



Hochschule Neubrandenburg

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften

Studiengang Lebensmittel- und Bioprodukttechnologie

SS 2014

Einsatzmöglichkeiten von Gärresten und Pflanzenkohle am Beispiel der Biogasanlage Ivenack

Verfasser: Erik Thürke

Erstbetreuer: Prof. Dr.-Ing. Heralt Schöne

Zweitbetreuer: Dipl. -Ing. Stefan Lebzien

abstract

Approximately 400 t of dried digestate are produced annually at the biogas plant Ivenack. Due to the EEG 2014 operators are forced to find new product paths. The dried digestate could be sold as fertilizer. However, the residues could instead also be pyrolyzed. Investigations of the digestate and the biochar will therefore deliver information on potential sales channels.

Inhaltsverzeichnis

abstract	2
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen	5
1. Einleitung	7
2. Stand der Technik	10
2.1 BGA Ivenack	10
2.1.1 Aktueller Stand	10
2.1.2 Ausbau Variante 1	11
2.1.3 Ausbau Variante 2	11
2.1.4 Vergleich der Substrat- und Energiebilanz	12
2.2 Aufbereitung des Gärrestes	14
2.2.1 Thermisches Aufbereitungsverfahren	14
2.3 Nutzung des getrockneten Gärrestes	15
2.3.1 Inverkehrbringen/ Bio Siegel	15
2.3.2 Thermische Nutzung	18
2.3.3 Landwirtschaftliche Ausbringung	18
2.3.3.1 Flüssiger Gärrest	18
2.3.3.2 Getrockneter Gärrest	18
2.4 Herstellung der Pflanzenkohle	19
2.4.1 Herkömmliche Methoden	19
2.4.2 Neue Verfahren	21
2.4.2.1 Pyreg-Verfahren	21
2.4.2.2 Hydrothermale Carbonisierung (HTC)	22
2.5 Verwendungsmöglichkeiten von Pflanzenkohle	25
2.5.1 Landwirtschaftliche Nutzung	26
2.5.2 Grillkohle	30
2.5.3 Erhöhung der Biogasproduktion	31
2.5.4 Aktivkohle	34
2.5.4.1 Wasseraufbereitung	35
2.5.4.2 Entschwefelung	35
2.5.5 Futtermittelzusatzstoff/Lebensmittelzusatzstoff	36
3. Analysen	38
3.1 Gärrest	38
3.2 Pflanzenkohle	39
3.3 Gärrest und Pflanzenkohle	39
4. Ergebnisse	40
4.1 Gärrest	40
4.1.1 Deklaration als Düngemittel	40
4.1.2 Siebanalyse	41
4.2 Pflanzenkohle	42
4.2.1 Auswirkung auf das EPZ	42
4.2.1.1 H/C- und O/C-Verhältnis	43
4.2.2 Grillkohle	45
4.2.3 Lebensmittel/Futtermittel	45
4.2.4 Siebanalyse	45
4.2.5 Jodzahl	48
4.3 Gemeinsame Ergebnisse	49
4.3.1 Brennwert/Heizwert/Wassergehalt	49
5. Auswertung	50
5.1 Preisermittlung Gärrest	50

5.2 Verkauf als NPK-Dünger	51
5.3 Verkauf der Pflanzenkohle	53
6. Zusammenfassung	54
7. Literaturverzeichnis	55
8. Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen	59
Anhang I,II	63
Erklärung über die selbstständige Anfertigung der Arbeit	66

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen

Symbol / Index	Bezeichnung	Einheit
V	Volumen	m^3
A	Fläche	m^2, ha
M	Masse	dt, kg
T	Temperatur	$^\circ\text{C}$
L	Länge	$\text{m}, \mu\text{m}$
N	Stoffmenge	mol

Abkürzungen

LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
TM	Trockenmasse (siehe auch TS)
TS	Trockensubstanz
FM	Frischmasse
OTS	Organische Trockensubstanz
N	Stickstoff
NH_4^+	Ammoniumion
DüV	Düngeverordnung
DümV	Düngemittelverordnung
NO_3^-	Nitrat
P_2O_5	Phosphoroxid
K_2O	Kaliumoxid
MgO	Magnesiumoxid
S	Schwefel
C	Kohlenstoff
DAP	Diammonphosphat
TSP	Tripelsuperphosphat
DüV	Düngeverordnung
DümV	Düngemittelverordnung
BioAbfV	Bioabfallverordnung
EPZ	Europäisches Pflanzenkohle Zertifikat

BGA	Biogasanlage
L-TS	Lufttrockensubstanz
OS	Originalsubstanz
ASTM	American Society for Testing and Materials

1. Einleitung

Über einen Dorset Bandrockner der BGA Ivenack fallen jährlich ca. 400 t getrockneter Gärrest an. Es handelt sich dabei um einen organischen Dünger, der mit entsprechenden Nährstoffen beladen ist. Die genaue Zusammensetzung wurde für diese Arbeit ermittelt. Zudem wird ganz in der Nähe auf 10 ha ein Feld Igniscum Candy angebaut. Igniscum Candy ist eine vom europäischen Sortenamt eingetragene Bezeichnung für einen Riesenknöterich der aus der Art *fallopia Sachalinensis* hervorgeht. Zum einen kann dessen abgestorbene Pflanzenmasse im Frühjahr geerntet oder zum anderen die Frischmasse im Sommer für die Biogasanlage verwendet werden. Die Frischmasse wird im Sommer geerntet und der Ivenacker Anlage in sillerter Form als Cosubstrat zugeführt und kann als bereichernde Ergänzung zur Maissilage gesehen werden. Die trockene Pflanzenmasse ist ein Brennstoff mit guten Verbrennungseigenschaften. Igniscum steht somit in der Gruppe der alternativen Energiepflanzen und ist vergleichbar mit anderen Dauerkulturen wie der Durchwachsenen Silphie. Die vorhandenen Reststoffe aus der Biogasanlage können nun entweder als Wirtschaftsdünger auf umliegende Felder ausgebracht oder als Universaldünger für den Kleingartenbereich zum Beispiel in Baumärkten angeboten werden.

Ziel des neuen EEG 2014 ist es, den Anlagenzubau von Bioenergieanlagen auf 100 MW installierter elektrischer Leistung pro Jahr zu beschränken. Die BGA Ivenack ist seit 2006 in Betrieb. Seit dem 1. August 2014 kann die bisherige Vergütung lediglich für die Menge eingespeister Kilowattstunden gewährt werden, die eine Höchstbemessungsgrenze nicht überschreiten. Diese wird aus der höchsten Leistung seit Inbetriebnahme eines Kalenderjahres vor dem 1. Januar 2014 ermittelt. Alles was darüber hinausgeht, wird mit dem aktuellen Monatsmarktwert vergütet. Die Höchstbemessungsgrenze bezieht sich bei der BGA Ivenack auf 95 % der zum 31.07.2014 installierten elektrischen Leistung.

Neu installierte Anlagen erhalten ab dem 1. August 2014 (ab einer Leistung von über 500 Kilowatt) eine Grundvergütung von 10,55 Cent je Kilowattstunde. Da die installierte Leistung dadurch 100 Kilowatt überschreitet, kann nur auf die Hälfte dieser installierten Leistung die Grundvergütung gewährt werden. Der Rest wird ebenfalls nach aktuellem Monatsmarktpreis vergütet (EEG, 2014).

Dem enormen Anstieg des Anteils nachwachsender Rohstoffe am eingesetzten Biogassubstrat der letzten Jahre wirkt nun jedoch das neue EEG entgegen. Kritiker des EEG befürchten einen großen Einschnitt im Ausbau der Biogasenergie. Der Bonus für den Einsatz nachwachsender Rohstoffe entfällt. Die im EEG festgelegten Vergütungsklassen für alternative

Energiepflanzen und Güllen werden nicht mehr gewährt (Rostek, 2014). Lediglich Gülleanlagen mit einer installierten Leistung von bis zu 75 Kilowatt erhalten weiterhin den erhöhten Betrag von 23,73 Cent pro Kilowattstunde (EEG, 2014). Vor allem große Anlagen die noch geplant sind, müssen dann wesentlich wirtschaftlicher betrieben werden. Damit wird der Anlagenbetreiber unter anderem gezwungen, die Wertschöpfung seiner Abfallprodukte zu erhöhen.

In dieser Arbeit sollen Möglichkeiten zur Nutzung von Reststoffen aus Biogasanlagen überprüft und die Wirtschaftlichkeit regionaler Vermarktungsstrategien aufgezeigt werden. Auch die Erhöhung der Biogasmengen mit Hilfe von innerbetrieblich herstellter Pflanzenkohle kann in Erwägung gezogen werden. Die Pflanzenkohle könnte aber auch als regional hergestellte Grillkohle verkauft werden. Als Substrate für die Verkohlung kann der Gärrest bzw. Igniscum Candy verwendet werden. Mit Hilfe einer Anlage der Firma Pyreg soll Pflanzenkohle hergestellt und auf spezifische Parameter untersucht werden, so dass jener optimale Verwendungszweck mit möglichst hoher Wertschöpfung unter Einhaltung spezifischer Produktanforderungen gefunden wird.

Ein möglicher Anwendungsbereich für Pflanzenkohle wird im landwirtschaftlichen Raum erwartet. Vor allem die Einarbeitung im Ackerboden zur Verbesserung der Wachstumsbedingungen für Kulturpflanzen steht zur Debatte. Zu diesem Thema liegt eine Vielzahl verschiedener Veröffentlichung mit entsprechend unterschiedlichen Ergebnissen vor. Eine Kaskadenanwendung scheint sich derzeit als überzeugendste Methode zur Anwendung von Pflanzenkohle anzubieten. Dabei überträgt sich der Nutzen der Kohle mit jeder weiteren Anwendung der jeweiligen Endprodukte auf die nächsten Teilanwendungen.

Durch Verwesung, Veratmung und natürliche Brände entstehen weltweit 120 Gt Kohlenstoff pro Jahr. Diese werden von Pflanzen aufgenommen und zu Biomasse umgewandelt.

Jährlich werden zudem noch etwa 9 Gt Kohlenstoff künstlich aus fossilen Energieträgern erzeugt. Wollte man diesen Anteil neutralisieren, ist eine ebenso große Menge aus dem Kohlenstoffkreislauf zu entnehmen, die sonst aus den natürlichen Abbauprozessen entstehen würde. Die Verwendung von Holz als Baumaterial und Rohstoff für die Möbelindustrie ist eine effektive Methode, um den Kohlenstoff für eine gewisse Zeit aus dem Kreislauf auszuschließen (Schmidt, 2012 A). Diverse Veröffentlichungen sagen für Pflanzenkohlen voraus, dass sie sich in Böden bis zu 1000 Jahre lang nicht abbauen, damit wäre zumindest eine von vielen Lösungen für das Klimawandelproblem gegeben. Grundlage für diese These ist die langfristige Bindung des Kohlenstoffs aus dem CO₂, der von den Pflanzen in ihre Biomasse aufgenommen wird. Die Umwandlung in stabilen Kohlenstoff und die stoffliche

Verwertung binden das CO₂ für eine gewisse Zeit. Ob es sich dabei wirklich um 1000 Jahre oder mehr handelt, gilt allerdings noch zu beweisen (Schmidt, 2011).

Pflanzenkohle ist als Nahrungsergänzungsmittel E 153 schon seit Jahren ein Begriff. Daher ist der teilweise auch verwendete Name „Biokohle“ etwas unglücklich in den Sprachgebrauch eingegangen. Mittlerweile haben sich Wissenschaft und Forschung auf den Begriff „Pflanzenkohle“ geeinigt, um Missverständnisse und Verwechslungen mit einem Bioproduct auszuschließen. Es hatten sich Vertreter der Biobranche verärgert über den Begriff „Bio“ geäußert. Im Folgenden wird daher die Formulierung „Pflanzenkohle“ verwendet. Entstanden ist der Begriff „Biokohle“ aus dem englischen „biochar“. Die Vorsilbe „bio“ bezieht sich aber auf das Wort „biomass“ (Schmidt, 2011).

2. Stand der Technik

2.1 BGA Ivenack

2.1.1 Aktueller Stand

Die Substratfütterung erfolgt über einen Feststoffdosierer in das Anmischbecken (180 m³). Die Rohgülle wird über eine 1,4 km lange Fernleitung von einem Milchviehbetrieb zur BGA befördert. Nach einer Verweilzeit von etwa 42 Tagen im Fermenter (2200 m³) gelangt das Substrat für 47 Tage in den Nachgärtner (2200 m³). Anschließend läuft der Gärrest in einendlager von 360 m³ Fassungsvermögen. Derzeit werden täglich 26 t Mais, 1 t Igniscum, 1,5 t Getreide und 15 m³ Rindergülle in die BGA eingetragen. Die anfallenden flüssigen Gärreste der BGA Ivenack werden zum Milchviehbetrieb wieder über die Fernleitung in ein Göllelager zurück gepumpt. Ein gewisser Anteil wird aus dem Endlager in Ivenack dem Bandtrockner zur Verfügung gestellt, wodurch 400 t Granulat des getrockneten Gärrestes entstehen.

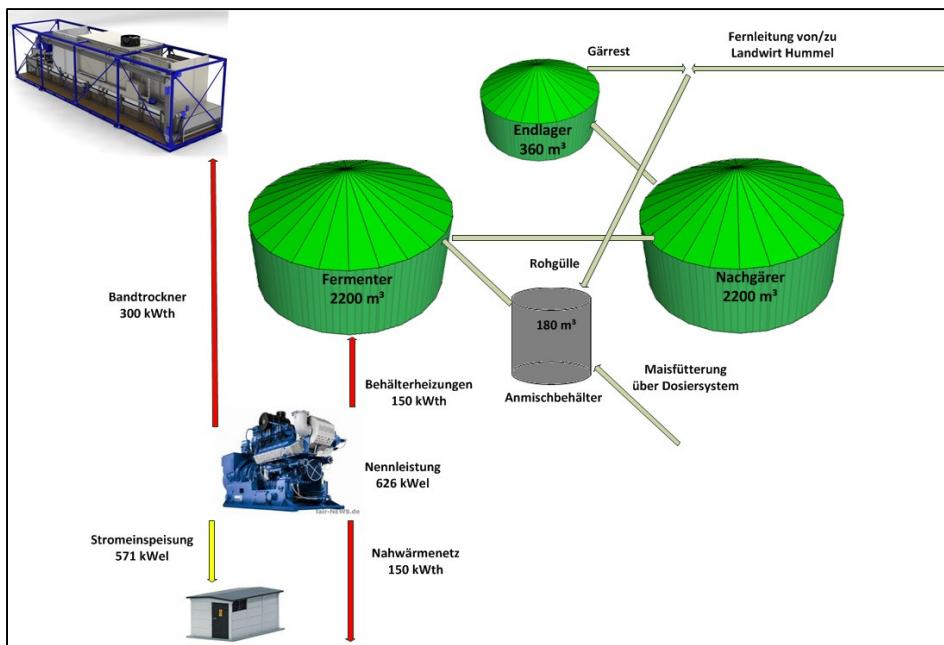


Abb. 1: Aktueller Verfahrensablauf an der BGA Ivenack (Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)

Die vom BHKW erzeugte thermische Leistung wird zurzeit für die Behälterheizung verwendet (150 kW_{th}) und in ein Nahwärmenetz eingespeist (150 kW_{th}). Die restlichen 300 kW_{th} stehen dem Bandtrockner mit einer Nennleistung von 900 kW_{th} zur Verfügung.

2.1.2 Ausbau Variante 1

Das zurzeit vorhandene BHKW mit Zündstrahlmotor und einer Nennleistung von 626 kW_{el} soll durch ein regelbares BHKW mit Gasmotor und einer elektrischen Leistung von 800 kW ersetzt werden. Bei einer Auslastung von 94% wird die durchschnittliche Gesamtleistung dann jährlich ca. **750** kW_{el} betragen. Die zusätzlich bereitgestellten Wärmemengen können die Versorgung des Nahwärmenetzes sicherstellen und für die Behälterheizung und die Trocknungsanlage zur Verfügung gestellt werden. Das Nahwärmenetz kann zudem eventuell noch ausgebaut werden. Derzeit sind an dieses etwa 30 Haushalte, eine Großküche und ein Altersheim angeschlossen. Folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die aktuelle und zukünftige Wärmenutzung im jährlichen Durchschnitt:

Tab.1: Wärmenutzung an der BGA Ivenack (Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)

Verwendung	Leistung (kW _{th})	
	vorher	nachher
Behälterheizung	150	250
Nahwärmenetz	150	200
Bandtrockner	300	350
Gesamt	600	800

Das Gesamtvorhaben des Energiedorfes Ivenack richtet sich nach den Neuerungen des EEG 2014. Dabei ist langfristig eine Unabhängigkeit vom EEG geplant, die mit der Direktvermarktung der elektrischen Leistung erreicht werden kann. Dafür wird von den neuen BHKW Modulen eine Regelbarkeit verlangt, um zeitweise Netzschwankungen auszugleichen. Nach dem neuen EEG (2014) ist die Fernsteuerbarkeit der Anlage Voraussetzung für den Weg in die Direktvermarktung. Das Unternehmen, welches den Strom annimmt, muss die Leistung ferngesteuert reduzieren können.

2.1.3 Ausbau Variante 2

Diese Variante ist zwar bereits in Planung, enthält aber noch kein konkretes Konzept. Demnach wird der jetzige Nachgärer zu einem Fermenter umfunktioniert, so dass 2 Fermenter

abwechselnd über das gleiche Eintragssystem gefüttert werden können. Daran wird sich ein neuer Kombibehälter mit einem Volumen von ca. 7000 m³ anschließen, welcher als Nächgärtner dient. Die Regelbarkeit wird dazu führen, dass der Gasspeicher auf dem Nachgärtner zeitweise höhere Gasmengen speichern muss. Auch eine erhöhte Fütterung wird zukünftig erfolgen. Das neue Dosiersystem stattet man zudem mit einer Biomix-Pumpe aus, um mehrere Behälter gleichzeitig beschicken zu können und somit eine flexible Prozessführung zu gewährleisten. In der folgenden Abbildung wird der zukünftige Verfahrensablauf der BGA Ivenack veranschaulicht:

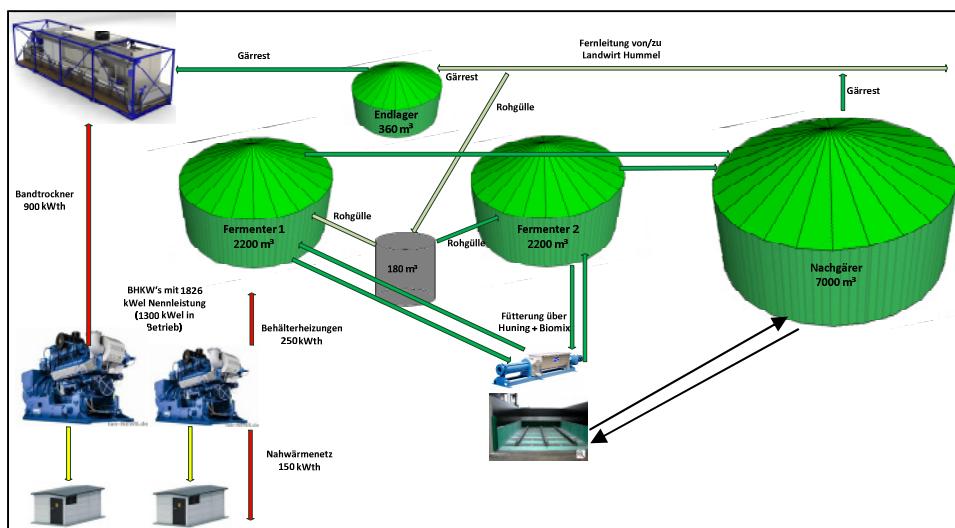


Abb.2: Zukünftiger Verfahrensablauf an der BGA Ivenack (Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)

2.1.4 Vergleich der Substrat- und Energiebilanz

Für die folgende Betrachtung werden allgemeine Faustzahlen verwendet, die je nach Bedarf und Erfahrungswerten verändert werden können. Die Betrachtung soll der Bestimmung für den Anlagenbetreiber relevanter Kennzahlen dienen, wie beispielsweise der Verweildauer und der benötigten Substratmenge.

Tab.2: Aktueller Stand der Energiebilanz der BGA Ivenack (eigene Darstellung aus Faustzahlen und Daten der Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)

Aktueller Stand	FM (t/d)	TS (% FM)	TS (t/d)	oTS (% TS)	oTS (t/d)
Maissilage	26	32	8,3	96,0	8,0
Rindergülle	15	7	1,1	80,0	0,8
Getreide	1,5	85	1,3	97,0	1,2
Igniscum-Silage	1	27	0,3	96,0	0,3
Substrat-Input	43,5	25,1	10,9		10,3

Biogas (m ³ /t oTS)	Biogas (m ³ /d)	CH ₄ (m ³ /d)	Energie (kWh/d)*
640	5112	2709,26	10254
350	294	155,82	590
730	903	478,50	1811
550	143	75,56	286
	6451	3419,13	12941

*Wirkungsgrad BHKW 38%

Die täglich bereitgestellte elektrische Leistung aus den Substraten beträgt 12941 kWh bzw. 539 kW_{el}. Um die nach dem Umbau geforderten 750 kW_{el} zu erzeugen, müssten täglich 18000 kWh_{el} aus den Substraten zur Verfügung gestellt werden. Diese Energie sollte, wenn möglich, nicht aus Getreide eingebracht werden. Der Gülleanteil soll auf 20 m³ erhöht werden; der Igniscumanteil bleibt gleich. Der Wirkungsgrad des BHKW's wird nach dem Umbau nicht mehr 38 %, sondern 43 % betragen. Der größte Anteil muss aus Maissilage stammen und wird aus der täglich benötigten Restenergie von 16787 kWh analog Tab. 2 zurückgerechnet.

Tab.3: Variante 1 der Energiebilanz der BGA Ivenack (eigene Darstellung aus Faustzahlen und Daten der Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)

	Energie (kwh/d)*	CH ₄ (m ³ /d)	Biogas (m ³ /d)
Maissilage	16787	3919,5	7395,4
Rindergülle	890	207,8	392,0
Getreide	0	0,0	0,0
Igniscum-Silage	324	75,6	142,6
	18000		
oTS (t/d)	TS (t/d)	FM (t /d)	
11,6	12,04	37,6	
1,1	1,40	20,0	
0,0	0,00	0,0	
0,3	0,27	1,0	

*Wirkungsgrad BHKW Neu 43 %

Um die benötigten 16787 kWh pro Tag zu erzeugen, werden ca. 38 t Maissilage benötigt. Aufgrund der Erhöhung des Inputs der Substrate werden sich zudem die Verweilzeiten verringern.

Tab.4: Substrat-Input in die BGA-Ivenack (eigene Darstellung aus Daten der Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)

	Variante 1			Aktueller Stand		
	FM (t/d)	Dichte (t/m ³)	Input (m ³ /d)	FM (t/d)	Dichte (t/m ³)	Input (m ³ /d)
Maissilage	37,6	0,75	50,1	26	0,75	34,7
Rinderfülle	20	1	20,0	15	1	15,0
Getreide	0	1	0,0	1,5	1	1,5
Igniscum-Silage	1	0,75	1,3	1	0,75	1,3
Substrat-Input	58,6		71,5	43,5		52,5

Tab.5: Verweilzeiten der Substrate an der BGA Ivenack (eigene Darstellung aus Daten der Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)

		Anmischbehälter	Fermenter	Nachgärtner	Gesamt
	Volumen (m ³)	180	2200	2200	
Aktueller Stand	Verweilzeit(d)	3,4	41,9	52,4	97,7
Variante 1	Verweilzeit (d)	2,5	30,8	38,5	71,8

2.2 Aufbereitung des Gärrestes

Unaufbereiteter Gärrest hat einen hohen Wassergehalt, der meist bei über 90 % liegt. Der höhere Wassergehalt im Vergleich zu den Ausgangssubstraten erklärt sich durch die Reduzierung der Trockensubstanz. Im Wesentlichen wird die darin enthaltene organische Substanz zu Methan und Kohlendioxid umgewandelt, dem Biogas (Reinhold, 2012).

2.2.1 Thermisches Aufbereitungsverfahren

An der Biogasanlage Ivenack besteht die Möglichkeit einen Teil des anfallenden Gärrestes in einen Dorset Bandtrockner einzuleiten, um so einen Großteil des Wassergehaltes zu entfernen. Durch die Gärresttrocknung besteht die Möglichkeit, einen transportfähigen und nährstoffreichen Dünger herzustellen. Während dabei Kalium und Phosphor im getrockneten Gärrest verbleiben, wird der Ammoniumstickstoff nahezu vollständig zu Ammoniak umgewandelt und findet sich in der Abluft wieder. 90 % des Ammoniaks können dabei durch eine Abluftreinigung zu Ammoniumsulfat umgesetzt und damit vor einer Freisetzung in die Atmosphäre bewahrt werden. Das Ammoniumsulfat sollte unbedingt aufgefangen werden, da es sich dabei um einen stickstoffreichen anorganischen Dünger handelt (Dorset, 2014).

Bandtrockner sorgen also für eine schonende Aufbereitung des Gärrestes. Dennoch geht ein Teil des Stickstoffs als Ammoniak in die verdampfte Phase über und ist somit von der festen Phase abgetrennt. Von der festen Phase, dem getrockneten Gärrest, ist dann jedoch keine

weitere Stickstoffemission zu erwarten. Es entsteht ein hoch an Kalium und Phosphor angereicherter, transportwürdiger Dünger. Dieser kann zum Beispiel auf stickstoffreichen Flächen eingesetzt werden (Döhler, 2009).

2.3 Nutzung des getrockneten Gärrestes

2.3.1 Inverkehrbringen / Bio Siegel

Die Anwendung eines Düngers mit Hinweis auf Verwendung für eine bestimmte Pflanzenart ist nicht sachgemäß, wenn der Boden eine Über- oder Unterversorgung eines oder mehrerer Nährstoffe aufweist. Entscheidend sind das passende Nährstoffverhältnis und die Geschwindigkeit der Nährstoffverfügbarkeit. Zu bemängeln ist nach (Klein, 2013) auch, die überwiegend im Kleingarten stattfindende Ausbringung und daraus resultierende Überversorgung des Bodens; meist aus Unwissenheit der Anwender. Besonders kritisch sind in diesem Zusammenhang auch mineralische Dünger zu betrachten, die häufig große Mengen Schwermetalle mit sich führen. Im Fokus der Kritiker stehen dabei Cadmium und das noch nicht mit einem Grenzwert bedachte Uran (Klein, 2013).

Haus- und Kleingartenbesitzer sind nicht den Regeln der guten fachlichen Praxis unterworfen, welche in der Düngeverordnung geregelt sind. Dementsprechend ungewiss ist die korrekte Bemessung der auf diesen Flächen verabreichten Nährstoffmengen durch ihre Anwender. Die Pflanzen benötigen für ein optimales Wachstum vor allem die Hauptnährstoffe Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium in ausreichenden Mengen. In der Regel sind die Böden der Kleingartenanlagen jedoch gut versorgt wenn nicht sogar überdüngt (Bucher, 2011).

Vor allem bei der landwirtschaftlichen Ausbringung von Düngemitteln sollte beachtet werden, dass die Versorgung des Bodens in Nährstoffklassen angegeben werden kann. Dabei entspricht in jedem Fall die Gehaltsklasse C einem angestrebten Wert, bei dem keine zusätzliche Versorgung des Bodens notwendig ist. Gehaltsklassen A und B müssen zusätzlich versorgt werden und die Gehaltsklasse D und E sind überversorgt. Die Böden A und B benötigen also mehr Nährstoffe als von den Feldfrüchten entzogen wird. Die Böden D und E sind so stark versorgt, dass die Düngung geringer ausfällt oder überhaupt keine Düngung mehr erforderlich ist. Zu berücksichtigen ist jedoch auch noch die Erhaltungsdüngung. Denn auch ein Boden, der die Klasse C hat, muss entsprechend der angebauten Kultur mit der Menge an Nährstoffen versorgt werden, die von den Feldfrüchten entzogen wird (Schweder, 2004). Der Einsatz sollte also mäßig und mit Hilfe einer Analyse der Bodennährstoffe erfolgen. Die geläufige Düngereinteilung nach Kulturarten ist zudem zwar weit verbreitet,

jedoch wenig sinnvoll. Es ist weder in der Düngemittelverordnung noch in der Düngeverordnung geregelt, die Düngemittel nach Anwendung für eine bestimmte Pflanzenart einzuteilen (Bucher, 2011). Wenn man den Nährstoffbedarf dieser Pflanzen kennt, kann man meist teurere Spezialdünger durch günstige ersetzen (Miehlich, 2009).

Nährstoffe aus organischen Düngern, vor allem Stickstoff, müssen zunächst mineralisiert werden, um pflanzenverfügbar zu werden. Hornspäne gelten hier als Beispiel für Stickstoffdünger mit Langzeitwirkung, weil die Nährstoffe sehr langsam mineralisiert werden. Nährstoffe aus Mineraldüngern hingegen können sehr viel schneller von den Pflanzen verwertet werden. Sind die Versorgung des Bodens und der Nährstoffbedarf der Pflanzen bekannt, ergibt sich daraus das benötigte Verhältnis der einzelnen Nährstoffe zueinander und damit die Art und Menge des Düngemittels (Bucher, 2011). In der folgenden Abbildung sind die Nährstoffgehalte einiger organischer Düngemittel zusammengestellt.

Dünger	Stickstoff	Phosphor	Kalium	Calcium	Mikro	Ausnutzung 1./2./3. Jahr %
	%					
Rinderdung (getrocknet)	1,6	0,7	3,6	2,4	mittel	45/34/20
Peru-Guano	7	5	1,8	9,0	viel	60/25/15
Hornmehl, Hornspäne	12	2	-	3,4	wenig	50/30/20
Knochenmehl	3,5	11	0,17	17	mittel	30/35/35
Kompost	0,5 - 1,5	0,05 - 0,4	0,3 - 0,7	0,4 - 5	mittel	40/30/30

Abb.3: Nährstoffkomponenten in verschiedenen organischen Düngemitteln (Miehlich, 2009)

Ein Düngemittel wie Hornmehl besitzt große Mengen an Stickstoff, aber kein Kalium. Damit kann die Versorgung der Pflanzen mit Kalium nicht gedeckt werden. Bei regelmäßiger Anwendung in kurzen Intervallen wird zwar sehr viel Stickstoff im Boden angereichert, die Versorgung mit Kalium bleibt aber aus. Auch das Nährstoffverhältnis von Guano ist nicht optimal für Stauden. Hier liegt der Phosphorgehalt zu hoch; bei einem zu geringen Kaliumgehalt (Miehlich, 2009). Im Fall des getrockneten Gärrestes kann davon ausgegangen werden, dass besonders kaliumzehrende Kulturen von der Düngung profitieren. Dafür kommen im Kleingarten zum Beispiel Erdbeeren, Obstbäume und Beetstauden in Frage (Bucher, 2011).

Ein vergleichbares Produkt, Fantastic Fructus, wird laut Verpackungsangaben für Obstgehölze und Stauden empfohlen. Die Mengen der enthaltenen Hauptnährstoffe Stickstoff, Kalium, Phosphor und Magnesium sowie die Spurennährstoffe Kupfer und Zink sind in Prozent angegeben. Zudem ist noch der Anteil organischer Substanz hervorgehoben. Ein Produktzertifikat der PCU Deutschland GmbH bescheinigt dem Dünger im ökologischen Landbau einsetzbar zu sein und rechtfertigt damit die Bezeichnung als BIO-Dünger (Der Biogartenfreund, 2014). Es stammt aus der Aufbereitung von Biogasgärresten an einer von der Bioenergy GmbH betriebenen Anlage in Woldegk. Die Aufbereitung des Gärrestes erfolgt mit einem Dorset Bandtrockner. Die Einsatzstoffe sind Maissilage, Getreide und Rindergülle. Da das Endprodukt getrockneter Gärrest mit dem Hinweis „Bio“ deklariert werden darf, ist davon auszugehen, dass es sich bei der Gülle um Exkreme von Tieren extensiver Landwirtschaft handelt (Zühlke, 2010).



Abb.4: getrockneter Gärrest der Bioenergy GmbH (Zühlke, 2010)

Viele Düngemittel tragen inzwischen den Hinweis „Bio“ im Namen. Damit ist zunächst lediglich die Möglichkeit gegeben, den Dünger nach EG Öko-Verordnung im ökologischen Landbau einzusetzen zu dürfen. Es bedeutet nicht, dass die eingesetzten Bestandteile aus ökologischem Anbau stammen müssen. Düngemittel mit Guano dürfen im ökologischen Landbau aber durchaus Verwendung finden und tragen daher auch oft das Bio-Zeichen (Klein, 2013).

2.3.2 Thermische Nutzung

Eine gewinnbringende Verwertung ist durch Trocknung der Gärreste möglich. Die Vermarktung als Brennstoff ist jedoch nicht ratsam, da nach BImSchV die Einstufung als Regelbrennstoff nicht möglich ist, wenn Rindergülle vergoren wurde (Döhler, 2009).

2.3.3 Landwirtschaftliche Ausbringung

2.3.3.1 Flüssiger Gärrest

Der Gärrest ist dank der Vergärung mit besseren Düngeeigenschaften ausgestattet als unvergorene Wirtschaftsdünger. Als wichtigste wertbestimmende Eigenschaft ist der hohe Anteil des Ammoniumstickstoffs zu nennen. Bei Anwendung im Ackerbau zeigten sich verbesserte Stickstoffaufnahme im Pflanzenbau und geringere Stickstoffauswaschungen in Lysimeterversuchen. Zudem wird die Keimfähigkeit von allen bedeutenden Unkrautsamen, darunter auch Ackerfuchsschwanz und Weißer Gänsefuß, zerstört (Neumann, 2002).

Sollten die Inputstoffe oft variiert werden, sind Untersuchungen in regelmäßigm Abstand zu wiederholen. Die Hauptnährstoffe können je nach verwendetem Substrat und Wassergehalt der Gülle schwanken. Der Ausbringungstermin sollte je nach Kulturart angepasst werden, denn die Wirkung ist auch vom jeweiligen Bedarf der Kultur und der Ausbringungsart abhängig. Zusätzlich liefert Gärrest, im Gegensatz zu mineralischen Düngern, eine große Menge organischer Substanz. Diese ist Ausgangsstoff für die Bildung von Humus. Ein erhöhter Humusgehalt wirkt sich positiv auf die Bodenfruchtbarkeit aus. Der Stickstoffanteil kann in verschiedenen Formen vorliegen. Ist er in der organischen Substanz gebunden, so wird die Verfügbarkeit im Boden verzögert. Liegt der Stickstoff als Ammonium vor, ist eine schnelle Verfügbarkeit für die Kulturen zu erwarten. Ein Hinweis auf die Verfügbarkeit gibt auch das C/N Verhältnis. Dieses ist bei Gülle und Gärrest eher eng und die Verfügbarkeit daher schnell (Schröder, 2012). Bei Reinhold et al. (2012) zeigte sich, dass Biogasgüllen, unabhängig vom Wirtschaftsdüngeranteil, ein relativ enges C/N-Verhältnis von 5:1 besitzen.

2.3.3.2 Getrockneter Gärrest

Da der Gärrest getrocknet, und dabei ein großer Teil des schnell verfügbaren Stickstoffanteils Ammonium abgetrennt wird, ist die Verfügbarkeit etwas langsamer als beim unaufbereiteten Gärrest (Döhler, 2009). Auch der Anteil des Stickstoffs in der organischen Substanz ist unterschiedlich schnell pflanzenverfügbar. Als Richtwert werden 60-75 % des schnell verfügbaren Stickstoffs aufgeführt. Dieser Anteil ist noch im Ausbringungsjahr auf die

Kulturen anrechenbar. Bei unsachgemäßer Ausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern können starke NH₄-Verluste auftreten. Feste Nährstoffträger wie der getrocknete Gärrest sind demnach von dieser Problematik nicht betroffen (Schröder, 2012). In der Biogasanlage Ivenack wird auch Getreideschrot als Substrat verwendet. Getreidekörner, so auch Roggenschrot, gehören zu der Substratgruppe, die den geringsten Anteil Kalium liefern. Es kommt vorwiegend in Blatt- und Stängelmasse vor. Demnach müsste Maissilage einen wesentlichen Teil der Kaliumquelle ausmachen. Schließlich macht es auch den größten Anteil der Inputmaterialien für die Biogasanlage aus (Kaltschmitt, 2009). Der Schwefelgehalt ist in Biomassen relativ gering. Bei Feldkulturen wie Mais kann es aufgrund der oft schwefelhaltigen Düngemittelgaben zu höheren Gehalten in der Pflanzenmasse kommen (Kaltschmitt, 2009). Der Schwefelgehalt wird für die Betrachtung der Düngereigenschaften des getrockneten Gärrestes vorerst aber nicht betrachtet und daher auch nicht untersucht.

2.4 Herstellung der Pflanzenkohle

2.4.1 Herkömmliche Methoden

Verfahren, die eine Produktion fester Biobrennstoffe aus Biomasse wie Holz zum Ziel haben, gehören den thermochemischen Umwandlungsprozessen an. Im speziellen wird das Verfahren, welches eine möglichst große Menge festen Biobrennstoffs hervorbringen soll, als Verkohlung bezeichnet. Dabei läuft vor allem die Pyrolyse ab – also die Zersetzung der Biomasse unter Wärmezufuhr bei Sauerstoffabschluss. Durch den in der Biomasse enthaltenen Sauerstoff kommt es bei diesen Verfahren auch zu teilweiser Oxidation des Kohlenstoffs zu Kohlenstoffmonoxid und beinhaltet damit auch den Prozess der Vergasung. Die Verkohlung kann also als technische Umsetzung der Pyrolyse zur Bereitstellung fester Sekundärenergieträger angesehen werden. Sie gehört also zur Pyrolyse und dient hauptsächlich der Kohleherstellung bei Temperaturen von über 500° C.

Tab.6: Übersicht thermochemischer Umwandlungsverfahren (Kalschmitt, 2009)

Technischer Prozess	Thermo-chemische Umwandlung	Sauerstoffangebot	Temperatur in °C	Produkte
Verbrennung	A&T, PZ, Vg, Ox	$\lambda \geq 1$	800 – 1 300	heißes Abgas
Vergasung	A&T, PZ, Vg	$0 < \lambda < 1^a$	700 – 900	brennbares Gas
Hydrothermale Vergasung	A&T, PZ, Vg	$0 < \lambda < 1^b$	400 – 700 (200 – 300 bar)	brennbares Gas flüssiger Rückstand
Pyrolyse	A&T, PZ	$\lambda = 0$	450 – 600	brennbares Gas, Pyrolyseöl und -koks
Verkohlung	A&T, PZ	$\lambda = 0$	>500	Holzkohle
Torrefizierung	A&T, PZ	$\lambda = 0$	250 – 300	torrefizierte Biomasse

A&T Aufheizung und Trocknung, PZ pyrolytische Zersetzung, Vg Vergasung, Ox Oxidation

^a Oxidationsmittel ist meist Luft, Sauerstoff (O_2) oder Wasserdampf (H_2O); ^b Oxidationsmittel ist Wasserdampf (H_2O) bei überkritischen Bedingungen

Es gibt grundsätzlich zwei Verfahren zur Verkohlung: Das Meilerverfahren ist wohl das weltweit am häufigsten angewandte, bei dem allerdings ein Teil der Biomasse verbrannt wird, um Wärmeenergie für den weiteren Verlauf der Verkohlung zu liefern. Daher kann mit dieser Methode nur eine Ausbeute von maximal 25 % Kohle in Bezug auf die Trockenmasse erreicht werden. Im Gegenzug dazu kann mit Retortenverfahren eine Ausbeute von über 30 % erfolgen. Dies wird durch eine indirekte Beheizung des Reaktors möglich. Allerdings werden dafür meist fossile Brennstoffe zur Aufheizung benötigt. Wenn jedoch der Prozess erst einmal angefahren ist, können die bei der Verkohlung entstehenden Gase ebenso eingesetzt werden und somit den Energiebedarf für die Erwärmung decken. Diese Verfahren setzen sich nur im kontinuierlichen Betrieb, wie bei der Köhlerei „Neue Hütte“, durch. Diese Anlage galt als Vorzeigemodell moderner Kohle- und Aktivkohleherstellung, ist aber mittlerweile nicht mehr in Betrieb. Die Rückführung der heißen Abgase ermöglichte die Verkohlung des Holzes im Reaktor. Das bei der Verkohlung entstandene Holzgas wurde aus dem Reaktor abgezogen und verbrannt. Die dabei entstehende Wärmemenge reichte aus, um Wasserdampf zu erzeugen, um damit wiederum eine Turbine zur Stromerzeugung anzutreiben. Die restliche Wärme in den Abgasen wurde für die Beheizung des Reaktors verwendet. Die Bauweise als Rohreaktor konnte Probleme durch aufquellendes Holz verursachen. Dem wurde mit der ausschließlichen Verwendung bestimmter Holzarten entgegengewirkt. Es erfolgte also eine Spezialisierung, deren Nachfrage offenbar nicht ganz nachgekommen werden konnte oder die Transportkosten überstiegen letztendlich eine tolerierbare Größe. Das Verfahren erscheint zudem kompliziert und aufwändig, wenn man bedenkt, dass die Ausschleusung der Kohle unter Luftabschluss

und über ein gekühltes Schneckenförderungssystem erfolgen muss. Gleichzeitig jedoch machte dieses Verfahren die Herstellung von Aktivkohle möglich, indem Wasserdampf in den Reaktor zugeführt und dadurch Anteile im Inneren des Kohlenstoffgerüstes entfernt und dadurch eine veränderte Porenstruktur bewirkt wurde (Kaltschmitt, 2009).

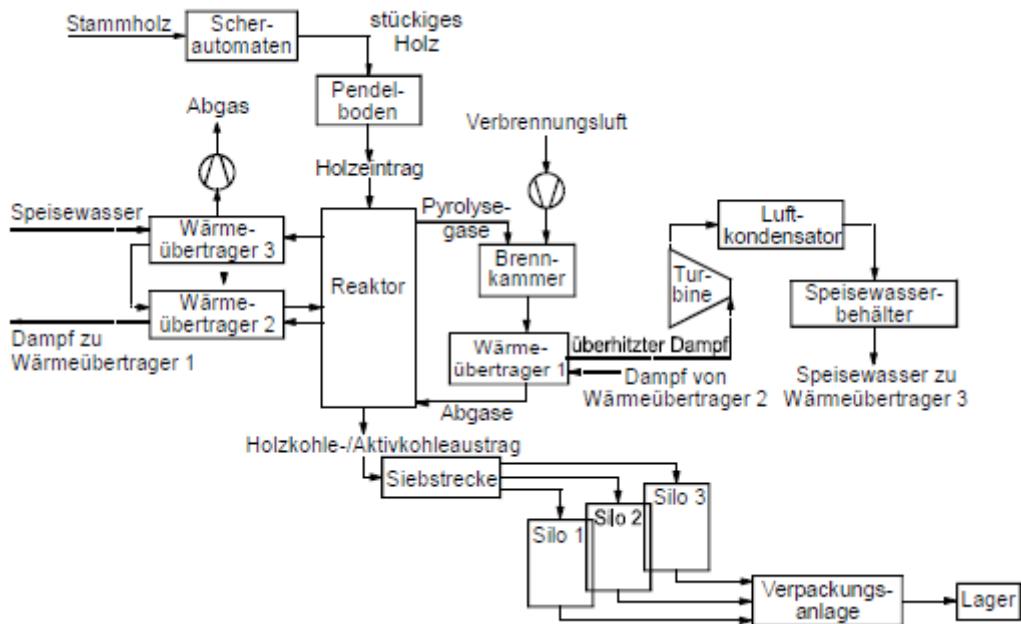


Abb.5: Schema der Köhlerei „Neue Hütte“ (Kaltschmitt, 2009)

Die Köhlerei „Neue Hütte“ wurde 1937 von der Forstlichen Hochschule Eberswalde errichtet und nach 1990 aufwändig modernisiert; bis die betreibende Firma dann jedoch 1997 zahlungsunfähig wurde. Eine erneute Reaktivierung der Anlage im Jahr 2000 blieb erfolglos, da nach 2 Jahren erneut Insolvenz angemeldet wurde. 2011 wurden schließlich die Bauteile der Anlage verschrottet oder verkauft. Neue Technologien haben bereits eine höhere Effizienz und verursachen weniger Emissionen (Petersson, 2011).

2.4.2 Neue Verfahren

2.4.2.1 Pyreg-Verfahren

Das Verkohlungsverfahren der Pyreg-Anlage geht aus einer Erfindung der Fachhochschule Bingen und der Innovations-Management GmbH Kaiserslautern hervor. Die Anlage ist nach einem 2007 veröffentlichten Fachbeitrag das BWK zur thermischen Verwertung von biogenen Festbrennstoffen konzipiert worden. Geeignet sind Substrate mit höherem Aschegehalt, geringen Ascheerweichungstemperaturen und hohen Stickstoff- und Chlorgehalten. Dabei handelt es sich um einen Pyrolyseprozess mit anschließender Flox-

Verbrennung der Gase. Das Flox-Verfahren ist wiederum von der WS WärmeProzesstechnik GmbH patentiert. Hierbei werden bei der Verbrennung der Pyrolysegase hohe Flammenkerntemperaturen verhindert und stattdessen gleichmäßig verteilte turbulente Temperaturströme erzeugt. Dies mindert die Entstehung von Luftschadstoffen, vor allem NO_x (Sehn, 2007).

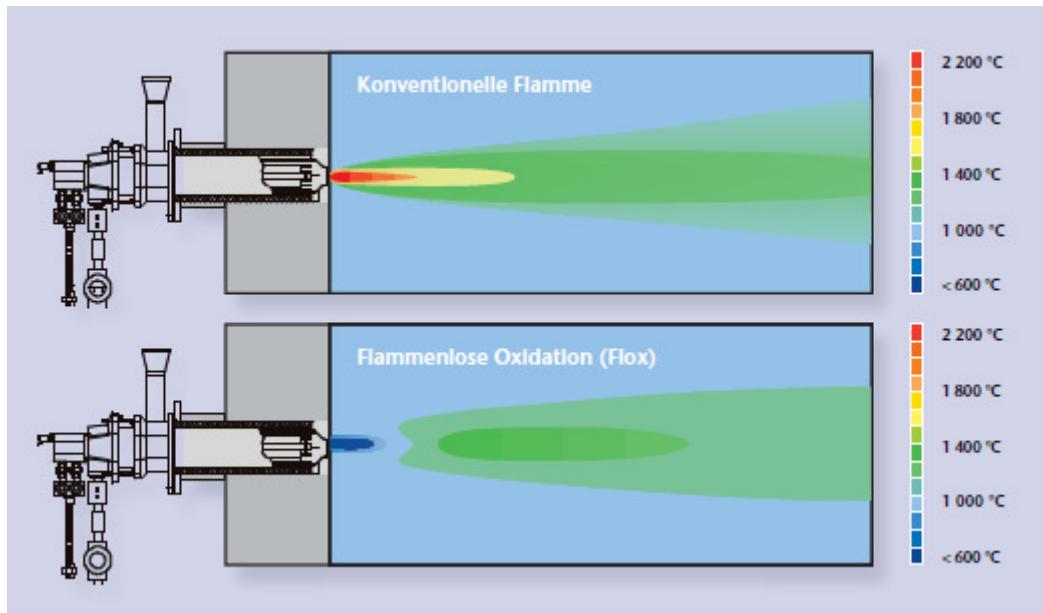


Abb.6: Vergleich von konventioneller Flamme und Flox-Flamme (Sehn, 2007)

Zudem liegt die Temperatur der Pyrolyse unterhalb der Ascheerweichungstemperatur der meisten Substrate, so dass Anlagenteile vor aufschmelzenden Aschen geschützt sind. Es geht hier also eher in Richtung Entsorgung von Abfallstoffen. Die Erwähnung der „Rückstände aus Klär- oder Biogasanlagen“ legt nahe, dass sich das Verfahren vor allem für Substrate eignet, die für herkömmliche Verbrennungsanlagen eher ungeeignet sind. Dabei kann es sich natürlich auch um getrocknete Gärreste aus Biogasanlagen handeln (Sehn, 2007). Insgesamt stehen bereits 7 Pyreg-Anlagen in Österreich und der Schweiz. Für die deutschen Firmen Geiger Pflanzenkohle und Fetzer GmbH sind Genehmigungen erteilt worden (Löhde, 2014). Die 500 kW Anlage wird seit 2001 serienmäßig gebaut und benötigt jährlich etwa 1300 t Substrat (TS) bei voller Leistung (Gerber, 2014).

2.4.2.2 Hydrothermale Carbonisierung (HTC)

Oliveira et al. (2013) haben verschiedene landwirtschaftliche Reststoffe, darunter auch separierter Gärrest mit 26,9 % TM, mit einer 20 l Apparatur, die dem HTC-Verfahren nachempfunden wurde, zu Kohle umgewandelt. Es wurden auch Kombinationen von

Substraten vor der Karbonisierung erzeugt. Dadurch konnte in einigen Fällen die Ausbeute der festen Phasen noch erhöht werden. Das bei dem Verfahren anfallende Prozesswasser wurde Biogasertragsversuchen nach VDI 4630 unterzogen (Oliveira, 2013). Das molare H/C und O/C Verhältnis rückt im van Krevelen Diagramm nach der hydrothermalen Karbonisierung in den Bereich von Braunkohle. Dies wird durch die Dehydratisierung und Decarboxilierung während der HTC verursacht, wodurch die Anteile von Wasserstoff und Sauerstoff im Substrat verringert werden (Oliveira, 2013).

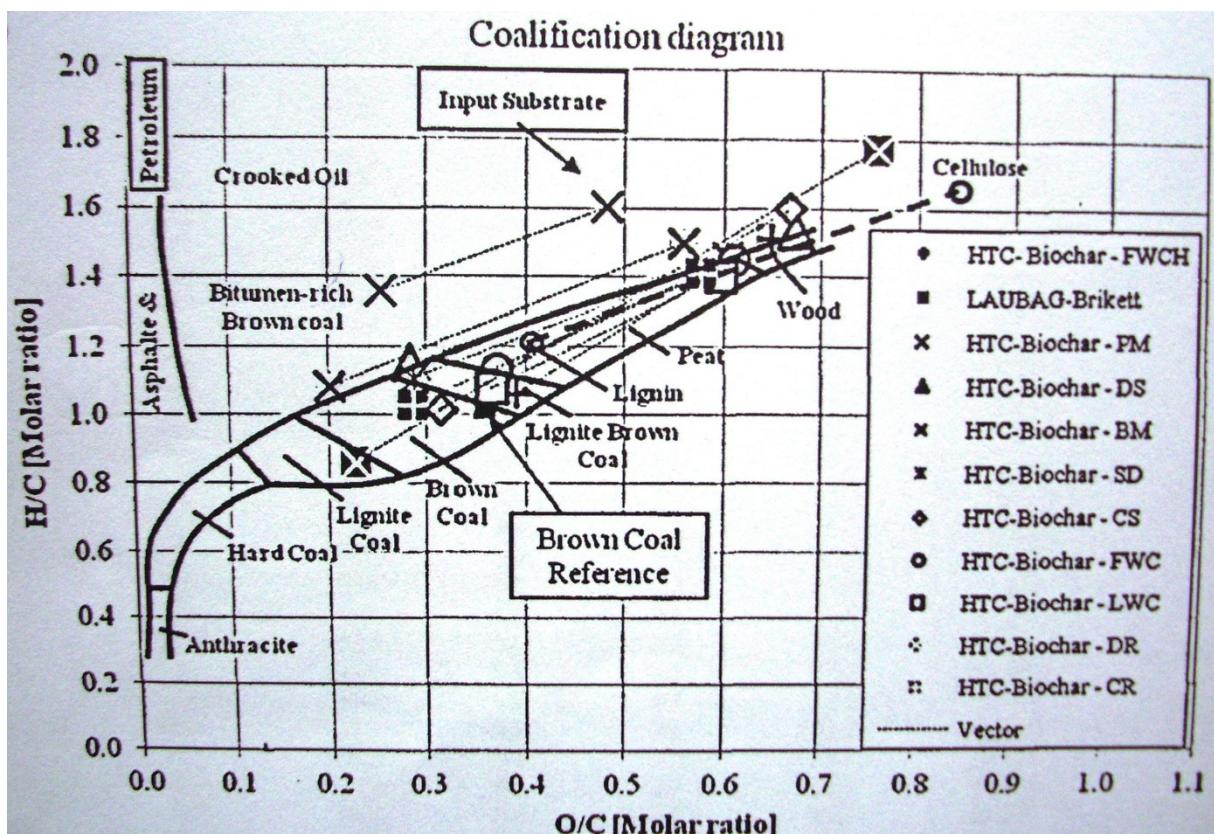


Abb.7: Vergleich der Substrate und HTC-Kohlen mit Braunkohle im van Krevelen Diagramm (Oliveira, 2013)

Aus dem Diagramm (Abb.8) der Korrelation von Kohlenstoffgehalt zu Brennwert wird deutlich, dass durch das Verfahren der Brennwert in den Bereich von Braunkohle angehoben wird.

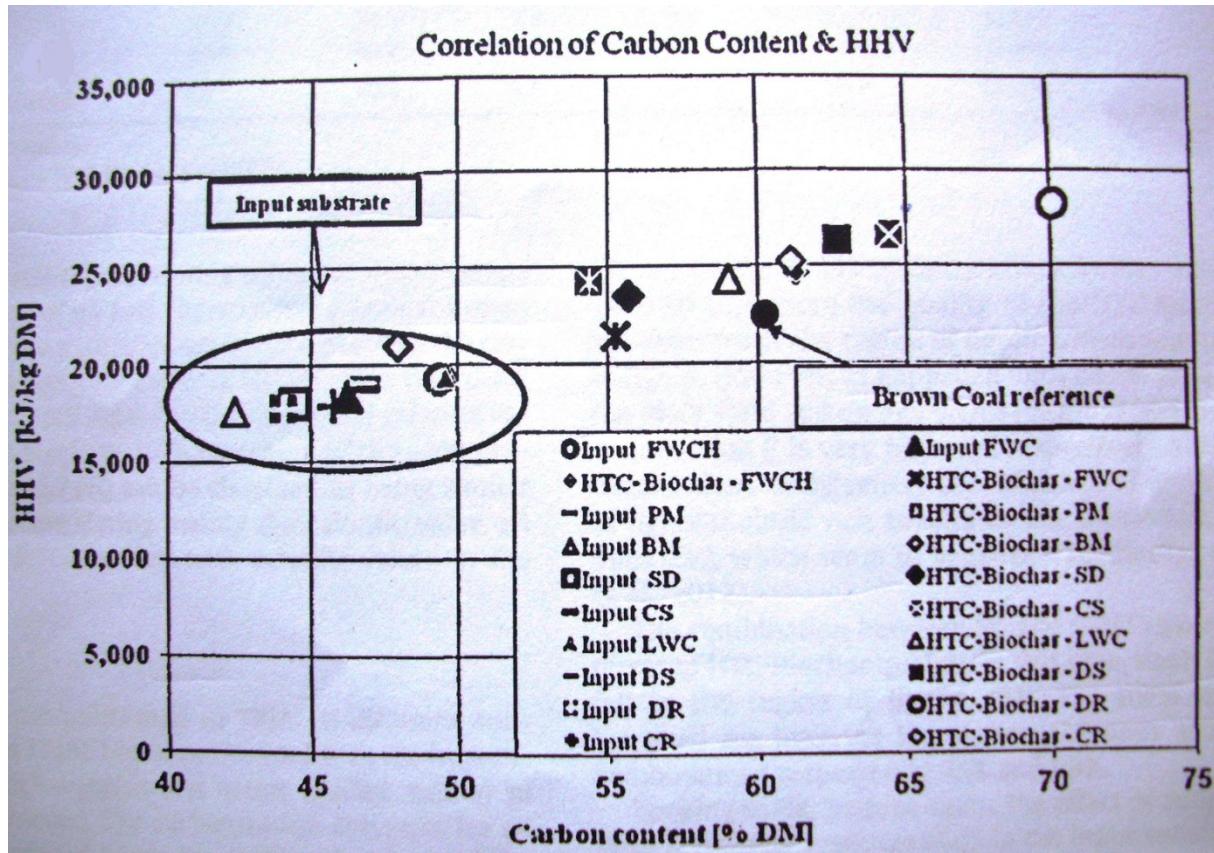


Abb.8: Korrelation von Kohlenstoffgehalt zu Brennwert (Oliveira, 2013)

Die Anschaffung einer HTC-Anlage empfiehlt Oliveira (2013) unter anderem an bestehenden Biogasanlagen. Demnach könnte das anfallende Prozesswasser als Substrat für die anaerobe Vergärung verwendet werden. Dann würden die separierten Gärreste als Substrat für die HTC-Anlage genutzt werden können, womit ein kleiner Kreislauf entsteht, in dem die Produkteigenschaften voll ausgeschöpft werden können. In der folgenden Abbildung ist dieser Verlauf dargestellt (Oliveira, 2013).

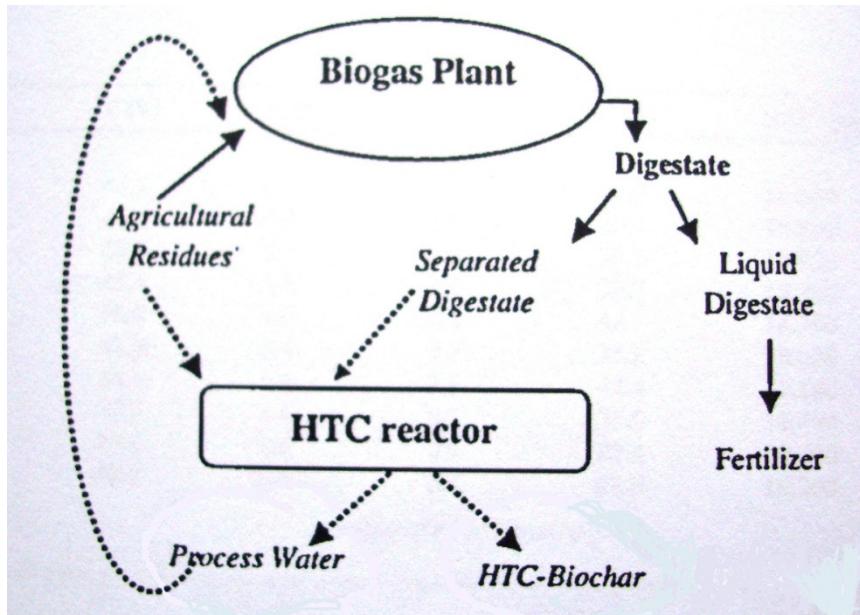


Abb.9: Verknüpfung von Biogas- und HTC-Verfahren (Oliveira, 2013)

2.5 Verwendungsmöglichkeiten von Pflanzenkohle

Das Biochar Science Network hat zusammen mit dem Delinat-Institut Richtlinien für die Untersuchung von Pflanzenkohle herausgebracht mit Grenzwerten, die sich nach deutscher und schweizerischer Bodenschutzverordnung richten sowie Analysemethoden, die sich an aktuellen wissenschaftlichen Veröffentlichungen orientieren. So soll mit Hilfe von vergleichbaren Methoden, eine einheitliche Untersuchung der verschiedenen Pflanzenkohlen möglich werden. Das Zertifikat beinhaltet auch Richtlinien zur Herstellung und den einsetzbaren Substraten. Neue energieeffiziente und umweltschonende Verfahren sollen dadurch gefördert werden, damit eine nachhaltige Produktion der Pflanzenkohle gewährleistet werden kann. Die Anwendungsgebiete sind noch vorrangig auf den landwirtschaftlichen Bereich, wie zur Güllebehandlung oder als Bodenverbesserer, ausgerichtet. In Zukunft kann aber ein Ausbau in andere Bereiche – wie der Medizin – erfolgen. Daher werden die Richtlinien jährlich überarbeitet, um den wachsenden Einsatzmöglichkeiten gerecht zu werden. Aus den Richtlinien für die Produktion von Pflanzenkohle ist außerdem zu entnehmen, dass sowohl Nawaro aus der Biogasproduktion als auch die Gärreste aus der Biogasanlage aus nachhaltigem Anbau stammen müssen. Die Pflanzenkohle wird in der Regel Chargenweise produziert. Die Herstellung der Charge wird mit einem Produktionsprotokoll dokumentiert. Noch vor Beginn der Zertifizierung sollen sich Hersteller bei der unabhängigen Kontrollstelle q.inspecta anmelden (Schmidt, 2012).

Denkbar ist auch ein nachhaltiger Einsatz der neuen Verkohlungstechnologien, wenn Abfall oder – wie bei profagus – Buchenrestholz, das nicht von der Möbelindustrie genutzt werden kann, zu stabiler Pflanzenkohle umgesetzt wird. Die Verwendung als Grillkohle ist dabei jedoch kontraproduktiv, da der Kohlenstoff auf diesem Weg nur für einen überschaubar kurzen Zeitraum aus dem Kreislauf ausgeschleust wird (Hantl, 2014; Schmidt, 2012 A).

Für die meisten Verwendungsmöglichkeiten der Pflanzenkohle sind Grenzwerte für Schwermetalle vorgegeben. Hohe Schwermetallgehalte können in Waldholz am ehesten auftreten, da hier die niedrigen pH-Werte des Bodens und die lange Wachstumszeit die Akkumulation begünstigen. Produkte aus Kurzumtriebsplantagen weisen im Gegensatz dazu, bis auf Cadmium bei Weiden, eher geringe Schwermetallgehalte auf. Bei der Verbrennung verbleiben Schwermetalle in der Asche (Kaltschmitt, 2009).

2.5.1 Landwirtschaftliche Nutzung

Der Einsatz von Pflanzenkohle als Bodenverbesserer ist keine Erfindung der Neuzeit. Schon vor 2500 Jahren haben Zivilisationen Pflanzenkohle als Trägerstoff für Nährstoffe genutzt. Dabei muss man davon ausgehen, dass sie die Prozesse und Funktionen, die in der Kohle vorgehen, nicht kannten, wohl aber die Wirkung erkannten, da sich die Fruchtbarkeit der Böden durch die Anwendung mit Pflanzenkohle erhöht. Davon zeugen unter anderem die Funde der brasilianischen Terra Preta. In den letzten 20 Jahren stieg daraufhin das Interesse an den Möglichkeiten zum Humusaufbau und der sogenannten Kohlenstoffsequestrierung durch Anwendung der Pflanzenkohle im Ackerbau (Schmidt, 2011).

Bei Glaser (2010) wurden Kohleprodukte aus verschiedenen Verfahren, darunter HTC- und Pyreg-Verfahren, für die Anwendung als Bodenverbesserer geprüft. PAK-Gehalte sind hier kaum enthalten. Hohe Werte wurden lediglich bei Grillholzkohle und Kohle aus Holzvergasern ermittelt. Aus dem Van-Krevelen-Diagramm kann die Stabilität der Kohlen veranschaulicht werden. Die Parameter molares H/C- und O/C-Verhältnis in mol% werden hier eingetragen. Glaser (2010) empfiehlt den in der Abbildung eingezeichneten Bereich ($O/C < 0,4$; $H/C < 0,6$) als Grenzwert für Pflanzenkohle, die zur Bodenverbesserung verwendet werden soll (Glaser, 2010).

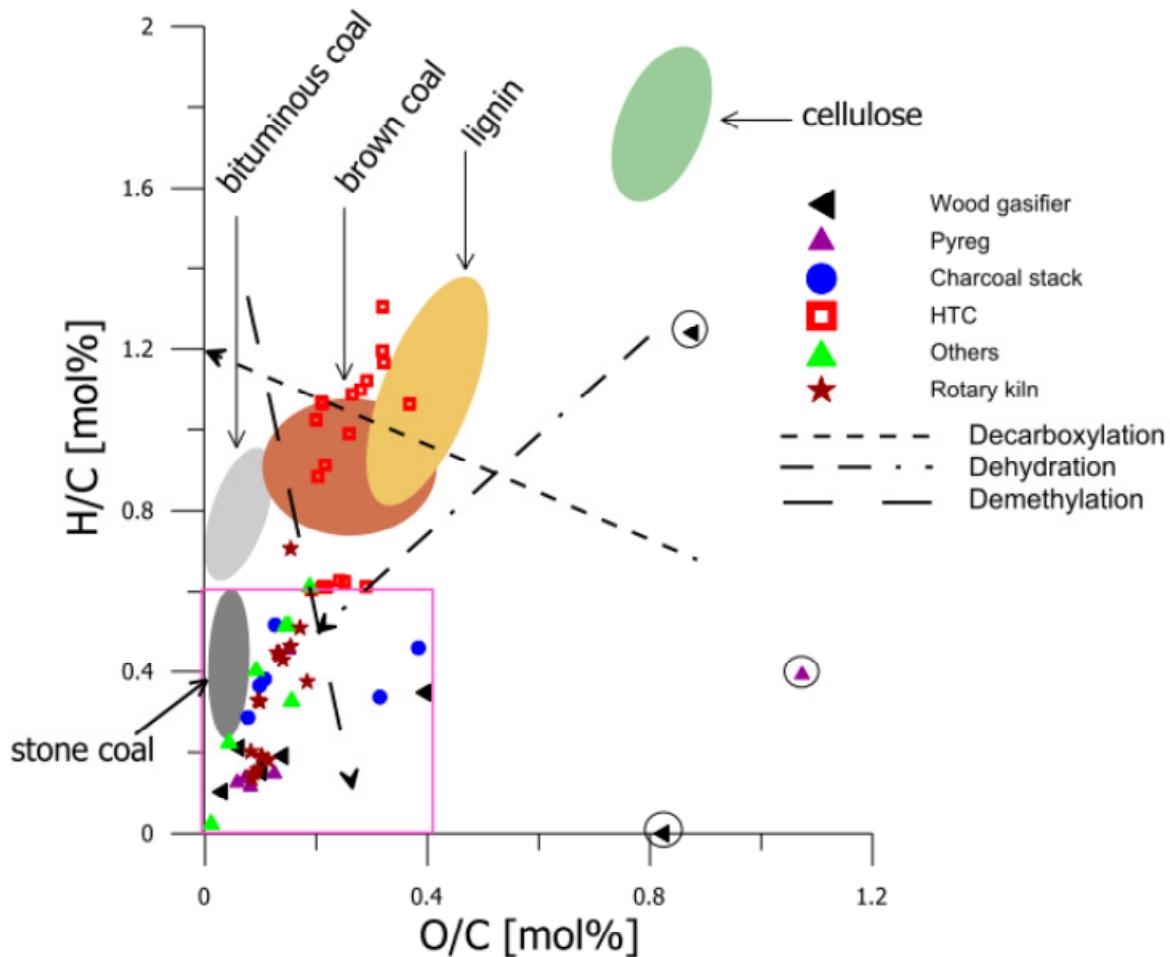


Abb.10: Van-Krevelen-Diagramm mit Grenzwerten für den Einsatz von Pflanzenkohlen als Bodenverbesserer (Glaser, 2010)

Da sich keine der HTC-Kohlen in dem empfohlenen Bereich befinden, sollten sie nicht als Bodenverbesserer eingesetzt werden. Die Verweilzeit von Pyrolysekohle wird grob mit 2000 Jahren angegeben. HTC-Kohlen sollen nur ein paar Dekaden Verweilzeit besitzen. Der Pyreg-Ausreißer unten rechts im Diagramm weist darauf hin, dass nicht nur das Verfahren Auswirkung auf die Eigenschaften der Kohleprodukte hat, sondern eventuell auch die eingesetzten Substrate. Ein weiterer Parameter für die Stabilität ist der Anteil poliaromatischen Kohlenstoffs, der auch als „Black Carbon“ bezeichnet wird. Pyreg-Kohle liegt noch im Bereich des Mindestanteils von 15 %, während der Anteil in HTC-Kohlen mit 5 % zu gering ist (Glaser, 2010). Die Untersuchung des Black Carbon-Gehalts ist aber keine Pflicht für das EPZ, da es dafür noch keine Standardanalyse gibt (Schmidt, 2012).

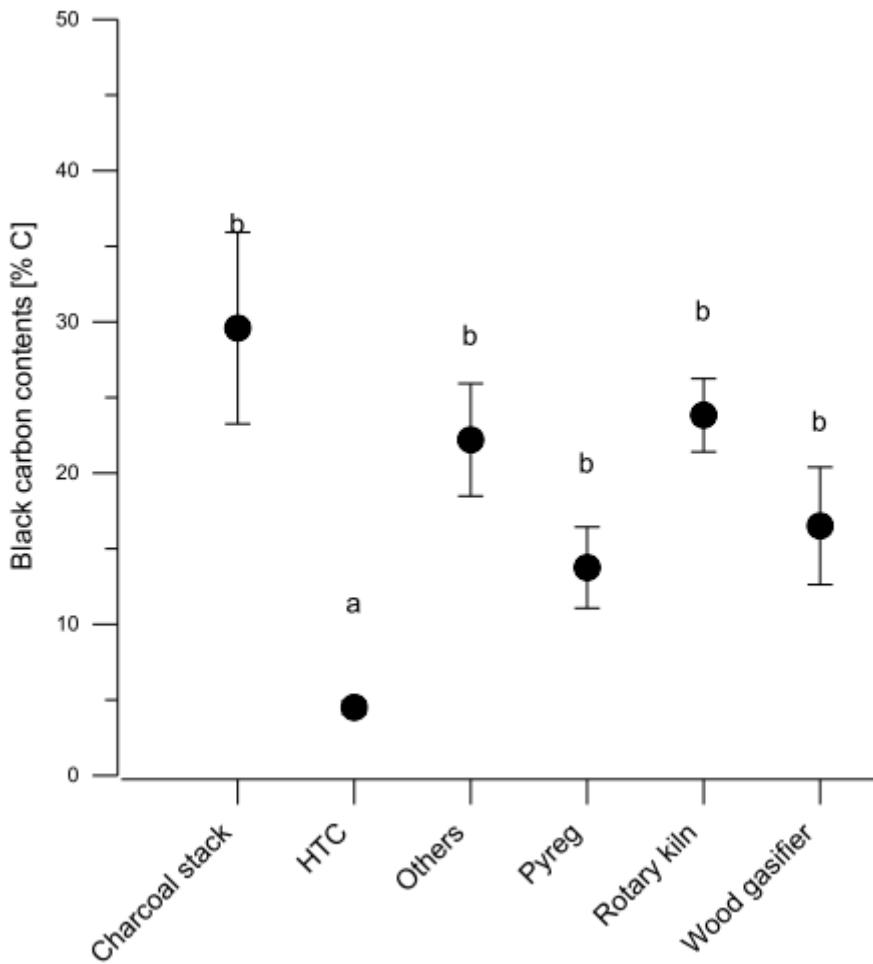


Abb.11: Anteil polyaromatischer Kohlenstoff (Black Carbon) bei unterschiedlichen Verfahren (Glaser, 2010)

Versuche zur Ermittlung des Einflusses von Kohlen auf die Regenwurmaktivität in Böden wiesen in beiden Fällen auf Vermeidungsreaktionen hin. Getestet wurde Material aus dem HTC- und Pyrolyseverfahren. Es wird eine Vermengung mit Gärrest empfohlen, um den störenden Einfluss auf die Regenwurmpopulation zu vermeiden. In den Versuchen zeigte sich dahingehend aber nur eine positive Wirkung bei Mischungen mit Pyrolysekohle. Der störende Einfluss der HTC-Kohle konnte nicht gemindert werden. Es kann aber auch eine staubbindende und vernetzende Wirkung an den Kohlepartikeln beobachtet werden. Die Kohleausbringung ist auch dann weniger nachteilig, wenn organisches Material mit der Kohle ko-kompostiert wird. Daher wird eine Zugabe zur Verrottung von Grünschnitt empfohlen (Holweg, 2012).

Schmidt (2012 A) empfiehlt eine Kaskadennutzung der Pflanzenkohle. Die Kohle soll nicht unaufgeladen in den Boden gebracht werden, denn „Pflanzenkohle allein ist wie ein Gerippe ohne Fleisch“. Soll heißen, dass Pflanzenkohle lediglich ein Trägerstoff und Bindemittel ist,

der Nährstoffe in sich aufnimmt und nach einer gewissen Zeit wieder abgibt. Schmidt (2012 A) geht weiter davon aus, dass sich durch die Aufkonzentration des Kohlenstoffs auf ca. 65 %, die verkohlten Biomassen – dank der stabilen Form über Jahrhunderte – selbst im Boden nicht mikrobiell abbauen. Die verwendeten Biomassen sollten allerdings ohnehin anfallen und nicht zur Verkohlung angebaut oder produziert werden (Schmidt, 2012). Die Annahmen von Schmidt (2012) werden durch Untersuchungen der Stabilität von Pflanzenkohle von Bai et al. (2013) relativiert. Dazu wurde Miscanthus mit Hilfe von Pyrolyse und HTC zu Pflanzenkohle umgewandelt. Die Abbaugeschwindigkeit der HTC-Kohle und der reinen Miscanthusbiomasse war dabei gleichermaßen schnell. Dahingegen war die Halbwertszeit der Pyrolysekohle etwas länger. Die langsamere Abbaugeschwindigkeit kann auf ein kleineres molares H/C bzw. O/C Verhältnis zurückzuführen sein. Auch ein höherer Aschegehalt steht im Zusammenhang mit der höheren Stabilität. Es wird zudem angenommen, dass durch gleichzeitige Stickstoffdüngung die Abbaubarkeit von HTC-Kohle in Böden noch erhöht wird. Die Halbwertszeiten von HTC- und Pyrolysekohle aus Miscanthus sowie von der reinen Miscanthusbiomasse wurden dazu von Bai et al. (2013) in drei unterschiedlichen Böden ermittelt. Diese sind Sand, lehmiger Sand und sandiger Lehm. Es wurden ähnlich geringe Halbwertszeiten für Miscanthus und HTC-Kohle von 0,7 bis 2,1 Jahre ermittelt. Pyrolysekohle hingegen konnte in allen Böden weit höhere Werte erreichen. Die Halbwertszeiten liegen zum einen zwar immer über denen von HTC-Kohle und Miscanthusbiomasse, können bei einer Spanne von 11-110 Jahren bei den drei unterschiedlichen Berechnungsmethoden aber keinen aussagekräftigen Wert liefern. Der biologische Zerfall der Kohlen ist im Sandboden wesentlich geringer ausgeprägt als im lehmigen Sand und sandigen Lehm. Es wird ein Zusammenhang zwischen den höheren Gehalten an organisch gebundenem Kohlenstoff und Stickstoff in den Böden lehmiger Sand und sandiger Lehm und einer dazu steigenden Abbaugeschwindigkeit beider eingesetzten Pflanzenkohlen vermutet. Im Pyrolyseverfahren wurde das Substrat Miscanthus bei 575 °C über 30 Minuten behandelt. Das HTC-Verfahren erfolgte bei 200 °C über 120 Minuten, bei einem Druck von 1,6 MPa. Der Aschegehalt steigt durch das HTC-Verfahren unwe sentlich von 2,5 auf 2,7 % und beim Pyrolyseverfahren erheblich auf 29,8 %. Nach Bai et al. (2013) ist die Doppelte Exponential-Methode (DEM), die zu bevorzugende für die Bestimmung der Halbwertszeit. Die Ergebnisse liegen hier für unverkohlte Miscanthusbiomasse zwischen 0,8 und 1,3 Jahren, bei HTC-Kohle zwischen 0,7 und 2,1 Jahren und bei Pyrolysekohle bei 19,7 und 44,5 Jahren. Alle Werte liegen bei Sandböden über denen der anderen besser bewerteten Böden (Bai et al., 2013).

So zeigte sich in Untersuchungen von Weiß et al. (2013), dass sich die Kaliumverfügbarkeit, in Böden die mit Pflanzenkohlesubstrate behandelt wurden, erhöht. Die Substrate enthalten 15 bzw. 30 Vol. % Pflanzenkohleanteil aus einem Pyrolyseverfahren. Die Substrate wurden an ertragsschwachen, sandigen Ackerböden der Lausitz getestet und zeigten bereits bei Ausbringungsmengen von 30 t/ha eine Wirkung auf die Kaliumverfügbarkeit. Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor und Gesamtstickstoff konnten sich jedoch erst bei relativ großen Ausbringungsmengen von 90 t/ha im Vergleich zu einer Mineraldüngervariante verbessern. An allen getesteten Standorten konnte zudem der Anteil des stabilen Kohlenstoffs im Boden erhöht werden. Dies fällt vor allem am jungen Kippenboden des ehemaligen Kohlebergbaus am Standort Welzow auf. Hier sind sehr geringe Mengen an Gesamtkohlenstoff und des darin enthaltenen stabilen Kohlenstoffs vorhanden. Dementsprechend deutlich konnte der Anstieg des Kohlenstoffgehaltes durch die Ausbringung der Kohlesubstrate beobachtet werden (Weiß, 2013).

Tab.7: Kohlenstoffanreicherung durch Zugabe von Pflanzenkohledünger auf unterschiedlichen Böden der Lausitz (Weiß, 2013)

Variante	Welzow				Sedlitz				Zinnitz			
	C _{org} [%]	C _{hwL} ----- [mg kg ⁻¹]	C _{H2O}	C _{npyr}	C _{org} [%]	C _{hwL} ----- [mg kg ⁻¹]	C _{H2O}	C _{npyr}	C _{org} [%]	C _{hwL} ----- [mg kg ⁻¹]	C _{H2O}	C _{npyr}
Min.dünger	0,32	62	30,0	327	1,14	244	63,2	1809	1,02	337	69,7	1135
60 t BKS15	0,58	116	40,5	509	1,59	276	80,3	1995	1,72	535	99,1	1238
90 t BKS15	1,08	168	66,6	652	-	-	-	-	-	-	-	-
60 t BKS 30	0,75	101	32,3	477	1,69	231	77,2	1802	1,42	484	88,2	1170

2.5.2 Grillkohle

Das einzige Holzkohlewerk Deutschlands ist ein ehemaliges Degussa-Werk, das von dem Unternehmen Profagus zur Herstellung von Buchenholzkohle und -briketts betrieben wird.

Das Unternehmen Degussa, eigentlich Deutsche Gold- und Silberscheideanstalt, hatte lange Zeit ein Monopol auf die Holzkohleherstellung und wichtige organische Nebenprodukte, darunter Methanol, Essigsäure und Formaldehyd. Noch im Jahr 1931 hatte das Unternehmen insgesamt 11 Betriebsstätten mit industriellen Retorten zur Holzverkohlung. Durch die Entwicklung der petrochemischen Industrie wurde das Holzkohleverfahren bis heute fast vollständig von Erdöl- und Erdgasverfahren abgelöst. Da sich diese Kohlenstoffquelle in naher Zukunft erschöpfen wird, kann eine Rückbesinnung auf Kohleverfahren erwartet werden. Hierzu soll die Herstellung von Methanol aus der Synthese von Kohlenstoffdioxid

mit Wasserstoff herangezogen werden. Methanol kann dann als Ausgangsstoff zur Erzeugung weiterer organischer Verbindungen dienen (Offermanns, 2013).

Das Brikettieren von unverkohlter Biomasse zur Verwendung als verdichtetes und proportionierbares Brennmaterial wird in der Regel mit Hilfe des Strangpressen- oder Presskammerverfahrens erreicht. Es ist aber unwahrscheinlich, dass die entstehenden Produkte für die Verwendung als Grillbriketts geeignet sind. Die Presslinge sind für gewöhnlich zylinderförmig mit Durchmessern von 50 bis 70 mm. Die bekannte Eierkohlenform ist hingegen nur mit Walzenpressen zu realisieren. Unverkohlte Biomasse kann mit diesem Verfahren nicht zu Briketts geformt werden. Zu kurz ist die Zeit in der das Material bei zu niedriger Temperatur verpresst wird, als das daraus ein stabiler Festkörper gepresst werden könnte. Zur Erhöhung der Stabilität müssten noch Presshilfsmittel eingesetzt werden. Dafür kommt vor allem Stärke aus Weizen oder Mais in Frage (Kaltschmitt, 2009). Im Versuchsmaßstab wurden bei Gerber (2012) Kohlebriketts mit Bindemitteln hergestellt. Dadurch stieg die Energiedichte um das 2,5-fache und die Dichte der Kohle von 250-300 kg/m³ auf 550-600 kg/m³. Es laufen noch weitere Versuche, bei denen auf den Einsatz von Bindemitteln verzichtet wird (Gerber, 2012).

2.5.3 Erhöhung der Biogasproduktion

Bereits 1986 gab es Untersuchungen am Indian Agricultural Research Institute in Neu Delhi zur Erhöhung des Gasertrags mit Hilfe von Holzkohle und anderen kohlenstoffhaltigen Zusätzen wie Graphit. Es wurden batch- und semikontinuierliche Versuche in 6,5-Liter-Behältern durchgeführt. Dabei wurde pulvelförmige Kohle, ausgehend von der Trockenmasse des Substrats Rinderdung, zugeführt. Der Trockenmassegehalt von 8 % wurde mit Hilfe von Wasser eingestellt. Letztendlich ergab die Mischung eine Menge von 5 Litern Substrat. Dem semikontinuierlichen Versuch wurden täglich 125 ml Substrat über einen Zeitraum von 40 Tagen zugeführt. Beide Varianten erhielten auch Blindversuche, die ohne Kohle liefen, um den Effekt auf den Gasertrag zu untersuchen. Die Ergebnisse fielen recht unterschiedlich aus und zeigten zum einen, dass sowohl das Material, welches zur Erhöhung der Gasproduktion verwendet wurde, als auch dessen prozentualer Anteil einen Einfluss auf die Menge des produzierten Biogas hat. Die Materialien Graphit, Petrolkoks und Industrieruß hatten nur geringe Veränderungen in der produzierten Biogasmenge gebracht. Holzkohle zeigte mit 16 % Mehrertrag den stärksten Effekt. Der Vergleich beruht allerdings auf einer Zeit von 56 Tagen und einer zugeführten Kohlemenge von 5 %. In einem weiteren Batchversuch stieg der Gasertrag um bis zu 17 %. Dabei zeigte sich ein propotionaler Anstieg bis zu einer

schrittweise zugeführten Menge Holzkohle von 5 %. 10 und 15 % Holzkohlezusatz hatten keinen weiteren Mehrertrag an Biogas erbracht. Der semikontinuierliche Versuch wurde daraufhin mit 5 % Holzkohle über 40 Tage betrieben und zeigte, im Vergleich zum holzkohlefreien Versuch, einen zusätzlichen Gasertrag von 34,7 %. Der Erklärungsversuch beruht bei Kumar et al. auf eine verbesserte mikrobielle Aktivität durch gesteigertes Wachstum an der Oberfläche der Kohlepartikel. In der Tat zeigte sich in Untersuchungen, dass die mit Kohle beimpften Substrate nach der Vergärung höhere Bakterienzahlen aufwiesen. Sowohl die Gesamtzahl der anaeroben Bakterien stieg, als auch die Anzahl der Cellulose hydrolysierenden Bakterien (Kumar, 1986).

Zur Prozessstabilisierung in Biogasanlagen werden immer häufiger Spurenelemente und Additive eingesetzt. Pflanzenkohle steht zur Diskussion, aufgrund diverser Eigenschaften die Biogasproduktion zu verbessern. Die spezifische Aufwuchsfläche steht dabei im Mittelpunkt der Erklärungen. Diese bewirkt demnach eine Akkumulation von methanbildenden Mikroorganismen. Daraus ergibt sich wiederum die Frage, ob bei steigender spezifischer Oberfläche auch ein Anstieg der Biogasproduktion zu erkennen ist. Ein weiterer Erklärungsversuch beruht auf der Fähigkeit, prozessstörende Moleküle vorübergehend zu binden. Da einige Pflanzenkohlen einen hohen Aschegehalt aufweisen, könnten jene mineralischen Bestandteile auch für die verbesserte Versorgung der Mikroorganismen sorgen. Diese müssten jedoch zunächst bioverfügbar werden, da die Mineralien in ungelöster Form vorliegen. Die Autoren bezeichnen letztere Erklärung als vernachlässigbar. Sie unterteilen die Gärversuche in Hauptfermenter und Nachgärer. Der Hauptfermenter wird mit Hilfe einer Mischung aus Gärrest und frischer Maissilage simuliert. Sie achten darauf, dass das Verhältnis der organischen Trockensubstanz (Substrat zu Impfschlamm), gemäß der VDI Richtlinie 4630, bei weniger als 0,5 % liegt. Als Nachgärer bezeichnen sie die Variante, die ausschließlich aus Gärrest besteht. Hier wird noch unterteilt in gesiebte und ungesiebte Kohle. Die Siebgröße beträgt 13 mm. Die größeren Partikel machen bei Pflanzenkohlen in der Regel nur einen geringen Anteil von 0,5 - 1,2 % aus. Der größere Anteil müsste einen anderen Verwertungsweg finden, wenn sich die Variante mit den größeren Partikeln als optimal herausstellt. Bei Rödger et al. (2013) beruht die eingesetzte Menge Pflanzenkohle auf den Anteil der verwendeten Feuchtmasse oder Frischmasse, mit einem Wert von höchstens 2,5 %. Bei höheren Mengen könnte in der Praxis die Rührfähigkeit durch Anstieg der Viskosität beeinträchtigt und somit ein höherer Energieverbrauch durch die Rührwerke verursacht werden. Bei Rödger et al. (2013) konnte nach 25 Tagen ein Methan Mehrertrag von 18,93 % beobachtet werden. Nach 40 Tagen wurde dann der höchste Mehrertrag von 21,7 %

festgestellt. Danach sank die Differenz wieder bis zum Abbruch nach 91 Tagen auf immerhin 8,89 %. In der Simulation des Nachgärers unterschied sich der Verlauf in den ersten 50 Tagen kaum, aber bis zum Abbruch des Versuches nach 91 Tagen hatte die Variante mit der ungesiebten Kohle einen Mehrertrag von 13,59 % erbracht. Die Variante mit den großen Partikeln brachte sogar 24,03 % Mehrertrag im Vergleich zur kohlefreien Variante. Der Mehrertrag ist nach den Wissenschaftlern aber nicht durch den zusätzlichen Abbau von kohlenstoffhaltiger Substanz zu erklären. Untersuchungen zeigten eine sehr stabile Kohle mit sehr geringem Anteil an gelöstem organischem Kohlenstoff. Rödger et al. (2013) stellten sich die Frage, inwieweit die Kohle vom Anfang bis zum Ende einer landwirtschaftlichen Nutzung zugeführt werden könnte. Beginnend mit der Fütterung von Rindern bzw. Zugabe zur Silage. Zunächst kann die Silierbarkeit der Substrate, danach die Verdauung der Nutztiere verbessert werden, dank der Entfernung von möglichen Giftstoffen. Die Pflanzenkohle wird demnach unverdaut ausgeschieden und ist in der Gülle enthalten, die dann zur Biogasgewinnung herangezogen wird. Es ist jedoch nicht sicher, wie lange die vorteilhaften Eigenschaften der Pflanzenkohle anhalten und ob sie im fortgeschrittenen Verlauf der Nutzungskette abschwächen. Sie müssen schließlich auch wieder aufgeladen werden, um ihre Eigenschaften zu behalten. Hier bietet sich die Integration des Pyrolyseverfahrens an. Der verkohlte Gärrest könnte, wiederaufgeladen, an den Anfang der Kette geführt werden. Auf diese Weise ist es möglich, einen Kreislauf zu schaffen. Dafür ist es ratsam, die Wirksamkeit von zwei unterschiedlichen Pflanzenkohlen auf den Gasertrag in einem Batchversuch zu untersuchen. Dafür kommen getrockneter Gärrest aus einer Biogasanlage und getrockneter Igniscum von einem Feld in der Nähe der Anlage in Ivenack in Frage. Beide Substrate könnten in der Praxis Anwendung finden (Rödger, 2013). Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Gasertrag jedoch nicht ermittelt.

Inthapanya (2012) verwendete Pflanzenkohle aus Reisspelzen, die zu 1 % und 3 % zugefügt wurden. Als Substrat diente Rinderdung. Die zugesetzte Menge Pflanzenkohle wurde in Bezug auf die eingesetzte Trockensubstanz der Substrate abgewogen. In beiden Fällen konnte ein höherer Gasertrag von ca. 30 % im Vergleich zur Nullprobe nachgewiesen werden. Demnach ist es unerheblich für den Mehrertrag, wenn die Menge an zugesetzter Pflanzenkohle 1 % übersteigt. Bei einem zweiten Versuch wurde die Pflanzenkohle in einem Nylon Säckchen mit einer Porengröße von 60 µm zugesetzt. Hierbei zeigte sich der gleiche positive Effekt wie bei der Einbringung im gesamten Fermenterraum (Inthapanya, 2012). Nach einem Patent zur Erhöhung der methanbildenden Bakterien in Fermentern wird die Ausbildung einer Schwimmschicht angestrebt, wodurch die Besiedlungsfläche für

entsprechende Bakterien erhöht wird. Damit soll nicht die Biogasausbeute der Substrate erhöht, sondern die maximal erreichbaren Ausbeuten schneller erreicht werden, ohne dabei erhebliche Mengen von Bakterien durch eine erhöhte Abführung aus dem Reaktor zu verursachen (Rossow, 2011). Auf diese Weise könnte auch die Pflanzenkohle in der Biogasanlage wirken.

2.5.4 Aktivkohle

Die Schwierigkeit in der Charakterisierung und dem Vergleich von Aktivkohlen liegt vor allem an den vielen möglichen Substraten, die zur Verkohlung oder Pyrolyse herangezogen werden können. Zudem haben auch die verschiedenen Herstellungsprozesse eine große Auswirkung auf die Ungleichmäßigkeit und der damit verbundenen schwierigen Vergleichbarkeit der Aktivkohlen (Möller, 2014).

Die Pyrolysetemperatur sollte zwischen 450 und 750 °C liegen, um eine möglichst hohe Adsorptionskapazität der Kohle hervorzubringen. Eine weitere bedeutende Eigenschaft ist die Kationenaustauschkapazität. Diese ist ein Maß für die Fähigkeit, an der Oberfläche positiv geladene Ionen aufzunehmen. Die hohe adsorptive Kraft ist auch der Grund, warum Pflanzenkohle nicht ohne Vorbehandlung in den Boden eingebracht werden sollte. Die Bindung der Nährstoffe und des Wassers sorgt in den ersten Monaten bzw. bis zu einem Jahr dafür, dass die Erträge an diesen Standorten eher gering ausfallen (Schmidt, 2011).

Möller et al. (2014) untersuchten den Zusammenhang zwischen Jodzahl und BET-Oberfläche an einer Auswahl von Aktivkohlen. Ein linearer Anstieg der spezifischen Oberfläche bei höherer Jodzahl konnte nicht festgestellt werden. Es zeigte sich jedoch die Tendenz eines Anstiegs. Also bei steigender Jodzahl ist eine größere spez. Oberfläche zu erwarten. Die geringe Korrelation kann nach Möller et al. jedoch auch durch die verschiedenen Ausgangsmaterialien erklärt werden (Möller, 2014)

Die Jodzahlen lagen bei Möller et al. (2014) im Bereich von 800 bis 1200 mg/g bei einer Anzahl von lediglich 13 Prüfgliedern. Die Ergebnisse könnten aufschlussreicher werden, wenn die Anzahl der untersuchten Aktivkohlen steigt und die Spanne der Jodzahl erhöht wird, z.B. 400 bis 1200. Der Versuch zeigt aber auch, dass die Jodzahlmessung nach ASTM und CEFIC vergleichbare Ergebnisse liefern. Die Abweichungen der Ergebnisse liegen bei maximal 2,35 % (Möller, 2014).

2.5.4.1 Wasseraufbereitung

Die Erfahrung hat gezeigt, dass Aktivkohle in verschiedenen Märkten etabliert werden kann. So wurden zum Beispiel für die Wasseraufbereitung von Bade- und Schwimmbeckenwasser Anforderungen an Aktivkohlen in die Schwimmbadnorm DIN 19643 aufgenommen. Eine der wichtigsten Anforderungen besteht in der Jodzahl oder auch Jodadsorption, die mindestens 900 mg/g betragen sollte. Damit wird die Adsorptionsleistung der Aktivkohle beschrieben. Die Messung erfolgt nach der ASTM (American Society for Testing and Materials), womit die Menge Jod ermittelt wird in mg, die von 1 g Aktivkohle adsorbiert werden kann. Vergleichbar mit der Jodzahl ist die spezifische Oberfläche oder BET-Oberfläche. Diese liegt bei Aktivkohlen zur Wasseraufbereitung zwischen 600 und 1500 m²/g. Der Zahlenwert liegt meist im selben Bereich wie die der Jodzahl. Daher sind tendenziell gleiche Werte für Jodzahl und BET-Oberfläche zu erwarten. Des Weiteren ist die Einteilung in Pulveraktivkohle und Kornaktivkohle nach Korngröße der Partikel möglich. Pulveraktivkohle sollte dabei ausschließlich Korngrößen unter 0,1 mm aufweisen, während die Korngröße der Kornaktivkohle in einem Bereich von 0,6 bis 2,4 mm liegen darf. Ausgangssubstrat der Aktivkohlen ist traditionell Steinkohle, aber auch Torf, Holzkohle oder Kokosnusschalen wurden bereits erfolgreich aktiviert und verwendet. Damit aus diesen kohlenstoffhaltigen Materialien Aktivkohle wird, müssen sie in einem Prozess aktiviert werden, bei dem Atome aus dem Kohlenstoffgerüst entfernt werden und dadurch Poren entstehen lassen (Wistuba, 2004).

2.5.4.2 Entschwefelung

Schwefelwasserstoff ist ein unerwünschtes Nebenprodukt, welches in Biogasanlagen zwangsläufig mit produziert wird. Organisch gebundener Schwefel kommt in der Eiweißfraktion der Substrate vor und wird mit Hilfe von Mikroorganismen gebildeter Desulfurases zu Schwefelwasserstoff umgewandelt. Werden Nebenprodukte nach BioAbfV mit vergoren, kann sich die Konzentration von Sulfat erhöhen und dadurch wiederum anaerob durch Desulfurikation zu Schwefelwasserstoff umgewandelt werden. Der zusätzliche Eintrag von Schwefel durch Bioabfälle kann jedoch an der Biogasanlage Ivenack ausgeschlossen werden. Die Schwefelwasserstoff- und Methanbildung laufen zudem unabhängig voneinander ab. Hohe Konzentrationen von Schwefelwasserstoff in der wässrigen Phase können aber methanbildende Mikroorganismen stören, womit die Biogaskonzentration gehemmt wird. Da es sowohl in der wässrigen Phase als auch im Gas vorkommt und beide Formen im Gleichgewicht zueinander stehen, führt es auch zur Korrosion gasleitender Apparaturen.

Somit würden auch die Motoren der Blockheizkraftwerke schnell geschädigt, wenn es nicht Aktivkohlefilter zur Gasreinigung gäbe. Bei steigenden Temperaturen im Fermenterraum steigt die Konzentration von Schwefelwasserstoff in der Gasphase. Es ist in jedem Fall zu empfehlen, die Konzentration bereits im Fermenter zu minimieren. Dafür können Additive wie Eisen(III)-Oxidhydrat eingesetzt werden, welches als Eisensulfid ausfällt und dann im Gärrest enthalten ist. Wird der Gärrest ausgebracht, soll der Schwefel über Oxidation zu Sulfat wieder pflanzenverfügbar werden. Eisen(III)-Oxidhydrat fällt unter anderem auch als Reaktionsprodukt bei der Enteisenung in Wasserwerken an (Otto, 2014).

Neue Investitionen in Maschinen für Biogasanlagen, wie Satelliten-BHKW's, machen aufgrund ihrer empfindlichen Katalysatoren eine vollständige Entschwefelung des Biogases nötig. Die Zufuhr von Eisenpräparaten reicht dazu nicht aus. In diesem Fall muss dann ein Aktivkohlefilter herangezogen werden. Der bei Kahnt-Ralle (2011) beschriebene Aktivkohlefilter enthält insgesamt 2 Tonnen Filtermaterial und kann 10 Monate betrieben werden, bevor die Kohle ausgetauscht werden muss. Die Aktivkohle ist zudem mit Substanzen behandelt welche die Aufnahme des Schwefels noch erhöhen sollen. Hohe Schwefelgehalte können unter anderem durch die Zufuhr von Putenmist verursacht werden. Das Interesse an den Aktivkohlefiltern ist seit Einführung des Emissionsminderungsbonus von 1 Cent/ kWh massiv gestiegen, obwohl man, abhängig vom Rohkohlepreis, der Aktivierungsmethode und Imprägnierung mit speziellen Substanzen, mit einem Aktivkohlepreis von bis zu 2700 Euro je Tonne rechnen muss (Kahnt-Ralle, 2011).

Bei einer Anlage mit 25 kW elektrischer Leistung, die lediglich mit Gülle und Speisefett betrieben wurde, zeigte sich kein signifikanter Anstieg des Gasertrages durch Zugabe von Zeolithen. Die Menge an Zeolithen betrug 16 kg und wurde dem Anmischbehälter täglich zugeführt. Diese Menge errechnet sich aus 5 % der zugeführten organischen Trockenmasse des täglichen Inputmaterials. Man geht davon aus, dass Zeolithe ihre Wirkung, vor allem beim Einsatz von proteinreichen Substraten, entfalten können. Der Grund hierfür soll die erhöhte Bildung von Schwefelwasserstoff und Ammoniak sein. Diese Moleküle können von Zeolithen gebunden werden und somit den Gärprozess stabilisieren (Stieg, 2006).

2.5.5 Futtermittelzusatzstoff/Lebensmittelzusatzstoff

Pflanzenkohle ist ein Lebensmittelzusatzstoff, der in den EU-Ländern als Pulver oder Granulat zum Färben von Lebens-, Arznei- oder kosmetischen Mitteln verwendet werden kann (Kuhnert, 2008). Besondere Anforderungen bestehen dann aber an den folgenden Inhaltsstoffen:

Tab.8: Ausschlusskriterien für Pflanzenkohle zur Anwendung als Lebensmittelfarbstoff (eigene Darstellung aus Daten von Kuhnert, 2008)

Parameter	Gehalt	Einheit	
C-Gehalt (asche-,wasserfrei)	95	%	mindestens
Aschegehalt	4	%	maximal
Trocknungsverlust	12	%	maximal
As	3	mg/kg	maximal
Pb	10	mg/kg	maximal
Hg	1	mg/kg	maximal
Cd	1	mg/kg	maximal

Die Reinheitsanforderungen für Kohlenstoffgehalt und Aschegehalt sind so hoch, dass ein dementsprechend hoher Preis für diese Ware verlangt werden kann. Zudem werden aufgrund der starken färbenden Wirkung nur geringe Mengen benötigt. Trotzdem kann man immerhin Abpackungen von 1 kg erwerben. Das Produkt „SENA -Premium- gemahlene Kohle medizinisch“ ist für gut 111 €/kg erhältlich (SENA-HERBAL, 2014). Holz besitzt in der Regel einen sehr geringen Aschegehalt von unter 1 % der Trockenmasse, wohingegen die Werte von Halmgutartigen meist bei über 5 % liegen (Kaltschmitt, 2009). Dementsprechend könnte die Pflanzenkohle bereits durch den erhöhten Aschegehalt der Biomasse nicht für die Verwendung als Lebensmittelfarbstoff verwendet werden. Pflanzenkohle ist aber auch ein nach Verordnung (EG) Nr. 1831/2003 zugelassener Futtermittelzusatzstoff und ist im Gemeinschaftsregister der Futtermittelzusatzstoffe als ebenfalls als Farbstoff E 153 aufgeführt. Nach Anhang I der Richtlinie 2002/32/EG sind einige wichtige Parameter zusammengestellt, die bereits im Rahmen der Untersuchungen für das EPZ unternommen werden sollen. Vor allem Grenzwerte für Schwermetalle müssen bei Pflanzenkohle beachtet werden. Andere wichtige Schadstoffe wie Aflatoxine oder Blausäure sind nicht zu erwarten.

3. Analysen

3.1 Gärrest

Der getrocknete Gärrest aus der Trocknungsanlage wird in einem überdachten Depot mit Betonboden gelagert.



Abb.12: Lagerung des getrockneten Gärrestes am Standort Ivenack (eigene Darstellung)

Die Probenahme des getrockneten Gärrestes erfolgte nach (Kape, 2009) mit Hilfe einer Probenehmerin der LUFA Rostock am 20. Mai 2014. Da der feste Gärrest unter den Düngemitteltyp Wirtschaftsdünger fällt und vergleichbar mit Festmist ist, wird für die Probenahme ein metallisches Stechgerät verwendet. Dieses wurde zunächst zur Hygienisierung abgeflammt, da auch eine Salmonellenuntersuchung durchgeführt werden soll. Über die manuelle Öffnung kann das Substrat in den hohlen Innenraum rieseln. Es müssen bei der hier vorliegenden Menge mindestens 10 Einstiche erfolgen, um eine repräsentative Sammelprobe zu erhalten. Bei der Bildung der Endprobe wurde darauf geachtet, dass eine Menge von 3 kg nicht unterschritten wird (Kape, 2009). Die in einen verschließbaren Plastikbehälter gefüllte Probe wurde an die LUFA Rostock zur Analyse der folgenden Parameter gesendet:

Tab.9: Untersuchungen und Methoden für die Bestimmung relevanter Parameter des getrockneten Gärrestes (eigene Darstellung aus dem Prüfbericht der LUFA Rostock, 2014)

Untersuchung	Methode
Trockenmasse	VDLUFA II 9.27
pH-Wert	VDLUFA II 11.14
Organische Substanz	DIN EN 12879
N-Gesamt	VDLUFA II 3.5.2.7
NH ₄ -N	VDLUFA II 3.2.1
C total	VDLUFA II 3.5.2.7
P ₂ O ₅ , K ₂ O, MgO	VDLUFA II 1, 4.4
Salmonellen	BioAbfV Anhang 2
Rohdichte	VDLUFA I 13.2.1
Co, Mo, Ni, Se, Cr, Mn	DIN EN ISO 11885-E22
Fe, Cu, Zn	VDLUFA II 8.3.4

3.2 Pflanzenkohle

Das erste und bislang einzige Labor, das sich auf Grundlage dieser Richtwerte am Netzwerk des EPZ beteiligt, ist das Analyselabor der Eurofins Umwelt Ost GmbH. Mit dem angebotenen Basispaket von Eurofins sind alle Analysen für die Zertifizierung einer Pflanzenkohle-Charge abgedeckt. Es sollen weitere Labore folgen, die sich ebenfalls an den vorgeschlagenen Analysen des EPZ orientieren und in das Netzwerk integriert werden sollen (Schmidt, 2013). Für die Untersuchung einiger besonders wichtiger Parameter, die vom EPZ für die Zertifizierung verlangt werden, wurde das Analytiklabor Wessling beauftragt. Die Ermittlung der Jodzahl erfolgte über die Jacobi Carbons Service GmbH mit Hilfe der ASTM D4607.

3.3 Gärrest und Pflanzenkohle

Die Siebanalyse von Gärrest und Pflanzenkohle wurde an der Hochschule Neubrandenburg nach DIN EN 15149-2 durchgeführt. Der Brennwert wurde nach DIN 51900-3 mit dem Bombenkalorimeter und dem Verfahren mit adiabatischem Mantel ermittelt und der Heizwert nach DIN 51900-1 berechnet.

4. Ergebnisse

4.1 Gärrest

4.1.1 Deklaration als Düngemittel

Nach DüMV ist der getrocknete Gärrest zwar als Wirtschaftsdünger zu bezeichnen, darf aber auch als organischer NPK-Dünger deklariert werden.

Tab.10: Ergebnisse der Gärrestuntersuchung (eigene Darstellung aus Daten des Prüfberichts der LUFA, 2014)

Parameter	Einheit	Ergebnis
Trockenmasse	%	90,8
pH-Wert	-LOG(H)	9,4
Organische Substanz	% TM	74,79
N-Gesamt	% FM	3,71
NH ₄ -N	% FM	0,09
C total	% FM	37,89
P ₂ O ₅	% FM	2,4
K ₂ O	% FM	5,69
MgO	% FM	1,23

Das C/N Verhältnis kann mit Hilfe folgender Formel berechnet werden:

$$C/N \text{ Verhältnis} = \frac{\text{org. Substanz } (\%TM) * 0,58}{\text{Gesamt N } (\%TM)}$$

(Breuer, 1997)

Das C/N-Verhältnis beträgt knapp 11:1 und ist damit weiter als bei unbehandelten Biogasgüllen mit einem Wert von 5:1 (Reinhold, 2012). Das Ergebnis kann auf die Abtrennung des Ammoniumstickstoffs zurückzuführen sein.

Die Spurennährstoffuntersuchung des Gärrestes ergab relevante Mengen von Eisen und Mangan. Diese können auf der Deklaration angegeben werden. Der Rest der untersuchten Spurennährstoffe erreicht nicht die Mindestgehalte nach DüMV.

Tab.11: Spurennährstoffgehalte des getrockneten Gärrestes (eigene Darstellung aus Daten des Prüfberichts der LUFA Rostock, 2014)

	mg / kg TS	% TS
Kobalt (Co)	2,07	0,0002
Molybdän (Mo)	2,76	0,0003
Nickel (Ni)	5,65	0,0006
Selen (Se)	1,08	0,0001
Chrom (Cr)	7,04	0,0007
Mangan (Mn)	312,76	0,0313
Eisen (Fe)	5496,7	0,5497
Kupfer (Cu)	72,4	0,0072
Zink (Zn)	187,6	0,0188

Der Eisengehalt liegt nicht höher als bei Bioabfall- oder Grüngutkomposten. Bioabfallkomposte besitzen durchschnittlich einen Gehalt von gut 9800 mg/kg und Grüngutkomposte nahezu 12000 mg/kg. Übliche Eisengehalte von Böden liegen bei 7000 mg/kg und höher (Breuer, 1997).

4.1.2 Siebanalyse

Um eine Staubemission aus dem Gärrest zu verhindern, wird von der DüMV ein maximaler Siebdurchgang von 0,5 % von Partikeln die kleiner als 0,1 mm sind verlangt. Selbst bei einer Siebzeit von 30 Minuten sind aber noch keine 0,5 % der Gesamtmenge im Bereich von unter 0,125 mm erreicht. Der Großteil liegt im Bereich von 1 - 4 mm, 99 % sind größer als 1 mm.

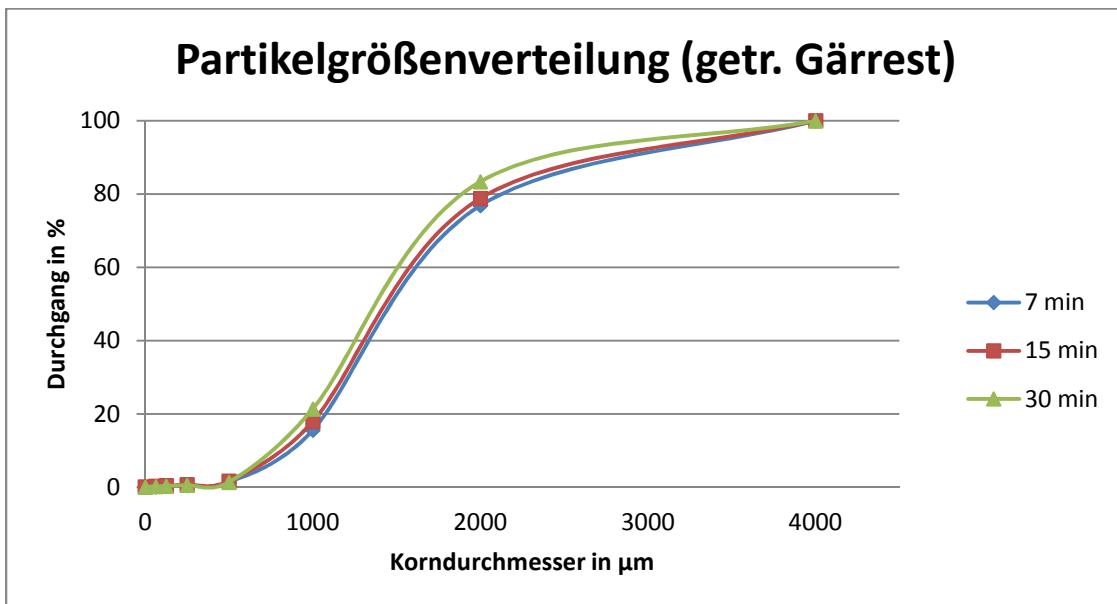


Abb.13: Partikelgrößenverteilung des getrockneten Gärrestes (eigene Darstellung)

Die Erhöhung der Siebzeit von 7 Minuten auf letztlich 30 Minuten hat kaum Auswirkung auf die Verteilung der Partikel. Es findet lediglich eine leichte Verschiebung der Anteile in den Bereichen von 1 - 2 mm bzw. 4 mm und größer statt.

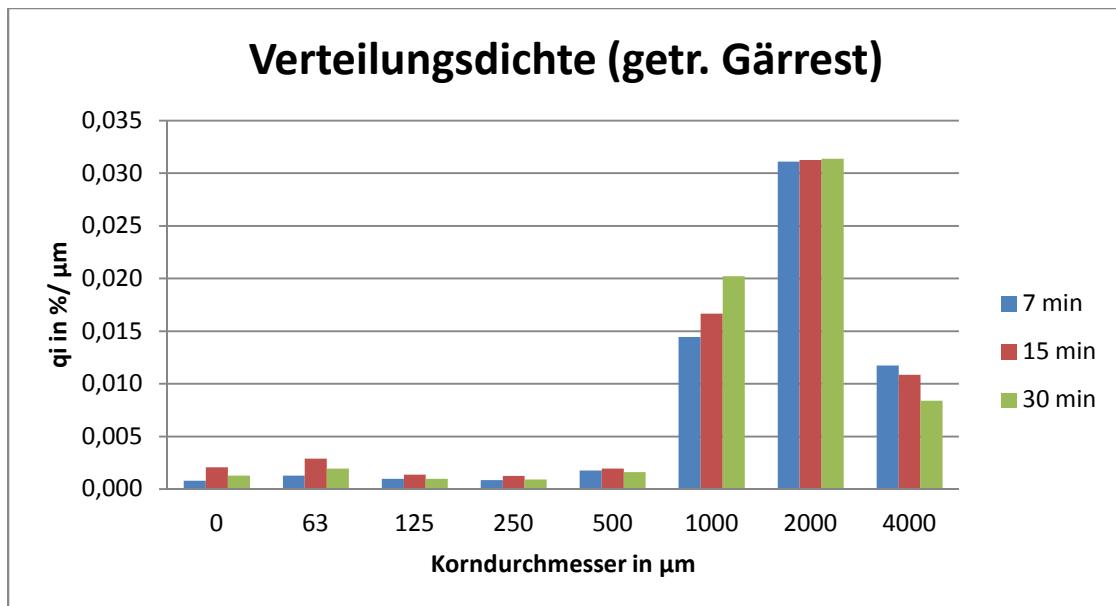


Abb.14: Verteilungsdichte des getrockneten Gärrestes (eigene Darstellung)

4.2 Pflanzenkohle

4.2.1 Auswirkungen auf das EPZ

Die untersuchten Parameter der Tab. 12 bestätigen die Anforderungen des Pflanzenkohlezertifikats. Damit sind die wichtigsten Kriterien zur Erlangung des Zertifikats erfüllt.

Tab.12: Gegenüberstellung der Analyseergebnisse der Igniscumkohle und den Anforderungen des EPZ (eigene Darstellung bzw. Berechnung aus Daten des Prüfberichts der Wessling GmbH und Schmidt, 2014)

Parameter	Ergebnis Igniscumkohle		EPZ Anforderungen	
	Einheit	Ergebnis	Basic	Premium
Quecksilber	mg/ kg TS	0,03	1	1
Blei	mg/ kg TS	0,46	150	120
Cadmium	mg/ kg TS	0,03	1,5	1
Chrom	mg/ kg TS	3,2	90	80
Kupfer	mg/ kg TS	6,7	100	100
Nickel	mg/ kg TS	3,3	50	30

Zink	mg/ kg TS	34	400	400	maximal
Kohlenstoff _{Ges}	% TS	81,8	50	50	mindestens
H/C Verhältnis	mol%	0,301	0,6	0,6	maximal
O/C Verhältnis	mol%	0,065	0,4	0,4	maximal
pH-Wert	-LOG(H)	10,1	nur	Angabe	
Schüttdichte	kg/ m ³	310	nur	Angabe	
Wassergehalt	Gew%	21,6	nur	Angabe	
Stickstoff	% TS	1,31	nur	Angabe	

Zur Zertifizierung bedarf es jedoch noch der Untersuchung weiterer Parameter. Für die Nährstoffe Stickstoff (1,31 % der TS), Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium ist kein Mindestgehalt gefordert. Lediglich die Deklaration des Gehaltes wird verlangt. Wasserhaltevermögen und spezifische Oberfläche sind Zusatzangaben für die Premiumzertifizierung. Auch pH-Wert, Wassergehalt und Schüttdichte müssen nur angegeben werden. Da der pH-Wert der Igniscumkohle höher als 10 ist, muss in den Lieferpapieren auf mögliche Gefahren für den Arbeitsschutz hingewiesen werden (Schmidt, 2012). Die PAK-Gehalte liegen in der Regel bei Pflanzenkohlen aus dem Pyreg-Verfahren weit unter den vom EPZ geforderten Grenzwerten von 12 mg/kg TS (basic) bzw. 4 mg/kg TS (premium) (Glaser, 2010; Schmidt, 2012).

4.2.1.1 H/C- und O/C - Verhältnis

Aus den prozentualen Anteilen von Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff werden die molaren Verhältnisse für die Einordnung ins Van-Krevelen-Diagramm berechnet. Die Formeln lauten wie folgt:

$$H/C \text{ Verhältnis (mol\%)} = \frac{m(H)}{M(H)} / \frac{m(C)}{M(C)}$$

$$O/C \text{ Verhältnis (mol\%)} = \frac{m(O)}{M(O)} / \frac{m(C)}{M(C)}$$

Tab.13: Molares H/C - und O/C - Verhältnis der Igniscumkohle (eigene Berechnung aus Daten des Prüfberichts der Wessling GmbH, 2014)

Parameter	Einheit	Ergebnis
H/C Verhältnis	mol%	0,301
O/C Verhältnis	mol%	0,065

Die Parameter werden ins Van-Krevelen-Diagramm eingetragen. Die Schnittstelle der roten Linien markiert den Punkt der Igniscum-Kohle im Diagramm:

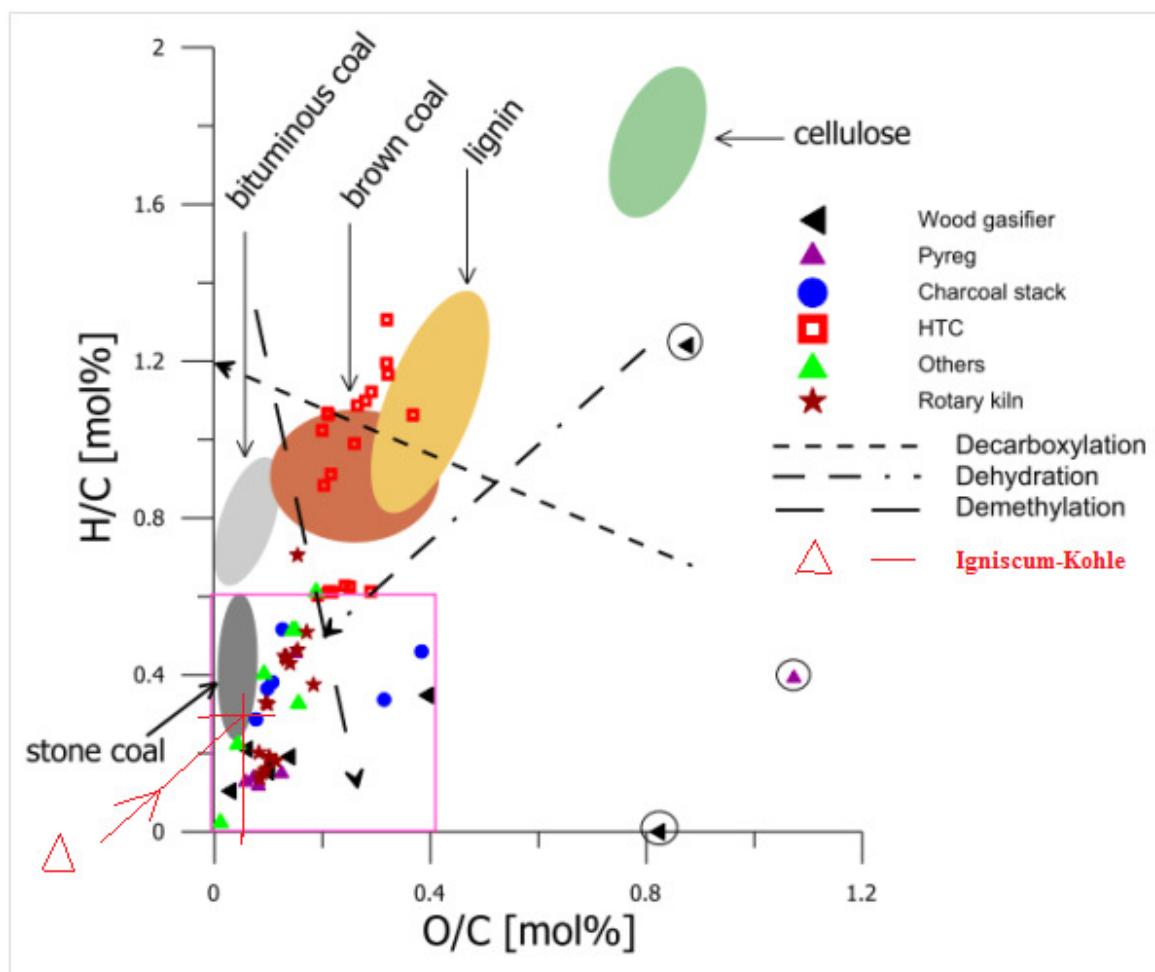


Abb.15: Van-Krevelen-Diagramm mit Grenzwerten für den Einsatz von Pflanzenkohlen als Bodenverbesserer (eigene Bearbeitung des Van-Krevelen-Diagramms aus Glaser, 2010)

Die Igniscum-Kohle erfüllt den Anspruch des EPZ hinsichtlich der Stabilität die durch das Van-Krevelen-Diagramm dargestellt werden kann. Die Grenzwerte für das molare H/C (0,6 mol%) - bzw. O/C - Verhältnis (0,4 mol%) werden eingehalten.

4.2.2 Grillkohle

Tab.14: Anforderungen an Grill-Holzkohlebriketts (eigene Darstellung aus Daten der DIN EN 1860-2)

Parameter	Einheit	Igniscum	Anforderungen
		Pflanzenkohle	Grill-Holzkohlebriketts
Kohlenstoff _{Ges}	Gew% L-TS	79,7	60
Aschegehalt	Gew%	10,2	18
Analysenfeuchte	Gew% L-TS	2,6	8

Die Anforderungen der DIN EN 1860-2 werden erfüllt. Sie gelten aber für das fertige Produkt. Genaue Aussagen über die Qualität von Briketts aus Pflanzenkohle können daher nicht gemacht werden.

4.2.3 Lebensmittel/Futtermittel

Tab.15: Anforderungen an Lebensmittel- und Futtermittelzusatzstoffe (eigene Darstellung aus Daten des Prüfberichtes der Wessling GmbH, 2014; Kuhnert, 2008; Richtlinie 2002/32/EG)

Parameter	Einheit	Igniscum	Grenzwerte	
		Pflanzenkohle	Futtermittelzusatzstoff ¹	Lebensmittel
Quecksilber	mg/ kg TS	0,03	0,1	1
Blei	mg/ kg TS	0,46	10	10
Cadmium	mg/ kg TS	0,03	1	1
Arsen	mg/ kg TS	n.u.*	2	3
Aschegehalt	% TS	10,2	-	4
C-Gehalt (asche-, wasserfrei)	% TS	81,8	-	95

* nicht untersucht

¹Grenzwerte in Bezug auf ein Futtermittel mit 12 % Feuchtigkeit

Für die Verwendung als Lebensmittelzusatzstoff ist der Aschegehalt zu hoch und der Gesamtgehalt an Kohlenstoff zu gering. Für die Verwendung als Futtermittelzusatzstoff spielen diese Parameter aber keine Rolle, so dass hierfür weiterhin eine Verwendungsmöglichkeit besteht.

4.2.4 Siebanalyse

Im Anhang sind die ursprünglichen Ergebnisse der Siebanalyse zu finden. Die folgenden Abbildungen liegen diesen Ergebnissen zu Grunde. Zunächst wurde die Kohle ungetrocknet mit einem Wassergehalt von 40 % gesiebt. Dabei kann im Bereich unter 125 µm keine nennenswerte Partikelmenge verzeichnet werden. Die Variation der Siebzeit hatte darauf keinen Einfluss.

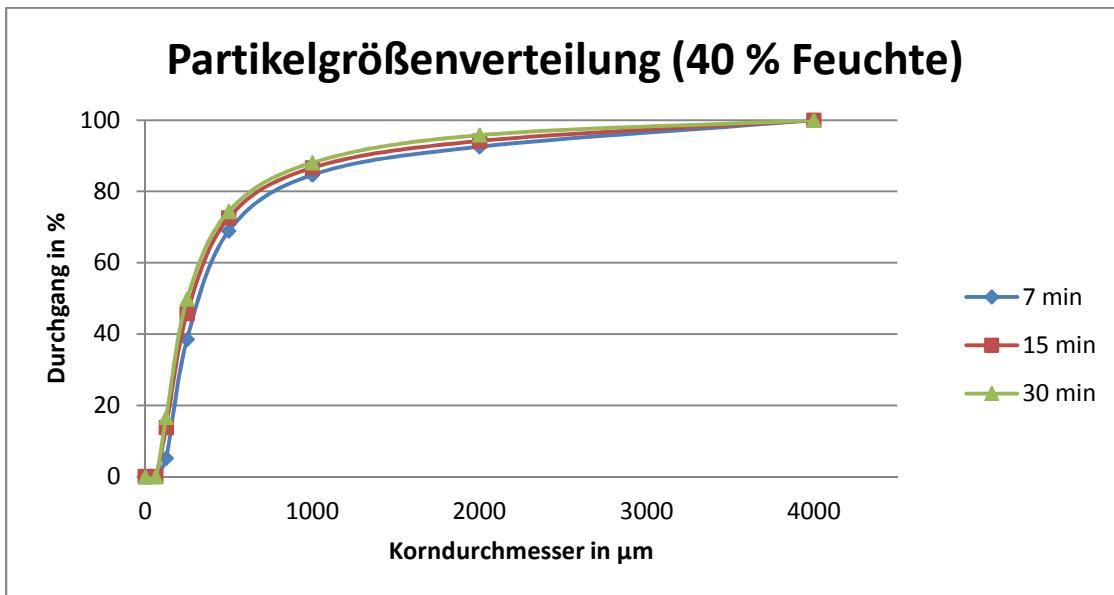


Abb.16: Partikelgrößenverteilung feuchter Igniscum-Kohle (eigene Darstellung)

Aus der Abb. 17 wird deutlich, dass die Siebzeit vor allem Auswirkung auf den Bereich zwischen 125 und 250 µm hat. Jedoch gelangen keine Partikel in die Siebe unterhalb von 125 µm. Diese sehr kleinen Partikel können offenbar erst nach der Trocknung durch die engmaschigen Sieben fallen.

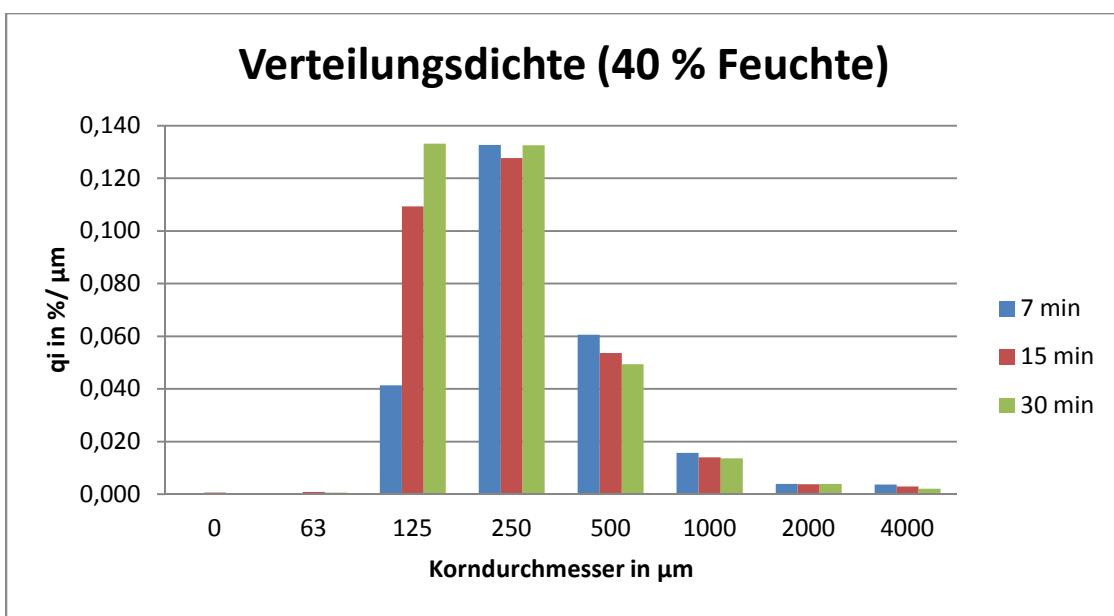


Abb.17: Verteilungsdichte feuchter Igniscum-Kohle (eigene Darstellung)

Bei der Siebung der absolut trockenen Kohle werden noch Partikel in einen Bereich von 0 - 125 µm aufgefangen. Deren Menge beträgt zusammen immerhin 9 % der Gesamtmenge. 93 % der Partikel liegen in einem Bereich von 0–2000 µm. Der Anteil der größeren Partikel kann durch die erhaltene Struktur der Pellets erklärt werden. Damit liegt die Gesamtmenge jedoch trotzdem in dem Bereich der Pflanzenkohle, die zum Beispiel von dem Unternehmen Carbon Terra verwendet wird. Deren zum Verkauf angebotene Pflanzenkohle hat eine Körnung von 0 – 5 mm (Schottdorf, 2014).

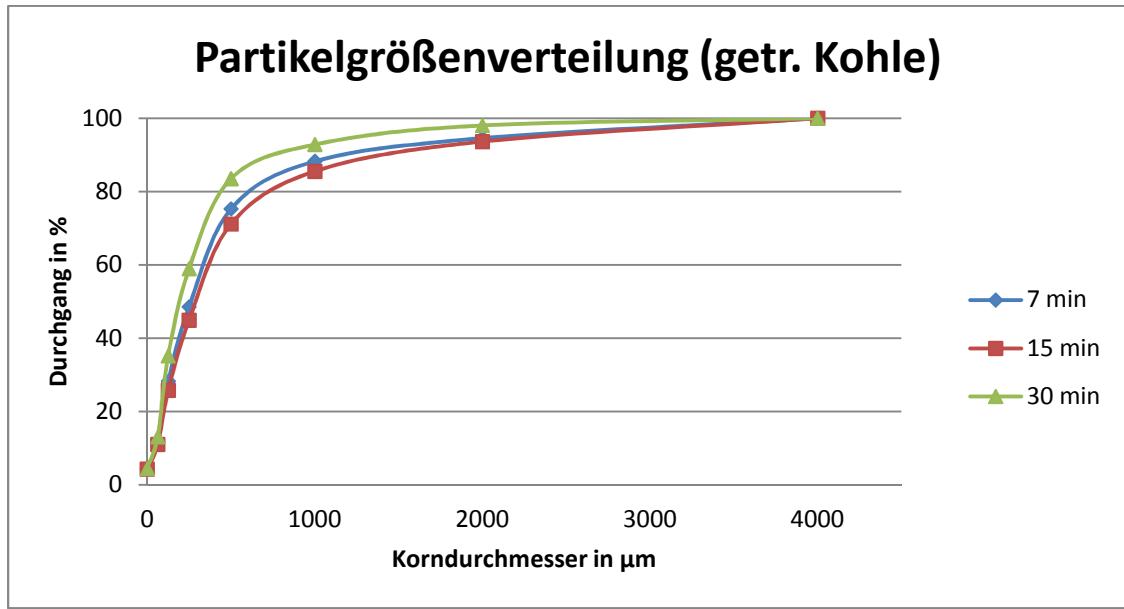


Abb.18: Partikelgrößenverteilung absolut trockener Igniscumkohle (eigene Darstellung)

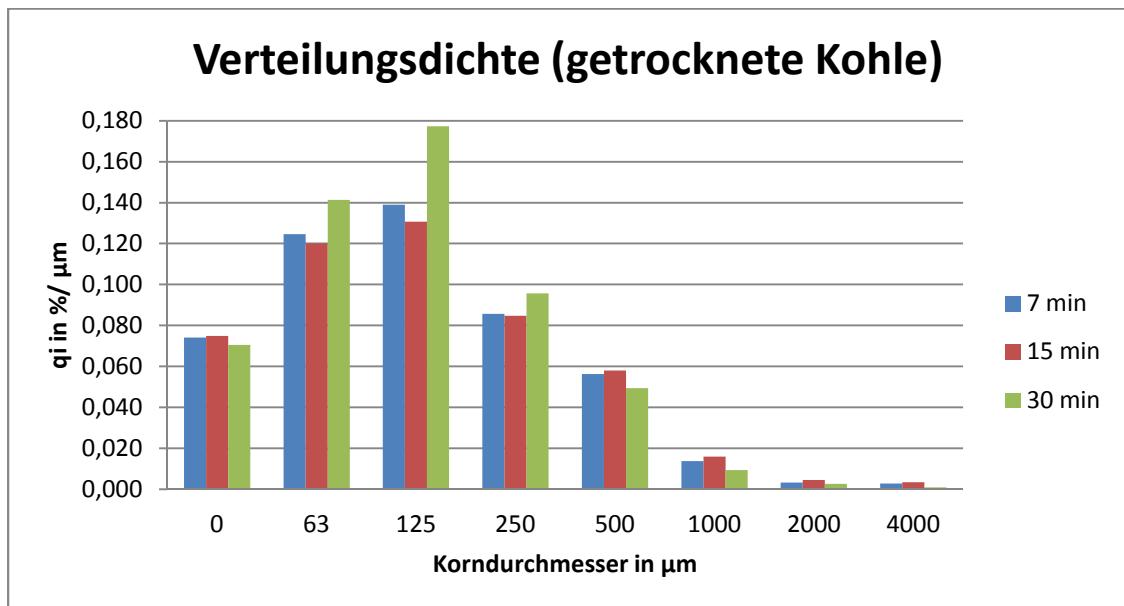


Abb.19: Verteilungsdichte absolut trockener Igniscumkohle (eigene Darstellung)



Abb.20: Pyreg-Kohle aus Igniscumpellets (eigene Darstellung)

In Abb.20 sind einige Kohlepartikel zu erkennen, die ihre ursprüngliche Pelletform beibehalten haben. Die über 4 mm großen Partikel machen bei feuchter Kohle 4-7 % und bei absolut trockener Kohle 2-7 % Massenanteil in Abhängigkeit von der Siebdauer aus.

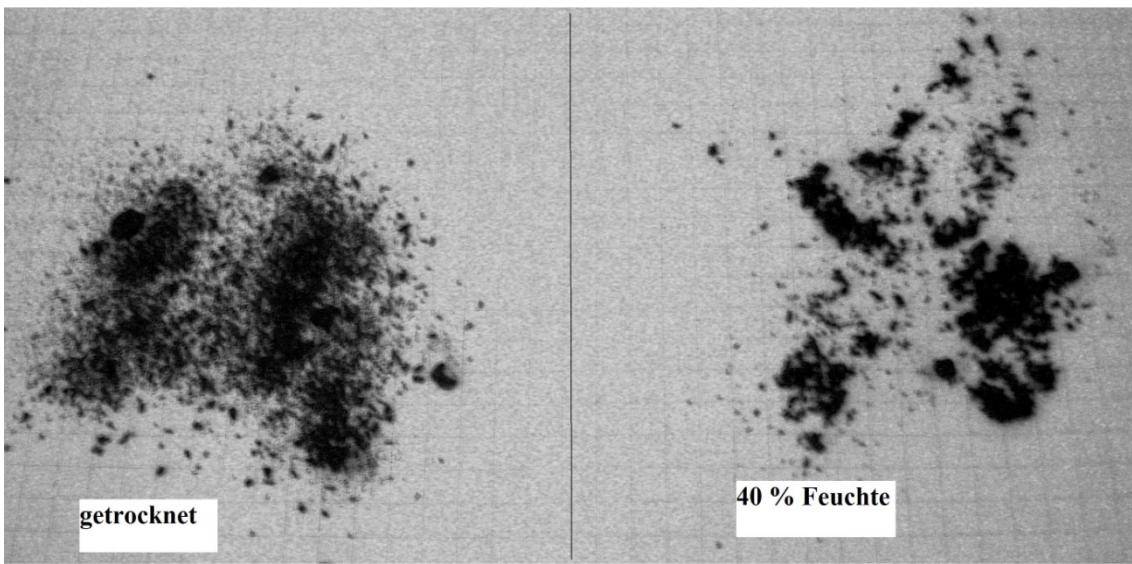


Abb.21: Vergleich von getrockneter und feuchter Kohle (eigene Darstellung)

4.2.5 Jodzahl

Die spezifische Oberfläche von Pflanzenkohle soll nach Schmidt (2011) in einem Bereich von $300 \text{ m}^2/\text{g}$ liegen. Dieser Wert reicht an handelsüblicher Aktivkohle natürlich nicht heran. Die Jodzahl soll nach DIN EN 12915-1 für granulierte Aktivkohle, die zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch vorgesehen ist, nicht weniger als 600 mg/g betragen.

Das Untersuchungsergebnis von jacobi carbons der Jodzahl, die dem Wert der spezifischen Oberfläche in den meisten Fällen sehr nahe kommt, liegt noch unter 100 mg/g. Klarheit über die Adsorptionskapazität der Pflanzenkohle kann die spezifische Oberfläche bringen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden konnte. Sollte die Pflanzenkohle nach EBC zertifiziert werden, ist diese Untersuchung allerdings im Basispaket der Eurofins GmbH bereits enthalten. Die BET-Oberfläche ist zudem ein wichtiger Parameter, der die Fähigkeit der Kohle zur Aufnahme von Wasser und darin gelösten Nährstoffen beschreibt. Mit steigender spezifischer Oberfläche steigt die Aufnahmefähigkeit (Schmidt, 2011).

4.3 Gemeinsame Ergebnisse

4.3.1 Brennwert/Heizwert/Wassergehalt

Das Ergebnis der LUFA Rostock für den Wassergehalt von 10 % wurde durch die Untersuchung an der Hochschule nicht bestätigt. Der Wert liegt mit 15 % etwas höher. Die Abweichung ist allerdings dadurch zu erklären, dass die Probe nicht zur selben Zeit analysiert wurde und die Probenahme etwa 2 Monate auseinander liegt. Der ermittelte Heizwert musste für die Igniscumkohle zweimal durchgeführt werden, da die Probe einen Wassergehalt von über 40 % besaß. Die Ermittlung des Brennwertes zeigte bei der trockenen Kohle dann ein nachvollziehbares Ergebnis von gut 28000 J/ g.

Tab.16: Wassergehalt und Heizwert von Pflanzenkohle und Gärrest (eigene Darstellung der Ergebnisse der Hochschuluntersuchung, 2014 und CONPOWER, 2012)

	Wassergehalt (%)	Brennwert (J / g)	Heizwert (J / g)
Igniscumpellets *	atro	18288	18288
Gärrest	15	15862	15495
Pflanzenkohle	40,7	17205	16212
Pflanzenkohle	atro	28482	-

*CONPOWER 2012

5. Auswertung

5.1 Preisermittlung Gärrest

Ausgehend von den mineralischen Düngemitteln können Einzelnährstoffpreise ermittelt und diese dann verwendet werden, um auf einen theoretischen Wert der Gärreste zu schließen. Dieser ist dann abhängig von den aktuellen Preisen die, wie in der folgenden Abbildung zu erkennen, monatlichen Schwankungen unterworfen sind.

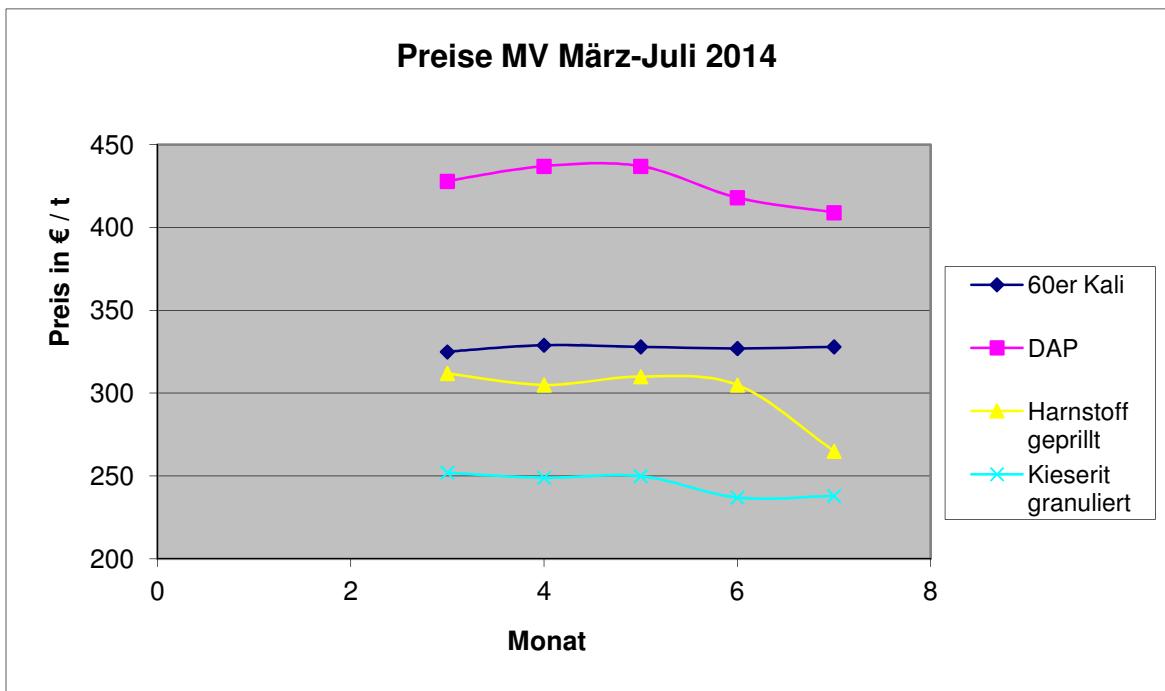


Abb.22: Preisentwicklung ausgewählter Düngemittel (eigene Darstellung aus Daten des LALLF, 2014)

Die einzelnen Nährstoffpreise der Düngemittel können aus den aktuellen Mineraldüngerpreisen der Marktinformation Ost entnommen werden.

Tab.17: Preise für mineralische Düngemittel (eigene Darstellung aus Daten des LALLF, 2014)

Dünger	Nährstoffgehalte (%)					EUR/dt	Nährstoffkosten EUR/kg				
	N	P2O5	K2O	MgO	S		N	P2O5	K2O	MgO	S
Harnstoff (geprillt)	46					30,0	0,65				
DAP	18	46				42,6	2,37	0,93			
Kali 60			60			32,7			0,55		
Kieserit				25	20	24,5				0,98	1,23

Die Wahl der mineralischen Düngemitteläquivalente fällt auf die Düngemittel mit dem höchsten Gehalt des entsprechenden Nährstoffs. Phosphor wird zurzeit am stärksten in Form von Diammonphosphat nachgefragt und für Kalium ist der Preis von Kali 60 mit 60 % K₂O als Vergleich vorgesehen. Der Magnesiumpreis muss aus dem kombinierten Düngemittel Kieserit bezogen werden, da er als Alleindünger nicht zu erhalten ist. Mit Hilfe der abgeleiteten Preise der Einzelnährstoffe aus den mineralischen Düngemitteln, kann der Wert des Gärrestes in €/t FM ermittelt werden. Aus den Preisäquivalenten der Mineraldünger und den Nährstoffgehalten der Gärreste ergibt sich ein Wert von gut 89 €/t FM des getrockneten Gärrestes. Aufgrund der Inhomogenität und damit verbundenen Schwierigkeiten bei der Ausbringung wird der Gärrest vermutlich einen geringeren Preis erzielen.

Tab.18: Ergebnis zur Berechnung des theoretischen Wertes des getrockneten Gärrestes (eigene Darstellung aus Daten des LALLF und den Ergebnissen des Prüfberichtes der LUFA Rostock, 2014)

	N	P2O5	K2O	MgO	Gesamt
€/ kg	0,65	0,93	0,55	0,98	
Gehalt % FM	3,71	2,4	5,69	1,23	
Gehalt kg /kg FM	0,04	0,02	0,06	0,01	
€ / kg FM	0,024	0,022	0,031	0,012	0,089
€ / t FM	24,196	22,226	31,011	12,054	89,486

5.2 Verkauf als NPK-Dünger

Der Verkaufspreis des Gärrestes richtet sich nach dem Vergleichsprodukt Fantastic Fructus. Dieser wird in 5 kg-Einheiten für 9,85 € angeboten (Der Biogartenfreund, 2014). Der getrocknete Gärrest kann entweder in Baumärkten angeboten oder direkt vor Ort verkauft werden. Eine Kalkulation (Siehe Tab. 21) soll dabei helfen, ausgehend von einem Verkaufspreis von 9,99 € pro Stück und den berechneten Selbstkosten von 2,5 €, auf den möglichen Gewinn zu schließen. Die Selbstkosten setzen sich aus den Material-, Personal-, Lager- und Transportkosten zusammen (Siehe Tab. 19). Die Materialkosten sind mit 0,7 € bereits vorgegeben, während die Personalkosten mit 0,9 € berechnet wurden. Die Lager- und Transportkosten können nur grob geschätzt werden. Ausgehend davon werden Selbstkosten in Höhe von 2,5 € angenommen. Es ergibt sich ein Gewinn von ca. 3 €. Die Befüllungszeit wird großzügig auf 5 Minuten geschätzt. Dazu gehören das Verschließen und das Stapeln im Lager. Für die Befüllung kann zum Beispiel ein 450 Euro Minijob in Frage kommen. Die monatlichen Gesamtkosten für einen Arbeitnehmer belaufen sich dann auf 589 €, da noch Sozialabgaben für den Arbeitgeber von 30,88 % anfallen (Kosick, 2014). Bei einem

Arbeitslohn von 450 € im Monat und einem Stundenlohn von 8,50 €/h kann eine monatliche Gesamtzeit von gut 53 Stunden angenommen werden. In dieser Zeit können etwa 3170 Einheiten mit je 5 kg Gewicht erstellt werden. Bei dieser Betrachtung (Siehe Tab. 20) sind etwa 7600 Einheiten bzw. 38 t Gärrest pro Jahr für den Verkauf als Gartendünger möglich. Sollte sich tatsächlich eine ausreichende Nachfrage ergeben, könnten jährlich gut 23000 € Gewinn aus dem Verkauf der 40 t Gärrest bezogen werden. Die restlichen 360 t Gärrest können für den im Abschnitt 5.1 berechneten Preis von 89 € an Landwirte verkauft werden. Aus diesem Verkauf würden dann ca. 32000 € Umsatz hervorgehen.

Tab. 19: Zusammensetzung der Selbstkosten (eigene Darstellung)

Materialkosten (Papiertüten)	0,70
Personalkosten	0,9
Lagerkosten	0,2
Transportkosten	0,7
Selbstkosten	2,50

Tab. 20: Berechnung der Personalkosten auf Grundlage einer 450 Euro-Stelle mit 8,50 € Lohn pro Stunde (eigene Darstellung)

Parameter	Wert
Stundenlohn (€)	8,5
Arbeitszeit (h/Monat)	52,9
Arbeitszeit (min/Monat)	3176,5
Tüten pro Monat	635
Tüten pro Jahr	7624
Befüllungszeit je Stück (min)	5
Kosten je Stück	0,93
Verbrauch t pro Jahr	38
Gewinn	23105

Tab. 21: Verkaufspreisberechnung für Gärreste als Gartendünger (eigene Darstellung)

	€	%
Selbstkosten	2,5	
+ Gewinn	3,03	121
= Barverkaufswert	5,53	
+ Kundenskonto	0,11	2
= Zielverkaufspreis	5,47	
+ Kundenrabatt	0,17	3
= Listenverkaufspreis	5,64	
+ Umsatzsteuer	1,07	19
= Brutto-Verkaufspreis	6,72	
 = Einstandspreis Baumarkt	6,72	
+ Gewinn	1,68	25
= Barverkaufspreis	8,39	
+ Kundenskonto	-	
= Zielverkaufspreis	-	
+ Kundenrabatt	-	
= Listenverkaufspreis	8,39	
+ Umsatzsteuer	1,60	19
= Brutto-Verkaufspreis	9,99	

5.3 Verkauf der Pflanzenkohle

Ausgehend von den Untersuchungsergebnissen kann Pflanzenkohle als Futtermittelzusatzstoff verwendet werden. Auch eine Zertifizierung durch das EPZ ist nach den bisher ermittelten Werten möglich. Zertifizierte Pflanzenkohle kann in Zukunft vor allem im landwirtschaftlichen Bereich, zur Aufwertung von Düngemitteln oder in der Tierfütterung und Güllebehandlung, eingesetzt werden. Die Firma Sonnenerde aus Riedlingsdorf in Österreich besitzt seit Juli 2012 eine kontinuierlich betriebene Pyreg-Anlage. Täglich werden dort 1500 kg Pflanzenkohle aus Zellulosefasern und Getreidespelzen produziert. Der aktuelle Preis für einen 30 Liter-Sack beträgt bei Sonnenerde 19,50 € (Dunst, 2014). Bei Carbon Terra beträgt der Preis für einen 30 Liter-Sack (10 kg) 24,95 €. Hier wird zertifizierte Pflanzenkohle im industriellen Maßstab mit dem sogenannten Schottdorf-Meiler produziert (Schottdorf, 2014). Der Preis je Tonne kann somit leicht über 600 € betragen. Es muss aber bedacht werden, dass die Wirtschaftlichkeit der Anlage bei voller Leistung betrachtet wird. Die jährliche Menge an Substraten die an der BGA Ivenack anfällt, liegt aber weit unter den möglichen 1300 t Substrat (TS), die nach Gerber (2014) bei voller Leistung verarbeitet werden können.

6. Zusammenfassung

Die CO₂-Minderung kann nicht der Hauptgrund für die Herstellung von Pflanzenkohle sein, denn dann wird sich dieses Vorhaben nur schwer in die Tat umsetzen lassen. Vielmehr muss ein wirtschaftlich überzeugender Grund angeführt werden, der diesen Prozess auch aus ökonomischer Sicht rechtfertigt. Ein Anreiz dafür kann durch die Kaskadennutzung der entstehenden Kohleprodukte gegeben werden. Der genaue Mehrwert sollte aber nur durch Langzeituntersuchungen bestätigt werden.

Die verhältnismäßig kleinen Anlagen des Pyreg- oder HTC-Verfahren können mit der Produktion der Retortenverfahren natürlich nicht mithalten. Der Vorteil besteht jedoch in den dezentralen Einsatzmöglichkeiten. Eine Menge von 300 t Pflanzenkohle pro Jahr kann sich zum Beispiel für die betriebsnahe Verwendung lohnen, wenn eine Kaskadennutzung angewendet wird. Auch ein Verkauf als zertifiziertes Produkt nach EPZ-Richtlinien ist erstrebenswert, wenn der finanzielle Nutzen entsprechend hoch ausfällt. Dieser hängt von den Eigenschaften der Pflanzenkohle ab. Umso höher die Qualität, desto vielseitiger können die Verwendungsmöglichkeiten sein. In bestimmten Bereichen, beispielsweise der Wasserbehandlung, sind spezifische Eigenschaften gefragt, wie eine hohe Jodzahl bzw. spezifische Oberfläche. Pflanzenkohlen aus den neuen Verkohlungsverfahren erreichen diese hohen Anforderungen aber in der Regel nicht. Es ist zwar durchaus denkbar, dass neuartige Verkohlungsprozesse in Zukunft die Produktion von Aktivkohle vollbringen. Die entstehenden Produkte müssten dann aber auch die Anforderungen an Aktivkohle erfüllen. Die HTC- und Pyrolyseanlagen wurden zudem eigentlich für die Abfall- und Reststoffverwertung entwickelt. Solche Materialien können mit Hilfe der Verkohlungsanlagen zu zertifizierten Pflanzenkohlen verarbeitet werden. Es besteht ein großes Potential für die Entwicklung eines Marktes für Pflanzenkohle, womit die Wertschöpfung an dezentralen Standorten erhöht werden kann. Gärreste sind aber keine Rest- oder Abfallstoffe. Es sind nährstoffreiche Wirtschaftsdünger die einen entsprechenden Preis erzielen können. Es kommt dabei auf die richtige Vermarktung an. Die Aufbereitung mittels Verkohlung führt nicht zu einer Erhöhung der Wertschöpfung. Auch Igniscum (getr. & pelletiert) ist bereits ein transportfähiger Brennstoff, der keiner weiteren Aufbereitung durch ein Verkohlungsverfahren bedarf.

7. Literaturverzeichnis

Bai M.; Wilske, B.; Buegger, F.; Esperschütz, J.; Kammann, C. I.; Eckhardt, C.; Koestler, M.; Kraft, P.; Bach, M.; Frede, H. G.; Breuer, L.: Degradation kinetics of biochar from pyrolysis and hydrothermal carbonization in temperate soils, Plant Soil (2013) 372: 375 - 387, Springer Science+Business Media Dordrecht 2013

Breuer, J.: Hohe Kompostqualität ist möglich. Räumliche und zeitliche Variabilität von Kompostinhaltsstoffen. Ergebnisse der Begleituntersuchungen zum Kompostierungserlaß Baden-Württemberg
<http://www.fachdokumente.lubw.badenwuerttemberg.de/servlet/is/20052/rb2.pdf?command=downloadContent&filename=rb2.pdf>.

Band 2 von Reihe "Boden FE", Ministerium für Umwelt und Verkehr. Baden-Württemberg, 1997, 29.08.2014

Bucher, A.: Leitfaden für die Düngung im Garten - In fünf Schritten zur erfolgreichen Düngung, Band 2, Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft & Forsten, 2011

CONPOWER Rohstoffe GmbH & Co. KG.; IGNISCUM Candy – der Maisersatz?, Kultivierung und Anwendung auf Grundlage der bisherigen Erfahrungen,
http://www.dorset.nu/upload/File/Dorset_GP/presentatie_22_juni_2012/2012_06_22_-Dorset_-_IGNISCUM.pdf. Dorset – Symposium auf dem Bauernhof, Aalten 22.06.2012, 15.07.2014

Der Biogartenfreund: Obst-, und Ziergehölzdünger, zertifizierter Bio-Dünger 5,0 kg, FANTASTIC FRUCTUS, Der BIO Gartenfreund, http://www.amazon.de/Ziergehölzdünger-zertifizierter-Bio-Dünger-Der-Gartenfreund/dp/B00CBTDPPA/ref=pd_sxp_f_i. 12.08.2014

DIN EN 12915-1. ICS 71.100.80

Produkte zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch-Granulierte Aktivkohle-Teil 1: Frische granulierte Aktivkohle, Juli 2009

DIN 51900-1. ICS 25.160.10; 75.160.20.

Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes, April 2000

DIN 51900-3. ICS 75.160.10; 75.160.20.

Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes-Teil 3: Verfahren mit adiabatischem Mantel, Januar 2005

DIN EN 1860-2. ICS 75.160.10

Geräte, feste Brennstoffe und Anzündhilfen zum Grillen-Teil 2: Grill-Holzkohle und Grill-Holzkohlebriketts-Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 1860-2:2005, Mai 2005

Dorset Agrar- und Umwelttechnik GmbH: Dorset DE Update
<http://www.dorset.nu/de/files/53.html>. 03.09.2014

Döhler, H.; Wulf, S.: Aktueller Stand bei der Gärrestaufbereitung, Gültzower Fachgespräche Band 30, S. 15 - 28, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2009

Dunst, G.: Herstellung Pflanzenkohle 2014.
<http://www.sonnenerde.at/index.php?route=common/page&id=1254>.
 04.09.2014

Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBI. I S. 1066), das durch Artikel 4 des Gesetzes vom 22. Juli 2014 (BGBI. I S. 1218) geändert worden ist

Gerber, H.: Die PYREG® 500 Der kompakte Alleskönnner
<http://www.pyreg.de/anlage.html>. 04.09.2014

Gerber, H.: Workshop: Herstellung von Biokohlein Brasilien aus biogenen Reststoffen,
http://www.izes.de/cms/upload/pdf/20121025_Workshop_Gerber.pdf. Saarbrücken,
 25.10.2012, 03.09.2014

Glaser B.: Biokohle - Produktion, Entwicklung und Charakterisierung zur Anwendung als Bodenverbesserer, http://www.bacatec.de/dl/Ge09_Glaser-Steiner_deu.pdf. 2010, 03.07.2014

Hantl, P.: Der Rohstoff Buche
www.holzkohle.de/index.php?option=com_content&view=article&id=206&Itemid=176.
 Bodenfelde, 18.07.2014

Holweg, C. L.: Beobachtungen zur Wirkung von Pflanzenkohlen auf die Bodenbiologie auf Basis der Regenwurmarktivität im Feldversuch und in vitro. Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, Tagung Kommission III „Bodenbiologie und Bodenökologie“, 20.09.-21.09.2012, Stuttgart-Hohenheim.

Inthapanya S.; Preston T. R.; Leng R. A.: Biochar increases biogas production in a batch digester charged with cattle manure 2012 <http://www.lrrd.org/lrrd24/12/sang24212.htm>. Livestock Research for Rural Development. Volume 24, Article # 212. 06.05. 2014

Kahnt-Ralle, E.: Aus dem Gas mehr rausholen 03.03.2011.
<http://joule.agrarheute.com/aktivkohlefilter.joule>, agrarheute, 17.06.2014

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H.(Hrsg.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2009

Kape, Hans-Eberhard: Probenahme von Boden, Pflanzen und Düngemitteln, Hinweise für die landwirtschaftliche Praxis, Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, 2009

Klein M.: Der Feind in meinem Beet, Öko-Test Mai 2013, S.128 - 135, 2013

Kosick, I.: Sozialabgaben beim Minijob
<http://www.450-euro-job.org/abgaben.html>. Verein für Soziales Leben e.V., 03.09.2014

Kuhnert, P; Muermann, B.; Salzer, U.-J. (Hrsg.): Handbuch Lebensmittelzusatzstoffe, Technologische, geschmacksgebende, nahrungsergänzende Stoffe, Behrs Verlag, Hamburg, 51. aktualisierte Lieferung, Oktober 2008

Kumar S.: A Note on Stimulation of Biogas Production from Cattle Dung by Addition of Charcoal, New Delhi, India 1986

Löhde, K.: Klärschlamm zu Dünger, Biomasse zu Pflanzenkohle
http://www.pyreg.de/website/resources/documents/ifat-artikel_umweltmagazin_klaerschlamm-zu-duenger-biomasse-zu-pflanzenkohle-2.0.pdf.
 Umwelt Magazin April - Mai 2014, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf
 03.09.2014

Miehlich, G.: Düngen im Haus- und Kleingarten? Ja, aber richtig
http://www.geowiss.uni-hamburg.de/i-boden/publrel/Miehlich_Boden_und_Duengung_im_Garten.pdf.
 Institut für Bodenkunde der Universität Hambur, Februar 2009, 03.09.2014

Möller, M.; Treese, J.; Pasel, C.; Bathen, D.: Eine kritische Betrachtung zur Charakterisierung von Aktivkohlen mittels der Jodzahl, Chemie Ingenieur Technik 86 I-2, S. 67-71, 2014

Neumann H.: Biogas, Strom aus Gülle und Biomasse, top agrar, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 2002

Offermanns H.: Aliphaten: Lange Stiefkinder der industriellen Chemie, Nachrichten aus der Chemie 61, Februar 2013

Oliveira, I., Blöhse, D., Ramke, H. G.: Hydrothermal carbonization of agricultural residues. Bioresource Technology. Ausgabe 142, Seiten 138 - 146, 2013

Otto, A.; Güßbacher, D.; Conrad, J.: Möglichkeiten des Einsatzes von Eisenhydroxid für die Bindung von Schwefelwasserstoff in Anaerob-Prozessen <http://www.deutsche-zeolith.de/images/Schwefelwasserstoff%.pdf>. Berlin, 18.07.2014

Petersson, V.: Köhlerei im Schlussverkauf 19.09.2011.<http://www.moz.de/artikel-ansicht/dg/0/1/976705>. Märkisches Verlags- und Druckhaus GmbH & Co. KG., Eberswalde, 11.08.2014

Reinhold, G.; Riedel R., Zorn, W.; König V.: Merkblatt Eigenschaften von Biogasgülle, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, September 2012

Richtlinie 2002/32/EG Des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Mai 2002 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung

Rossow, N.: Verfahren und Vorrichtung zur Erhöhung der Besiedlungsdichte von methanbildenden Bakterienstämmen in Biogasfermentern
<http://www.google.com/patents/EP2314666A1?hl=de&cl=de>.EP20100013957, 2011,
 26.08.2014

Rostek S.; Ehrhard, G.: Bewertung der Beschlussfassung zum EEG 2014 der Bundesregierung [http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Homepage/\\$file/14-06-27%20EEG%20Synopse%20Bundestagsbeschluss_final.pdf](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Homepage/$file/14-06-27%20EEG%20Synopse%20Bundestagsbeschluss_final.pdf).
 Fachverband Biogas e.V. Stand: 27.06.2014, 26.08.2014

Rödger J.-M.; Ganagin W.: Steigerung des Biogasertrages durch die Zugabe von Pflanzenkohle, Müll und Abfall 9, Göttingen, Fachgebiet nachhaltige Energie- und Umwelttechnik NEUTec, 2013

Schmidt, H. P.: European Biochar Certificate, <http://www.european-biochar.org/de/laboratories>. Januar 2013, 19.07.2014

Schmidt, H. P.: European Biochar Certificate. Richtlinien für die Produktion von Pflanzenkohle, Biochar Science Network (Hrsg.), Version 4.2 - 13.06.2012, 15.07.2014

Schmidt, H.P.: Pflanzenkohle, eine Schlüsseltechnologie zur Schließung der Stoffkreisläufe. Ithaka Journal. Seiten 75–79, Delinat-Institut für Ökologie und Klimafarming, Arbaz (Schweiz), 2012 A

Schmidt H.P.: Pflanzenkohle. Ithaka Journal 1. S. 75-82. Arbaz (Schweiz): Delinat Institut für Ökologie und Klimafarming, 2011

Schottdorf, B.: Verkauf Pflanzenkohle Pur Juni 2014
http://www.carbon-terra.eu/de/pflanzenkohle/verkauf/pflanzenkohle_pur. 04.09.2014

Schröder C.: Die organische Frühjahrsdüngung richtig berechnen. Deutsche Saatveredelung AG. Innovation. Seiten 12 - 14, April 2012

Schweder, P.: Düngung: Hinweise und Richtwerte für die landwirtschaftliche Praxis: Leitfaden zur Umsetzung der Düngeverordnung, Rostock, 01.10.2004

Sehn, W.; Gerber, H. Pyrolyse mit flammenloser Oxidation kombinieren, eBWK, Bd. 59 Nr. 10, 2007

SENA-HERBAL: SENA -Premium - gemahlene Kohle medizinisch - E153- (1kg),
<http://www.amazon.de/SENA-Premium-gemahlene-Kohle-medizinisch/dp/B00L8BBR5W>. Detrate, 28.08.2014

Stieg, M.: Untersuchungen einer Biogasanlage im Hinblick auf verbesserte Biogasproduktion durch Zusatzmittel, Irdning, 2006

Verordnung (EG) Nr. 1831/2003 Des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. September 2003 über Zusatzstoffe zur Verwendung in der Tierernährung

Weiß, U.; Klug, A.; Haubold-Rosar, M.; Zeitz, J.: Zur Wirkung von Biokohle-Substraten auf den Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalt ertragsschwacher Acker- und Kippenböden der Lausitz - Ergebnisse aus Feldversuchen. Jahrestagung der DBG. Titel der Tagung: Böden - Lebensgrundlage und Verantwortung, 07.-12.09.13, Rostock.

Wistuba, E.; Markiel, W.: Qualitätskriterien - oder was ist bei Aktivkohle zu beachten
<http://www/etc-gmbh.de/pdf/qualitaetskriterien.pdf>. Bädertechnik, Archiv des Badewesens 11 2004, 13.08.2014

Zühlke M.: Bioenergy GmbH 2010.<http://www.bioenergygmbh.de>. 30.06.2014

8. Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

Abbildungen

Abb. 1: Aktueller Verfahrensablauf an der BGA Ivenack (Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)	10
Abb.2: Zukünftiger Verfahrensablauf an der BGA Ivenack (Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)	12
Abb.3: Nährstoffkomponenten in verschiedenen organischen Düngemitteln (Miehlich, 2009)	16
Abb.4: getrockneter Gärrest der Bioenergy GmbH (Zühlke, 2010)	17
Abb.5: Schema der Köhlerei „Neue Hütte“ (Kaltschmitt, 2009)	21
Abb.6: Vergleich von konventioneller Flamme und Flox-Flamme (Sehn, 2007)	22
Abb.7: Vergleich der Substrate und HTC-Kohlen mit Braunkohle im van Krevelen Diagramm (Oliveira, 2013)	23
Abb.8: Korrelation von Kohlenstoffgehalt zu Brennwert (Oliveira, 2013)	24
Abb.9: Verknüpfung von Biogas- und HTC-Verfahren (Oliveira, 2013)	25
Abb.10: Van-Krevelen-Diagramm mit Grenzwerten für den Einsatz von Pflanzenkohlen als Bodenverbesserer (Glaser, 2010)	27
Abb.11: Anteil polyaromatischer Kohlenstoff (Black Carbon) bei unterschiedlichen Verfahren (Glaser, 2010)	28
Abb.12: Lagerung des getrockneten Gärrestes am Standort Ivenack (eigene Darstellung)	38
Abb.13: Partikelgrößenverteilung des getrockneten Gärrestes (eigene Darstellung)	41

Abb.14: Verteilungsdichte des getrockneten Gärrestes (eigene Darstellung)	42
Abb.15: Van-Krevelen-Diagramm mit Grenzwerten für den Einsatz von Pflanzenkohlen als Bodenverbesserer (eigene Bearbeitung des Van-Krevelen-Diagramms aus Glaser, 2010)	44
Abb.16: Partikelgrößenverteilung feuchter Igniscum-Kohle (eigene Darstellung)	46
Abb.17: Verteilungsdichte feuchter Igniscum-Kohle (eigene Darstellung)	46
Abb.18: Partikelgrößenverteilung absolut trockener Igniscumkohle (eigene Darstellung)	47
Abb.19: Verteilungsdichte absolut trockener Igniscumkohle (eigene Darstellung)	47
Abb.20: Pyreg-Kohle aus Igniscumpellets (eigene Darstellung)	48
Abb.21: Vergleich von getrockneter und feuchter Kohle (eigene Darstellung)	48
Abb.22: Preisentwicklung ausgewählter Düngemittel (eigene Darstellung aus Daten des LALLF, 2014)	50
Tabellen	
Tab.1: Wärmenutzung an der BGA Ivenack (Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)	11
Tab.2: Aktueller Stand der Energiebilanz der BGA Ivenack (eigene Darstellung aus Faustzahlen und Daten der Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)	12
Tab.3: Variante 1 der Energiebilanz der BGA Ivenack (eigene Darstellung aus Faustzahlen und Daten der Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)	13
Tab.4: Substrat-Input in die BGA-Ivenack (eigene Darstellung aus Daten der Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)	14

Tab.5: Verweilzeiten der Substrate an der BGA Ivenack (eigene Darstellung aus Daten der Kompetenzzentrum Regiostrom Ivenack GmbH)	14
Tab.6: Übersicht thermochemischer Umwandlungsverfahren (Kaltschmitt, 2009)	20
Tab.7: Kohlenstoffanreicherung durch Zugabe von Pflanzenkohledünger auf unterschiedlichen Böden der Lausitz (Weiß, 2013)	30
Tab.8: Ausschlusskriterien für Pflanzenkohle zur Anwendung als Lebensmittelfarbstoff (eigene Darstellung aus Daten von Kuhnert, 2008)	37
Tab.9: Untersuchungen und Methoden für die Bestimmung relevanter Parameter des getrockneten Gärrestes (eigene Darstellung aus dem Prüfbericht der LUFA Rostock, 2014)	39
Tab.10: Ergebnisse der Gärrestuntersuchung (eigene Darstellung aus Daten des Prüfberichts der LUFA, 2014)	40
Tab.11: Spurennährstoffgehalte des getrockneten Gärrestes (eigene Darstellung aus Daten des Prüfberichts der LUFA Rostock, 2014)	41
Tab.12: Gegenüberstellung der Analyseergebnisse der Igniscumkohle und den Anforderungen des EPZ (eigene Darstellung bzw. Berechnung aus Daten des Prüfberichts der Wessling GmbH und Schmidt, 2014)	42
Tab.13: Molares H/C - und O/C - Verhältnis der Igniscumkohle (eigene Berechnung aus Daten des Prüfberichts der Wessling GmbH, 2014)	44
Tab.14: Anforderungen an Grill-Holzkohlebriketts (eigene Darstellung aus Daten der DIN EN 1860-2)	45
Tab.15: Anforderungen an Lebensmittel- und Futtermittelzusatzstoffe (eigene Darstellung aus Daten des Prüfberichtes der Wessling GmbH,	

2014; Kuhnert, 2008; Richtlinie 2002/32/EG)	45
Tab.16: Wassergehalt und Heizwert von Pflanzenkohle und Gärrest (eigene Darstellung der Ergebnisse der Hochschuluntersuchung, 2014 und CONPOWER, 2012)	49
Tab.17: Preise für mineralische Düngemittel (eigene Darstellung aus Daten des LALLF, 2014)	50
Tab.18: Ergebnis zur Berechnung des theoretischen Wertes des getrockneten Gärrestes (eigene Darstellung aus Daten des LALLF und den Ergebnissen des Prüfberichtes der LUFA Rostock, 2014)	51
Tab. 19: Zusammensetzung der Selbstkosten (eigene Darstellung)	52
Tab. 20: Berechnung der Personalkosten auf Grundlage einer 450 Euro-Stelle mit 8,50 € Lohn pro Stunde (eigene Darstellung)	52
Tab. 21: Verkaufspreisberechnung für Gärreste als Gartendünger (eigene Darstellung)	53

Anhang I Siebanalyse Pflanzenkohle

18. Jul Kohle (Igniscum Pellets) Feuchte: 40 %

Versuch 1: Einwaage 100,03 g, Amplitude 1,5 mm, Zeit 7 min.

di,min (µm)	di,max (µm)	m (g)	m (%)	qi (%/µm)	Qi (%)	1-Qi (%)
0	63	0,00	0	0,000	0	100
63	125	0,00	0	0,000	0	100
125	250	5,17	5	0,041	5	95
250	500	33,18	33	0,133	39	61
500	1000	30,26	30	0,061	69	31
1000	2000	15,67	16	0,016	85	15
2000	4000	7,87	8	0,004	93	7
4000	6000	7,39	7	0,004	100	0
Feuchte: 40 %		99,54				

Versuch 2: Einwaage 100,04 g, Amplitude 1,5 mm, Zeit 15 min.

di,min (µm)	di,max (µm)	m (g)	m (%)	qi (%/µm)	Qi (%)	1-Qi (%)
0	63	0,04	0	0,001	0	100
63	125	0,05	0	0,001	0	100
125	250	13,67	14	0,109	14	86
250	500	31,91	32	0,128	46	54
500	1000	26,80	27	0,054	73	27
1000	2000	13,97	14	0,014	87	13
2000	4000	7,50	8	0,004	94	6
4000	6000	5,80	6	0,003	100	0
Feuchte: 40 %		99,74				

Versuch 3: Einwaage 100,61 g, Amplitude 1,5 mm, Zeit 30 min.

di,min (µm)	di,max (µm)	m (g)	m (%)	qi (%/µm)	Qi (%)	1-Qi (%)
0	63	0,00	0	0,000	0	100
63	125	0,04	0	0,001	0	100
125	250	16,64	17	0,133	17	83
250	500	33,15	33	0,133	50	50
500	1000	24,67	25	0,049	74	26
1000	2000	13,65	14	0,014	88	12
2000	4000	7,74	8	0,004	96	4
4000	6000	4,18	4	0,002	100	0
Feuchte: 40 %		100,07				

22. Jul Kohle (Igniscum Pellets) Getrocknet

Versuch 4: Einwaage 106,07 g, Amplitude 1,5 mm, Zeit 7 min.

di,min (µm)	di,max (µm)	m (g)	m (%)	qi (%/µm)	Qi (%)	1-Qi (%)
0	63	4,67	5	0,074	4	96
63	125	7,73	8	0,125	12	88
125	250	17,38	17	0,139	28	72
250	500	21,40	21	0,086	49	51
500	1000	28,17	28	0,056	75	25
1000	2000	13,70	14	0,014	88	12
2000	4000	6,65	7	0,003	95	5
4000	6000	5,74	6	0,003	100	0
getrocknet		105,44				

Versuch 5: Einwaage 111,37 g, Amplitude 1,5 mm, Zeit 15 min.

di,min (µm)	di,max (µm)	m (g)	m (%)	qi (%/µm)	Qi (%)	1-Qi (%)
0	63	4,72	5	0,075	4	96
63	125	7,44	7	0,120	11	89
125	250	16,34	16	0,131	26	74
250	500	21,19	21	0,085	45	55
500	1000	28,99	29	0,058	71	29
1000	2000	15,92	16	0,016	86	14
2000	4000	8,99	9	0,004	94	6
4000	6000	7,02	7	0,004	100	0
getrocknet		110,61				

Versuch 6: Einwaage 100,71 g, Amplitude 1,5 mm, Zeit 30 min.

di,min (µm)	di,max (µm)	m (g)	m (%)	qi (%/µm)	Qi (%)	1-Qi (%)
0	63	4,44	4	0,070	4	96
63	125	8,76	9	0,141	13	87
125	250	22,16	22	0,177	35	65
250	500	23,93	24	0,096	59	41
500	1000	24,71	25	0,049	84	16
1000	2000	9,37	9	0,009	93	7
2000	4000	5,25	5	0,003	98	2
4000	6000	1,96	2	0,001	100	0
getrocknet		100,58				

Anhang II Siebanalyse Gärrest

12.08.2014 getrockneter Gärrest Ivenack

Versuch : Einwaage g, Amplitude 1,5 mm, Zeit 7 min.

di,min (µm)	di,max (µm)	m (g)	m (%)	qi (%/µm)	Qi (%)	1-Qi (%)
0	63	0,05	0	0,001	0	100
63	125	0,08	0	0,001	0	100
125	250	0,12	0	0,001	0	100
250	500	0,21	0	0,001	0	100
500	1000	0,88	1	0,002	1	99
1000	2000	14,45	14	0,014	16	84
2000	4000	62,2	61	0,031	77	23
4000	6000	23,49	23	0,012	100	0
Feuchte		101,48				

Versuch : Einwaage 102,73 g, Amplitude 1,5 mm, Zeit 15 min.

di,min (µm)	di,max (µm)	m (g)	m (%)	qi (%/µm)	Qi (%)	1-Qi (%)
0	63	0,13	0	0,002	0	100
63	125	0,18	0	0,003	0	100
125	250	0,17	0	0,001	0	100
250	500	0,31	0	0,001	1	99
500	1000	0,97	1	0,002	2	98
1000	2000	16,67	16	0,017	18	82
2000	4000	62,49	61	0,031	79	21
4000	6000	21,72	21	0,011	100	0
Feuchte		102,64				

Versuch : Einwaage 101,36 g, Amplitude 1,5 mm, Zeit 30 min.

di,min (µm)	di,max (µm)	m (g)	m (%)	qi (%/µm)	Qi (%)	1-Qi (%)
0	63	0,08	0	0,001	0	100
63	125	0,12	0	0,002	0	100
125	250	0,12	0	0,001	0	100
250	500	0,23	0	0,001	1	99
500	1000	0,81	1	0,002	1	99
1000	2000	20,22	20	0,020	21	79
2000	4000	62,76	62	0,031	83	17
4000	6000	16,81	17	0,008	100	0
Feuchte:		101,15				

Erklärung über die selbstständige Anfertigung der Arbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Erik Thürke

Ort, Datum

Unterschrift