

Exposé zukunftsweisender Einkommensoptionen für Biogasanlagenbetreiber

Herstellung von Pflanzenkohle aus Gärresten zur stofflichen Nutzung



© Bilder: Andreas Muskolus, ISAP (links), Maja Schultze, ATB (rechts)

Verena Wilken | Landwirtschaftskammer Niedersachsen

Mark Paterson | Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

Erstellt: Februar 2021

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Projektes „Biogas Progressiv: Zukunftsweisende Strategien für landwirtschaftliche Biogasanlagen“ (ProBiogas), finanziert mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) aus dem Sondervermögen Energie- und Klimafond (FKZ: 22405416; 22407617; 22408117)

Einleitung

Für zahlreiche Biogasanlagenbetreiber, stellt sich mit Ablauf der 1. EEG-Förderperiode nach 20 Jahren die Frage, wie ihre Anlage weiterhin rentabel regenerative Energie produzieren kann. Die im Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG 2021) vorgesehene Verlängerung der Vergütung über die Ausschreibungen für Biomasseanlagen bietet grundsätzlich die Möglichkeit eines Weiterbetriebs, allerdings sind dafür technisch sowie ökonomisch optimierte Anlagenkonzepte notwendig.

Mit dem Projekt „Biogas Progressiv – zukunftsweisende Strategien für landwirtschaftliche Biogasanlagen“ (ProBiogas) verfolgen die Projektpartner das Ziel, praxistaugliche Verfahrensoptionen für den Weiterbetrieb von Biogasanlagen zu evaluieren. Alle potenziellen Nutzungsoptionen, die im Projekt nicht techno-ökonomisch detailliert dargestellt werden konnten, werden in Form eines Konzeptsteckbriefs vorgestellt.

Bei den hier beschriebenen Verfahrensoptionen handelt es sich um Konzepte, die derzeit zum Beispiel nur über einen eingeschränkten Absatzmarkt verfügen, sich noch in der Entwicklung befinden, nicht die Marktreife erlangt haben oder nur unter sehr speziellen Bedingungen realisiert werden können. Sie alle eint jedoch, dass sie in Zukunft eine mögliche Einkommensquelle für landwirtschaftliche Biogasanlagen darstellen können.

Dieses Exposé soll als fundierte Entscheidungshilfe dienen, ob sich mit der Herstellung von Pflanzenkohle aus Gärresten für den Biogasbetrieb eine Erlössituation realisieren lässt.

1. Allgemeine Beschreibung

Pflanzen- oder auch Biokohle ist ein poröses kohlenstoffreiches Produkt, das durch die Behandlung von organischem Material wie Holz, Klärschlamm oder auch Gärresten entsteht. Eine Verkohlung von organischem Material findet im Gegensatz zur Verbrennung unter Sauerstoffausschluss statt und kann sowohl durch Pyrolyse als auch durch Hydrothermale Carbonisierung erreicht werden. Die Ausbeute an Pflanzenkohle, die stoffliche Zusammensetzung und die physikalischen Eigenschaften der Produkte können je nach Ausgangssubstrat und Prozessparameter stark schwanken (Haubold-Rosar et al. 2016). Der englische Begriff „biochar“ wird im Deutschen häufig mit Biokohle übersetzt. Zur Vermeidung einer Verwechslung mit biozertifizierten Landwirtschaftsprodukten eignet sich der neutralere Begriff „Pflanzenkohle“ besser (Schmidt 2011) und wird hier im Folgenden genutzt.

Die Kopplung von der Pflanzenkohleherstellung mit dem Biogasprozess basiert auf der Verwendung der Gärreste als ein mögliches organisches Substrat. Ein weiterer Schnittpunkt ist die Möglichkeit, Pflanzenkohle als Zuschlagsstoff im Biogasprozess zur Verbesserung der Effizienz einzusetzen, dieser Aspekt wird hier aber nur kurz in Abschnitt 4 beleuchtet.

Bekannt wurde die Pflanzenkohle als ein Teil der im Amazonasgebiet vorzufindenden schwarzen, anthropogenen Erden, Terra preta genannt. Neben Kohle wurden von den Indios vor über 1.000 Jahren Speisereste, menschliche Fäkalien und Tonscherben in die



Böden eingebracht, um die ausgewaschenen und damit nährstoffarmen Böden fruchtbar zu machen.

Seit einigen Jahren wird zu diesem Aspekt der Bodenverbesserung durch die Einbringung von Pflanzenkohle in den Boden, aber auch zu anderen Nutzungsmöglichkeiten (Stalleinstreu, Futterzuschlagsstoff, Herstellung von SuperCaps¹, Additiv für den Biogasprozess) sowie einer möglichen Kaskadennutzung von Pflanzenkohle intensiv geforscht und berichtet. Werden Gärreste zur Herstellung von Pflanzenkohle verwendet, so werden deren Düngereigenschaften durch den Umwandlungsprozess maßgeblich verändert. Aus dem mineralisch-organischen Mehrnährstoffdünger wird ein hauptsächlich auf C-Zufuhr ausgerichteter Bodenverbesserer. Nährstoffe werden längerfristig gebunden und nur langsam freigesetzt.

Vorteile

In der aktuellen Klimadebatte wird Pflanzenkohle als eine Möglichkeit diskutiert, CO₂ aus der Atmosphäre zu binden und durch die intensive Stabilisierung des Kohlenstoffs langfristig im Boden zu speichern (Kohlenstoffsequestrierung) (Teichmann 2014). Das Einbringen von Pflanzenkohle in den Boden führt zu einer Veränderung der physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des Bodens. Die Pflanzenkohle greift somit in das offene System „Boden“ ein und ändert auch die vorhandenen Stoffflüsse und -kreisläufe, v. a. den Kohlenstoffkreislauf und den Stickstoffkreislauf (Drews-Shambroom 2018). Die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Pflanzenkohle können zu einer Bodenverbesserung beitragen, da die Kohle durch ihre große innere und äußere Oberfläche eine hohe Sorptions-, Bindungs- und Einlagerungsfähigkeit für Nährstoffionen und anorganische sowie organische Verbindungen aufweist. Nach der Ausbringung an der Luft oder durch eine spezielle Aktivierung bei der Herstellung entstehen an den Oberflächen der Pflanzenkohle funktionelle Gruppen mit negativem Ladungsüberschuss, welche die Sorptionskapazität für Nährstoffkationen wie K⁺, Mg²⁺ oder NH₄⁺ erhöhen. Gleichzeitig besitzt Pflanzenkohle auch Adsorptions- und Speicherkapazitäten für Nährstoffanionen (z. B. PO₄⁻) (Haubold-Rosar et al. 2016). Weitere Vorteile bei der Herstellung von Pflanzenkohle aus organischen Reststoffen werden in der starken Massereduktion und der damit verbundenen Erhöhung der Transportwürdigkeit gesehen, in der Schnelligkeit des Behandlungsverfahrens, beispielsweise im Vergleich zur Kompostierung, sowie in einer gleichzeitigen Hygienisierung des Materials durch die hohen Prozesstemperaturen.

¹ SuperCaps sind Superkondensatoren aus Biokohle, die eine lange Lebensdauer haben sollen und Energie schnell speichern und liefern können; Projekt von der Universität Hohenheim, Leiterin Dr. Andrea Kruse, Abteilung Konversionstechnologien nachwachsender Rohstoffe.



Nachteile

Viele der deutschen und internationalen Forschungsvorhaben haben aber gezeigt, dass nicht alle erwarteten vorteilhaften Eigenschaften und Effekte auftreten und dass die Herstellung und Verwendung von Pflanzenkohle auch Nachteile mit sich bringen kann. Beginnend mit der Herstellung sollten nur schadstofffreie Produkte zur Verkohlung genutzt werden, da Schadstoffe während des Verkohlungsprozesses angereichert werden können. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass durch den Verkohlungsprozess organische Schadstoffe wie Dioxin, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) oder leicht flüchtige Verbindungen erst entstehen, was es durch eine angepasste Prozessführung zu vermeiden gilt. Für die Aufbringung von Pflanzenkohle auf den Boden zur Verbesserung der Bodeneigenschaften kann davon ausgegangen werden, dass mindestens 5 bis 10 t TM Pflanzenkohle je Hektar notwendig sind, um überhaupt einen Effekt zu erzielen, zum Beispiel auf sandigen Standorten. Zu wiederholten geringeren Ausbringungsmengen von Pflanzenkohle fehlen bisher Untersuchungen. Ein positiver Effekt im Boden durch die Ausbringung von Pflanzenkohle ist überhaupt nur zu erwarten, wenn der Boden in den Bereichen, in denen die Pflanzenkohle wirken soll, nicht optimal eingestellt ist, d. h. bei Böden mit geringem Humusgehalt, mit saurer Bodenreaktion, mit geringer Nährstoff- und Wasserversorgung und bei geringer bodenbiologischer Aktivität. Auf bereits guten, ertragsfähigen Böden wurden in verschiedenen Versuchen keine Änderungen oder sogar Ertragsminderungen durch den Einsatz von Pflanzenkohle festgestellt (Reibe 2015, Kloss et al. 2014, Lehner et al. 2017). Trotz der großen Anzahl an Untersuchungen fehlt es an tieferem Prozessverständnis von der Wirkung der Kohlen auf den Nährstoffhaushalt und die Fauna im Boden, insbesondere was die Entwicklungen über lange Zeiträume angeht. So nimmt z. B. der hydrophobe Charakter der Biokohlen mit zunehmender Alterung ab und die Wasserspeicherkapazität nimmt damit zu. Stickstoff wird zunächst durch die Pflanzenkohle festgelegt, wodurch Auswaschungen und Emissionen verringert werden, wodurch aber auch die Pflanzenverfügbarkeit abnimmt, was die negativen Ertragseffekte nach der Ausbringung zum Teil erklärt. Eine zusätzliche Düngung oder eine vorherige sogenannte Aktivierung, also die Beladung der freien Bindungsplätze der Pflanzenkohle mit Nährstoffmolekülen, könnte hier Abhilfe schaffen. Dies wird beispielsweise durch eine Kompostierung oder Fermentation mit nährstoffreichen organischen Stoffen realisiert. Dadurch „altert“ die Kohle und die Kationenaustauschkapazität des Bodens wird erhöht (Haubold-Rosar et al. 2016). Insgesamt ist der Einsatz von Pflanzenkohle am ehesten für sehr ertragsschwache Böden und dort für wertvolle Kulturen lohnend. Zudem wurde ein negativer Einfluss von Pflanzenkohle im Boden auf die Wirksamkeit von Bioziden (Fungizide, Herbizide, Insektizide) festgestellt, was durch die hohe Adsorptionsfähigkeit bedingt ist. Das bedeutet, dass Biozide und Pflanzenkohle nicht gleichzeitig angewendet werden sollten (Drews-Shambroom 2018).

Der Marktpreis von Pflanzenkohle ist derzeit noch zu hoch, um einen Anreiz für eine flächenmäßige Ausbringung in den oben genannten Mengen vorzunehmen, zumindest solange der zusätzliche Erlös aus den Ertragssteigerungen der einzige Gewinn aus dieser



Maßnahme bleibt, da diese über einen sehr langen Zeitraum bestehen müsste. Falls es irgendwann eine CO₂-Bepreisung geben sollte, die für Biokohle-Herstellung und -Verwertung greift, wäre die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme neu zu überprüfen.

Rechtlich ist in Deutschland die Ausbringung von Pflanzenkohle aus Gärresten bisher nicht erlaubt. Nach der Düngemittelverordnung (DüMV 2012) Anlage 2, Tabelle 7 (Hauptbestandteile) ist die Ausbringung von Pflanzenkohle als Ausgangsstoff für Kultursubstrat sowie als Trägersubstanz in Düngemitteln aus chemisch unbehandeltem Holz und mit mindestens 80 % C in der Trockenmasse, hergestellt durch Pyrolyse, erlaubt. Da die Qualität und Zusammensetzung der Pflanzenkohlen je nach verwendetem Substrat und nach Herstellungsverfahren stark schwanken können, wäre ein Kontroll- und Zertifizierungssystem mit einheitlich definierten Qualitätskriterien wünschenswert, wie dies in Deutschland beispielsweise für Kompost durch die RAL-Gütesicherung existiert. In der Schweiz wurde 2012 das „European Biochar Certificate“ eingeführt, welches aber bisher freiwillig ist. Das Europäische Pflanzenkohlezertifikat unterscheidet die Qualitätsstufen „Basic“, „Premium“ und „Futter“ und beinhaltet Anforderungen zur eingesetzten Biomasse, an die Eigenschaften der Pflanzenkohle (z. B. Inhalts- und Schadstoffe) sowie u. a. Anforderungen zur Pyrolysetechnik.

2. Verfahrenstechnische Beschreibung

Es gibt zwei Verfahren zur Erzeugung von Pflanzenkohle, die Hydrothermale Carbonisierung (HTC) und die Pyrolyse. Pflanzenkohle entsteht durch die Erhitzung von meist pflanzlicher Biomasse ohne Sauerstoffzufuhr. Im Verlauf der Pyrolyse und der Hydrothermalen Carbonisierung führen höhere Temperaturen zur Verdampfung bestimmter Biomasseanteile.

Die Hydrothermale Carbonisierung ist ein chemisch-physikalisches Verfahren, bei dem organische Masse durch Zufuhr von Wasser und Wärme und durch den dabei entstehenden Druck im Verlauf einer exothermen Reaktion in Kohle und Wasser umgesetzt wird. Dieser Prozess der Inkohlung fand über Millionen von Jahren hinweg unter geologischen Einflüssen statt (Ramke und Blöhse 2010) und wird sich nun technisch zunutze gemacht.

Um das HTC-Verfahren einzusetzen, wird ein Druckgefäß mit den ausgewählten pflanzlichen Produkten, Wasser und einem geeigneten Katalysator gefüllt. Als pflanzliche Substrate lassen sich verschiedenste organische Materialien verwenden, wie Laub, Holz, Wildpflanzen oder die hier thematisierten Gärreste. Danach wird das Reaktionsgefäß geschlossen und unter Druck und Luftabschluss bei 180 bis 220 °C für 4 bis 12 Stunden erhitzt. Nach der Abkühlung der Mischung entsteht eine wässrige schwarze Flüssigkeit mit braunkohleartigen Partikeln (Ramke und Blöhse 2010).

Bei der Pyrolyse werden durch hohe Temperaturen von 200 bis 900 °C und unter Sauerstoffausschluss große Moleküle geteilt und es entstehen die Produkte Kohle, kondensierbare Dämpfe und thermisch nutzbares Pyrolysegas. Vor der Pyrolyse ist eine Aufbereitung der Gärreste notwendig, um mit einem Trockenmassegehalt von mindestens



35 % in die thermochemische Umwandlung zu starten. Hierzu könnte durch eine Trocknung mittels Abwärme aus der Biogasanlage oder durch Zugabe trockener Biomassereststoffe ein Trockenmassegehalt bis zu 50 % erreicht werden.

Technisch wird die Pyrolyse in geschlossenen Behältern durchgeführt. Das Ausgangsmaterial wird entweder als ruhende Schüttung vorgelegt und dann erhitzt oder es wird kontinuierlich eingetragen bzw. durch den Reaktor gefördert (Schnecken, Drehrohr, ablative Pyrolyse). Die Produkte der Pyrolyse sind Gase (CO_2 , H_2 , CO), kondensierbare Dämpfe (H_2O und organische Verbindungen) sowie ein fester kohlenstoffreicher Rückstand (Holzkohle), der als Pflanzenkohle genutzt werden kann (Haubold et al. 2014). Die enthaltene flüssige Phase nach der Pyrolyse kann in der Biogasanlage für Methangewinnung weiterverwendet werden. Die Verdampfung von extra-, inter- und intrazellulärem Wasser aus der Biomasse gehört zu den ersten Schritten der Pyrolysereaktionen (bis ca. $200\text{ }^\circ\text{C}$) und verläuft endotherm, also unter Energiezufuhr (Radloff 2016).

Bei der sogenannten pyrolytischen Verkohlung oder langsamen Pyrolyse steht die Produktion von festen Pyrolyseprodukten, also Kohle, im Vordergrund. Die Reaktionsbedingungen liegen meist bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen, niedrigen Aufheizraten und langen Verweilzeiten. Wenn die Temperaturen zwischen 250 und $300\text{ }^\circ\text{C}$ und die Verweilzeiten zwischen 15 und 30 min liegen, wird das Wasser verdampft und sauerstoffreiche Verbindungen werden abgebaut, der sogenannte Prozess der Torrefizierung (Radloff 2016).

Ein Vergleich der beiden Verfahren und deren Produkte zeigt, dass ein Vorteil der Hydrothermalen Carbonisierung gegenüber der Pyrolyse darin besteht, dass nasse Gärreste verwertet werden können, ohne vorher aufwendig getrocknet werden zu müssen. Zusätzlich lässt sich nach dem Prozess die entstehende HTC-Pflanzenkohle besser von der wässrigen Phase abtrennen als bei anderen organischen Materialien, die erst aufwendig entwässert oder getrocknet werden müssen. Hierdurch und durch den exothermen Ablauf der Reaktion ist die Energiebilanz des Verfahrens günstiger als bei der Pyrolyse. Zudem ist die Ausbeute an Biokohle bei dem HTC-Verfahren mit 50 bis 80% deutlich höher als bei der schnellen Pyrolyse mit nur 12% bzw. 35% bei der langsamen Pyrolyse (Teichmann 2014). Gleichzeitig bestimmen die Konversionsverfahren und Reaktionsbedingungen auch die Eigenschaften der Pflanzenkohle. So gilt zwar, dass mit steigender Temperatur der Ertrag der Pflanzenkohle sinkt, gleichzeitig nimmt dabei aber auch der Kohlenstoffgehalt der Pflanzenkohle zu. Bei den trockenen Verfahren wird bei der langsamen Pyrolyse insgesamt am meisten Kohlenstoff von der Biomasse in die Pflanzenkohle transferiert, deswegen sind sie besonders gut für eine Kohlenstoff-Sequestrierung im Boden geeignet. HTC-Kohlen sind im Vergleich weniger stabil (Teichman 2014).



3. Anknüpfungspunkte zur Biogasanlage

Gärreste aus der Biogasproduktion können zur Herstellung von Pflanzenkohle genutzt werden. Nach Separation und Trocknung kann eine Pyrolyse erfolgen. Soll das Wasser aus den Gärresten mit genutzt werden, kommt eine Hydrothermale Carbonisierung in Frage.

Die Pflanzenkohle aus Gärresten könnte, rechtliche Regelungen nicht berücksichtigt, für verschiedene Zwecke genutzt werden. Die Ausbringung von Pflanzenkohle auf den Boden zur langfristigen C-Sequestrierung und potenziellen Bodenverbesserung ist vielfach getestet und diskutiert worden (siehe Abschnitt 2). Die Anwendung von Pflanzenkohle als Dünger oder Bodenhilfsstoff ist bisher rechtlich nicht erlaubt und der Kauf für Landwirte nicht ökonomisch, da die Anschaffungskosten nicht durch die potenziell erzielten Ertragssteigerungen gedeckt werden. Andere potenzielle Einsatzmöglichkeiten von Pflanzenkohle aus Gärresten sind: Zuschlagstoff für Futtermittel, Güllebehandlung, Stalleinstreu, Zugabe im Silierprozess, Reduktionsmittel in der Metallurgie, Brennstoff. Allerdings ist Pflanzenkohle derzeit nicht in der Positivliste für Einzelfuttermittel gelistet, was für QS-Betriebe, die eine Zertifizierung für die Qualitätssicherung erhalten, Voraussetzung für eine erlaubte Anwendung wäre. Auch der Einsatz als Stalleinstreu ist nicht erlaubt, da dies eine Zufuhr zum Wirtschaftsdünger bedeuten würde und somit unter die Düngemittelverordnung fallen würde, in der Pflanzenkohle nicht als Düngemittel gelistet ist. Der Heizwert von Pflanzenkohle aus Gärresten beträgt rund 20 MJ/kg bzw. 16,5 MJ/kg TM und ist damit vergleichbar mit dem von Holzpellets.

Ein zweiter Berührungspunkt der Pflanzenkohle mit der Biogasanlage ist die mögliche Nutzung von Pflanzenkohle als Zuschlagsstoff im Fermenter zur Prozessstabilisierung. Werden feuchte Gärreste durch den Prozess der Hydrothermalen Carbonisierung verkohlt, kann das anfallende Prozesswasser als gut vergärbare Biomasse in den Biogasfermenter eingespeist werden und die Pflanzenkohle als Aufwuchsträger und zusätzliche Nahrung für die Mikroorganismen genutzt werden. Dadurch werden die ligninhaltigen Biomassen abgebaut und somit eine Steigerung des Ertrags erzielt (ATB 2014). In verschiedenen Studien konnte der Biogasertrag durch den Einsatz von Pflanzenkohle gesteigert werden. Rödger et al. (2013) fanden eine Steigerung bis zu 24 % und schlussfolgerten, dass der Grund eine verbesserte Abbaurate des Substrats selbst sei und die Steigerung des Biogasertrags durch den Abbau der Biokohle selbst vernachlässigbar sei. Sie fanden heraus, dass durch die Zugabe sowohl eine bessere Substratausnutzung im Hauptfermenter als auch eine deutlich höhere Ausschöpfung des Gärrestpotenzials erreicht wurde. Es wurde auch beobachtet, dass die Pflanzenkohle als eine Art Filter dient, indem die Stör- bzw. Hemmsubstanzen aufgenommen werden, wodurch der Biogasprozess stabilisiert wird. Sie schlussfolgerten, dass in dieser Form der Einsatz von verschiedenen Additiven bzw. Hilfsstoffen und Spurenelementen eingespart werden könnte. Mumme et al. (2014) fanden bei der leicht abbaubaren HTC-Kohle mit plus 31,7 % deutlich höhere Biogasertragssteigerungen als bei der stabileren Pyrolysekohle und schlussfolgern daher, dass die Ertragssteigerung durch den Abbau der Kohle selbst resultiert. Auch Inthapanya



und Preston (2013) fanden eine leichte Ertragssteigerung von 4 bzw. 5 % bei allerdings gleichzeitiger Abnahme des Methangehalts und Meyer-Kohlstock et al. (2016) beobachten vergleichbare Biogasertragssteigerungen von 5,1 bzw. 3,0 % bei unterschiedlichen eingesetzten Biokohlemengen.

Durch Kombination der Prozesse Biomasseverkohlung und Biogaserzeugung könnten Synergieeffekte erzielt werden, die eine Grundlage für ein effizienteres Nährstoff-, Kohlenstoff- sowie Kosten- und Energiemanagement bilden. Allerdings besteht rechtlich das gleiche Problem wie bei der Anwendung als Bodenhilfsmittel: Einsatzstoffe in Biogasanlagen müssen in der DüMV als zulässige Bestandteile zur Herstellung von Düngemitteln gelistet sein. Dies ist bisher nur für Pflanzenkohle aus unbehandeltem Holz der Fall.

4. Ökonomische Angaben

Die Herstellungskosten für Pflanzenkohle setzen sich zusammen aus den Investitionskosten für die Karbonisierungsanlage, den laufenden Kosten für Energie, Wartung, Versicherung, Personalkosten sowie den Kosten für die eingesetzten Substrate. Für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung können die erzielbaren Preise für die hergestellte Pflanzenkohle, gegebenenfalls verwertete Wärmeleistung sowie vermiedene Kosten für die Entsorgung der Gärreste gegenübergestellt werden.

Dengel et al. (2016) führten eine Wirtschaftlichkeitsprüfung für die Verkohlung von getrockneten Gärresten einer 1.430-kW-Biogasanlage mit folgenden Annahmen durch:

- Bisher werden die anfallenden Gärreste mit BHKW-Wärme getrocknet und als Dünger genutzt, nun sollen sie nach der Trocknung zu hochwertiger Biokohle umgewandelt werden. Ziel: Durch die Karbonisierung wird die Masse reduziert und ist leichter auszubringen. Dadurch wird eine bessere Vermarktbarkeit als bisher beim Gärrest erreicht, da es hinsichtlich Ausbringtechnik und Gärreststruktur sehr unterschiedliche Anforderungen bei den Landwirten gibt
- Der Bandtrockner ist ausgelegt auf 1.200 kg/h und trocknet 4.000 t Gärrest pro Jahr von durchschnittlich 24 auf 94 % TS (1.200 t/a getrockneter Gärrest).
- Der Heizwert des getrockneten Gärrestes beträgt durchschnittlich 14,4 MJ/kg bzw. 4,0 kWh/kg bei einer Schüttdichte von 100 bis 120 kg/m³.
- Die Wärme, die bei der Stromproduktion entsteht, wird zum Betrieb einer ORC-Nachverstromungsanlage, zur Beheizung der Hofgebäude und des Ferments sowie zur Wärmeversorgung des Gärresttrockners genutzt.
- Karbonisierungsanlage für Pyrolyse: PYREG 500 der Firma Pyreg GmbH
 - maximale Brennstoffleistung: 500 kW
 - maximaler Brennstoffdurchsatz: 180 kg/h bzw. 1.300 t/a TS



- Materialanforderungen: Energiegehalt mindestens 10 MJ/kg;
Wassergehalt < 50 %; Größe < 30 mm
- auskoppelbare Heizwärmeleistung: bis zu 150 kW
- externe elektrische Leistungsaufnahme: etwa 10 kW
- Platz ist vorhanden, Gebäude müssen eventuell gebaut werden.
- Genehmigungen: Es kommen ggf. Wasser-, Abfall- und tierseuchenrechtliche Auflagen dazu. Die Karbonisierungsanlage muss evtl. nach BImSchG genehmigt werden und somit Grenzwerte der TA Luft einhalten.

Es gibt nur wenige auf dem Markt verfügbare Biomassekonversionsanlagen bzw. Karbonisierungsanlagen zur Herstellung von Pflanzenkohle. Ein Beispiel für eine Pyrolyseanlage ist die PYREG 500 der Firma Pyreg GmbH in Dörth, die bereits mehrfach verkauft wurde und deshalb in der oben genannten Analyse ausgewählt wurde. Der Anschaffungspreis der Anlage beträgt 435.000 €, (davon ca. 330.000 € für das PYREG 500 Modul, 20.000 € für den Kamin, 60.000 € für Vorlagebehälter und Kohleverladung, 10.000 € für die Inbetriebsetzung und Nebenkosten, 10.000 € für Bautechnik, Fundamente, Asphalt und Schleppldach, 5.000 € für die Montage, Inbetriebnahme, Probetrieb und Fracht). Bei einem Annuitätsfaktor von 8,99 % ergibt sich ein Gesamtpreis von 586.597,50 € und eine jährliche Abschreibung von 39.106,50 €. Hinzu kommen:

- jährliche Kosten für Wartung und Instandhaltung der Module (16.400 €/a)
- Servicevertragskosten mit PYREG (11.500 €/a)
- Personalkosten (9.000 €/a)
- Versicherungskosten (2.175 €/a).

Die Summe dieser Betriebskosten von 39.075 € zusammen mit den Abschreibungskosten ergeben die jährlichen Fixkosten von 78.181,50 €/a. In der Studie werden zusätzlich 60.000 €/a für variable Kosten – Wasser, elektrischen Strom und zusätzliche Düngemittel – angenommen.

In der Studie wird berechnet, dass aus den 1.200 t getrockneten Gärresten 332 t Pflanzenkohle pro Jahr produziert werden können. Damit liegen die Herstellungskosten für die Pflanzenkohle bei 416,20 €/t. Im Vergleich dazu fallen laut Radloff (2016) Herstellungskosten von ca. 623 €/t TM für die Pyrolyse und 382 €/t TM für das HTC-Verfahren an.

Dem können die Vermarktungspreise für Pflanzenkohle gegenübergestellt werden. In der Studie von Dengel et al. (2016) werden 250 €/t Pflanzenkohle angenommen, sofern die Kriterien des EBC (European Biochar Certificate) erfüllt werden (Preis der Pyreg-Tochtergesellschaft Novocarbo). Bei einer Recherche nach Verkaufspreisen für Pflanzenkohle im Internet bewegen sich die Preise zwischen 500 und 3.120 €/t, auch abhängig davon, ob sie ein EBC haben bzw. für welche Einsatzzwecke sie geeignet sind.



Zundel et al. (2018) geben in einer ökonomischen Analyse für die Vermarktung von Pflanzenkohle den durchschnittlichen Preis zertifizierter Kohle mit 790 €/t an. Allerdings beziehen sich die Preise in den meisten Fällen auf Pflanzenkohle, die auch im Pflanzenbau oder als Futtermittel zugelassen sind und somit aus unbehandeltem Holz hergestellt sind. Für Pflanzenkohle aus Gärresten bestehen bisher kaum Absatzwege und daher ist ein Marktpreis schwer zu ermitteln.

Einnahmen durch Wärmenutzung wurden in der Studie nicht berücksichtigt, da keine geeignete Wärmesenke verfügbar war. Vermiedene Kosten für die Gärrestentsorgung wurden mit 0 € angenommen (kostenfreie Abgabe).

Des Weiteren wurden in der Studie zur endgültigen Gewinnberechnung Einnahmen über einen zusätzlichen KWK-Bonus von 27.810 €/a angenommen, wodurch der Gesamterlös auf rund 111.000 €/a berechnet wurde. Dem stehen die jährlichen Erzeugungskosten von 138.180 € gegenüber. Somit ist die Herstellung von Pflanzenkohle aus Gärresten auf dieser Biogasanlage nicht wirtschaftlich darstellbar. Eine Wirtschaftlichkeit würde sich erst einstellen, wenn die Pflanzenkohle mit 420 €/t verkauft werden könnte oder wenn die Menge der erzeugten Pflanzenkohle auf über 1.135 t/a ansteigen würde.

5. Marktrelevanz und Absatzmärkte

Pflanzenkohle aus Gärresten

Das EBC-Zertifikat des Ithaka-Instituts (www.european-biochar.org) erhalten Pflanzenkohlen aus Gärresten dann, wenn die Substrate der Biogasanlage nachhaltig erzeugt wurden und im Falle von nachwachsenden Rohstoffen biologisch produziert wurden (EBC 2012). In Deutschland sind Pflanzenkohlen, die aus Gärresten hergestellt wurden, weder zur Aufbringung auf den Boden noch zur Tierfütterung zugelassen. Somit bezieht sich der vorhandene Markt in Deutschland hauptsächlich auf Pflanzenkohle aus unbehandeltem Holz aus der Pyrolyse. Ein Absatzmarkt für gärrestbasierte Pflanzenkohle würde sich gegebenenfalls bei veränderten rechtlichen Rahmenbedingungen entwickeln.

Pflanzenkohle im Allgemeinen

Im Jahr 2014 wurden in Europa 205 t Pflanzenkohle für Anwendungen auf den Boden verkauft (Jirka und Tomlinson 2014, zitiert von Radloff 2016). Die meisten Pflanzenkohleprodukte werden heutzutage direkt auf den Internetseiten der Unternehmen vermarktet. Einige Vermarkter bieten ihre Produkte mittlerweile auch auf Online-Verkaufsplattformen wie Ebay zum Verkauf an. Die Zielgruppe für die Vermarktung sind laut Radloff (2016) vor allem Kunden, die besonderen Wert auf Nachhaltigkeit und biologisch-dynamischen Anbau legen.

Nichtsdestotrotz existieren viele Einsatzbereiche für die Verwendung von Pflanzenkohle und aus dieser Sicht auch ein großes Potenzial für den Markt. Hier sind einige Verwertungsmöglichkeiten aufgelistet (Schmidt 2011):

- Bodenhilfsstoff für die Landwirtschaft (organisch aktivierte Pflanzenkohle)



- Terra Preta ähnliche Erden mit Zusatz von Pflanzenkohle (Torfersatz)
- Komposthilfsstoff
- Zusatzstoff für die Futtermittelsilage
- Güllezusatz
- Stalleinstreu auf Basis von mikrobiell aktivierter Pflanzenkohle
- Futterzusatz (Kohlenschwarz, für Zierfische zugelassen)
- Trägermittel für organische und mineralische Dünger (Kohlenstoffdünger)
- Nahrungsergänzungsmittel (E 152)
- Filtermittel für Abwasserreinigung
- Boden- und Seewassersanierung
- Wasserzusatz für Fischzucht und Aquarien
- Saatgutpellets
- Isolationsmaterial für Hausbau und damit Verbesserung des Raumklimas
- Pellets für Metallurgie
- Pellets für Pelletheizungen
- Ausgangsstoff für Kohlefaser, Plaste.

Für welche dieser Anwendungen der Einsatz von Pflanzenkohlen mit Ausgangssubstrat Gärrest erlaubt ist, konnte, abgesehen von den oben bereits erläuterten Fällen, nicht endgültig geklärt werden.

6. Rechtliche Belange und Förderungen

Pflanzenkohle als Dünger/Bodenhilfsmittel

Zur rechtlichen Einordnung von Pflanzenkohle muss zunächst klar sein, ob es sich bei dem Produkt um Abfall oder ein Nebenprodukt handelt. Hierzu bieten die Abfallrahmenrichtlinie der EU (AbfRRL 2008) und das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG 2020) die entsprechenden Vorgaben.

Hauboldt-Rosar et al. (2014) schreiben dazu: „Die Kriterien zur Abgrenzung von Abfall und Nebenprodukt konkretisiert das KrWG in § 4 Abs. 1. Fällt hiernach ein Material oder Gegenstand bei einem Herstellungsverfahren an, dessen hauptsächlicher Zweck nicht auf die Herstellung dieses Materials oder Gegenstandes gerichtet ist, ist er als Nebenprodukt und nicht als Abfall anzusehen, wenn

- sichergestellt ist, dass das Material oder der Gegenstand weiterverwendet wird,
- eine weitere, über ein normales industrielles Verfahren hinausgehende Vorbehandlung hierfür nicht erforderlich ist,



- das Material oder der Gegenstand als integraler Bestandteil eines Herstellungsprozesses erzeugt wird und
- die weitere Verwendung rechtmäßig ist; dies ist der Fall, wenn das Material oder der Gegenstand alle für seine jeweilige Verwendung anzuwendenden Produkt-, Umwelt und Gesundheitsschutzanforderungen erfüllt und insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt führt.

Aus § 4 Abs. 1 KrWG folgt, dass Materialien und Gegenstände, die im Rahmen eines Herstellungsverfahrens unbeabsichtigt oder hauptsächlich nicht bezweckt anfallen, grundsätzlich Abfälle sein können. Die Voraussetzungen nach den Nrn. 1 bis 4 bilden demgegenüber den gesetzlich geregelten Ausnahmetatbestand. Liegen die dort bezeichneten Voraussetzungen vor, handelt es sich auch bei unabsichtlich angefallenen Materialien um Nebenprodukte und damit nicht um Abfälle. Die Prüfung der Voraussetzungen des § 4 KrWG hat somit in zwei Schritten zu erfolgen: Zunächst ist zu klären, ob das fragliche Material möglicherweise als Teil des Hauptproduktionsverfahrens zu begreifen ist und schon deshalb kein Abfall ist. Ist dies zu verneinen, ist zu fragen, ob gleichwohl kein Abfall, sondern ein Nebenprodukt vorliegt, weil die in Abs. 1 Nr. 1 bis 4 genannten Voraussetzungen vorliegen.“

Auch der „Entledigungstatbestand“, über den über die Abfall- oder Nebenprodukteigenschaft entschieden wird, ist im KrWG (2020) über das Herstellungsverfahren definiert. Für Pflanzenkohle würde hier gelten, dass der Anfall des Produktes in der Hauptsache vom Verfahrenszweck getragen wird und somit kein Abfall vorliegt. Für ein Nebenprodukt muss darüber hinaus gelten, dass es ohne zusätzliche Vorbehandlung weiterverwendet werden kann und die Weiterverwendung rechtmäßig ist.

Hier muss wiederum das Düngerecht berücksichtigt werden. Dazu schreiben Hauboldt-Rosar et al. (2014): „Eine verlässliche Aussage über die Einhaltung solcher Anforderungen kann etwa über Qualitätssicherungsmaßnahmen im Herstellungsverfahren getroffen werden und wird heute bereits vielfach praktiziert wie z. B. für Kompost über die Fremdüberwachung und Zertifizierung nach RAL-Gütezeichen durch die Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. Für Biokohle wird durch staatlich akkreditierte Kontrollorgane und durch die Europäische Pflanzenkohle-Stiftung an Gütesicherungsgrundlagen gearbeitet (EBC), deren Abstimmung mit geltenden Rechtsbestimmungen jedoch noch aussteht. Das gilt auch für die von der „International Biochar Initiative“ herausgegebenen Richtlinien zu Qualitätskriterien und Untersuchungsmethoden (IBI 2012)“.

Die Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten (EU DüngeP 2019) legt verschiedene Bestimmungen nur für mineralische Düngemittel fest, die dann die Bezeichnung „EU-Düngemittel“ bekommen können. Für Pflanzenkohle sind vor allem düngerechtliche Regelungen zu Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen und Kultursubstraten relevant. Die rechtlichen Anforderungen hierzu gibt die Düngemittelverordnung (DüMV 2012) vor. Die Tabelle 7 im Anhang 2 enthält für Düngemittel, Bodenhilfsstoffe,



Kultursubstrate und Pflanzenhilfsmittel zulässige Ausgangsstoffe. Unter Tabelle 7.1.10 sind Kohlen aufgeführt, wobei diese nur aus pflanzlich unbehandelten Holz bestehen dürfen. Ausnahmen hierfür gibt es nicht. Zu beachten ist, dass die Kohlen als Ausgangsstoff für Kultursubstrate und als Trägersubstanz in Verbindung mit Zugabe von Nährstoffen über zugelassene Düngemittel verwendet werden dürfen. HTC-Biokohle ist nach DüMV nicht als Ausgangsstoff zum Herstellen und Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln zugelassen. Da Pflanzenkohle kein Düngemittel laut Düngemittelverordnung ist, ist sie auch als Einstreumittel im Wirtschaftsdünger derzeit nicht erlaubt, denn die dem Dünger zugeführten Stoffe müssen in der DüMV gelistet sein, die Zulassung müsste beim BMEL beantragt werden.

Darüber hinaus regelt die Düngemittelverordnung Kennzeichnungspflichten und einzuhaltende Grenzwerte. Gegebenenfalls müssen auch die Anforderungen nach Bioabfallverordnung (BioAbfV 2017) oder Klärschlammverordnung (AbfKlärV 2017) eingehalten werden.

Bei der Aufbringung von Pflanzenkohle auf den Boden muss bei der Düngebedarfsermittlung laut Düngeverordnung (DüV 2017) der gesamte enthaltene Stickstoff angerechnet werden, auch wenn dieser kaum verfügbar ist.

Laut Düngegesetz (DüngG 2020) ist die C-Sequestrierung als mögliche Zweckbestimmung nicht erfasst.

In einem Artikel zu EU-Regelungen bezüglich Pflanzenkohleanwendung von Montanarella und Lugaro (2013) wird deutlich, dass auf EU-Ebene die pflanzenbauliche Anwendung von Pflanzenkohle nicht schlüssig geregelt ist. Durch die Einführung des EBC-Zertifikats sollte diese Lücke geschlossen werden, allerdings wird das Zertifikat national noch nicht als EU-Recht anerkannt. Die Autoren sehen aber ein hohes Potenzial für Pflanzenkohle, sobald rechtliche Regelungen bestehen. Insbesondere wird die Möglichkeit, anfallenden Bioabfall für eine Verkohlung zu nutzen, als positiv gewertet, da z. B. gegenüber einer Kompostierung einige Vorteile gesehen werden (Hygienisierung, weniger CO₂-Emissionen und vereinfachte Handhabung bei Transport und Ausbringung).

European Biochar Certificate (EBC)

Seit einigen Jahren existieren Standardisierungsprogramme und Zertifizierungen für Biokohlen, die den Handel auf beiden Seiten erleichtern und eine nachhaltige Produktion sichern sollen, indem ein sicheres Kontrollsystem für die Herstellung und auch für die Analyse von Pflanzenkohlen definiert werden. In Europa existiert das European Biochar Certificate (EBC) des Ithaka-Instituts (www.european-biochar.org). Das EBC ist ein freiwilliger Industriestandard in Europa. In der Schweiz ist dessen Einhaltung verpflichtend für die Genehmigung des Einsatzes von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft. Die Definition von Pflanzenkohle laut EBC-Richtlinie ist: „Pflanzenkohle ist ein heterogenes Material, das durch Pyrolyse aus nachhaltig gewonnenen Biomassen hergestellt wird und vorwiegend aus pyroaromatischen Kohlenstoffen und Mineralien besteht. Die Anwendung von Pflanzenkohle



führt zu Kohlenstoffsinken, ihre Verbrennung zur Energiegewinnung wird ausgeschlossen.“ (EBC 2012) Dementsprechend gelten Kohlen aus der Hydrothermalen Carbonisierung hier nicht als Pflanzenkohle.

Es werden drei Qualitäten unterschieden: „Basic“, „Premium“ und „Futter“. Als Kriterien werden Ausgangsbiomasse/Substrate, Kohlenstoffspeicherkapazität, Düngeleistung der üblichen Düngestoffe (N, P, K, S, Mg), Kalkungswerte und Schadstoffe wie PAK, Dioxine und Furane bewertet. Für die Analysen werden Methoden vorgeschrieben. Außerdem gibt es Vorschriften bezüglich des Pyrolyseprozesses, für einzuhaltenden Arbeitsschutzmaßnahmen sowie zur Erstellung des Lieferscheins.

Laut Positivliste sind Gärreste im EBC als Ausgangsstoff für Pflanzenkohle erlaubt, bei der Basic-Qualität gibt es keine weiteren Anforderungen, bei der Premium-Qualität müssen bei Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in der Biogasanlage diese nachhaltig angebaut sein und bei der Bio-Qualität müssen die nachwachsenden Rohstoffe, falls eingesetzt, biologisch erzeugt sein. Für die Erzeugung von Futterkohle sind Gärreste jedoch nicht erlaubt, hier ist als einziges Substrat naturbelassenes Holz zugelassen.

Pflanzenkohle als Futtermittel

Laut Futtermittelrecht gibt es den Futterzusatzstoff Kohlen schwarz (Pflanzenkohle). Dieses Produkt ist nur für Zierfische zugelassen. Mit handelsüblichen Pflanzenkohlen sind aber nicht Futterzusatzstoffe gemeint, sondern Einzelfuttermittel (Gerste ist z. B. ein Einzelfuttermittel).

Die meisten landwirtschaftlichen Betriebe sind QS-Betriebe. Diese dürfen nur Einzelfuttermittel einsetzen, die in der deutschen Positivliste für Einzelfuttermittel aufgeführt sind. In dieser Liste fehlt die Pflanzenkohle. In der niederländischen Liste GMP+ ist sie folgendermaßen beschrieben: Pflanzliche Kohle: Erzeugnis, das durch Verkohlung von Pflanzenmasse gewonnen wird (unverarbeitete Holzschnitzen vom Wald). Darüber hinaus gibt es noch einen EU-Futtermittelkatalog, der aber für den Landwirt nicht rechtlich verbindlich ist. Hier ist die pflanzliche Kohle (Holzkohle) ein „Erzeugnis, das durch Verkohlung von Pflanzenmasse gewonnen wird“.

Wenn der Kohlelieferant Pflanzenkohle vermarkten will, muss das Produkt den jeweiligen Positivlisten der Länder entsprechen. Zudem muss der Lieferant bei QS entsprechend „zertifiziert“ sein. Unter diesen Bedingungen darf er Pflanzenkohle an deutsche Betriebe liefern.

7. Chancen und Hürden

Der Einsatz von Pflanzenkohle aus Gärresten aus Biogasanlagen im Pflanzenbau als Bodenverbesserer kann auf ertragsschwachen Böden zu Ertragssteigerungen führen, die jedoch bei momentanen Marktpreisen noch nicht zu einer Wirtschaftlichkeit der Maßnahme führen. Einige positive Wirkungen der Einbringung von Pflanzenkohle in den Boden wurden nachgewiesen (Erhöhung der Wasserspeicherkapazität und der Ionenaustauschkapazität



etc.). Es müssen jedoch erhebliche Mengen aufgebracht werden um den gewünschten Effekt der C-Sequestrierung zu erreichen und auf ertragsstärkeren Böden kann die Aufbringung auch (zunächst) zu Ertragsdepressionen, wahrscheinlich durch Nährstofffestlegung, führen.

Was bisher fehlt, sind Untersuchungen zur langfristigen Wirkung des Einsatzes von Pflanzenkohle im Pflanzenbau. Dies führt wohl auch dazu, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen einer solchen Verwertung bisher entgegenstehen. Dies gilt auch für die Verwertung von Pflanzenkohle aus Gärresten als Futtermittel.

Positiv für den Anlagenbetreiber wären die Effekte der Hygienisierung und Massenreduzierung der Gärreste durch den Verkohlungsprozess. Ob die Herstellung von Pflanzenkohle aus Gärresten wirtschaftlich ist, hängt im Wesentlichen vom Marktpreis der Kohle ab. Die Wirtschaftlichkeit kann durch die zusätzliche Erzeugung von Energie oder Gas durch die Pyrolyse gesteigert werden.

8. Weiterführende Informationen

Die Einbringung von Pflanzenkohle in landwirtschaftlichen Böden bedeutet eine C-Sequestrierung. Die Pflanzenkohle lagert sich dort wie Erdöl oder Braunkohle über viele Jahre stabil an. Es findet also eine Kohlenstoffsenkung statt, was theoretisch in Form von CO₂-Zertifikaten geltend gemacht werden könnte. Jedoch gab es bei den letzten Weltklimakonferenzen keine Entscheidung, um Pflanzenkohle in den Kohlenstoffhandel miteinzubeziehen. Die Gründe dafür sind die wenigen Erfahrungen in der Verwendung von Pflanzenkohle in großem Maßstab und die immer noch notwendige Forschung. Außerdem existiert auch die Befürchtung, dass eine großindustrielle Pflanzenkohleproduktion eine Umwandlung von natürlichen Wäldern oder landwirtschaftlichen Flächen in Holzplantagen nach sich ziehen würde.

Das Ithaka-Institut bemüht sich um die Einbeziehung von Pflanzenkohle in den CO₂-Zertifikathandel sowie um die Schaffung der notwendigen Grundbedingungen dafür. Das Ithaka-Institut ist ein internationales Open-Source-Netzwerk für Klimafarming und Kohlenstoffstrategien. Das Institut stellt auch zahlreiche Informationen über Pflanzenkohle auf ihrer Internetseite zur Verfügung. Es ist auch bekannt für seine Expertise im Bereich der Herstellung, Charakterisierung und Anwendung von Pflanzenkohle und entwickelte zahlreiche pflanzenkohlebasierte Produkte (mehr Informationen unter: www.ithaka-institut.org).

Das Projekt APECS (Anaerobic Pathways to Renewable Energies and Carbon Sinks) zielt auf die Entwicklung eines Gesamtverfahrens, in dem die Herstellung von Pflanzenkohle aus Gärresten als Bodenverbesserungsmittel mit der Energiegewinnung in einer effizienten Produktion von Biomethan als Energieträger in einem Verfahren kombiniert werden. Der Hintergrund dafür ist die Verknüpfung von Biokonversion und thermochemischer Karbonisierung zu einem effizienten Hybridverfahren. Für die Biogaserzeugung wird das am ATB entwickelte Aufstromverfahren genutzt. Die Vorteile dieses Verfahrens sind vor allem,



dass es geeignet ist für sehr strukturreiche Roh- und Reststoffe und dass es einen hohen Durchsatz bei vermindertem Energiebedarf sowie hohe Produktivität und Prozessstabilität erreicht. Das Projekt APECS zählt zu den Gewinnern des „Ideenwettbewerbs Bioenergie – Neue Wege beschreiten“ und wurde im Rahmen des Förderprogramms „BioEnergie 2021“ durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Weitere Information unter: www2.atb-potsdam.de/apecs/Verfahren.htm (Zugriff am 16.3.2021).

Zurzeit existieren zahlreiche Hersteller von Pyrolyseanlagen, wie beispielsweise:

Der PYREG-Reaktor zählt zu den großen Anlagen. Seine Leistung ist vorteilhaft angepasst an eine dezentrale Nutzung, damit die Brennstoffe nicht weit transportiert werden müssen. Neben der Pflanzenkohle wird noch Energie in Form von Wärme hergestellt, die meist zum Vortrocknen der Biomasse verwendet wird. Mit der Anlage können täglich bis zu 1,5 Tonnen und jährlich bis zu 300 Tonnen Pflanzenkohle hergestellt werden.

Der Schottdorf-Meiler wurde vor ca. 10 Jahren entwickelt, um Pflanzenkohle in industriellen Mengen herstellen zu können. Er ist ein Reaktor mit einer Grundfläche von 3 x 3 m und liefert pro Tag bis zu 3 Tonnen Pflanzenkohle. Er ist größer als die PYREG-Anlage. Es können alle Arten von Biomasse pyrolysiert werden. Alle Materialien liefern laut Hersteller ein einheitliches Produkt, welches in Form von Pellets, Pulver oder Briketts erhältlich ist. Neben der Pflanzenkohle entsteht noch brennbares Gas, das zur Energiegewinnung verwendet werden kann.

Der BIOMACON-Kompaktconverter ist eine kleine Anlage, eingerichtet für ligninhaltige Rohstoffe (verholzte Pflanzen) mit einem Wassergehalt von maximal 50 %. Bei der Pyrolyse entsteht Abwärme, die direkt abgeführt und genutzt werden kann. Daher ist die Anlage entsprechend dem erforderlichen Wärmebedarf in verschiedenen Größen erhältlich. In einer BIOMACON-Anlage können, je nach Größe der Anlage, zwischen ca. 6 und 34 kg Pflanzenkohle pro Stunde hergestellt werden.



Literatur

AbfKlärV (2017): Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung – AbfKlärV) die zuletzt durch Artikel 6 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist. www.gesetze-im-internet.de/bioabfv/BioAbfV.pdf, Zugriff am 16.03.2021

AbfRRL (2008): Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 (Abfallrahmenrichtlinie – AbfRRL). Amtsblatt der Europäischen Union vom 22.11.2008, L312/3. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0098-20180705&from=DE>, Zugriff am 16.03.2021

ATB (2014): Kohle-Doping für Biogasanlagen. Mit Biokohle zu höheren Gaserträgen. Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V.; www.fona.de/de/kohle-doping-für-biogasanlagen, Zugriff am 16.10.2019

BioAbfV (2017): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV). In der Fassung der Bekanntmachung vom 4. April 2013 (BGBl. I S. 658), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 2 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist. www.gesetze-im-internet.de/bioabfv/BioAbfV.pdf, Zugriff am 16.03.2021

Dengel, A.; Groß, B.; Außendorf, Y. (2016): Thermische Nutzung von getrocknetem Gärrest. 14. Symposium Energieinnovation, 10.-12.02.2016, Graz/Austria, www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2016/files/lf/Session_B5/LF_Dengel.pdf, Zugriff am 18.10.2019

DüMV (2012): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV) vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414) geändert worden ist. www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/DüMV.pdf, Zugriff am 16.03.2021

DüngG (2020): Düngegesetz vom 9. Januar 2009 (BGBl. I S. 54, 136), das zuletzt durch Artikel 277 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist. www.gesetze-im-internet.de/d_ngg/DüngG.pdf, Zugriff am 16.03.2021

DüV (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV) vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305). www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/DüV.pdf, Zugriff am 16.03.2021

Drews-Shambroom, A. (2018): Die Verwendung von Pflanzenkohle im Ackerbau als Bestandteil einer regenerativen Landwirtschaft in Deutschland. Masterarbeit. http://opus.uni-lueneburg.de/opus/volltexte/2018/14497/pdf/MA_Drews_Shambroom_zensiert.pdf, Zugriff am 06.03.2020



EBC (2012): European Biochar Certificate – Richtlinien für die nachhaltige Produktion von Pflanzenkohle, European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. www.european-biochar.org/en/download. Version 8.3G vom 1. September 2019, DOI: 10.13140/RG.2.1.4658.7043

EU DüngeP (2019): Verordnung (EU) 2019/1009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1009&from=DE>, Zugriff am 16.03.2021

Haubold-Rosar, M.; Heinkele, T.; Rademacher, A.; Kern, J.; Dicke, C.; Funke, A.; Germer, S.; Karagöz, Y.; Lanza, G.; Libra, J.; Meyer-Aurich, A.; Mumme, J.; Theobald, A.; Reinhold, J.; Neubauer, Y.; Medick, J.; Teichmann, I. (2014): Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer "veränderter" Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Texte 04/2016, www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_04_2016_chancen_und_risiken_des_einsatzes_von_biokohle.pdf, Zugriff am 23.10.2019

KrWG (2017): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 2 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist. www.gesetze-im-internet.de/krwg/KrWG.pdf, Zugriff am 16.03.2021

International Biochar Initiative (IBI) (2013): Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is used in Soil. www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Standards_V1.1.pdf, Zugriff am 20.02.2021

Inthapanya, S.; Preston, T.R. (2013): Biochar marginally increases biogas production but decreases methane content of the gas in continuous-flow biodigesters charged with cattle manure. *Livestock Research for Rural Development* 25(11), [www.lrrd.org/lrrd25/11/sang25189.htm#Livestock%20Research%20for%20Rural%20Development%2025%20\(11\)%202013](http://www.lrrd.org/lrrd25/11/sang25189.htm#Livestock%20Research%20for%20Rural%20Development%2025%20(11)%202013), Zugriff am 24.04.2020

Jirka, S.; Tomlinson, T. (2014): 2013 State of the Biochar Industry – A Survey of Commercial Activity in the Biochar Field. International Biochar Initiative

Kloss, S.; Zehetner, F.; Wimmer, B.; Buecker, J.; Rempt, F.; Soja, G. (2014) Biochar application to temperate soils: Effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177, 3-15

Lehner, D.; Thalenhorst, H.; Kariger, R. (2017): Einfluss von HTC-Biokohle als Bodenverbesserer auf den Wachstums- und Entwicklungsverlauf bei Sojabohnen. *Ökologischen Landbau weiterdenken: Verantwortung übernehmen, Vertrauen stärken*, S. 74-75



- Meyer-Kohlstock, D.; Haupt, T.; Heldt, E.; Heldt, N; Kraft, E. (2016): Biochar as Additive in Biogas-Production from Bio-Waste. *Energies* 9, p. 247, DOI:10.3390/en9040247
- Montanarella, L.; Lugato, E. (2013): The Application of Biochar in the EU: Challenges and Opportunities. *Agronomy* 3, pp. 462-473
- Mumme, J.; Srocke, F.; Heeg, K.; Werner, M. (2014): Use of biochars in anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 164(2016), pp. 189-197
- Radloff, S. (2016): Modellgestützte Bewertung der Nutzung von Biokohle als Bodenzusatz in der Landwirtschaft. Dissertation, <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000054613>, Zugriff am 16.10.2019
- Ramke, H. G.; Blöhse, D. (2010): Analytik von Biokohle aus hydrothormaler Carbonisierung von Biomasse. In: Fachgespräch Feststoffuntersuchung 2010 – Neue Entwicklungen in der Abfall- und Altlastenuntersuchung. BEW-MUNLV-Seminar, BEW Bildungsstätte Essen, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW, www.th-owl.de/fb8/fachgebiete/abfallwirtschaft/pdf/Essen_2010_Beitrag_Internet.pdf, Zugriff am 20.02. 2021
- Reibe, K. (2015): Wirkungen von Biokohlen im System Boden-Pflanze. Untersuchungen auf sandigen Standorten. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin. <https://edoc.hu-berlin.de/bitstream/handle/18452/17906/reibe.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, Zugriff am 15.10.2019
- Rödger, J.-M.; Ganagin, W.; Krieg, A.; Roth, C.; Loewen, A. (2013): Steigerung des Biogasertrages durch die Zugabe von Pflanzenkohle. *Müll und Abfall* 9(13), S. 476-481
- Schmidt, H. (2011): Pflanzenkohle. *Ithaka Journal* 1/2011, S. 75–82. www.ithaka-journal.net/druckversionen/142011-pflanzenkohle.pdf, Zugriff am 05.03.2020
- Teichmann, I. (2014): Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten. *DIW-Wochenbericht* 81

