

Abschlussbericht zur Studie

Biomasse-Pyrolyse (Mai – Okt 2010)

Machbarkeitsstudie zum Einsatz einer innovativen Technologie zur Bioenergieerzeugung mittels Pyrolyse mit niedrigen Staubemissionen und hohem CO₂-Reduktionspotential

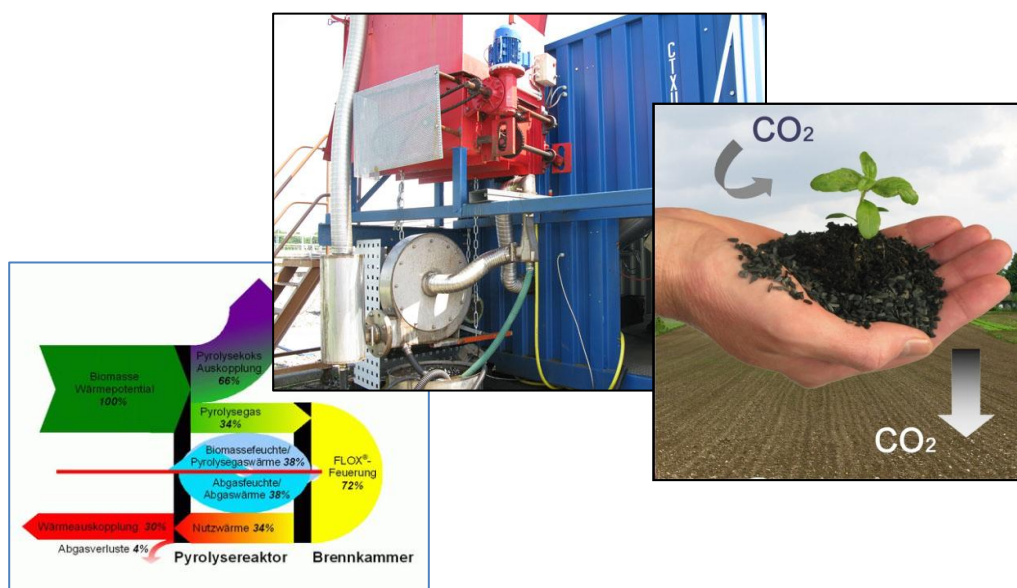
gefördert durch

**Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz
badenova AG & Co. KG**

Projektnummer: 2010-12

Projektleitung: Dr. Carola Holweg / Friedbert Schill

vorgelegt von Dr. C. Holweg



Inhaltsangabe

1. Projektbeschreibung

- 1.1. Einführung
- 1.2. Biomasse-Pyrolyse im *PYREG*-Verfahren
- 1.3. Life Food GmbH: Taifun-Tofu-Hersteller in Freiburg
- 1.4. Biokohle: Potential für die Bodenanwendung und den Klimaschutz
- 1.5. Projektziele und Vorgehensweise

2. Ergebnisse

- 2.1. Verhalten und Eignung von Okara im *PYREG*-Reaktor
- 2.2. Elementaranalyse von Okara-Biokohle
- 2.3. Erstuntersuchungen zur Okara-Biokohle-Bodenanwendung unter dem Aspekt „Kohlenstoff-Stoffwechsel“
- 2.4. Integrierfähigkeit, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit einer *PYREG*-Anlage bei Life Food GmbH

3. Zusammenfassung und Ausblick

4. Abkürzungen

5. Literaturliste

6. Abbildungen

1. Projektbeschreibung

1.1. Einführung

Im Zentrum der einjährigen Machbarkeitsstudie stand ein Pyrolyse-Verfahren, das als innovative Bioenergie-Technik zur Verarbeitung von Restbiomasseaufkommen in einem regional ansässigen Betrieb zum Einsatz kommen könnte. Die erst 2006 patentierte Pyrolysetechnik wurde bekannt durch ihre guten Stoff- und Klimabilanzen bei der Nutzung problematischer Restbiomassen. In der Firma Life Food GmbH im Industriegebiet Freiburg-Hochdorf fallen jährlich beträchtliche Restmengen der Sojaverarbeitung an (Okara, d.h. vorwiegend Schalenreste der Sojabohne), die als Ausgangsstoff für eine PYREG-Anlage in Frage kommen.

Ein Energiegewinn aus der Pyrolyse entsteht bei der Verbrennung des Synthesegases. Zum anderen wird die kohlenstoffreiche Biomasse zum carbonisierten Nebenprodukt Biokohle umgesetzt. Nicht nur die Bioenergiegewinnung, sondern auch die Biokohleproduktion stellt dabei ein Wertschöpfungspotential mit Klimarelevanz. Biokohle gewinnt derzeit als Struktur- und Bodenhilfsstoff ein immer größeres Interesse hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Bodenverbesserung. Abhängig vom jeweiligen Boden kann Biokohle zu einem positiven Nährstoffhaushalt und zur Humusentwicklung beitragen, sowie die Auswaschung von Stoffen wie Nitrat verringern. Mit dem langsamen Abbau der Biokohle und der damit verbundenen langfristigen Festlegung von CO₂ verbinden sich daher Chancen für den Klimaschutz. Klimarelevant ist auch die PYREG-Technik selbst, da es in Bezug auf die prozessbedingten Abgase ein besonders schonendes Verfahren darstellt. Aufgrund der Boden-Rezyklierung des Kohlenstoffs in Form der Biokohle bestehen gute Chancen für den Klimaschutz sowie für geschlossene Stoffkreisläufe basierend auf Restbiomassen. Die Frage der Biomasse-Verkohlung im Sinn eines regionalen Stoffkreislaufs in der Region Freiburg wurde als Projekt innerhalb des badenova Innovationsfonds erstmalig bearbeitet.

1.2. Biomasse- Pyrolyse im *PYREG*-Verfahren

Das Pyrolyseverfahren von *PYREG* (www.PYREG.de) war in den letzten Jahren an der FH Bingen entwickelt worden zum Zweck der Pyrolyse von biologischen Abfall- und Reststoffen. In landwirtschaftlich geprägten Räumen gibt es viele Abfall- oder Nebenprodukte, die als regenerative Brennstoffe genutzt werden könnten. Dazu zählen beispielsweise Grünschnitt, Stroh, Rapspresskuchen, Trester oder Klärschlamm als kohlendioxidneutrale Bioenergieträger, wovon insbesondere Klärschlamm ganzjährig

verfügbar ist. Das 2006 patentierte *PYREG*-Verfahren mit nachgelagerter flammloser Oxidation (FLOX) (Abb. 1) zur Energieerzeugung lieferte in einem Pilotprojekt mit Klärschlamm sehr überzeugende Ergebnisse. Im *PYREG* Biomasse-Pyrolysereaktor (Abb. 2, 3) werden die chemischen Verbindungen der Biomasse thermisch aufgespalten - pyrolysiert - und das dabei entstehende Pyrolysegas mit flammloser Oxidation im innovativen FLOX-Brenner (FLOX = flammlose Oxidation) bei geringen Emissionen verbrannt. „Normalerweise sind bei der thermischen Verwertung solcher Biomassearten zum einen der hohe Ascheanteil, der für hohe Staubemissionen und Verschlackungsprobleme verantwortlich ist, und zum anderen der Stickstoffgehalt, der an der Oxidation teilnimmt und damit die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte erschwert“ (2008 Zitat Prof. Dr. Winfried Sehn, FH Bingen; www.innovations-report.de). Generell hat die Biomasse-Verkohlung, verglichen mit der natürlichen Verrottung oder Verbrennung, nur sehr geringe Gas- bzw. Feinstaub- und Stickoxid-Emissionen. Insbesondere beim *PYREG*-Verfahren werden jedoch Staubemissionen durch den indirekten Ausbrand des Festbrennstoffes im Gasbrenner reduziert, während das FLOX[®]-Verfahren mit interner Rauchgasrückführung die thermische NO_x-Bildung verhindert (Abb. 4). Die Wärme könnte über Stirling- oder Dampfmaschinen zur Stromerzeugung genutzt oder zur Trocknung der Biomasse eingesetzt werden. Das Verfahren erlaubt Optimierung in zweierlei Richtungen: Eine optimale Energieausbeute aus der Biomasse bei geringem Kohlenstoffanteil in der Asche oder einen hohen Kohlenstoffanteil bei reduzierter Energieerzeugung. Wird der Ertrag an thermischer Energie auf ein Drittel des Heizwertes der eingesetzten Biomasse abgesenkt, bleiben 27 Prozent des Kohlenstoffs in fester Form zusammen mit den Mineralstoffen in der Asche übrig. In Biokohle aus Pyrolyse wird daher ein beträchtlicher Teil des von Pflanzen aufgenommenen CO₂ fest gebunden (Abb. 5.).

Dipl.-Ing. Helmut Gerber war an der Entwicklung des *PYREG*-Verfahrens maßgeblich beteiligt und beschreibt die Vorteile gerade für problematische Biomassen folgendermaßen (www.ithaka-journal.net/pyrolysereaktor): „Ein Einsatz von problematischen Biomassen ist in den meisten Anlagen nicht möglich. Das Vergasungsgut wird im Vergaser kleiner Leistungsklasse meist allein durch Gravitationskräfte bewegt, wodurch es bei Abweichungen von der idealen Brennstoffbeschaffenheit und Zusammensetzung leicht zu Betriebsstörungen durch Brückenbildung und Verschlackung kommt.“

Der *PYREG*-Reaktor bietet hier einen neuen Lösungsansatz, indem ein sehr kompakter und kostengünstig herzustellender Pyrolysereaktor kleiner Leistung mit bewegtem Vergasungsbett mit einer besonders schadstoffarmen FLOX-Feuerung kombiniert wird. Durch die direkte thermische Verwertung kann auf eine Gasreinigung und eine

wirkungsgradmindernde Gaskühlung verzichtet werden. Durch die FLOX-Verbrennung sind sehr geringe Abgasemissionen insbesondere im Bereich der Stickoxide möglich, die mit anderen Verfahren nicht zu realisieren sind.

Da die für die Pyrolyse benötigte Prozesstemperatur deutlich unterhalb der Ascheerweichungstemperatur der einzusetzenden Brennstoffe liegt, sind im Gegensatz zu bekannten Verfahren keine Betriebsstörungen durch aufschmelzende Aschen zu beobachten. Des Weiteren kann auf den Einsatz von kostenintensiven Hochtemperaturwerkstoffen verzichtet werden. Bedingt durch das Verfahrensprinzip sind die Staubemissionen wesentlich geringer im Vergleich zu einer herkömmlichen Biomassefeuerung ähnlicher Leistung, die dem bisherigen Stand der Technik entspricht. [...]. Ein mit Pyrolysegas betriebenes Blockheizkraftwerk mit Verbrennungsmotor in der Leistungsklasse <50 kWel wird zurzeit von keinem Hersteller marktreif angeboten.“

Das Verfahren der energetischen Nutzung von Bioenergieträgern eignet sich sehr gut zum dezentralen Einsatz, dort, wo die Brennstoffe verfügbar sind und Energie benötigt wird. Das erspart weite Transportwege und entlastet zusätzlich die Umwelt. So hat das Verfahren das Potential zur umweltgerechten und ökonomischen Nutzung von Biomassereststoffen. Es ist zudem sehr flexibel gegenüber dem Biomasseangebot und verträgt feuchtes Material bis zu 50 % TS(Trockensubstanz)-Gehalt. Derzeit läuft ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Projekt, wo die Anlage über einen Dampfprozess als Blockheizkraftwerk aufgebaut wird.

1.3. Life Food GmbH: Taifun-Tofu-Hersteller in Freiburg

Die Life Food GmbH Taifun-Tofuprodukte (Abb. 6-9) produziert rein pflanzliche Lebensmittel in Bioqualität und beliefert seit nunmehr über 20 Jahren Bio-Großhändler in Deutschland und 13 anderen europäischen Ländern. Das Unternehmen produziert an seinem Standort in Freiburg mit derzeit rund 160 Mitarbeitern rund 3.300 t Tofuspezialitäten pro Jahr und ist mit der Marke TAIFUN Marktführer für Bio-Tofu in Europa. Mit einem seit Jahren nachhaltigen Wachstum um etwa 10 % pro Jahr steigt stetig der Bedarf an Bio-Sojabohnen, der durch Anbauprojekte in der Region, sowie in Frankreich, Italien und Österreich abgedeckt wird.

In der Firmenphilosophie stehen Qualität und Nachhaltigkeit an oberster Stelle. Zur Bewertung und Verbesserung von Umweltauswirkungen wurde bereits Ende der 90er ein Umweltmanagementsystem eingeführt hat. Im Rahmen der Umweltauswirkungen steht der Energieverbrauch (Gas und Strom) im Mittelpunkt. Entsprechend der Firmenphilosophie gibt es eine große Offenheit sowie ein aktives Zugehen auf neue

Technologien, die eine emissionsarme und klimaneutrale Energienutzung ermöglichen. Dieses Interesse konnte ideal mit einer Studie zur Abschätzung des Potentials einer innovativen Technologie wie die der PYREG-Anlage verknüpft werden.

1.4. Biokohle: Potential für die Bodenanwendung und den Klimaschutz

Bodenanwendung

Die Idee der Nutzung von „biochar“ zur Fruchtbarkeitssteigerung von Böden (biochar ist die meistgebräuchliche Bezeichnung für pyrogene Biokohle oder Holzkohle) wird seit der näheren Erforschung von Terra Preta¹ (Abb. 10, 11) intensiv weiterverfolgt und mittlerweile weltweit an vielen anderen Standorten erprobt (2002 Glaser et al., 2009 Biochar for Environmental Management). Terra Preta wurde bereits von Indios vor 700 Jahren im Amazonasgebiet eingesetzt, um mit Holzkohle Urwaldböden dauerhaft fruchtbar zu machen und die Auswaschung von Nährstoffen zu verhindern.

Mit den heutigen technischen Entwicklungen und dem Ruf nach innovativen Verfahren zur emissionsarmen und effizienten Restbiomasseverwertung bekam das Interesse an einem Biokohle-Bodenkonzept verstärkten Auftrieb. Wachsende Nachfrage nach innovativen Verwertungstechniken für Restbiomassen einerseits und die immer lauter werdende Debatte zu Humus- und Kohlenstoffverlusten heutiger Böden beschleunigen diese Entwicklung. Auch auf mögliche Gefahren wird aufmerksam gemacht, wenn es beispielsweise um den Missbrauch guter Ansätze der Terra preta Technologie geht und dies auf Kosten natürlicher Ressourcen und ärmerer Länder (s. Abholungsthematik in den Tropen; www.biofuelwatch.org.uk).

Der Nutzen von Biokohle ist im Hinblick auf einen Ertragszuwachs unbestritten, hängt jedoch auch von den Vorbedingungen des Bodens sowie dem Klima und anderen Parametern ab wie zum Beispiel der Art der Ausgangssubstrate und Technik der Carbonisierung (Verkohlung). Eine Verbesserung der Bodenfunktion durch Biokohlegaben wurde vor allem bei ärmeren Böden berichtet (2010 Verheijen et al.), da defizitäre Nährstoff- und Wasserversorgung hier besonders zu Buche schlagen.

Auch andere Faktoren die üblicherweise gut über Biokohle-Kompost/ (org.Dünger+Mikroorganismen)-Mischungen erreicht werden (Stichwort „Bioaktivierung“ oder „Biofilm“), können die Wirksamkeit von Biokohle stark beeinflussen und positive Bodenreaktionen bzw. Wachstumsverbesserungen frühzeitig einleiten. Erste Beispiele für

¹ Terra Preta do Indio (portug. verbrannte Erde; Schwarzerden, entdeckt im Amazonasgebiet als Produkt einer Technik zur Bodenamelioration unter Zuhilfenahme biotischer (Exkrememente, Küchenabfälle usw.) wie auch abiotischer (Holzkohle) Abfälle, entstanden in präkolumbianischer Zeit; ähnliche Bodenformationen, aber nicht anthropogenen Ursprungs sind Czernozems, Schwarzerdeböden wzB. in der Ukraine)

Versuche in Deutschland, Biokohle in diesem Zusammenhang zu vermarkten sind: Palaterra® (s. <http://de.juwi.com>), www.swiss-biochar.com, www.triaterra.com, www.horstwagner.de.

Der messbare Zuwachs bzw. Mehrertrag in der Pflanzenmasse schwankt weltweit zwischen verschiedenen Standorten, je nach Bodenausgangslage, Mischung der Biokohle mit Dünger, Pflanzenart und Ausgangssubstrat für die Biokohle zwischen wenigen Prozent (2009 Biochar for Environmental Management), bis zu mehrfachem Zuwachs (Abb. 12; www.biochar.info; 2010 Pratt and Moran).

Klimaschutzpotential

Im Prozess der Verkohlung liegt im Vergleich zu herkömmlichen Bioenergie-Anlagen ein hohes CO₂-Einsparpotential. Anders als bei der direkten Verbrennung von Biomasse oder der Methanverbrennung nach herkömmlicher Biogaserzeugung wird das in der Biomasse enthaltene CO₂ nicht 1:1 wieder in die Atmosphäre abgegeben (Abb. 13), sondern bleibt in der Endbilanz zu fast 2/3 im Festkörper Biokohle gebunden (Abb. 14). Eine Bodenrückführung der Biokohle beinhaltet daher noch weitere Chancen für das Klima. Im Fall der Pyrolyse-Technik entsteht ein Kohlenstoffkoks, der sich nur sehr langsam zersetzt. Geht man für eine Modellrechnung von einer jährlichen Verwertung von 800 t TS-Biomasse aus (TS = Trockensubstanz), können mehr als 400 t CO₂ pro Jahr im Fall einer Bodenanwendung sequestriert werden. Beim Pyrolyse-Verfahren kann daher ein Drittel mehr klimawirksames Treibhausgas als bei herkömmlicher Bioenergiegewinnung eingespart werden.

Berechnung CO₂-Bilanz Grüngutpyrolyse mit Hilfe der PYREG-Anlage

Im Berechnungsbeispiel der CO₂-Bilanz für Grüngut kann die gesamte Verwertungskette von der Ernte der Biomasse bis zur Einbringung in den Boden analysiert werden. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse befindet sich in der folgenden Tabelle (Tabelle 1). Die Berechnung von Helmut Gerber (www.ithaka-journal.net/pyrolysereaktor) bezieht sich auf ein Grüngut bzw. landwirtschaftliches Nebenerzeugnis wie Trester oder Rapskuchen mit einer Feuchte von 100%:

Nr.	Bezeichnung Arbeitsschritt*	CO ₂ -Emission in kg CO ₂ / t Grüngut (tr)
1.	Bereitstellung, Ernte	2,4
2.	Transport zur Grüngutannahmestelle	2,6
3.	Aufbereitung durch Häcksler	9,4
4.	Pyrolyse – thermischer Verbrauch	1281
5.	Pyrolyse – elektrischer Verbrauch	31
6.	Transport zum Landwirt	1,2
7.	Ausbringen durch Landwirt	3
A	Summe CO ₂ -Aufwand	1.330
B	CO ₂ -Einlagerung Grüngut in der Wachstumsphase	1.830
C	CO ₂ -Sequestrierung pro Tonne Grüngut	500

Tabelle 1: CO₂-Bilanz Grüngutpyrolyse, s. auch **Abb. 5**.

[1] Bereitstellung, Ernte: Rasenmäher, Freischneider, Motorsäge: 0,22l Kraftstoff / MWh Biomasse [Beilharz 2003].

[2] Transport zur Verwertungsstelle: PKW, Fahrstrecke 10 km, spezifische Emission 260 g/t km [Schwertransportmagazin Nr.14 2007].

[3] Mechanische Aufbereitung, Mobilhacker: 0,85l Kraftstoff/MWh Biomasse [Briem et.al IER /DLR/LEE 2004].

[4] Pyrolyse, Massenbilanz BioChar/Grüngut = 0,3 [Messwert Technikumsanlage FH-Bingen 2007]

[5] Pyrolyse, elektrische Leistung Nebenaggregate: 2 kW, CO₂ Bilanz elektrische Energie: 550 g CO₂/kWh [VDEW 2005].

[6] Transport zum Landwirt: LKW, 12,5 t, Fahrstrecke 15 km, 79 g/t km [Schwertransportmagazin Nr.14 2007].

[7] Ausbringung durch Landwirt: Traktor, Fahrstrecke 20 km, 150 g/t km. [Schwertransportmagazin Nr.14 2007].

.....
Der Verwertungsweg „Biomasse-Biokohle-Boden“ hat daher in mehreren Richtungen hohe Klimaschutzpotentiale. Zu den Hauptvorteilen zählen die emissionsarmen Herstellungsverfahren, die effiziente stoffliche Nutzung von Restbiomassen bei gleichzeitigem Energiegewinn, die Möglichkeit einer mittel- bis langfristigen Festlegung von CO₂, sowie Wirkungen auf die Bodenökologie und Bodenphysik mit positiven Folgen für THG(Treibhausgas)-Emissionen, Boden- und Wasserschutz. Neue Beobachtungen aus der Bodenforschung legen die Vermutung nahe, dass sich Biokohle kompensatorisch auf (klimawirksame) Gasemissionen landwirtschaftlicher Böden auswirkt, wobei die einzelnen, mikrobiellen Mechanismen noch nicht geklärt sind (beispielsweise 2010 Vortrag Dr. Claudia Kammann, Universität Giessen; Workshop „Biokohle und Co“ gefördert d. Umweltministerium in Hessen). Da klimarelevante Bodenemissionen derzeit als sehr wichtig erkannt werden, bemüht man sich intensiv um ein näheres Verständnis dieser Vorgänge (s. vTI; ZALF und weltweite Forschungsprojekte).

Auch andere Verfahren wie das der hydrothermalen Carbonisierung (HTC) werden zur Verkohlung von Restbiomassen eingesetzt. Das über einen Dampfdruckprozess laufende Verfahren wird hier nicht weiter thematisiert, seine kohleartigen Endprodukte werden derzeit jedoch ebenfalls für eine Bodenanwendung kritisch beleuchtet, da die herstellungsbedingten Produkteigenschaften erheblich von pyrolytischen Biokohlen abweichen. Hauptblickwinkel war bisher die Verwendung als Brennstoff zum Ersatz fossiler Heizmaterialien, eine Nutzbarkeit für die Bodenverbesserung ist jedoch bei Weitem nicht ausgeschlossen.

1.5. Projektziele und Vorgehensweise

Die Machbarkeitsstudie sollte grundlegende Fragen klären, ob sich ein etwa 3-jähriges Pilotprojekt basierend auf der Pyrolyse von Okara und in Verbindung mit einer möglichst effektiven Nutzung von Energie, Biomasse sowie Biokohle anbieten würde. Die Fragestellung stützte sich hauptsächlich auf die Eingangsgrößen PYREG-Pilotanlage, Okara als schwer verwertbarer biogener Faserstoff bei der Firma Life Food GmbH und die regionale Verwertung von Biokohle. Außer der Behandlung der technisch-stofflichen Fragen sollte auch eine wirtschaftliche und ökologische Beurteilung vorgenommen werden.

Um die Perspektiven für ein größeres Biomasse-Pyrolyse-Projekt einzuschätzen, sollten die grundsätzlichen Bedingungen für eine erfolgreiche Pyrolyse von Okara sowie Integration einer Anlage bei der Fa. Life Food GmbH geprüft werden. Hierzu waren Pyrolyse-Tests vorgesehen, die zeigen sollten, ob das Material, hauptsächlich bestehend aus Sojabohnenschalen, in der vorliegenden Konsistenz und Feuchtigkeit direkt verwertbar ist, ob Vortrocknung nötig wäre und wie der Abgasverlauf während des Pyrolyseprozesses zu bewerten ist. Zu diesem Zweck sollte frisch gewonnene Okara an die Pilotanlage bei Bingen gebracht und in einem mehrstündigen Reaktorlauf getestet werden.

Die zweite Betrachtung sollte sich auf die grundsätzlichen Gegebenheiten für eine sinnvolle Integration einer Anlage in der Fa. Life Food GmbH beziehen. Hierfür sollte ein Inspektionsbesuch von Mitarbeitern der Fa. PYREG GmbH unter Berücksichtigung von Stoffstromdaten und raum- und energietechnischen Fragen durchgeführt werden. Bei positiver Beurteilung sollte die Möglichkeit der Hinzunahme von angeliefertem Klee gras als Pyrolysiergut geprüft werden (Schill-Hof), womit bei einer geplanten Aufbringung des Biokohleprodukts auf die betriebseigenen Ackerflächen ein weiterer Stoffkreislauf integriert wäre.

Als Vortest für mehrjährige Bodenuntersuchungen nach Biokohlegaben auf den landwirtschaftlichen Flächen und besonders im Hinblick auf den Kohlenstoffverbleib sollten an der Universität Freiburg, Institut für Forstliche Bodenkunde, nicht nur Bodenproben genommen, sondern auch Respirationsanalysen durchgeführt werden.

2. Ergebnisse

2.1. Verhalten und Eignung von Okara im PYREG-Verfahren

Da für die Wärmegewinnung über die pyrolytische Nutzung von Okara große Abhängigkeiten von der Biomasse selbst bestehen, wurde ein Pyrolyse-Testlauf mit Okara in der 100 kW Pyreg-Pilotanlage durchgeführt. Okara fällt während der Tofuproduktion (Abb. 15) als Reststoff in frischem Zustand als gelblich flockige Masse (Abb. 16) mit einer Temperatur von ca. 60° C an. Feuchteuntersuchungen (Abb. 17) ergaben einen Trockensubstanz(TS)-Gehalt von 23,5 %. Brennwertanalysen von Okara in getrocknetem Zustand ergaben 19,4 J/g (Vergleich zu Stroh: 17 J/g; Holzpellets: 17,6 J/g).

Okara Frischmasse (ca. 700 Liter, TS-Gehalt 70%, Temp. 60° C), abgefüllt in eine Kunststoff Big Box (Abb. 18), wurden am 15.06.2010 bei der Fa. Taifun GmbH abgeholt. Aufgrund des warmen Sommertags kühlte die Masse nur langsam ab und war auch nach 4 h Transport bis zum Zeitpunkt des Pyrolysebeginns noch handwarm.

Kurzbeschreibung funktioneller Bestandteile der PYREG-Versuchsanlage (Container-aufbau, s. Abbildungen):

- a) Einfüllbehälter außerhalb des Containers, per Leiter erreichbar (Abb. 19 a)
- b) Förderrohr ausgehend vom Einfüllbehälter in den Innenraum des Containers (Abb. 19 b)
- c) Förderrohr mit 1,5 m Länge und ca. 40 cm Außendurchmesser mit einer Trocknungs-Temperatur von 450° C, die durch die vom Brenner zurückgeleiteten Abgase vorgehalten wird; das Förderrohr läuft leicht schräg nach oben (Neigungswinkel ~30°) (Abb. 19 c, Prof. W. Sehn, FH Bingen)
- d) Reaktorrohr mit 1,5 m Länge, ca. 50 cm Außendurchmesser und einem Temperaturgradienten von 450 - 800° C; Neigungswinkel (Transport von unten nach oben) ~30°(Abb. 19 d)

- e) Am Ende des Reaktorrohrs führt ein seitliches Auswurfrohr die entstehende Biokohle samt Restasche außerhalb des Containers, wo sie in einem offenen Behälter gesammelt wird (Abb. 19 e)
- f) Aus dem Reaktorrohr entweichen Synthese- bzw. Pyrolysegase, vorwiegend bestehend aus Kohlenmonoxid (CO), Wasserstoff (H₂), Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) sowie einer Reihe von höheren Kohlenwasserstoffen. Das Gasmisch wird in den anschließenden FLOX-Brenner geleitet und dort bei ca. 1000° C verbrannt (Abb. 19 f); Kontrollansicht in den Brenner (Abb. 19 g)

Okara-Pyrolyse im Versuchsreaktor

Die Okara wurde über das erste Förderrohr in den Innenraum des Containers eingeführt und dort in einem zweiten Förderrohr (Trockner) mit Abwärmeluft vorgetrocknet. Die vorgetrocknete Masse wird in das Reaktorrohr weiterbefördert und wird an dessen Ende je nach Transportgeschwindigkeit nach ca. 30 min ausgeschleust. Die heißen Brenngase, die sich während der Pyrolyse im Reaktorrohr bilden, werden in den FLOX-Brenner geleitet. Die Verbrennungsabgase werden über den Reaktor und Trockner geleitet, bevor sie über den Kamin an die Umgebung abgegeben werden.

Verhalten von Okara im Versuchsablauf

Während eines Testlaufs über ca. 1,5 h wurden Parameter wie Wärmeentwicklung, Abgaszusammensetzung und Beschaffenheit der Biokohle beobachtet. In diesem Zeitraum wurden über 100 Liter Okara Frischmasse pyrolysiert. Okara-Biokohle fiel als leichtes, feinkörniges Biokohlegranulat an. Das Mengenverhältnis Biomasse zu Biokohle konnte aufgrund der kurzen Versuchsdauer nicht quantifiziert werden. Für die Optimierung des Anlagenbetriebs hinsichtlich des Einsatzes von frischer Okara und die Quantifizierung der Kohlenstoff- und Energieeffizienz sowie der Betriebskosten sind mehrtägige Dauerläufe notwendig. Man kann jedoch sagen, dass sich frische Okara in Bezug auf die Transportierbarkeit und den Feuchtegehalt im Wesentlichen wie Klärschlammproben verhielt.

Emissionswerte

Generell gilt, dass die für den jeweiligen Biomassestoff idealen Pyrolysebedingungen durch wiederholtes Nachregeln der Sauerstoffzufuhr und der Geschwindigkeit der Förderschnecken eingestellt werden können. Während die Sauerstoffzufuhr die elementare Gaszusammensetzung im FLOX-Brenner regelt (hier vor allem NO_x),

bestimmt die Fördergeschwindigkeit im Trocknungs- und Reaktorrohr den Trocknungs- und Carbonisierungsgrad der Biomasse sowie die Gaszusammensetzung des Synthesegases vor der Einleitung in den FLOX-Brenner. Die Messwerte schwankten (wie üblich) während der frühen Phase des Testlaufs, stellten sich jedoch insgesamt so ein, dass die NO_x –Werte, aber auch die Werte anderer Abgase in einem niedrigen Bereich weit unterhalb der 1. BImSchV lagen (**Abb. 20**).

Stoffliche Eigenschaften Okara und Okara-Biokohle

Frischmasse von Okara hat in Bezug auf die Transportierfähigkeit im PYREG-Reaktorrohr und den Feuchtegrad (TS 23,5 %) große Übereinstimmungen mit Klärschlammproben, über die bei Pyreg langjährige Erfahrungen bestehen.

Okarakoks, Farbgebung: die Okara-Biokohlepartikel sind dunkelbraun bis schwarz mit einem Schwerpunkt auf Dunkelbraun (**Abb. 21**). Bei der Farbgebung gilt: je stärker die Schwärze des Granulats, desto intensiver verkohlt ist das Produkt.

Korngrößenverteilung: ca. 95 % aller Partikel mit Durchmessern von 0,1 bis 2 mm, der Restanteil lag im Bereich 2 – 5 mm.

Weitere Beobachtungen:

Der Zeitabstand zwischen Einfüllen von Okara und dem erstem Auswurf von Okara-Biokohle war, verglichen mit bisherigen Erfahrungen, eher lang.

Erklärungsmöglichkeiten: Aufgrund der leichten und homogenen Beschaffenheit von Okara könnte es entlang der Förderschraube im Reaktorrohr zu einem Zurückrieseln verkohlender Partikel gekommen sein, was zu längerem Verbleib der Partikel im Reaktor geführt haben könnte. Dieselbe Erklärung könnte aufgrund der Leichtigkeit der Partikel auch für das Trocknungsrohr gelten. Auch die braunschwarze Farbgebung des Granulats spricht dafür, dass eine Verlangsamung des Okaratransports im Reaktor stattgefunden hat, da die Biomasse-Pyrolyse normalerweise zu tiefschwarzen Partikeln führt.

Gesamtergebnis:

Es stellte sich heraus, dass die vom Werk frisch gelieferte Okara sowohl von ihrer Stofflichkeit als auch von ihren Abgaswerten für die emissionsarme Pyrolyse mit Hilfe der PYREG-Anlagentechnik geeignet ist. In Bezug auf die Abgaswerte (NO_x) wurden Werte weit unterhalb der Norm (1. BImSchV) abgelesen. Zum Energiefluss kann gesagt werden, dass die gewonnene Wärmeenergie außer zur Vortrocknung der Okaramasse auch weitere Wärmeverbrauchsorte versorgen könnte, über die

Größenordnung kann jedoch mit Hilfe des vorliegenden Stichversuchs keine genaue Aussage getroffen werden. Als Endergebnis kann aber gesagt werden, dass Okara grundsätzlich über das PYREG-Verfahren gut zu verarbeiten wäre und einen Prozess ermöglicht, der zu guten Abgaswerten und wahrscheinlich auch zu sinnvollen Energiebilanzen führen würde.

2.2. Elementaranalyse von Okara-Biokohle

Zunächst wurden Gewicht und Feuchte von Okara-Frischmasse bestimmt: die TM von frischer Okara betrug 72 %. Das Gewicht von 1 Liter Okara-Frischmasse, so wie sie am Ende des Produktionsprozesses bei Life Food GmbH vorliegt, liegt ungefähr bei 0,41 kg (Schüttdichtemessung ergab 0,41 kg/l; die normale Dichte ist 0,9494 kg/l).

Es bestand vor allem die Frage, ob sich bestimmte Stoffe im Okarakoks detektieren lassen, sodass bei entsprechender Konzentration eine Bodenanwendung nicht in Frage käme. Nicht nur abhängig vom Ausgangsstoff der Biomasse können Schwermetalle enthalten sein. Während der Erhitzungsvorgänge im Pyrolyseprozess können sich auch neue Stoffe mit ungünstigen Eigenschaften für die Biosphäre bilden. Um diesbezüglich eventuelle Gefahren auszuschließen, wurde der Okarakoks daher auf Schwermetalle und problematische organische Stoffe hin untersucht.

Tabelle 2. Untersuchungsergebnisse Elemente Okarakoks			
Parameter	Analyte	Einheit	Ergebnisse
Trockenrückstand in %	TR-%	%	99,3
Glührückstand 550° Feststoff	GLR-Fest--550	%	57,8
C-Elementar	C_EI	%	33,8
H-Elementar	H_EI	%	1,3
N-Elementar	N_EI	%	2,8
S-Elementar	S_EI	%	0,6
Brennwert berechnet	Hs ber.	J/g	9276
TOC-fest	TOC-fest	%	32,7
Calcium	Ca-Aufschluß	%	6,55
Magnesium	Mg-Aufschluß	%	1,13
Natrium	Na-Aufschluß	%	0,24
Kalium	K-Aufschluß	%	4,9
Aluminium	Al-Aufschluß	%	1,85
Mangan	Mn-Aufschluß	%	0,2
Eisen	Fe-Aufschluß	%	5,85
Zink	Zn-Aufschluß	%	0,11
Kupfer	Cu-Aufschluß	%	<0,001

Phosphor	P_Aufschluß	%	3,9
Blei	Pb-Aufschluß	%	<0,006
Cadmium	Cd-Aufschluß	%	<0,001
Nickel	Ni_Aufschluß	%	<0,002
Chrom	Cr-Aufschluß	%	<0,001
O-berechnet	O_ber.	%	22,8
O-Elementar	O_El	%	23,5
Brennwert gemessen	Hs gem.	J/g	12119

Wie die Messungen bzw. Berechnungen in Tabelle 2 zeigen, ist der Energiegehalt bzw. Brennwert von Okarakoks mit einem um ca. 10000 J/g vergleichsweise niedrig. Heizwerte anderer Biomassen wie zum Beispiel Ast- und Heckenschnitt haben höhere Heizwerte (17200 J/g). Jedoch hatten voneinander unabhängige Bestimmungen verschiedener Institute dieselben Werte ergeben. Auffallend waren jedoch Abweichungen zwischen Wiederholungsmessungen, was derzeit nicht erklärt werden kann. Auch die Elementargehaltsbestimmung für Kohlenstoff ergab nur 33 %, während Holzkohle normalerweise einen C-Anteil von 90 % aufweist. Der Ascheanteil (gemessen über Glührückstand, s. Abb. 22 a und b: Labor FH Offenburg) ist mit ca. 60–70 % der TM des Okarakokses dementsprechend hoch. Der TOC-Gehalt (Anmerkung: TOC-Wert gibt die Summe des gesamten organisch gebundenen Kohlenstoffs an) lag mit knapp 33 % zwischen den Werten von pyrolysierten Weizenkörnern (TOC 90%) und pyrolysiertem Klärschlamm (TOC 5%), (s. 2009 Helmut Gerber, www.ithaka-journal.net/pyrolysereaktor). Der Wassergehalt des Okarakokses betrug noch ca. 1 %.

Bezüglich anderer Stoffe, die sich teilweise unter Sauerstoff schnell abbauen und wo Analysen nicht direkt am Feststoff durchgeführt werden können, wurde ein Leaching-Versuch durchgeführt (Auswaschversuch). Hierbei wurde das Okarapyrolysat mit standardisierter Anzuchterde und Wasser gemischt und über mehrere Stunden hinweg bewegt. Die Lösungen aus der Abpressung von Erde ohne und Erde mit Koks wurden analysiert und verglichen (nicht gezeigt). Schadstoffe, die besonders bei der thermischen Behandlung organischer Verbindungen auftreten könnten, wurden nicht gefunden (z.B. verschiedene Furfurale/Furane: HMF, MF, Furfurale; Anmerkung: zu dieser Gruppe zählen Pyrolyseprodukte reduzierender Zucker; sie wirken ähnlich toxisch wie PAKs, polyzyklische Kohlenwasserstoffen, die in Zigarettenrauch, Dieselabgasen aber auch in exponiertem Freilandgemüse vorkommen). Auch andere Stoffe, die bedenklich sein könnten, wzb. Formaldehyd oder Phenol, wurden hierbei nicht gefunden.

Es bestand eine Frage bezüglich einer möglichen Nährstoffeinbringung durch den Okarakoks. Anders als bei Verbrennungsvorgängen an der Luft, wo Asche mit den darin

enthaltenen Elementen K, P, Ca, Na, Cl usw. oft als gut sichtbarer Anteil zurückbleibt, sind diese Elemente auf dem Weg der pyrolytischen Umsetzung von Biomasse eng an das Kohlenstoffgerüst der Biokohle gebunden („verbacken“). Eine Verfügbarkeit dieser Elemente als Nährstoff für Pflanzen ist daher möglicherweise fraglich. Es wird vermutet, dass manche der in der Biokohle enthaltenen Elemente auch pflanzenverfügbar sind. Dies bedeutet einen möglichen Zusatzwert der Okarakohle als Nährstofflieferant aufgrund begleitender Nährstoffe und Spurenelemente. Das für die Pflanzenernährung wichtige Element Phosphor, das derzeit im Gespräch ist aufgrund des immer stärker defizitären Bodenvorkommens, wurden ebenfalls nur sehr geringe Anteile (3,9 %) im Okarakoks gefunden. Im Vergleich dazu enthält Klärschlammkoks ca. 10 % P und 10 % C. Kürzliche Untersuchungen an der FH Bingen legen die Vermutung nahe, dass Pflanzen aus (Klärschlamm-)Pyrolysat-Boden-Mischungen vergleichsweise wenig Phosphor aufnehmen (2009 Projektbericht Appel, FH Bingen; Anmerkung: dort waren auch andere Stoffaufnahmen aus pyrogenem Klärschlammkoks geringfügig, oder wie im Fall der Schwermetalle fast unmöglich; Klärschlamm selbst weisen im Mittel Blei-Werte von 0,1g/kg TM auf, s. 1999 Schwermetalle in Böden). Bei Schwermetallen sind verminderte Stoffaufnahmen natürlich von Vorteil, wobei in Okara schon bezüglich der Ausgangsmasse nur sehr geringe Spuren enthalten wären. Bei Blei, Cadmium, Nickel und Chrom wies Okarakoks jeweils weniger als 0,001-0,006 % auf, d.h. es lag keine Belastung vor.

Für die Gruppe der Dioxine wurden, angefangen mit 2,3,7,8-TCDD, die 15 wichtigsten polychlorierten Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD/PCDF) gemessen. Es waren keine Spuren nachweisbar („nicht bestimmbar“ nach NATO/CCMS-TE). Für Dioxingehalte in Böden gilt beispielsweise, dass noch bei gefundenen Werten < 5 ng I-TEq/kg TM jegliche Nutzung der Böden ungepüft möglich sei (1991 Richtwerte und Handlungsempfehlungen zur Bodennutzung und -sanierung der B/L-AG Dioxine).

Zusammenfassend traten keine nennenswerten Konzentrationen möglicher Schadstoffe auf, sodass einer Boden Anwendung von Okara-Biokohle insofern nichts entgegen stehen würde.

2.3. Erstuntersuchungen zur Okara-Biokohle-Bodenanwendung unter dem Aspekt „Kohlenstoff-Stoffwechsel“

Gegenwärtig wird die Verarmung von Kohlenstoff in Böden als wachsendes Problem erkannt. Die Bodenkonferenz der EU sprach 2009 folgende Empfehlungen aus (<http://ec.europa.eu>): „Kohlenstoffbindung im Boden und in den terrestrischen Ökosystemen kann zur Minderung des Klimawandels und zur Erhöhung der Lebensmittelsicherheit beitragen, da sie eine Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion und den effektiveren Einsatz von Ressourcen

ermöglicht. Durch den Einsatz empfohlener Bewirtschaftungspraktiken (zum Beispiel Mulchen und Deckfrucht statt Pflügen, integriertes Nährstoffmanagement zur Schaffung eines positiven Nährstoffgehaltes, Einsatz von Biokohle, komplexe Fruchtwechsel, Auffangen und Wiederverwendung von Wasser durch Tropf- und Furchenbewässerung) kann Kohlenstoff in einer Größenordnung von 200 bis 1 000 kg/ha/Jahr im Boden gebunden werden“.

Es bestehen V.ermutungen, dass die Zugabe von Biokohle vorhandene Stoffflüsse und Wechselwirkungen in Böden so verändert, dass Böden langfristig zu CO₂-Puffern, werden. Als Vorversuch für spätere, mehrjährige Experimente wurden Gefäßversuche im Labor durchgeführt, in denen der Gaswechsel beobachtet werden konnte. Hierzu wurde Okara-Biokohle in unterschiedlichen Konzentrationen mit standardisiertem Boden in einem Gefäß gemischt und über die Dauer von drei Wochen auf CO₂-Ausgasung in die Atmosphärenluft geprüft. Als Kontrolle diente statt Okarakoks eine Probe getrockneter, aber unverkohelter Okara, von der ein Abbau durch Mikroorganismen und damit ein deutlicher CO₂-Anstieg erwartet wurde.

Zunächst wurden Bodenproben von einer Ackerfläche des Schill-Hofs (March-Buchheim) genommen (Abb. 23), auf der die Rezyklierung der Okara-Biokohle geplant war. Boden aus dieser Fläche diente als „standardisierter Boden“.



Abb. 23: Lage der Probenahmepunkte auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche in March (Luftaufnahme aus www.googlemaps.de)

Um eine etwaige Veränderung des Kohlenstoff-Vorrats des Bodens durch spätere Biokohlegaben erfassen zu können, wurde der aktuelle Kohlenstoff-Vorrat bestimmt. Um einen Flächenbezug herzustellen (t C/ha), musste zunächst eine Referenz-bodenschicht in der Tiefe festgelegt werden. Für diese Schicht wird die Dichte an volumentreuen Bodenproben bestimmt und sodann die vorhandene Menge Kohlenstoff je Hektar berechnet. Die ausgebrachte Biokohle, bzw. die Menge des darin enthaltenen Kohlenstoffs kann so einfach in Relation zum vorhanden Bodenkohlenstoff gesetzt werden. So kann auch eine Abschätzung getroffen werden, inwiefern eine Anreicherung des Bodenkohlenstoffs durch eine ausgebrachte Menge überhaupt überprüfbar ist.

Nach Ermittlung des mittleren Gehalts an organischem Kohlenstoff der Referenzbodenschicht (11,73 mg /g Boden) wurde dieser mit der mittleren Trocken-

raumdichte (1,17 g/cm) multipliziert. Hierbei ergab sich ein Vorrat von 20,6 t C_{org}/ ha oder 2,06 kg C_{org}/m². Bei einer Ausbringung von 10 t Biokohle je Hektar (entspricht beim vorliegenden C-Anteil < 3 t C_{org}) entspräche die Menge des darin enthaltenen Kohlenstoffs so nur ca. 10 % des aktuell gespeicherten Kohlenstoffs. Aufgrund der nur geringen C-Vorratsänderung wäre die Überprüfbarkeit der aus der Biokohlebehandlung resultierenden Änderungen fraglich, zumal auch davon auszugehen ist, dass zumindest ein (wenn auch geringer) Teil des Biokohle-C abgebaut wird. Eine Möglichkeit solche geringen Vorratsänderungen zu erfassen, wäre, die Probenanzahl deutlich zu erhöhen, oder, die überdauernde beigefügte Biokohle mittels Dichtefraktionierung zu erfassen.

Versuchsdesign

Es wurden 4 Varianten je 4 Replikationen getestet.

Variante 0: 0-Versuch; standardisierter Boden des Ackers aus March.

Variante 1: standardisierter Boden + Zugabe von 0,477 g Biokohle je 100g Boden (=70g TS). Die 0,477 g Biokohle entsprechen 0,11 g C und sind vergleichbar mit einer Ausbringung von 12,3 t Biokohle je ha, wenn man die Referenzbodenschicht als Maßstab zur Hilfe nimmt.

Variante 2: standardisierter Boden + Zugabe von 4,997 g Biokohle je 100g Boden. Die 4,997g Biokohle entsprechen 1,17 g C und sind vergleichbar mit einer Ausbringung von 128 t Biokohle je ha, wenn man die Referenzbodenschicht als Maßstab zur Hilfe nimmt.

Variante 3: standardisierter Boden + Zugabe von 0,6497 g Okara je 100g Boden. Die 0,6497 g Okara entsprechen 0,32 g C und sind vergleichbar mit einer Ausbringung von 10,3 t Okara (Trockenmasse!) je ha, wenn man die Referenzbodenschicht als Maßstab zur Hilfe nimmt.

Die Proben wurden über die gesamte Versuchsdauer kontrolliert mit einer Peristaltikpumpe belüftet und bei einer konstanten Raumtemperatur von 21°C aufbewahrt. Die Respirationmessungen erfolgten am 1., 2., 5., 7., 12. und 19. Tag.

Methode

Der zuvor in der Kühlkammer eingelagerte Boden wurde standardisiert, d. h. bei 30°C getrocknet und gesiebt (2mm). Anschließend wurde das lockere Material angefeuchtet und vorsichtig durchmischt. Die Messung der volumetrischen Bodenfeuchte ergab Messwert um die 50%. Allerdings ist ein solcher Messwert nicht viel mehr als ein sehr grober Anhaltspunkt, da im weiteren Verlauf die Bodenstruktur durch die Beigabe der Okara-Biokohle bzw. unverkohlten Okara und die Einbringung in die Messgefäße stark verändert wurde. Man kann jedoch davon ausgehen, dass die Bodenfeuchte in einem

Bereich liegt, der für den mikrobiellen Abbau optimal ist. Diese optimale Bodenfeuchte ist normalerweise erreicht wenn 50-70% des vorhandenen Porenvolumens mit Wasser gefüllt sind. Aus dem nunmehr feuchten Boden wurden 4 Teilproben hergestellt und diesen Teilproben entsprechend der Variantenbeschreibung Biokohle bzw. Okara zugegeben und eingearbeitet. Je Variante wurden 4 Glasgefäße mit ca. 100g fertiger Bodenmischung befüllt; die Lagerung in den Gefäßen ist locker mit Aggregatgrößen zwischen 5-20 mm. So kann von einer optimalen Sauerstoffversorgung und damit überwiegend aerober Respiration ausgegangen werden.

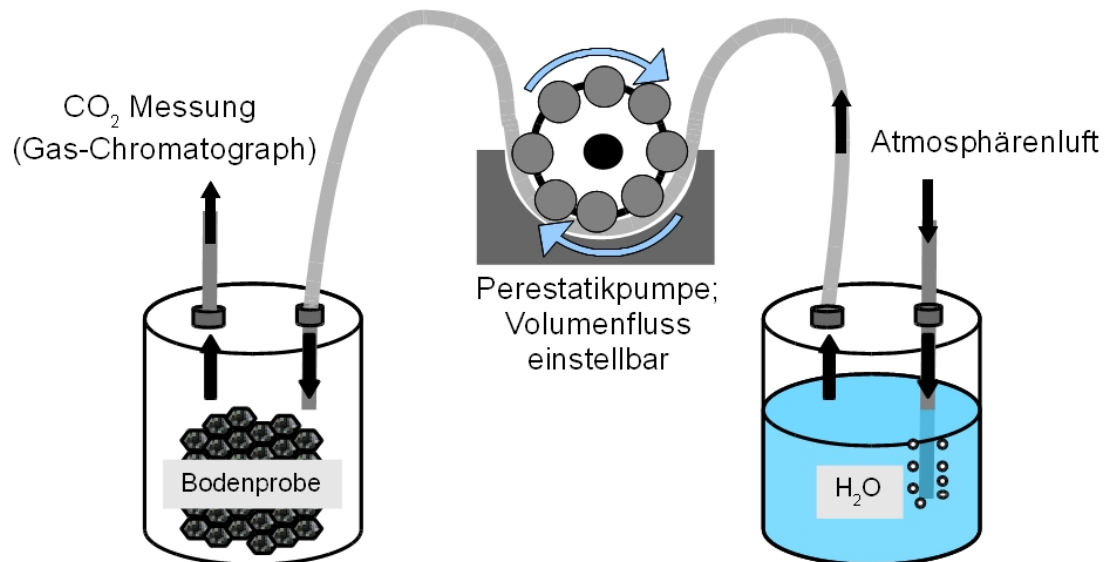


Abbildung 24: Schematischer Aufbau zur Messung der Bodenrespiration im Labor

Die Glasgefäße mit dem Boden wurde mit einem Deckel mit 2 Zugängen ansonsten luftdicht verschlossen (Abb. 24). Durch einen Zugang wurde der Probe ein kontinuierlicher Fluss an angefeuchteter Atmosphärenluft zugeführt, durch den anderen Zugang wird die Luft abgeführt. Die Befeuchtung der zugeführten Luft ist sehr wichtig, da ansonsten die Bodenprobe auf Dauer austrocknen und so das Ergebnis stark beeinflussen würde. Nach einer gewissen Anlaufzeit entspricht die produzierte Menge CO₂ (=Respiration) der Menge die über den Ausgang abgeführt wird, d. h. Produktion und Emission aus dem Gefäß stehen im Gleichgewicht. Misst man nun die CO₂-Konzentration der Atmosphärenluft und die der austretenden Luft, so lässt sich aus der Differenz und der Flussrate die Respirationsrate der Bodenprobe ermitteln.

Ergebnisse Respirationsversuch (s. Abb. 25)

Okara, mit seinem engeren C/N Verhältnis ist leichter abbaubar und stimuliert damit die Respiration. Die Respirationsrate der Okaravariante (Variante 3, gelb) lag immer eine Größenordnung über den Raten der anderen Varianten (Abb. 25: 0 = schwarz, 1 = blau, 2 = rot), mit der Maximalrate zu Beginn und anschließend abfallenden Werten, wobei nach 20 Tagen kein signifikanter Unterschied mehr zwischen den Varianten 0, 1 und 2 besteht (nicht dargestellt).

Die Messungen ergaben für Variante 2 (+viel Kohle, rot) während der ersten 2 Tage negative Raten (nicht dargestellt). Das heißt, es wurde hierbei kein CO₂ aus dem Gefäß emittiert, sondern aufgenommen. Dieser Effekt ist auf die Biokohle zurückzuführen, hat aber keineswegs etwas mit einer „C-Sequestrierung“ zu tun. Viel wahrscheinlicher ist, dass aufgrund der hohen Menge an zugefügter Kohle der pH- Wert der Bodenlösung angestiegen ist, wodurch sich mehr CO₂ lösen konnte. Ein Schnelltest, der leicht saure Werte für Lösungen auf Okara-Basis und leicht alkalische Werte für Lösungen auf Biokohle-Basis ergab, bestätigte diese Vermutung.

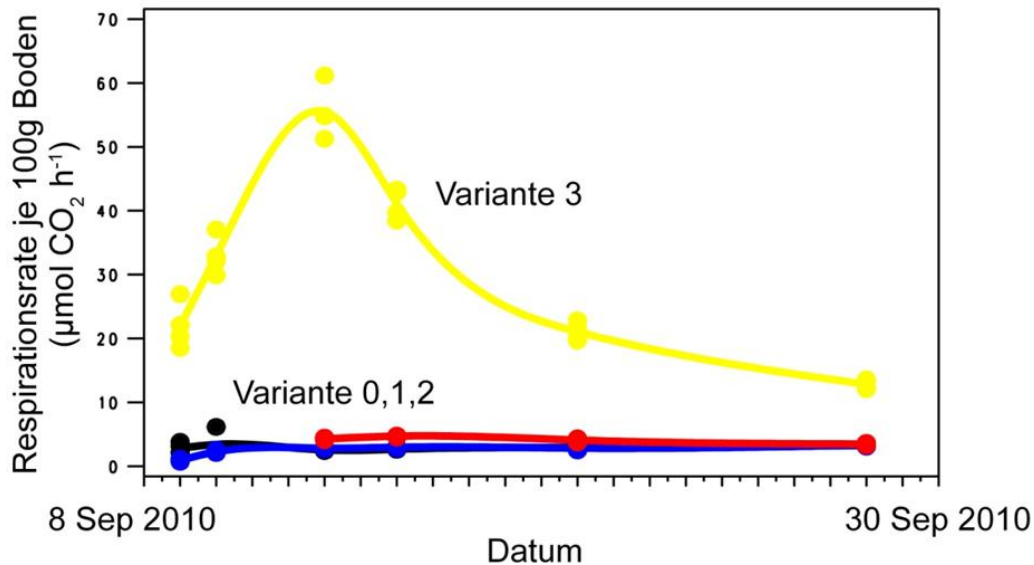


Abb. 25: Zeitlicher Verlauf der Respirationsraten aller Varianten

Der Respirationsversuch zeigte, dass sich direkt nach der Gabe von Okara-Biokohle in Böden CO₂-Änderungen einstellen, die sehr wahrscheinlich auf pH-Änderungen zurückzuführen sind. Um Aussagen zu treffen, ob ein längerfristiger Einfluss der Biokohle eine Änderung von CO₂-Flüssen bewirkt, die auf die mikrobielle Aktivität und das standortsgegebene Gleichgewicht des CO₂-Stoffwechsels zurückzuführen wäre, müssten viel längere Beobachtungszeiträume, idealerweise Freilandmessungen, gewählt werden.

Untersuchung und Berichtsteil (*nichtkursiv*): Dipl. Forstwirt Martin Maier, Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre, Universität Freiburg

2.4. Integrierfähigkeit, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit einer PYREG-Anlage bei Life Food GmbH

Für die Nutzung von frischer Okara und für die nachfolgende Beurteilung der Energiebilanz war zunächst die Frage wichtig, ob sich der Stoff an sich für eine pyrolytische Behandlung im PYREG-Verfahren eignen würde. Wie oben dargestellt, konnte dies grundsätzlich bejaht werden und zwar ohne, dass eine Vortrocknung der

frischen Okara im Betrieb Life Food GmbH nötig wäre. Die Frage ist für die Wirtschaftlichkeit der Anlage von großer Bedeutung, da mit einem vorgelagerten Trocknungsschritt sowohl zusätzlicher Energieverbrauch als auch technische Vorrichtungen und Arbeitszeit verbunden wären. Der Versuch zeigte jedoch, dass das integrierte Vortrocknungsrohr ausreicht, um die eintretende Okaramasse in einen pyrolysefähigen Zustand zu bringen, und auf eine externe Vortrocknung verzichtet werden kann. In der vorliegenden Konsistenz ließ sich frische, d.h. ungetrocknete Okara zum einen ausreichend gut in das System einspeisen. Zum anderen konnten die O₂-Zufuhr und die Transportgeschwindigkeit so eingestellt werden, dass sich sowohl ein Kohlegranulat mit gewünschten Biokohleeigenschaften, als auch ein brauchbares Synthesegas mit ausreichender Eignung für eine Verbrennung und damit Wärmeerzeugung ergaben. Verbesserungen bezüglich des internen Weitertransports der Okara in den Förderrohren könnten möglicherweise durch das Verringern des Neigungswinkels der Reaktorrohre erreicht werden, wodurch das tendenzielle Zurückrollen der sehr leichten Okarabrösel verhindert würde.

Zur Beurteilung der Rentabilität waren weitere Überlegungen entscheidend, wie zum Beispiel die Frage, wie die restliche Energie aus dem FLOX-Brenner (die nicht für die Vortrocknung der Okara im Trocknungsrohr benötigt werden würde) möglichst effizient den Energieflüssen im Betrieb zugeführt wird. Der Energiebedarf in Form von Dampf wird derzeit aus Dampfkesseln gedeckt, die mit Erdgas betrieben werden. Die Frage, ob ein Teil der Wärmeenergie der PYREG-Anlage zur Dampferzeugung beitragen könnte (was mit einer Einsparung des fossilen Erdgases verbunden wäre) wurde bejaht. Auf Basis der übrigen Zusatzleistung aus dem PYREG-System bot sich an, ein aktuelles Angebot einer Schweizer Energietechnikfirma als mögliche Lösungskomponente zu prüfen. Technisch kurz zusammen gefasst würde hier über einen Temperaturgradienten Energie abgeleitet, die dann über Mikroturbine und Generator zur Stromerzeugung genutzt wird. Nach erster, grober Schätzung eines PYREG-Sachverständigen ließen sich auf diese Weise eventuell 10 - 20 kW_{el} gewinnen. Das Angebot ist derzeit mit einem reduzierten Sonderpreis für Erstkunden gekoppelt. Anhand einer überschlägigen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung stellte man jedoch fest, dass sich die Stromauskopplung mit diesem Prinzip als Demonstrations- und Vorführanlage nur mit dem Sonderpreis gerade noch tragen würde. Mit dem vom Hersteller anvisierten offiziellen Preis ließe sich die Stromerzeugung wirtschaftlich allerdings nicht amortisieren (Invest: ca. 5000 EUR / kW elektrisch). Für eine positive Beurteilung günstig wäre zwar, wenn sich bisherige Entsorgungskosten der Biomasse einsparen ließen. Da die Entsorgung von Okara im Fall der Fa. Life Food GmbH jedoch

derzeit durch eine unentgeltliche Abholung erfolgt, ist eine Kostenkompensation jedoch ebenso wenig aus dieser Richtung gegeben.

Das bedeutet für die Suche nach einem möglicherweise wirtschaftlichen Weg für eine PYREG-Anlage bei der Fa. Life Food GmbH, dass die Gewinne vor allem aus dem Verkauf des Pyrolysekoks von Okara kommen müssten. Hierbei stellt sich konkret die Frage, welche Käufergruppen vorhanden wären und wie der Marktwert von Biokohle für die Bodenanwendung einzuschätzen ist. Der generellen Frage des Marktwertes und der regionalen Nachfrage von Biokohle waren die Antragsteller im Vorfeld mittels einer gesonderten Studie mit Hilfe von Stichproben-Befragungen nachgegangen. Im regionalen Bezug hatte diese im damaligen Befragungszeitraum (Mai bis August 2010) einen theoretischen Kaufpreis von bis zu 400 €/t Biokohle ergeben (mittlerer Wert 200 €/t), wobei die Einschätzungen stark vom jeweiligen Kenntnisstand und der persönlichen Einschätzung des Befragten über den möglichen (oft noch wenig bekannten) Nutzen von Biokohle abhängen (s. Punkt 1.4). Da die Biokohleforschung noch sehr jung ist und verschiedene Ausgangsstoffe und Verkohlungstechniken zu Produkten mit unterschiedlichen Eigenschaften führen, ist auch der Kenntnisstand abhängig von neuen Ergebnissen, die publik werden. Interessant ist zu beobachten, dass, obwohl die Bodenanwendung von Biokohle als neue Technologie erst seit Kurzem propagiert wird, derzeit auch regional schon eine beginnende Nachfrage zu beobachten ist. Das Interesse besteht besonders im Kleingartenbereich und bei ökologischer Ausrichtung.

Aufgrund einer noch fehlenden Marktorganisation bzw. Verkaufsplattform für Biokohle, die gesicherte Erlöse aus dem Verkauf von Okara-Biokohle zur Bodenverbesserung („Terra preta“ Herstellung) erwarten ließen, ist die Kalkulation mit Gewinnen aus der Biokohle angesichts größerer Investitionen noch nicht möglich.

Zusammengenommen kann gesagt werden, dass sich eine Projektierung einer PYREG-Anlage bei der Fa. Life Food GmbH unter den jetzigen Möglichkeiten der Verwertung und Kostenersparnis nicht rechtfertigen ließe.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Für den bei der Tofuproduktion anfallenden Reststoff Okara zeigte sich anhand einer Test-Pyrolyse eine grundsätzliche Verwendbarkeit. Trotz des geringen Energiegehalts und der relativ hohen Feuchte ist der Stoff geeignet für eine direkte Verwertung mit dem PYREG-Verfahren. Betrachtet man des Weiteren die Umweltverträglichkeit und die möglichen Begleitstoffe des Okarakokses, kann carbonisierte Okara grundsätzlich für die Bodenverbesserung verwertet werden.

Betrachtet man den gesamten Wertschöpfungspfad, ergibt sich jedoch vor allem durch die fehlenden Kostenersparnisse bei der Okara-Entsorgung und dem noch nicht bekannten bzw. noch nicht genügend entwickelten Regionalmarkt für Biokohle eine noch zu unsichere Einschätzung der Rentabilität einer Anlageninvestition im Betrieb Life Food GmbH.

Mit der derzeitigen Suche nach verschiedenen Verstromungsmöglichkeiten innerhalb der PYREG-Technologie (z.B. BMBF: Dampfschraubenmotor) sowie mit dem sich aktuell in der Region Freiburg erweiternden Biokohle-Interessenskreis seitens des Gartenbaus könnte sich jedoch mittelfristig schon eine vorteilhaftere Situation ergeben.

Flexible Stoffverwertung mit regionaler Bedeutung für Natur und Landschaft

Grundsätzlicher Vorteil der PYREG-Anlage, aber auch anderer Pyrolysetechnologien, die derzeit entwickelt werden, ist die stoffliche Flexibilität. Sie erlaubt die Nutzung höchst diverser, biogener Ausgangsstoffe, was besonders in Regionen mit vielfältiger Landwirtschaft von Bedeutung und Vorteil sein. Gerade bei sehr heterogenen Anbauflächen könnte die Biomasse-Verkohlung attraktiv sein, wenn ein Teil des bisher ungenutzten und im Jahresverlauf unterschiedlich anfallenden Materials verwendet werden kann. Besondere Chancen für eine schonendere, landwirtschaftliche Nutzung könnten sich entwickeln, wenn so auch Restmassen aus Pflanzenanbau mit Fruchtfolge zur Verwertung kommen könnten – optimalerweise in gleichzeitiger Aufbringung von carbonisiertem und nicht carbonisiertem organischem Reststoff. Anders als bei herkömmlichen Technologien, die viel stärker auf ein gleichmäßiges Substrat angewiesen sind, könnte die höhere Flexibilität somit Vorteile für eine abwechslungsreichere, nicht von Monokulturen geprägte Landnutzung mit sich bringen. Durch die zusätzliche Wertschöpfung, die sich durch den Verkauf von Biokohle ergeben könnte, wären Erntereste jeglicher Art verwertbar, sodass der Druck zur Vereinheitlichung von Kulturen über weite Flächen hinweg abnehmen könnte. Geht man einerseits von einem gesellschaftlichen Willen mit hoher Bewertung von reich strukturierten Landschaften aus und zweitens von Landwirtschaftsbetrieben, die an der Nahtstelle des Erhalts solcher Landschaften stehen, aber wirtschaftlich denken müssen, könnte sich mit der Biomasse-Verkohlung erstmalig eine neue Situation für diese Interessen ergeben.

Der Stoffkreislauf über die Biokohlenutzung in Böden könnte des Weiteren zu einer Nullemissionsstrategie der Region beitragen, besonders, wenn sich neben der langfristigen Kohlenstofffestlegung und CO₂-Senke auch die bessere Bilanz gasförmiger und flüssiger Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden bewahrheiten.

Mit der flexiblen stofflichen Verwertung bestehen zuletzt auch Chancen, Nutzungskonkurrenzen zu vermeiden, sodass bei der Etablierung verschiedener Biomasse-Verkohlungstechniken von Anfang an Restbiomassen im Hauptblickpunkt bleiben können und sollten. Um ökologisch-ökonomisch ungünstige Entwicklungen insgesamt zu vermeiden, sollten vor jeder größeren Umsetzung der Biokohle-Technologie in der Region Kontroll- und Beurteilungskriterien festgelegt werden, sodass vorgeschlagene Nutzungspfade bzw. Stoffangebote hinsichtlich ihres ökologischen Potentials, dem Einfluss auf die Landschaft sowie auf sozio-ökonomische Wirkungen gegenüber Biomasse-Anbietern und Biokohle-Nutzern kritisch beurteilt werden können.

4. Abkürzungen

B/L-AG	Bund Länder Arbeitsgruppe Dioxine
Hs	Heizwert, oberer („superior“)
I-TE	Toxizitätsäquivalente nach dem internationalen Bewertungsschema
J	Joule
NATO-CCMS	North Atlantic Treaty Organisation - Committee on the Challenges of Modern Society
TOC	total organic compounds
TM, tr	Trockenmasse
vTI	Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei
ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V. Müncheberg

5. Literaturliste und Internetlinks (www...)

(Reihenfolge wie im Text)

PYREG.de

innovations-report.de/html/berichte/umwelt_naturschutz/fh_bingen_erzeugt_neuartigem_pyrolyseverfahren_124041.html

ithaka-journal.net (Stichwörter: pyrolysereaktor, biokohle, terra preta)

2002 Glaser, B. et al. 'Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review', *Biol. Fertil. Soils* 35, 219-230.

2009 *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Edited by Johannes Lehmann and Stephen Joseph. Published by Earthscan.

biofuelwatch.org.uk (Stichwort biochar)

2010 Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A.C., van der Velde, M., Diafas, I., 2010, Biochar Application to Soils, A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions, JRC Scientific and Technical Reports, 166 p.

biochar.info

2010 Pratt K, Moran D. Evaluating the cost-effectiveness of global biochar mitigation potential. Biomass and Bioenergy 34: 1149-1158. doi:10.1016/j.biombioe.2010.03.004

<http://de.juwi.com>, swiss-biochar.com, triaterra.com, horst-wagner.de

2009 Helmut Gerber: Biomassepyrolyse mit PYREG-Reaktor (www.ithaka-journal.net/pyrolysereaktor)

2010 Workshop 17.März: Pyrolyse, Hydrothermale Carbonisierung, Biokohle und Kraftstoffvorstufen. Veranstalter: Hessisches Umweltministerium HMUELV (<http://www.cib-frankfurt.de>)

1999 Schwermetalle in Böden – Analytik, Konzentrationen, Wechselwirkungen. Hrsg. Alloway. Springer-Verlag Berlin Heidelberg

2009 Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen und Schwermetallen aus pyrolysiertem Klärschlamm (Projektbericht). Verantwortlicher Versuchsleiter: Prof. Dr. Thomas Appel, Fachhochschule Bingen, <http://www.fh-bingen.de/Klaerschlamm-Pyrolyse-2008.2874.0.html>

2009 http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/report_conference_de.pdf

6. Abbildungen

Projektbeteiligte:

- Dr. C. Holweg (rer.nat.biol., Dipl. Forstw.) (Nachhaltigkeits-Projekte, Merzhausen bei Freiburg)
- Friedbert Schill (Schill-Hof, Ökologische Landwirtschaft, March Buchheim)
- Life Food GmbH Taifun-Tofuprodukte Freiburg (Geschäftsbereichsleiter Qualität & Technologie A. Graf)
- FH Bingen Fachbereich Technik, Informatik und Wirtschaft (Prof. Dr. W. Sehn)
- PYREG GmbH (Dipl. Ing. H. Gerber, Dipl. Ing. J. Scherer)
- FH Offenburg Maschinenbau (Prof. Dr. J. Jochum, G. Lange, P. Huber)
- Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre, Universität Freiburg (Dipl. Forstwirt Martin Maier)
- KIT-ITC-CPV (Karlsruhe Institut für Technologie, Dr. habil. A. Kruse)
- Oekometric GmbH (Dr. H. Rottler)