al. The feasibility and costs of biochar deployment in the UK. Carbon Management. 2011(2), S. 335-356.
- [19] Kumar, Sushil, Jain, M.C. und Chhonkoar, P.K. A Note on Stimulation of Biogas Production from Cattle Dung by Addition of Charcoal. Biological Wastes. 20, 1987, S. 209-215.
- [20] Inthapanya, S., Preston, TR und Leng, RA. Biochar increases biogas production in a batch digester charged with cattle manure. Livestock Research for Rural Development. 2012 (12).
- [21] Nomura, Toshiyuki, et al. Selective Immobilization of Aceticlastic Methanogens to Support Material. Osaka : Department of Chemical Engineering Osaka Prefecture University; KONA Powder and Particle Journal No.26 (2008), 2006.
- [22] Weiß, S., et al. Selektive Förderung von Biogasmikroorganismen durch Migulatoren. Osnabrück : Biogas-Innovationskongress , 2012.
- [23] Feher, Adam, et al. Bedarfsgerechter Einsatz von Spurenelement-Biogasadditiven unter Berücksichtigung der Bioverfügbarkeit. Michael Nelles und Peter Weiland. Biogas 6. Innovationskongress. Osnabrück , 2013.
- [24] vTi. Biogas-Messprogramm II. Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2009. 978-3-9803927-8-5.
- [25] KTBL. Faustzahlen Biogas. Darmstadt : Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 2007. 978-3-939371-46-5.
- [26] Ahlborn, Christine und Wallmann, Rainer. Stabilität unterschiedlich aufbereiteter Biomassen. Müll und Abfall. 2011(11), S. 522-529.
- [27] Gerlach, Achim. Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierhaltung und Güllebehandlung. K. Fricke, et al. Arbeitskreis für die Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen e.V. (ANS e.V.). Biokohle im Blick - Herstellung, Einsatz und Bewertung. Berlin : Orbit e.V., 2012, Nachtrag.

Anschrift der Autoren

HAWK Hildesheim / Holzminden / Göttingen

Fakultät Ressourcenmanagement

Fachgebiet Nachhaltige Energie- und Umwelttechnik NEUTec
Rudolf-Diesel Str. 12
37075 Göttingen

Folgen Sie uns auf Twitter 

So erhalten Sie künftig Nachrichten zu aktuellen Angeboten, unserer Teilnahme an Veranstaltungen – und vieles mehr!

www.ESV.info/Twitter

Sie möchten einen unserer Titel über Twitter weiterempfehlen? Auch das geht jetzt auf unseren Produktseiten ganz einfach per Mausklick.

ESV ERICH
SCHMIDT
VERLAG

Auf Wissen vertrauen



Der Standard an Vollständigkeit und Aktualität

Seit Jahrzehnten informiert dieser Kommentar fundiert und zuverlässig. Die Kombination aus Vorschriften-sammlung und Kommentierung bietet Ihnen:

- ▶ die Kommentierung der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98,
- ▶ Kommentierungen zum neuen Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und zur neuen Deponieverordnung (DepV),
- ▶ den Praktiker-Kommentar zur Nachweisverordnung mit Erläuterung der Vorschriften über das elektronische Nachweisverfahren,
- ▶ laufend weitere und aktualisierte Kommentierungen einschlägiger Vorschriften, z. B. ElektroG, AbfBeauftrV, AltfahrzeugV, Altölv und KlärschlammV,
- ▶ zahlreiche relevante Nebengesetze, die in Sammelbänden regelmäßig nicht zur Verfügung stehen,
- ▶ aktuelle Mitteilungen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA).

Recht der Abfallbeseitigung des Bundes, der Länder und der Europäischen Union

Kommentierungen der Abfallrahmenrichtlinie, des KrWG und weiterer abfallrechtlicher Gesetze und Verordnungen

Begründet von Prof. Dr. med. habil. Gottfried Hösel, Ministerialdirigent a. D., und Prof. Dr. jur. Heinrich Freiherr von Lersner, Präsident des Umweltbundesamtes a. D.

Herausgegeben von Prof. Dr. jur. Heinrich Freiherr von Lersner, Dr. jur. Helge Wendenburg, Ministerialdirektor im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, und Prof. Dr. jur. Ludger-Anselm Versteyl, Rechtsanwalt und Notar, Fachanwalt für Verwaltungsrecht
Loseblattwerk, 10.104 Seiten in 6 Ordnern,
€ (D) 154,-, ca. 5 Ergänzungslieferungen pro Jahr,
ISBN 978-3-503-00828-5

Weitere Informationen:

 www.ESV.info/978-3-503-00828-5

Das besondere PraxisPlus für Sie als Abonnent: Sie erhalten **kostenlosen Zugriff auf UMWELTdigital**, der umfangreichen, ständig aktualisierten Umweltrechtsdatenbank aus dem Erich Schmidt Verlag mit Vorschriften der EU, des Bundes und der Länder. Profitieren Sie u. a. von der Volltextsuche, aktueller Rechtsprechung sowie dem wöchentlich erscheinenden Newsletter und dem Veranstaltungskalender.

Kostenfrei aus dem deutschen Festnetz
bestellen: 0800 25 00 850

ESV ERICH
SCHMIDT
VERLAG

Auf Wissen vertrauen

Bestellungen bitte an den Buchhandel oder: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG · Genthiner Str. 30 G · 10785 Berlin
Tel. (030) 25 00 85-229 · Fax (030) 25 00 85-275 · ESV@ESVmedien.de · www.ESV.info