

Energetische Verwertung der Rückstände aus Biogasanlagen und Kompostierwerken zur Gesteuerung von Strom, Wärme und Biokohle

Matthias Franke, Samir Binder und Andreas Hornung

1.	Hintergrund und Potenziale.....	835
2.	Absatzstruktur der Gärreste von Bioabfallvergärungsanlagen	836
3.	Gärrestaufbereitung und Klimarelevanz.....	837
4.	Weitergehende Gärrestverwertung.....	837
5.	Einbindung der Pyrolyse in Bioabfallvergärungsanlagen.....	842
6.	Ausblick.....	843
7.	Literatur.....	844

1. Hintergrund und Potenziale

Vor dem Hintergrund steigender Energiekosten sowie der aktuellen Diskussionen um Klima- und Ressourcenschutz geht es bei der biologischen Behandlung von Bioabfällen nicht mehr allein um die Erzeugung eines hochwertigen Kompostes. Vielmehr zielen aktuell laufende Optimierungsmaßnahmen darauf ab, die derzeit immer noch überwiegend rein stoffliche Verwertung des Bioabfalls durch eine energetische Verwertung zu ergänzen. Neben der Errichtung neuer Vergärungskapazitäten wird dabei seit einigen Jahren auch die Integration anaerober Prozessstufen in bestehende Kompostierungsanlagen realisiert [1]. Der im Vergleich zur Kompostierung höhere Eigenenergiebedarf der Anlagen kann damit durch regenerativen Strom und Wärme substituiert werden. Die allgemeine Akzeptanz der Energieerzeugung aus Bioabfällen ist dabei im Vergleich zu der aus nachwachsenden Rohstoffen aufgrund einer dort möglichen Nahrungsmittelkonkurrenz deutlich größer. Das Bioabfallaufkommen in Deutschland (ohne Grüngut) beträgt etwa 4 Millionen Tonnen pro Jahr. Derzeit sind etwa 100 Bioabfallvergärungsanlagen in Betrieb (Bild 1). Die elektrische Anschlussleistung der Anlagen beträgt insgesamt etwa 85 MW [2].

Bereits die große Spreizung des durchschnittlichen Pro-Kopf-Aufkommens an Bioabfällen von 32 kg/(E-a) bis 152 kg/(E-a) [3] zwischen den Bundesländern zeigt jedoch, dass die Erfassungsmengen künftig noch deutlich gesteigert werden könnten, zumal bundesweit weniger als die Hälfte der Bürgerinnen und Bürger an eine Biotonne angeschlossen sind [3].

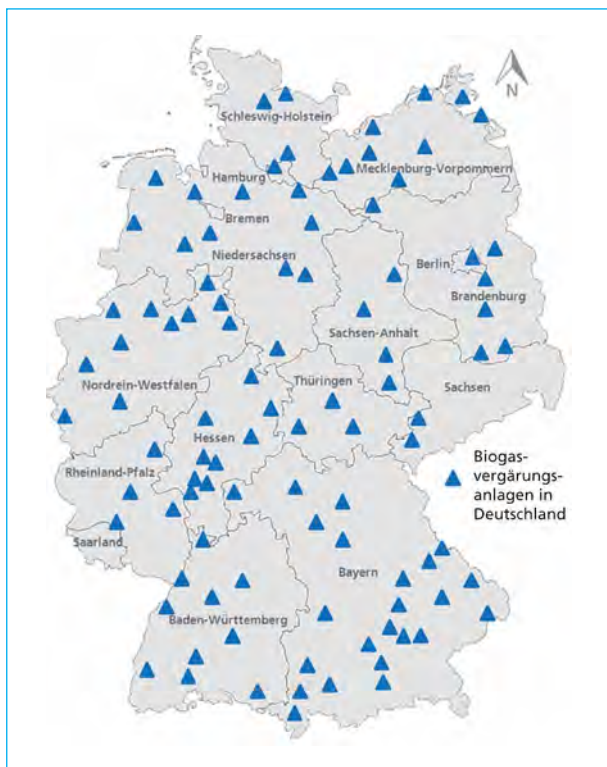


Bild 1:

Biogasvergärungsanlagen in Deutschland

Quelle: Kern, M.; Raussen, T.: Biogas-Atlas 2011/2012, Anlagenhandbuch der Vergärung biogener Abfälle in Deutschland. Witzchenhausen: 2011, 283 Seiten

Die gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz vorgesehene Pflicht zur flächendeckenden getrennten Erfassung von Bioabfällen ab dem Jahr 2015 kommt der Erschließung dieses Potenzials entgegen und könnte Mengensteigerungen im Bereich von 2 bis 4 Millionen t/a mit sich bringen [4, 5]. Die Anzahl der Bioabfallvergärungsanlagen könnte sich damit um 220 Anlagen auf dann über 300 Anlagen steigern [5].

Aktuell fallen in den Bioabfallvergärungsanlagen jährlich etwa 1,3 Millionen Tonnen Gärreste an. Die Verwertung der Gärreste erfolgt vorwiegend auf landwirtschaftlichen Flächen und wird im Zuge der geänderten gesetzlichen Rahmenbedingungen in den nächsten Jahren deutlich zunehmen.

2. Absatzstruktur der Gärreste von Bioabfallvergärungsanlagen

Im Bereich der Verwertung von Bioabfallgärresten ist die Landwirtschaft der fast ausschließliche Absatzmarkt. Nachrotte und Kompostherstellung werden nur in 5 bis 10 Prozent der Anlagen durchgeführt [6]. Dies kann zu Flächenkonkurrenzen mit landwirtschaftlichen Biogasanlagen bei der Ausbringung der Gärreste führen. Kern et. al gehen davon aus, dass insbesondere für die flüssige Gärrestphase in Gebieten, in denen bereits große Güllemengen aus der Tierhaltung ausgebracht werden, eine zusätzliche Ausbringung von Gärresten schwierig ist [7].

Im Zuge der Novellierung der Bioabfallverordnung wurde eine Ausweitung der Untersuchungspflichten von Bioabfallgärresten vorgenommen, auch Grüngut fällt nun erstmalig unter diese Untersuchungspflicht.

3. Gärrestaufbereitung und Klimarelevanz

Die Gärreste verfügen auf der einen Seite über ein großes Potenzial zur Substitution von Mineraldüngern und tragen damit zur Ressourcenschonung und Reduzierung von klimarelevanten Treibhausgasen bei. Auf der anderen Seite setzen Gärreste auch nach Abschluss des Gärprozesses im Rahmen der offenen Lagerung und Ausbringung klimarelevantes Ammoniak, Lachgas und Methan frei. Die aus der Lagerung der Gärreste resultierenden Emissionen werden auf bis zu 10 Prozent der erzeugten Biogasmenge eingeschätzt [8, 9]. Bei der Ausbringung der Gärreste sind vor allem im Bereich der flüssigen Gärreste Emissionen von Lachgas und Ammoniak relevant [10]. Zwar wird vielfach ein unsachgemäßer, nicht dem Stand der Technik entsprechender Aufbau und Betrieb der Anlagen sowie eine unsachgemäße Aufbereitung und Ausbringung der Gärreste als Hauptursache für die Emissionen angesehen [8], gänzlich vermeiden lassen sie sich aber auch bei optimalen Bedingungen ohne weitere Behandlungsschritte nicht.

4. Weitergehende Gärrestverwertung

Ein seit einiger Zeit vermehrt diskutierter Ansatz zur Veredelung von Gärresten und Komposten sowie zur Reduzierung klimarelevanter Emissionen ist die Erzeugung von Biokohle. Die durch den gezielten Inkohlungsprozess herbeigeführte Stabilisierung des Kohlenstoffs soll eine langfristige Fixierung im Boden ermöglichen. Aufgrund der hohen Adsorptionsfähigkeit der erzeugten Biokohle kann diese zugleich als Wasser- und Nährstoffdepot genutzt werden und so die Nährstoffnutzungseffizienz erhöhen [11, 12]. Nach derzeitigem Stand der Technik wird Biokohle in hydrothermalen sowie pyrolytischen Prozessen erzeugt. Auf Vergasung basierende Verfahren führen prinzipiell auch zu einem festen, koksartigen Rückstand. Dieser ist jedoch durch erhöhte Gehalte an polyzyklischen Kohlenwasserstoffen gekennzeichnet und daher als Bodenverbesserer oder Düngemittel ungeeignet [13, 14].

Die Hydrothermale Carbonisierung (HTC) eignet sich prinzipiell zur Behandlung nasser, schwer abbaubarer Biomassen, demnach auch für die weitere Aufbereitung von Gärresten. Dabei werden die Substrate in wässriger Phase unter Temperaturen von 180 bis 250 °C und Drücken bis etwa 20 bar behandelt. Einen Überblick über Verfahrensvarianten und Prozessparameter gibt [13].

Bei den pyrolytischen Verfahren werden die Gärreste zunächst entwässert, getrocknet und schließlich der Pyrolyse zugeführt. Der unter Sauerstoffabschluss ablaufende Prozess wird bei Temperaturen im Bereich von 400 bis 800 °C vollzogen. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Randbedingungen beider Verfahrensvarianten weisen auch die erzeugten Biokohlen unterschiedliche Charakteristika auf.

So verfügen die bei vergleichsweise geringen Temperaturen erzeugten HTC-Kohlen über eine geringe Abbaustabilität. Gegenüber Komposten kann sogar auch eine erhöhte Bioverfügbarkeit und damit Umsetzung im Boden erfolgen [15]. Dagegen weisen die aus Pyrolyseprozessen stammenden Biokohlen aufgrund deutlich erhöhter Kohlenstoffgehalte gegenüber der HTC-Kohle eine erhöhte Abbaustabilität auf und können damit am ehesten einen Beitrag zur längerfristigen Kohlenstofffixierung im Boden leisten. Ein von der Firma Pyreg bereits technisch umgesetztes Pyrolysekonzept setzt auf die Trocknung und Pyrolyse verschiedener in Kompostwerken anfallenden Stoffströme. Über ein in Österreich realisiertes Konzept werden Markterlöse von 450 EUR/t Biokohle genannt, die aufgrund hoher Produktionskosten allerdings weiterhin nur durch Annahmeerlöse für die Stoffströme tragfähig sind [16].

Fraunhofer UMSICHT arbeitet daher am Institutsteil Sulzbach-Rosenberg an der Realisierung eines auf Pyrolyse basierenden Konzeptes, das neben der Erzeugung der Biokohle weitergehende energetische Wertschöpfungsoptionen ermöglicht und bestehende Bioabfallvergärungsanlagen in idealer Weise ergänzen kann (Bild 2).

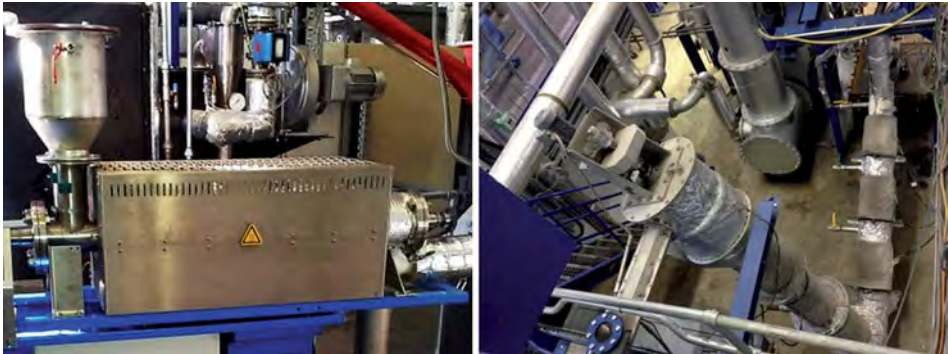


Bild 2: Pyrolyseeinheiten (links: 2 kg/h; rechts: 60 kg/h) bei Fraunhofer UMSICHT

Das Verfahren basiert auf dem Prinzip der sogenannten Intermediate Pyrolysis, bei der die Gärreste bei Temperaturen von 450 bis 500 °C in einem Koaxialschneckenreaktor unter Luftabschluss erhitzt und zu Pyrolysekoks, -gas und -öl umgewandelt werden. Durch eine angepasste Prozessführung wird die produzierte Biokohle in den Pyrolysereaktor rückplatziert und ermöglicht durch den Kontakt der reaktiven Koks mit den erzeugten Pyrolysegasen eine prozessintegrierte Reformierung. Das entstehende Produktgas hat damit eine deutlich reduzierte Fracht an Partikeln und Teeren und kann durch ein kostenminimiertes Gasaufbereitungsverfahren motorisch genutzt werden. Die erzeugte Flüssigphase setzt sich zusammen aus einem mit Biodiesel mischbaren Öl und einer wässrigen Fraktion, die mit geringem verfahrenstechnischem Aufwand separiert werden kann. Ein modifizierter Zündstrahlmotor der Firma Cummins lief mit dem Pyrolyseöl und -gas im Mischbetrieb mit Biodiesel bereits über eine Periode von 500 Stunden wartungsfrei. Die modifizierten Motoren stellte die Nachhaltige Energiesysteme und Anlagenbau Kaiserslautern GmbH (NEK) entsprechend der Spezifikationen des erzeugten Treibstoffs bereit.

Berlin macht mehr daraus.

Mehr als Dünger und Kompost...

Seit Anfang 2013 bereiten wir in unserer Biogasanlage pro Jahr rund 60.000 t organische Abfälle zu Biogas auf und betanken damit 150 gasbetriebene Müllsammelfahrzeuge. So schließt sich der Kreis und die Umwelt freut sich.





**Der Auftrag beinhaltet Engineering,
Lieferung und Inbetriebnahme von**
*2 SSBGL-LCL 200 Drallbrennern mit je 26 MW Leistung
und die komplette Brennstoffversorgung und -aufbereitung*

HEIZWERTARME FLÜSSIGKEITEN THERMISCH NUTZEN

Drallbrenner SSB-LCL verwandelt unerwünschte
Nebenprodukte in wertvolle Energie

Bei der Produktion von Bioethanol und Sojaöl entstehen unerwünschte Nebenprodukte wie Vinasse und Molasse, die wenig Energie, dafür aber viel Wasser und Asche enthalten. Oft werden diese auf umliegenden Flächen entsorgt und belasten damit sowohl Luft als auch Grundwasser. Für die Pilotanlage Araucária der Firma IMCOPA im brasilianischen Bundesstaat Paraná wurde deshalb innerhalb kürzester Zeit nach einer Möglichkeit gesucht, diese Nebenprodukte umweltfreundlich und kostensparend zu verwerten.

Die SAACKE Lösung: der SSB-LCL. Selbst Flüssigkeiten von weniger als 10 MJ/kg verfeuert der Drallbrenner mit nur minimaler Stützfeuerung. Heizwertarme Nebenerzeugnisse ersetzen somit über 80 % der vorherigen fossilen Brennstoffe an der Anlage Araucária. Zudem kann die Asche rund um das IMCOPA-Gelände nun als Dünger (mehr als 10.000 Tonnen pro Jahr) in der Landwirtschaft genutzt werden. So werden das Firmenbudget und die Umwelt gleichermaßen entlastet.

NEK ist ein auf Motorenentwicklung spezialisiertes Unternehmen, das sich unter anderem mit der Anpassung konventioneller Aggregate beispielsweise an säurehaltige Kraftstoffe befasst.

Eine besonders für Bioabfallvergärungsanlagen sinnvolle Erweiterung des Verfahrens stellt der sogenannte BAF (Biomass Activated Fuel) -Reaktor dar (Bild 3), da hiermit auch die in den Anlagen anfallenden Kunststoffabfälle verwertet werden können. Die flüchtige Phase aus dem Pyrolyse- und Reforming-Prozess wird nicht direkt auf den Motor, sondern zunächst in den BAF-Reaktor eingeleitet und reagiert dort mit einem heißen, langkettigen Öl. Das dabei entstehende Produktgas wird über zwei Kühlstufen in einen Treibstoff- und einen Wasser-Anteil kondensiert. Das verbleibende Gas wird abschließend in einem elektrostatischen Abscheider gereinigt und direkt in einem Blockheizkraftwerk in elektrische Energie gewandelt. Das BAF-Verfahren bietet gegenüber der reinen Pyrolyse mehrere Vorteile. Zum einen erfährt das Pyrolysegas durch die Einbringung in ein Öl grundsätzlich eine Reinigung. Zum anderen reagiert das Gas außerdem mit dem Öl und crackt dieses in wesentlich niedrigeren Temperaturbereichen, als dies ohne Pyrolysegas möglich wäre.

Durch diese Reaktion bildet sich somit ein stabilerer, lagerfähiger Treibstoff mit einem deutlich höheren Energiegehalt im Vergleich zum reinen Pyrolyseöl. Je nach verwendetem Einsatzstoff im BAF-Reaktor und genutzter Temperatur kann im BAF-Prozess wahlweise mehr Gas oder Treibstoff erzeugt werden. Die Einsatzstoffe für den BAF-Reaktor reichen hierbei von Plastikabfällen (PE/PP) über Ölrückstände bis hin zu Bioölen. Mit der BAF-Technologie können somit auch Pyrolyseöle ohne großen Aufwand soweit aufgewertet werden, dass sie zur dezentralen Energieerzeugung direkt in Blockheizkraftwerken nutzbar werden. Darüber hinaus werden die Öle lagerbar und können somit auch zur dezentralen Energieerzeugung in Spitzenlastzeiten verwendet werden. Für den speziellen Fall von Bioabfallvergärungsanlagen liegt der besondere Charme des Verfahrens in der Möglichkeit, die in den Bioabfallchargen enthaltenen Kunststoffabfälle, die bislang gegen Zuzahlung einer thermischen Verwertung zugeführt werden, im BAF-Reaktor zu einem verstromungsfähigen Gas umzusetzen. Der hohe Energiegehalt der Kunststoffabfälle führt dabei zu entsprechend hohen Energieausbeuten. Die beschriebene Verfahrenskombination wurde bereits am Standort der Harper Adams University (UK) in Betrieb genommen. Die dort realisierte Anlage weist eine Durchsatzleistung von 100 kg/h auf (Bild 3).



Bild 3:

Pilotanlage Verfahrenskombination Pyrolyse-BAF (Kapazität 100 kg/h)

Im Rahmen des Interreg IVb Projektes Bioenergy Nord West Europe (BioenNW) wurde das beschriebene Verfahrenskonzept in einer Forschungs Kooperation unter Beteiligung der Länder Belgien, Frankreich, Italien, Holland und Großbritannien im Demonstrationsmaßstab umgesetzt. Insbesondere die Kombination aus Pyrolyse und Anaerobtechnik ist Gegenstand des Forschungsverbundes und soll in den beteiligten Ländern umgesetzt werden [17].

5. Einbindung der Pyrolyse in Bioabfallvergärungsanlagen

Nachfolgend ist in Bild 4 eine mögliche Integration der Pyrolysestufe in bestehende Biogasanlagen schematisch dargestellt.

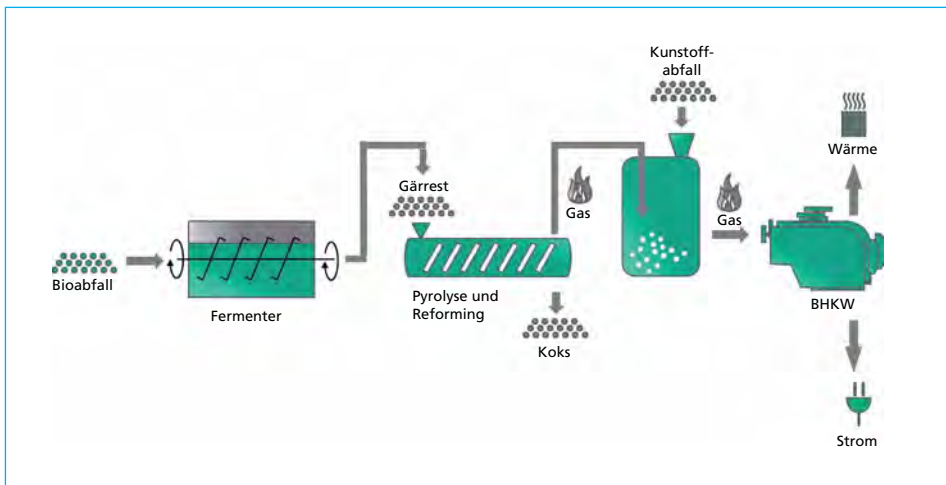


Bild 4: Integration einer Pyrolyseanlage in bestehende Biogasanlagensysteme und die gewonnenen Energieträger und Produkte

Die erzeugten gasförmigen und flüssigen Pyrolyseprodukte können gespeichert oder in einem zusätzlich installierten Kombi-BHKW energetisch zur Strom- und Wärme-Produktion genutzt werden. Die Abwärme der BHKW kann kostenneutral für die gesamte Biogasverbundanlage, beispielsweise zur Trocknung der Gärrestmengen oder zur Fermenterbeheizung, genutzt werden. Das im Pyrolyseprozess separierte Wasser kann dem Vergärungsprozess wieder zugeführt werden. Die Rückführung des Prozesswassers in den Fermenter führt dort zu einem Anstieg der Methanproduktion.

Die Integration einer Pyrolyseanlage kann die Effizienz von Bioabfallvergärungsanlagen durch die damit verbundene Gärrestverwertung erhöhen und zugleich die regionale Wertschöpfung steigern. Der Pyrolyseprozess ermöglicht darüber hinaus den Aufschluss von ligninhaltigen Komponenten zu flüssigen und gasförmigen Brennstoffen und trägt zur optimierten Nutzung der eingesetzten Gärreste bei.

Dies bedeutet, dass vermehrt erneuerbare und vor allem speicherfähige Energie aus dem Gärrest gewonnen werden kann und die Klimabilanz der Fermentation aufgrund der hohen CO_2 -Speicherfähigkeit der Biokohle deutlich verbessert wird.

Das technisch nutzbare Potenzial zur Biokohleherstellung wird bei 10 bis 20 Prozent der anfallenden Bioabfallgärreste gesehen.

Die Verwendung der Biokohlen kann sowohl stofflich als auch energetisch erfolgen. Abgesehen von der Möglichkeit der Mitverbrennung in Großkraftwerken ist prinzipiell der Einsatz von Biokohlen auch in kleineren, genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen denkbar. Perspektivisch ist auch eine Verwendung in Hausbrandanlagen und die damit verbundene Zulassung zum Regelbrennstoff nach der 1.BImSchV denkbar. Durch den Endkundenhandel könnte ein zusätzlicher Absatzmarkt bedient werden, auf dem deutlich höhere Preise durchgesetzt werden können.

Ebenso kann eine landwirtschaftliche Verwertung von Biokohlen bei nachgewiesener Eignung sinnvoll sein. Diese können sowohl als Bodenverbesserer als auch perspektivisch als Dünger eingesetzt werden. Hierzu sind aber neben dem technischen Nachweis auch der rechtliche Rahmen und der Zulassungsweg zu bewerten.

Schließlich sind auch industrielle Anwendungen von Biokohle von Interesse. Hier steht vor allem die Substitution von fossiler Kohle in bestehenden Prozessen im Mittelpunkt. Erste Ansatzpunkte sind die Nutzung von Biokohlen in den Kohleelektroden der Aluminiumherstellung oder als Reduktionsmittel bei der Stahlerzeugung.

6. Ausblick

Die stoffliche oder energetische Verwertung von Biokohle führt im Gegensatz zur landwirtschaftlichen Ausbringung von Gärresten nicht zur Freisetzung der Klimagase Methan, Ammoniak und Lachgas. Durch den Einsatz von Biokohle als Bodenverbesserer wird der Kohlenstoff dauerhaft fixiert, was langfristig zur CO_2 -Speicherung und somit zum weiteren Ausbau der Klimaschutzziele beiträgt [18].

Essenziell für die großtechnische Biokohleapplikation in Gartenbau und Landwirtschaft ist die Etablierung standardisierter Analyseroutinen zur Qualitätssicherung der Biokohle. Der Institutsteil Sulzbach-Rosenberg von Fraunhofer UMSICHT arbeitet vor diesem Hintergrund gemeinsam mit Forschungseinrichtungen in Italien und Großbritannien an der Schaffung einer anerkannten Zertifizierungsroutine.

Institutsleiter Prof. Dr. Andreas Hornung ist Mitglied der International Biochar Initiative (IBI), die sich für die nachhaltige Nutzung von Biokohle unter sozialen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten einsetzt. Die Initiative unterstützt den Austausch und die Verbreitung von Informationen und Fakten zum Thema Biokohle.

Fraunhofer UMSICHT arbeitet an der Realisierung einer Demonstrationsanlage zur Koppelung einer bestehenden Bioabfallvergärungsanlage mit der Pyrolyse-BAF-Technologie. Vorbehaltlich positiver Förderbescheide soll das Verfahrenskonzept im Demonstrationsmaßstab realisiert und im Praxistest evaluiert werden.

7. Literatur

- [1] Franke, M.; Rühl, O.; Faulstich, M.: *Integration von Vergärungsstufen in Kompostieranlagen*. In: Bilitewski B.; Schnurer H.; Zeschmar-Lahl B.; (Hrsg): Müllhandbuch 4/09, 2009, S. 5420/1-5420/1
- [2] Kern, M.; Raussen, T.: Biogas-Atlas 2011/2012, Anlagenhandbuch der Vergärung biogener Abfälle in Deutschland. Witzenhausen: 2011, 283 Seiten
- [3] Kern, M., Raussen, T.: Potenzieller Beitrag der Abfallwirtschaft zur Energieversorgung. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung V. Stofflich – energetisch. Witzenhausen: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2010, S. 461-475
- [4] Alwast, H.: Auswirkung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes auf Stoffströme und Behandlungskapazitäten in Deutschland, Wasser und Abfall, 13. Jahrgang, Heft 10. Wiesbaden: 2010, S. 10-14
- [5] Bergs, C.-G.: KrWG und Bioabfallverordnung – Konsequenzen für die Bioabfallfassung und -behandlung. In: Wiemer, K.; Hern, M.; Raussen, T. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung VIII, stofflich-energetisch, Witzenhausen: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2013, S. 107-120
- [6] H&K: Humuswirtschaft & Kompost aktuell, Ausgabe 4-2013, 08.04.2013.
- [7] Kern, M.; Raussen, T.; Funda, K.; Lootsma, A.; Hofmann, H.: Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz. In: Dessau: Umweltbundesamt Texte 43/2010, FKZ: 370733304, 2010, 196 Seiten
- [8] Präsentation Workshop zum Projektabschluss der Projekte *Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen* (FKZ 20633326) und *Ermittlung der Emissionssituation bei der Vergärung von Bioabfällen* (FKZ 370944320), 20.06.2011. Dessau: Umweltbundesamt, 2009
- [9] Cuhls, C.; Mähl, B.; Clemens, J.: Emissionen aus Biogasanlagen und technische Maßnahmen zu ihrer Minderung. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Erneuerbare Energien Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 147 bis 160
- [10] Cuhls, C.; Mähl, B.: Methan-, Ammoniak- und Lachgasemissionen aus der Kompostierung und Vergärung – technische Maßnahmen zur Emissionsminderung. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung III, stofflich-energetisch, Witzenhausen: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2008, S. 471-489
- [11] Libra, J.A. et al.: Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. In: Biofuels 2(1), 2011, S. 89-124
- [12] Steiner, C.; Glaser, B.; Teixeira, W.G.: Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferrasol amended with compost and charcoal. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 171, Bd 6, 2008, S. 893-899
- [13] Quicker, P.: Thermochemische Verfahren zur Erzeugung von Biokohle. In: Wiemer, K.; Hern, M.; Raussen, T. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung VIII, stofflich-energetisch, Witzenhausen: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2013, S. 325-336
- [14] Reichle, E.; Schmoedel, G.; Schmid, M.; Körner, W.: Rückstände aus Holzvergasungsanlagen. In: Müll und Abfall, 3, 2010, S. 118-126
- [15] H&K: Humuswirtschaft & Kompost aktuell 11/2011, Biokohle – Klimaretter oder Mogelpackung, 2011, S. 3-6
- [16] Dunst, G.: Die erste abfallrechtlich bewilligte Pflanzenkohle-Produktionsanlage Europas. In: Wiemer, K.; Hern, M.; Raussen, T. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung VIII, stofflich-energetisch, Witzenhausen: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2013, S. 349-354
- [17] BioenNW: Homepage Projekt Bioenergy NorthWest Europe: <http://bioenergy-nw.eu/>, 2013
- [18] Holweg, C.: Abschlussbericht zur Studie Biomasse-Pyrolyse, Machbarkeitsstudie zum Einsatz einer innovativen Technologie zur Bioenergieerzeugung mittels Pyrolyse mit niedrigen Staubemissionen und hohem CO₂-Reduktionspotential, Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz badenova AG & Co. KG, Proj.-Nr. 2010-12, Dezember 2010