

Stand: 15. Oktober 2014

Bedeutung von Pflanzenkohle und Pflanzenkohle-Kompost nach Terra Preta Art für eine nachhaltige Agrikultur Eine Bewertung aus Sicht des BUND

Was ist Terra Preta?

Unter „Terra Preta“ do Indio - portugiesisch für „Schwarze Erde“ – wird eine historische Bodenkultur verstanden, die sich auf ein über 2000 Jahre altes Landnutzungssystem in Amazonien bezieht. Dort wurden seit den 1960er Jahren Böden von Wissenschaftlern untersucht, die wegen ihres großen Kohlenstoffgehalts tiefgründig schwarz gefärbt sind und bis heute eine hohe Bodenfruchtbarkeit aufweisen [Glaser *et al.*, 2001; Lehmann and Joseph, 2009; Novotny *et al.*, 2009] und im Gegensatz zu natürlichen Schwarzerden¹ anthropogenen Ursprungs sind. Über die genaue Entstehung dieser Böden wissen wir wenig, weil die alten bevölkerungsreichen Kulturen entlang der großen Flüsse Amazoniens schon kurze Zeit nach der Eroberung des Kontinents durch die Europäer durch eingeschleppte Infektionskrankheiten ausgestorben sind. Durch archäologische und bodenkundliche Untersuchungen ist bekannt, dass diese Böden mit einem hohen Anteil von Pflanzenkohle (biochar) bis zu 2m mächtig sind und auf allen Ebenen mit Tonscherben und Überresten organischer Abfälle und Fäkalien menschlicher Siedlungen, Knochen und Muscheln durchmischt sind [Hockenberger *et al.* 1999].

An dieser Stelle ein Hinweis auf die Forschungen um die Pflanzenkohle: Sie begann mit Justus Liebig², dem „Vater der organischen Chemie“, der schrieb, dass Biokohle „alle anderen Substanzen mit ihrer Kraft übertrifft, Ammoniak in ihren Poren anzureichern (...) Sie absorbiert ihr 90-faches Volumen an gasförmigen Ammoniak, das ganz leicht durch die Befeuchtung mit Wasser wieder abgetrennt werden kann. (*Agricultural Chemistry*, p.35)“³

„Kohlenstoff ist der Grundbaustein des Lebens. Natürlich gibt es noch viele weitere Elemente, ohne die es kein Leben gäbe, aber die einzigartigen Eigenschaften des Kohlenstoffs halten einfach alles zusammen: Vom spiralförmigen Gerippe der DNS bis zu den komplizierten Ringen und Schlingen, Steroiden und Proteinen. Tatsächlich sind „organische Verbindungen“ gleichbedeutend mit Kohlenstoffverbindungen“.⁴

Anthropogene Schwarzerden – sehr ähnlich den Terra Preta Böden Amazoniens - werden mittlerweile weltweit in vielen Regionen nachgewiesen und wissenschaftlich untersucht und nicht nur in

¹ Klassifizierung Schwarzerden siehe „Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe <http://www.bgr.bund.de>

² Namensgeber der Justus Liebig Universität Gießen, *12.05.1803 in Darmstadt, Professur 1824-1852 in Gießen, +18.04.1873 in München

³ <http://www.ithaka-journal.net/english-justus-von-liebig-and-the-birth-of-modern-biochar>

⁴ Theodore Gray: Die Elemente-Bausteine unserer Welt

tropischen oder subtropischen Gebieten. Auch in gemäßigten Klimazonen wurden sie als „Nordic Dark Earth“ in den letzten Jahren erforscht [*Wiedner and Glaser, 2014 - noch unveröffentlicht*]; beispielsweise in der Nähe von Gartow im Wendland als 1000 Jahre alte Kulturerde oder in Haitabu in Schleswig-Holstein mit Mächtigkeiten von bis zu 80cm. Es handelt sich in allen Fällen um historische Landnutzungssysteme intensiver, meist Gartenbaukulturen, die sich über einen längeren Zeitraum entwickelt haben. Auch bei diesen Böden ist der hohe Kohlenstoffgehalt in stabilen Strukturen herausragendes Merkmal. Auch die fruchtbaren Schwarzerdeböden, die bis ins Neolithikum zurück datieren, enthalten in einer bis 80 cm dicken Schicht 10 bis 40 Prozent Kohlenstoff.⁵

Das interessante Phänomen anthropogener Schwarzerden ist ihre bis heute hohe Fruchtbarkeit und die über Jahrhunderte andauernde Stabilität des organischen Materials. Warum dies so ist, ist Gegenstand internationaler Forschung, wobei die Pflanzenkohle (biochar) im Fokus steht. Die Zahl der Publikationen zum Themenkomplex ist weltweit seit 2005 exponentiell gestiegen [*Fischer, D. / Vortrag Bad Dübener, 2013*], derzeit sind weit über 1000 wissenschaftliche Studien zu Biochar veröffentlicht. Sogar die Weltbank⁶ setzt sich ernsthaft mit dem Thema auseinander und hat dazu eine umfangreiche Studie erstellen lassen. Es werden große Potentiale für den Aufbau neuer anthropogener Schwarzerden (Terra Preta nova) und den Einsatz von Pflanzenkohle in den Ländern des Südens gesehen, um dort Erträge zu steigern, Wasser und Nährstoffe im Boden zu halten, Bodenerosion vorzubeugen, Flächen zu rekultivieren und der Vernichtung von Wald entgegen zu wirken [*Wiedner and Glaser, 2014*].

Das Terra Preta - Phänomen der hohen Fruchtbarkeit dieser Böden ausschließlich auf den hohen Anteil von Pflanzenkohle (biochar) zu reduzieren, wird hingegen aus Sicht des BUND kritisch betrachtet. Kein Boden ist ein Perpetuum mobile; die Dauerfruchtbarkeit der alten Terra Preta Böden bzw. anthropogenen Schwarzerden ist nur durch ihre lange nachhaltige Bewirtschaftung und kontinuierliche Zuführung von organischem Material möglich und möglich gewesen. Relikte dieser Praktiken wurden Ende des letzten Jahrhunderts im oberen Bereich der Xingú Region in Brasilien [*Anderson und Posey 1989*] [*Heckenberger 1999, 2003 und 2008*] dokumentiert. Dort wurde eine intensive Anbauweise mit Rotation auf denselben Flächen praktiziert, die sich deutlich von der noch heute weit verbreiteten Brandrodung (slash-burn-and-abandon-pattern) unterscheidet, wobei organische Masse aus Palmblättern (Recycling von Häusern), organischen Abfällen inkl. Fäkalien, P und Ca aus Fischgräten und Jagd, Ca aus Muscheln und Schnecken sowie Holzkohle kontinuierlich in großen Haufen gesammelt kompostiert /teilweise fermentiert wird und dann in die Böden verbracht wird. Eben gerade diese uralten und teilweise immer noch praktizierten, intensiven Agrikulturen mit Einsatz von Pflanzenkohle stellen eine Chance und Alternative zur großflächigen Zerstörung der Urwälder und Grasgesellschaften und Anlage von Monokulturen (Soja, Mais u.a.) dar.

Die Suche nach rein technischen Lösungen mit Pflanzenkohle birgt hingegen die Gefahr, eine ganzheitliche Sicht einer umwelt- und menschengerechten Agrikultur und damit das Zusammenspiel

⁵ Bekannt ist, dass ein manchmal hoher Anteil des organischen Kohlenstoffs in diesen Böden pyrogenen Ursprungs ist und durch die unvollständige Verschmelzung von Grasbiomasse entstand. Gemessen wird der "black carbon" - Gehalt, ein biochemischer Marker, der ca. 30 Prozent von Pyrolysekohle (Grasbiochar) ausmachen kann. Dieser pyrogene Anteil des organischen Bodenkohlenstoffs ist der älteste und damit langlebigste Teil des Bodenkohlenstoffs, wenn C14 datiert. Er ist nicht toxisch; obwohl theoretisch bei Verschmelzung von Gras auch Teerkondensate oder PAKs entstehen können, aber wir wissen auch, dass diese bei Bränden entstehenden Substanzen in Böden rasch abgebaut werden. Weiterhin interessant sind auch die im Zuge menschlicher Besiedlung entstandenen Böden wie Plaggenesche, in denen auch oft, jedoch nicht immer pyrogene Marker zeugen, dass Menschen diese Kohlen eingebracht haben. Es gibt aber auch Black Carbon aus nicht pyrogenen, sondern auch biogenen Quellen. Glaser (Glaser et al. 2006) hat in einer Studie belegt, dass es Bodenpilze gibt, wie z.B. *Aspergillus niger*, die BC Verbindungen durch metabolische Prozesse bilden können. Es ist nicht sicher nicht auszuschließen, dass es weitere Bodenpilze gibt, die in der Lage sind, zu stabilen C-Verbindungen im Boden beizutragen und somit einen wesentlichen Anteil an der natürlichen, sowie auch der anthropogenen Schwarzerdebildung leisten.

⁶ Weltbank Studie, 2014

aller Faktoren aus dem Blick zu verlieren: Es gilt, den Boden als lebendigen Organismus und den Humusaufbau mit seinen vielfältigen positiven Wirkungen zu begreifen. Böden sind enorme Kohlenstoff (C)-speicher: sie speichern etwa 2,5mal mehr organischen Kohlenstoff als die terrestrische Vegetation und zweimal so viel wie die Atmosphäre [Kögel-Knabner, I. – 2007]. Kontinuierlich wachsende C-Speicher – und damit C-Senken – sind bekanntermaßen natürliche Hochmoore [Succow 2012]⁷ und jahreszeitlich beweidete Graslandgesellschaften [Idel, A. 2012] sowie anthropogene Schwarzerden wie Terra Preta Böden in Amazonien, solange sie kontinuierlich und nachhaltig bewirtschaftet wurden. Eine Tonne Humus entlastet die Atmosphäre um ca. 1,8 Tonnen Kohlendioxid und eine Tonne Kohlenstoff entspricht rund 3,7 Tonnen Kohlendioxid⁸.

Boden ist als C- und Wasserspeicher auch Klimaregulator. Es besteht die Befürchtung, dass durch steigende Temperaturen C im Boden stärker ab- als aufgebaut wird, wie am Beispiel England und Wales zwischen 1978 und 2003 untersucht wurde [Bellamy et al., Nature, 2005].

Im Hinblick auf den Klimawandel und zunehmende Starkregenereignisse ist es dringend erforderlich, die organische Bodenmasse mit Hilfe einer schonenden und konservierenden Bewirtschaftungsweise aufzubauen (pfluglose Bodenbearbeitung, ganzjährige Bedeckung des Bodens, Grünlandumbruchverbot u.a.). Das alles setzt jedoch eine völlig andere Weichenstellung in der Agrarpolitik voraus, die sich schwerpunktmäßig an einer umweltschonenden und regionalen Lebensmittelversorgung statt an Agrarindustrie mit Massentierhaltung und Futtermittelimport orientiert. Dieser Paradigmenwechsel muss global eingeleitet werden.

Deshalb ist es sinnvoll, die Terra Preta Technik in Bezug auf Chancen zu beleuchten, den Humusaufbau im Boden zu fördern; die Stabilität von Pflanzenkohle-Ton-Humus-Komplexen zu untersuchen, um Böden fruchtbar(er) zu machen und mehr C im Boden dauerhaft zu speichern (C-Sequestrierung).

Der BUND lehnt jedoch ab, dass die Erforschung und der Einsatz von Pflanzenkohlen im Boden für die Behebung der negativen Auswirkungen der Agrarindustrie funktionalisiert werden, um solche Systeme zu maximieren und scheinbar akzeptabler zu machen. Terra Preta Technik sollte als eine Möglichkeit und Chance begriffen werden, Schritt für Schritt eine zukunftsfähige Landwirtschaft und einen regionalen Stoffkreislauf aller organischen unbelasteten Substanzen aufzubauen und dabei die Vorteile eines Einsatzes von unbelasteter Pflanzenkohle gezielt zu nutzen wie im noch nicht veröffentlichten Teil 2 des Papiers noch ausgeführt werden wird.

Dafür ist es wichtig, Pflanzenkohlen, die aus unterschiedlichem organischen Material in unterschiedlichen Verfahren hergestellt werden, genau in ihrer Wirkungsweise zu untersuchen und für bestimmte Anwendungen zu erforschen, weil die Möglichkeiten zum Einsatz von Pflanzenkohlen sehr vielfältig sind. Mit der Weichenstellung hin zu einer nachhaltigen Agrarkultur wird es sinnvoll sein, weitere Pflanzenkohle-Mechanismen zu berücksichtigen, beispielsweise zur Sanierung belasteter Böden oder zur Herstellung von Torfersatzstoffen zum Schutz der letzten europäischen Hochmoore.⁹

⁷ Succow, M. (2012): "Moore sind die wichtigsten CO₂-Senken - weltweit speichern sie mit nur 3 % Flächenanteil 1/3 des terrestrischen Kohlenstoffs!"

⁸ Quelle: <http://www.nachhaltigkeit.info/>

⁹ Intakte Hochmoore sind eine der wichtigsten C-Senken weltweit; Landwirtschaft auf entwässerten Hochmooren und Torfabbau sind ein Hotspot für die Emission klimarelevanter Gase. Für Deutschland hat das Thünen-Institut 40 Mio t CO₂-Emissionen pro Jahr durch landwirtschaftliche Dränierung von Moorböden berechnet.

Begriffsklärung: Biochar, Biokohle, Holzkohle, Pflanzenkohle

In internationalen wissenschaftlichen Publikationen zur Erforschung des Einsatzes und der Wirkung von Pflanzenkohle wird von „biochar“ gesprochen, übersetzt als „Biokohle“. Da dies jedoch im deutschen Sprachgebrauch mit einer Bio-Zertifizierung der Pflanzenkohle assoziiert ist, ist ein neutraler Begriff „Pflanzenkohle“¹⁰ geprägt worden, obwohl diese genau genommen auch nicht-pflanzliche Bestandteile aus der Tierhaltung enthalten kann. Wir verwenden alle drei Begriffe im Folgenden.

Während Pflanzenkohle aus sehr unterschiedlichem organischen Material hergestellt werden kann (aus holzhaltigen Abfällen der Forstwirtschaft oder Landschaftspflege, Gärresten, sehr unterschiedlichen organischen Reststoffen aus Landwirtschaft und Gartenbau) besteht Holzkohle nur aus holzhaltigem Material und wird traditionell unter weitgehendem Sauerstoffabschluss in Köhlereien/Kohlemeilern hergestellt. Dabei entweichen Pyrolysegase in der Regel ungenutzt und belasten die Atmosphäre.

Im Folgenden konzentrieren sich die Aussagen auf zertifizierte Pflanzenkohle/Biokohle, da aus BUND-Sicht nur diese sicher zur Bodenverbesserung und zur Langzeitspeicherung von Kohlenstoff geeignet ist.

Bildung von stabilem Kohlenstoff, natürliche und künstliche Pyrolyse

Der Kohlenstoffgehalt von Pyrolysekohle schwankt zwischen 10 bis 90 Masseprozent in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial und von mineralischen Beimengungen darin sowie von den Prozessbedingungen. Mit mehr als 50 Prozent Kohlenstoffgehalt wird sie als Pflanzenkohle nach dem Europäischen Pflanzenkohle Zertifikat¹¹ (EPZ) bezeichnet, darunter als Pyrolyseasche. In modernen, auf die Herstellung von Biokohle ausgerichteten Pyrolyseanlagen, wie im Folgenden ausgeführt, können Verunreinigungen dieser weitgehend vermieden werden. Es müssen saubere Ausgangsstoffe und geeignete Prozessbedingungen gewählt werden.

Dass es in der Praxis möglich ist, mit moderner Technik hochwertige Pflanzenkohle herzustellen, zeigt das TerraBoGa Projekt im Botanischen Garten in Berlin.

Dort werden z.B. aus Holzhackschnitzeln Pflanzenkohlen in einer kommerziellen Pyrolyseanlage hergestellt (K. Terytze, FU Berlin, persönliche Mitteilung), die einen Kohlenstoffgehalt von 90 Masseprozent in der Trockensubstanz haben. Laut Europäischem Pflanzenkohle Zertifikat (EBC) gibt das molare H/C-Verhältnis der Pflanzenkohle Aufschluss über ihren Karbonisierungsgrad (APZ Abschnitt 5.3.): „Höhere Werte als 0,6 lassen auf minderwertige Kohlen und mangelhafte Pyrolyse-Verfahren schließen.“ Das EBC fordert einen H/Corg Grenzwert von 0,7. Das molare H/C-Verhältnis dieser Holzhackschnitzel-Pflanzenkohlen beträgt 0,16 und ist damit im internationalen Vergleich sehr gut. Auch die Konzentration von Polyzyklischen Kohlenwasserstoffen ist unter dem Grenzwert, den das EBC für Premium-Biokohle fordert (mündliche Mitteilung)¹².

¹⁰ Entsprechend der Düngemittel VO (2012) ist Holzkohle aus chemisch unbelastetem Holz als Bodenhilfsstoff erlaubt; Pflanzenkohle hingegen nicht generell, sondern nur, wenn sie aus unbelastetem Holz hergestellt ist wie zum Beispiel aus Holzabfällen, Holzschredder u.ä..

¹¹ <http://www.european-biochar.org/de/>

¹² Die ersten Ergebnisse zum TerraBoGa-Projekt „Kompostierung und Karbonisierung von pflanzlichen Reststoffen – Herstellung von Biokohle und Biokohlesubstraten im Botanischen Garten Berlin-Dahlem“ vorauss. 2014 veröffentlicht.

Pyrolysekohle und Hydrothermalkohle (HTC)

Pflanzkohle wird als Pyrolysekohle angeboten; des Weiteren wird Hydrothermal-Kohle angeboten, die sich in Herstellung und Eigenschaften deutlich unterscheiden (Schimmelpfennig und Glaser 2012).

Karbonisierung durch Pyrolyse: Mit modernen, technisch ausgereiften Verfahren zur Herstellung von Pflanzkohle kann organisches Material mit einem Feuchtigkeitsgehalt von bis ca. 50 Prozent unter Sauerstoffabschluss pyrolysiert werden. Die dabei entstehenden Synthesegase dürfen entsprechend dem Bundesimmissionsschutz Gesetz (BImSchG) nicht unverbrannt emittiert werden. Sie können entweder schadstoffarm verbrannt und wärmetechnisch genutzt oder abgeleitet und anderweitig als Rohstoff- und Energieträger genutzt werden. Die Prozesswärme während der Pyrolyse kann zum Trocknen der nachgeförderten Biomasse verwendet (energieautarker Prozess) werden. Der größere Teil der Abwärme lässt sich zu Heizzwecken nutzen oder über KWK in Strom und Wärme umwandeln.

Bekannte deutsche Hersteller von Pyrolyseanlagen für größere und kleinere Anwendungen sind Pyreg¹³, BioMaCon¹⁴, Carbon Terra¹⁵ (Schottdorf-Meiler) sowie Regenis¹⁶.

Neben der Pyrolyse unter Luftabschluss sind weltweit einige hunderttausend Kleinpyrolyseöfen verbreitet, die nach TLUD-Prinzip arbeiten (Top-Down-Burner). Ein Glutnest wandert unter geringer Primärluftzufuhr von oben nach unten durch das trockene Biomaterial. Die über dem Glutnest erzeugte Holzkohle verbrennt nicht weiter, da der Sauerstoff vom Glutnest verbraucht wurde. Das vom Glutnest erzeugte Holzgas mischt sich mit der Sekundärluft und verbrennt in einer Flamme, die vorzugsweise zum Kochen genutzt wird. Laut Christa Roth¹⁷, GIZ, ist das 12-fach effizienter als das Kochen auf drei Steinen und als relativ saubere bis saubere Verbrennung einzuordnen (siehe Abbildung im Anhang Figure 2.5). 2014 wurde dazu eine Studie der GIZ (Roth, C. 2014) veröffentlicht.

Hydrothermale Karbonisierung: Ein weiteres Verfahren zur Herstellung von Kohle aus Biomasse ist die hydrothermale Karbonisierung (HTC) unter Zugabe von Wasser unter Drücken von ca. 20bar und Temperaturen von 180°C. HTC-Kohle weist nicht die Langzeit-Stabilität von Pyrolysekohle auf; sie zersetzt sich schneller im Boden [Kammann, 2012].

Bei der Terra Preta Technik wird im Wesentlichen nur Pyrolysekohle verwendet, die bei Temperaturen >350°C bis ca. 850°C und Sauerstoffgehalten von unter <2% aus organischer Substanz entsteht [Verheijen et al. 2010, Schmidt et al. 2012, Teichmann 2014]. Ausgangsstoffe für die Pyrolysekohle sind organische Reststoffe.

Qualität von Anlagen zur Herstellung von Pflanzkohle

Um Missbrauch einer alten und zugleich neuen Kulturtechnik von vornherein zu vermeiden, gilt es aus BUND-Sicht, hohe Anforderungen an die Standards für die Anlagen zur Herstellung von Pflanzkohle und an das Endprodukt Pflanzkohle zu stellen. Dies ist, sofern es noch nicht durch Bundesgesetze und Verordnungen oder EU-Recht geschehen, im Einzelnen noch zu regeln.

¹³ Verschiedene Hersteller von Pflanzkohle, die diese mit einer Pyreg-Anlage herstellen, sind EBC zertifiziert. Siehe dazu: <http://www.ithaka-journal.net/herstellung-von-pflanzkohle-mittels-pyreg-technologie>

¹⁴ Pflanzkohle aus der BioMaCon Anlage wurde von der FU Berlin untersucht mit sehr guten Ergebnissen (mündliche Mitteilung; Werte werden voraussichtlich in 2014 noch veröffentlicht)

¹⁵ Pflanzkohle aus der Carbon Terra Anlage ist mit dem EBC zertifiziert

¹⁶ Pflanzkohle aus der Regenis Anlage ist mit dem EBC zertifiziert

¹⁷ Christa Roth ist „Consultant for Food and Fuel“ im Auftrag der GIZ und berät Regierungen in Afrika.

Grundsätzlich gilt, dass Pyrolyse-Anlagen dezentral – also dort, wo organische Reststoffe anfallen, die nicht anderweitig sinnvoll verwertet werden können – sinnvoll sind. Beispielsweise auf einem Landwirtschafts- oder Gartenbaubetrieb mit direkt angeschlossener Abwärmenutzung, (z.B. Gebäude/Gewächshaus/Trocknungsanlage) oder bei (kommunalen) Kompostieranlagen, die vor Ort die Synergie einer Karbonisierung mit der Optimierung der Kompostierung und der Herstellung von der Terra Preta ähnlichen Substraten nutzen können. So werden lange Wege vermieden und regionale Stoffkreisläufe geschlossen. Der Import von Pflanzenkohle quer durch Europa ist abzulehnen, da dies dem Klimaschutzgedanken und einer nachhaltigen regionalen Kreislauf- und Humuswirtschaft widerspricht.

Anlagen zur Herstellung von Pflanzenkohle sollten in der Lage sein, vielfältige biogene Reststoffe zu karbonisieren und sich nicht auf Holzabfälle beschränken. Es fallen in unterschiedlichen Betrieben (Landwirtschaftlicher Betrieb, Gartenbau, Kompostieranlage, Grünschnittannahmestellen) unterschiedliche Materialien an, die aus unterschiedlichen Gründen oft nicht direkt wieder auf Böden ausgebracht werden können. Allerdings müsste dazu die Düngemittel VO geändert werden, die bislang nur Holzkohle aus naturbelassenem Holz als Bodenhilfsstoff erlaubt und nicht aus sonstigem unbelasteten organischem Material (Grünabfälle, Stroh, Gärreste u.a.).

Pyrolyseanlagen sind hinsichtlich Trocknung des Einsatzgutes, Kohlenstoff-Ertrag sowie Ausbeute an Energie und eventuellen Nebenprodukten zu optimieren. Pyrolyseanlagen zur Herstellung von Treibstoffen aus Bioöl liefern i.d.R. weniger geeignete Biokohle als Anlagen, die zur Biokohlen-Herstellung optimiert sind. Bioöl als Nebenprodukt ist hier nicht wünschenswert. Die Anlagen sollten nur zertifizierbare Biokohle und Pyrolysegas (Synthesegas) liefern.

Im kontinuierlichen Betrieb kann die Anlage das Einsatzgut mit der Wärmeenergie trocknen, die beim Pyrolyseprozess frei wird. Nasses Einsatzgut schmälert allerdings den Gesamtenergiegewinn der Anlage stark, weshalb es mit umweltfreundlicher Wärme (Niedertemperatur-Abfallwärme, Luft- und Sontrocknung) vorgetrocknet werden sollte.

Zur Bodenverbesserung und der langfristigen Abscheidung stabilen Kohlenstoffes ist ein hoher Gehalt an Kohlenstoff in der Biokohle anzustreben. Im Beispiel auf S. 5 betrug dieser 90 Prozent. Die restlichen 10 Prozent beinhalten sowohl Asche als auch H, N und O.

Auch aus Sicht des BUND ist es Ziel der Pyrolyse-Prozessführung, aus dem verfügbaren Einsatzstoff möglichst viel saubere Biokohle zu erhalten, die einen hohen Anteil von Kohlenstoff hat, der möglichst mehrheitlich in der Form des stabilen Kohlenstoffes vorliegt. Die Molekularstruktur der eingesetzten Biomasse und die chemischen Vorgänge während der Pyrolyse setzen dem Wunsch nach möglichst viel Biokohle jedoch enge natürliche Grenzen. Bei der Pyrolyse entweicht das Pyrolysegas aus dem eingesetzten Gut. Es enthält vor allem H₂, CO₂, CO und CH₄. Etwa die Hälfte aller Atome des Einsatzgutes sind Kohlenstoff, der Rest vor allem Wasserstoff und Sauerstoff. Das heißt, ein Teil des Kohlenstoffes im Einsatzgut entweicht in Form von Pyrolysegas und steht für die Bildung der Biokohle nicht zur Verfügung. Die Hälfte bis 3/5 der Kohlenstoffatome des Einsatzgutes finden sich im Gas wieder, nur 1/2 bis 2/5 in der Biokohle. Neben H, C und O enthält das Einsatzgut auch nicht flüchtige Elemente wie Ca, Si, Na und K. Sie sind sowohl in der organischen Masse eingebaut als auch in der Erde, die an Pflanzen haftet. Diese entweichen nicht, sondern verbleiben in der Biokohle. Was bei der Verbrennung von Holz oder anderer Biomasse übrigbleibt, wird zusammenfassend als Asche bezeichnet. Bei der Pyrolyse verbleibt die Asche in der Biokohle. Da die Biokohle zur Bodenverbesserung verwendet wird, kann die darin enthaltene Asche als Dünger wirken.

Mengenmäßig ergibt sich folgendes Bild, wobei die konkreten Zahlen je nach Art des Einsatzstoffes stark variieren. Zum Beispiel liefern Holzreste in Form von Holzhackschnitzeln relativ viel Biokohle mit geringem Aschegehalt. 1 kg lufttrockenes Restholz von Forstarbeiten enthält 200 bis 300 g Wasser und 5 bis 50 g Asche, der Rest ist organische Masse, die zu etwa 1/4 aus Lignin und zu 3/4 aus Cellulose und Hemicellulose besteht. Diese organische Masse wird während der Pyrolyse in Pyrolysegas und Biokohle zerlegt. Es entsteht etwa 150 g wasserfreie Biokohle (15 Masseprozent), die 5 bis 50 g Asche enthält (das sind 3 bis 33%). 850 g sind Pyrolysegas, in dem auch die Feuchtigkeit des Einsatzgutes als Wasserdampf enthalten ist. Verluste gibt es nicht. Mitunter wird eine Kohleausbeute von über 30 Prozent¹⁸ angegeben. Das kann folgendes bedeuten: Der Aschegehalt ist hoch, die Kohle ist nass vom Ablöschen, und/oder die Pyrolyse war unvollständig und enthält noch viel an H und O, das bei vollständiger Pyrolyse sich im Pyrolysegas befinden würden. Der letzte Fall deutet auf eine Kohle hin, die nicht lange im Boden verbleiben wird.

Das Pyrolysegas kann zur Energiegewinnung verbrannt werden, was heute am häufigsten angewendet wird. Nach aufwändiger Reinigung kann es auch in einem BHKW in Strom und Abwärme umgewandelt werden. Aus Sicht einer effektiven Mehrfachnutzung des eingesetzten Biorohstoffes sollte zukünftig das Pyrolysegas einer stofflichen Nutzung zugeführt werden, wozu es eine Reihe von Verfahren gibt, die aber noch an das in relativ kleinen Mengen anfallende Gas anzupassen sind. Durch stoffliche Nutzung kann somit Erdöl und Erdgas der Chemieindustrie ersetzt werden.

Es dürfen keine Pyrolysegase einer Anlage emittiert werden, da diese giftig und klimarelevant sind. Diese können z.B. als Energieträger einer nachgeschalteten Anlage (KWK) anstelle von fossilen Energieträgern genutzt oder abgeleitet und energetisch sinnvoll in einer anderen Anlage eingesetzt werden. Auch die Abwärme einer Anlage ist vollständig zu nutzen. Aus BUND-Sicht ist es wichtig, dass die Gesamt-Energiebilanz einer Anlage offen gelegt wird.

Die Abgaswerte unterliegen der BImSchutzVO und damit den gültigen Grenzwerten für im Verbrennungsprozess emittierte Gase von Anlagen. Dabei sind auch die Dioxin- und Furanwerte einzuhalten, da diese beispielsweise durch salzhaltige organische Masse im Pyrolyseprozess entstehen können.

Die Prozessführung von Anlagen ist – nach dem Stand von Wissenschaft und Technik – so optimal zu gestalten, dass keine Kondensate entstehen (Bioöl, Teer) und ebenso andere organische Schadstoffe im Endprodukt Pflanzenkohle vermieden oder unten den entsprechenden Vorsorgewerten sind.

Die Prozessführung ist in verschiedener Hinsicht von zentraler Bedeutung, damit von vornherein die Gefahr hoher Schadstofffrachten durch schlechte Prozessführung vermieden wird [*Keiluweit et al. 2012*].

Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Anlage sind Angaben erforderlich über den Mengendurchsatz in Kilogramm Einsatzstoff/Stunde und ob ein kontinuierlicher Betrieb möglich ist.

Für die Beurteilung der Qualität des Endproduktes Pflanzenkohle ist die Angabe wichtig, wie hoch der H- und O-Gehalt ist. Ein niedriger Gehalt ist ein Indiz für gute Karbonisierung.

¹⁸ 30 Prozent ist laut Auskunft H.P. Schmidt noch die Regel.

Hohe Anforderungen an Input für Pyrolyseanlagen

Da biogene Abfallstoffe eine wichtige Quelle für Pyrolysekohle sind, besteht die potentielle Gefahr kriminellen Missbrauchs, wie er im Abfallbereich nicht selten ist. Hier sei auf den letzten Skandal in 2014 verwiesen, wo Biogasanlagen mit Giftmüll kontaminiert wurden, deren Gärreste bereits auf Böden ausgebracht wurden. Vorsicht ist also geboten [Kammann 2012, Kröfges 2007].

Vorsorglich hat das Europäische Pflanzenkohle Zertifikat (European Biochar Certificate - EBC) deshalb festgelegt, dass zur Herstellung von Pflanzenkohle ausschließlich unbelastete organische Reststoffe verwendet werden dürfen, die in einer Positivliste aufgeführt sind. In Anlehnung an diese Positivlisten aus Österreich und der Schweiz [Schmidt et al 2012; Teichmann 2014] und deren Erfahrungen im Umgang mit Einsatzstoffen ist eine Umsetzung in deutsches Recht zu fordern. Beispielsweise könnte eine Positivliste als Anhang an die DüngVO verbindlichen Charakter für Bodenhilfsstoffe haben. Damit sind nicht geeignete, belastete Holz-, Pflanzen-, oder andere Kohlen ausgeschlossen. Auf jeden Fall ist verbindlich zu regeln, dass ausschließlich unbelastetes organisches Material zum Einsatz in Böden kommen darf.

Die Herstellung von Pflanzenkohle aus landwirtschaftlichen Primärprodukten ist aus Gründen effektiver Flächen- und Substratnutzung grundsätzlich abzulehnen und wird hier deswegen nicht weiter bedacht.

Erste Überlegungen, bestimmte Fraktionen nicht organischer Abfälle zu pyrolysieren, mit dem Ziel der Herstellung von Pyrolysekohle als Bodenhilfsstoff müssen konsequent von Anfang an abgelehnt werden. Um solchen Tendenzen von vornherein vorzubeugen, gilt es entsprechende gesetzliche Regelungen und Normen zu entwickeln. Daher ist zu begrüßen, dass seit Juli 2013 eine VDI-Arbeitsgruppe eingerichtet worden ist, die eine Richtlinie zu Verfahren der Erzeugung von Biomassekarbonisaten, möglichen Einsatzstoffen, emissionsrelevanten Fragestellungen und Einsatzgebieten und Anwendungen solcher Biomassekarbonisate erarbeitet¹⁹.

Qualität und Qualitätssicherung von Pflanzenkohle

Oft wird reine Pflanzenkohle bereits als ein Düngemittel missinterpretiert. Pflanzenkohle ist aufgrund seiner großen Oberfläche und Sorptionskraft ein Speichermedium für Nährstoffe, Mineralien und Wasser ebenso wie für Mikroorganismen und eröffnet deshalb neue Möglichkeiten, die in einem Substrat ohne Kohle nicht möglich sind. Die Umweltvorteile von Pflanzenkohle werden in Teil 2 unserer Stellungnahme (noch nicht veröffentlicht) noch ausgeführt.

Die Qualitäten von Pflanzenkohlen sind je nach Ausgangsmaterial, Prozessführung und Anlage sehr unterschiedlich. Sehr unterschiedlich groß kann auch die Oberfläche von Pflanzenkohle sein und 300 bis 500 m² pro Gramm betragen.

Um die Qualität von Pflanzenkohle (Grenzwerte für Schadstoffe, Anteil des stabilen Kohlenstoffs) auf einem hohen Niveau zu gewährleisten und dies Anwendern transparent zu machen, ist das Zertifizierungssystem für Pflanzenkohle nach dem EBC [Schmidt et al. 2012] sehr hilfreich. Es wurde eigens eine Methode entwickelt und damit eine Voraussetzung [Hilber et al. 2012], um die tatsächliche Belastung mit PAKs in Pflanzenkohle sicher nachzuweisen (Toluol-Extraktion).²⁰ Im EBC wird beschrieben, welche Stoffe pyrolysiert werden dürfen (Input), um Missbrauch vorzubeugen und welche Qualität die Pflanzenkohle haben muss (Output) mit dem Zusatz, dass das Zertifizierungssystem entsprechend dem Stand von Wissen und Forschung dynamisch

¹⁹ Siehe dazu: Tagungsbeitrag Peter Quicker, Kathrin Weber RWTH Aachen: "VDI-Kommission 3933 – Anlagen zur Herstellung von Biomassekarbonisaten" 2014 – Biokohle Workshop vom 22. und 23.9.14 FH Bingen

²⁰ www.european-biochar.org und <http://www.european-biochar.org/biochar/media/doc/1355872365733.pdf>

fortgeschrieben wird. Auch für die Prozessführung der Pyrolyse gibt es Vorgaben. Die internationale Biochar Initiative (IBI) hat parallel dazu mit ihrem freiwilligen Zertifizierungssystem für Pflanzenkohle einen vergleichbaren – aber nicht identischen - Standard wie im EBC entwickelt.²¹

Es sind Anpassungen an deutsches Recht (DüngeVO) erforderlich, wonach bislang nur Holzkohle aus unbehandeltem Holz als Bodenhilfsstoff zugelassen ist und keine weiteren organischen, unbelasteten Materialien.²²

Die Vorsorgewerte der BBodSchV für PAK mit 10mg/kg TP für Feinboden bei einem Humusgehalt von >8% und 3mg/kg TP bei einem Humusgehalt von ≤8% entsprechen weitestgehend den Werten des EBC.²³ Je nach Herstellungsverfahren, Prozessführung und Ausgangssubstrat sind sehr unterschiedliche PAK-Belastungen möglich [Keiluweit et al. 2012]. Die PAK Belastungen können zwar durchaus sehr gering sein [Freddo et al. 2012, Schimmelpfennig und Glaser 2012] und müssen auch nicht gefährdend für Pflanzen und Bodentiere sein [Busch et al. 2011; Hilber et al.; 2012]; es bliebe jedoch bei unkontrollierter Herstellung und Verwendung noch ein Gefährdungspotenzial.

Daher ist auch in Deutschland eine Regelung erforderlich, die sich an hohen Vorsorgestandards orientiert und vorgibt, dass nur solche Pflanzenkohlen in Böden verbracht werden dürfen, die klar zu definierende Standards erreichen. Hilfreich ist dabei die Regelung im EBC, die für die Basic-Zertifizierung von PAK-Werten unter 12mg/kg TM und für die Premium-Zertifizierung von unter 4mg/kg TM ausgehen. In der EU wird zurzeit für eine Verordnung für Gärreste und Kompost der Grenzwert von 6mg/kg TM für PAK (16 Kongenere) diskutiert. Dieselben Werte gelten nach deutschem Recht für Kompost (Kompostverordnung). Bei Schwermetallen entsprechen die Basic-Werte der deutschen Bodenschutz VO und die Premium-Werte der vorsorgeorientierten Schweizer Chemikalien-Risikoreduktions-VO.

Qualitätssicherung von Pflanzenkohlekompost und Pflanzenkohlekompost-Substraten

Die im EBC formulierten Grundanforderungen, die an Pflanzenkohle gestellt werden, sind eine gute Grundlage, um Schadstoffeintrag in Böden nach dem Vorsorgeprinzip zu vermeiden. Die Parameter (zum Beispiel im Temperaturbereich) sind jedoch sehr weit. Daher ist es für viele Anwendungen ergänzend sinnvoll, Standardisierungen für die Herstellung und den Einsatz von Pflanzenkohlen zu erarbeiten und dies auch durch klar definiertes Ausgangsmaterial (feedstock) und Prozessführung während der Pyrolyse zu gewährleisten. Je nach Anforderung (als Bodenhilfsstoff, als Zugabe bei der Kompostierung, als Zusatz zu Futtermitteln, als Zusatz zu Gülle, ...) gibt es für den Ausgangsstoff Pflanzenkohle spezielle Parameter, die wichtig sind. Bei der Herstellung von Substraten auf Pflanzenkohlebasis (torffreie Substrate) ist es für den Gartenbau von Bedeutung gleichbleibende Qualitäten zu ermöglichen. Das trifft aber auch für viele andere Anwendungen zu.

Außerdem ist eine Standardisierung der Methoden bei der Herstellung von Substraten mit Pflanzenkohle erforderlich, sowohl für die unterschiedlichen Anforderungen, die an Substrate für den Gartenbau gestellt werden als auch für die Forschung, um Ergebnisse von Labor- und Feldversuchen vernünftig vergleichen zu können.

²¹ <http://www.biochar-international.org/certification>

²³ Da Pflanzenkohle eine starke Sorptionskraft hat, ist die Gefahr, dass PAK über den Pfad Boden-Pflanze gehen, eher gering. Im Gegenteil; Pflanzenkohle wird auch zur Entseuchung PAK-belasteter Böden eingesetzt.

Weiterhin sollte diskutiert werden, ob Parameter entwickelt werden sollten oder/und ein Gütesiegel für pflanzenkohlehaltige Substrate analog dem Gütesiegel der Bundesgütegemeinschaft Kompost für Komposte, sinnvoll ist. Dies könnte eine Entscheidungshilfe für private Verbraucher ebenso wie für Großverbraucher (Pflanzenanzucht) darstellen und Sicherheit beim Kauf und Einsatz solcher Substrate bieten.

Ausblick

Ein Teil 2 des Grundsatz-Papiers „Bedeutung von Pflanzenkohle und Pflanzenkohle-Kompost nach Terra Preta Art für eine nachhaltige Agrikultur - Eine Bewertung aus Sicht des BUND“ ist in Arbeit. Wir werden uns in diesem Zusammenhang mit den Umwelteffekten durch Einsatz von Pflanzenkohle beschäftigen und dabei sowohl auf Best-Practice-Beispiele ebenso wie kritische Aspekte verweisen. Dazu werden auch Forderungen aus BUND Sicht formuliert zum Forschungsbedarf, zur bislang mangelnden Untersuchung zur Bodenbiologie im Zusammenhang mit Pflanzenkohle-Kompost, zum komplexen Humusaufbau, zur regionalen Schließung von Stoffkreisläufen, zur Notwendigkeit von Langzeitversuchen und Dauerbeobachtungsflächen.

Siehe auch für die weiterführende Diskussion: „BUND-Fakten-Papier "Schwarzerde" vom BUND Bergstraße.

AutorInnen:

Dr. Friedrich Naehring – BUND Dresden, Dr. Anita Idel – BAK Landwirtschaft, Sibylle Maurer-Wohlatz – BUND Region Hannover / BUND BAK Landwirtschaft, Rainer Sagawe – BUND Hameln-Pyrmont, Gerd Wiesmeier – BUND Gießen, Willy Welti – BUND Bergstraße

Literatur

- Anderson, A. and Posey, D. (1989): Management of a Tropical Scrub Savanna by the Garotire Kayapó of Brazil. In: resource management in Amazonia: indigenous and folk strategies. Posey, D., Baleé (Ed). Advances in Economic Botany. Vol. 7.
- Baldock, J.A., Smemik, R. (2002): Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Organic Geochemistry*, 33: 1093-1109.
- Beste, A. (2008): Ansprüche an die Bodenqualität bei zu erwartenden Klimaänderungen. Vortrag Tagung Klimawandel - Auswirkungen auf Landwirtschaft und Bodennutzung, Osnabrück 2008 - Tagungsreader
- Beste, A.; Valentin, I. (2010): Bodenschutz in der Landwirtschaft. Ein Streifzug durch Paragraphen, Felder und Forschungslandschaften. In: *Der Kritische Agrarbericht 2010*.
- Bellamy et al., (2005): Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003, *Nature*
- Busch, D., Kammann, C., Grünhage, L. und Müller, Ch. (2011): Simple Biototoxicity Tests for Evaluation of Carbonaceous Soil Additives: Establishment and Reproducibility of Four Test Procedures. *J. Environ. Qual.* 40, 1–10
- Cayuela et al. (2013): Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N₂O emissions? in: *Scientific Reports* 3, 1732
- Dunst, G. (2013): Die erste abfallrechtlich bewilligte Pflanzenkohleproduktionsanlage Europas. *Müll und Abfall* 12/2013 661-664
- Europäische Kommission, Generaldirektion Umwelt: Die Fabrik des Lebens: Weshalb die biologische Vielfalt in unseren Böden so wichtig ist, 2010
- Ernsting, A. (2009): Biochar – Klimaretter oder Bumerang? In: *umwelt aktuell*, Oktober 2009
- Fischer, D., Glaser, B. (2014): Synergisms between Compost und Biochar for Sustainable Soil Amelioration.
- Fischer, D. (2013): Terra Preta – Stand des Wissens und Perspektiven - Vortrag in Bad Döben
- Freddo, A., Cai, Ch. & Reid, B.J. (2012): Environmental contextualisation of potential toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar. *Environmental Pollution Journal*; B.
- Gerlach, A. (2012): Pflanzenkohle in der Rinderhaltung - in: *Ithaka Journal* 1/2012: 80–84 ISSN 1663-0521
- Glaser, B., L. Haumaier, G. Guggenberger, and W. Zech (2001): The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics, *Naturwissenschaften*, 88(1), 37–41.
- Glaser et al. (2006): Sequestration and turnover of bacterial- and fungal-derived carbon in a temperate grassland soil under long-term elevated atmospheric pCO₂
- Gray, Theodore: Die Elemente-Bausteine unserer Welt, KOMET Verlag GmbH, Köln
- Harter et al. (2013): Linking N₂O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community, in: *The ISME Journal*
- Hilber, I et al., 2012: Quantitative Determination of PAHs in Biochar: A Prerequisite To Ensure Its Quality and Safe Application
- Heckenberger et al. (1999): Village Size and Permanence in Amazonia: Two Archaeological Examples from Brazil
- Heckenberger, M.J. (2003): Pristine Forest or Cultural Parkland?; in: *Science* 301, 1710 (2003)
- Heckenberger, M.J. (2008): Pre-Columbian Urbanism, Anthropogenic Landscapes, and the Future of the Amazon; in: *Science* 321, 1214 (2008)
- Hülsberger, K.J., (2011): C-Sequestrierung in landwirtschaftlich genutzten Böden; in: *H&K aktuell* 01/2_2011
- Idel, A. (2012): „Die Kuh ist kein Klimakiller“ Wie die Agrarindustrie die Erde verwüstet und was wir dagegen tun können; Metropolis Verlag, 4. Auflage
- Kammann, C. (2012): Chancen und Risiken des Einsatzes von Pflanzenkohle. Biokohle in Böden. *Müll und Abfall* 5/2012
- Kammann C, Glaser B and Schmidt HP (bisher unveröffentlicht) in: Biochar meets Compost, Chapter 7 The ancient enigma „Terra preta“: the cradle of biochar concepts

- Keiluweit, M., Kleber, M.M., Sparrow, M.A., Simoneit, B.R.T. und Prahm F.G. (2012): Solvent-Extractable Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Biochar: Influence of Pyrolysis Temperature and Feedstock. *Environ. Sci. Technol.*, 46 (17), pp 9333–9341.
- Kögel-Knabner, I. (2007): Seniorenstudium LMU - Böden als Quelle und Senke für CO₂– 2007 - http://epub.uni-muenchen.de/1370/1/senior_stud_2007_01_03.pdf
- Kröfges, P., Skutlarek, D., Färber, H., Baitinger, C., Gödeke, I., Weber, R. (2007): PFOS/PFOA contaminated megasites in Germany polluting the drinking water supply of millions of people. *Organohalogen Comp.* 69, 877-880.
- Lehmann, J., and S. Joseph (2009): Biochar for Environmental Management: An Introduction; in: *Biochar for environmental management: science and technology*, Chapter 1, Earthscan, London.
- Novotny, E. H., M. H. B. Hayes, B. E. Madari, T. J. Bonagamba, E. R. de Azevedo, A. A. de Souza, G. Song, C. M. Nogueira, and A. S. Mangrich (2009): Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon region for the utilisation of charcoal for soil amendment, *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 20(6), 1003–1010
- Qayyum, M.F., Steffens, D. Reisenauer, H.P. und Schubert, S. (2012): Kinetics of Carbon Mineralization of Biochars Compared with Wheat Straw in Three Soils. *J. Environ. Qual.* 41, 1210-1220
- Roth, Christa (2014): Micro-gasification: cooking with gas from dry biomass), Hrsg. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
- Scheub, U., Pieplow, H. & Schmidt, H.-P. (2013): Terra Preta. Die schwarze Revolution aus dem Regenwald. Oekom Verlag, München
- Schils, R et al. (2008): ClimSoil Report - review of existing information on the interrelations between soil and climate change.
- Schimmelpfennig, S. und Glaser, B. (2012): One Step Forward toward Characterization: Some Important Material Properties to Distinguish Biochars. *J. Environ. Qual.* 41, 1001-1013
- Schmidt, H. P. (2011): Wege zu Terra Preta – Aktivierung von Pflanzenkohle. *Ithaka Journal* 1/ 2011: 28–32
- Schmidt, H. P. (2012): 55 Anwendungen von Pflanzenkohle. *Ithaka Journal* 1/ 2012: 99–102 (2012)
- Schmidt, H.P, Abiven, S., Glaser, B., Kammann, C., Bucheli, Th., und Leifeld, J. (2012): Europäisches Pflanzenkohle Zertifikat.
- Sohi S., Lopez-Capel, E., Krull, E. and Bol, R. (2009): Biochar, climate change and soil: A review to guide future research. CSIRO Land and Water Science Report 05/09. February 2009 <http://www.csiro.au/files/files/poei.pdf>
- Succow, M. (2012) Bedeutung, Funktion und Zustand der Moore in Niedersachsen; Tagungsbeitrag Moorschutz in Niedersachsen.
- Teichmann, I. (2014): Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten. DIW Wochenbericht Nr. 1+2 2014, [Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten](#)
- UFO Plan 20271264 (2008) Bodenschutz: „Ermittlung von Optimalgehalten an organischer Substanz landwirtschaftlich genutzter Böden nach §17 (2) Nr. 7 BBodSchG“
- Verheijen, F.G.A., Jeffery, S., Bastos, A.C., van der Velde, M., and Dias, I. (2009). Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 149pp.
- Weltbank: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/18781/888880PUB0Box30Iso0784070June122014.pdf?sequence=1>
- Wiedener, K., Rumpel C., Steiner Ch., Pozzi A., Maas R., Glaser B., (2013): Chemical evaluation of chars produced by thermochemical carbonization (gasification, pyrolysis and hydrothermal carbonization) of agro-industrial biomass on a commercial scale. Available online at www.sciencedirect.com
- Wiedner, K., Glaser, B. (noch unveröffentlicht , voraussichtlich 2015): Traditional use of biochar
- Woolf, D. (2008): Biochar as a soil amendment: A review of the environmental implications. http://orgprints.org/13268/1/Biochar_as_a_soil_amendment_-_a_review.pdf
- Worzk F., Schatten R., Krüger C., Terytze K., Vogel, I. (2014): Auswirkungen von Biokohle-Substraten und Biokohle auf Bodenparameter und Pflanzenwachstum MKW- und PAK-kontaminierter Böden; in 03.14 altlasten spektrum

Anlage Grafiken

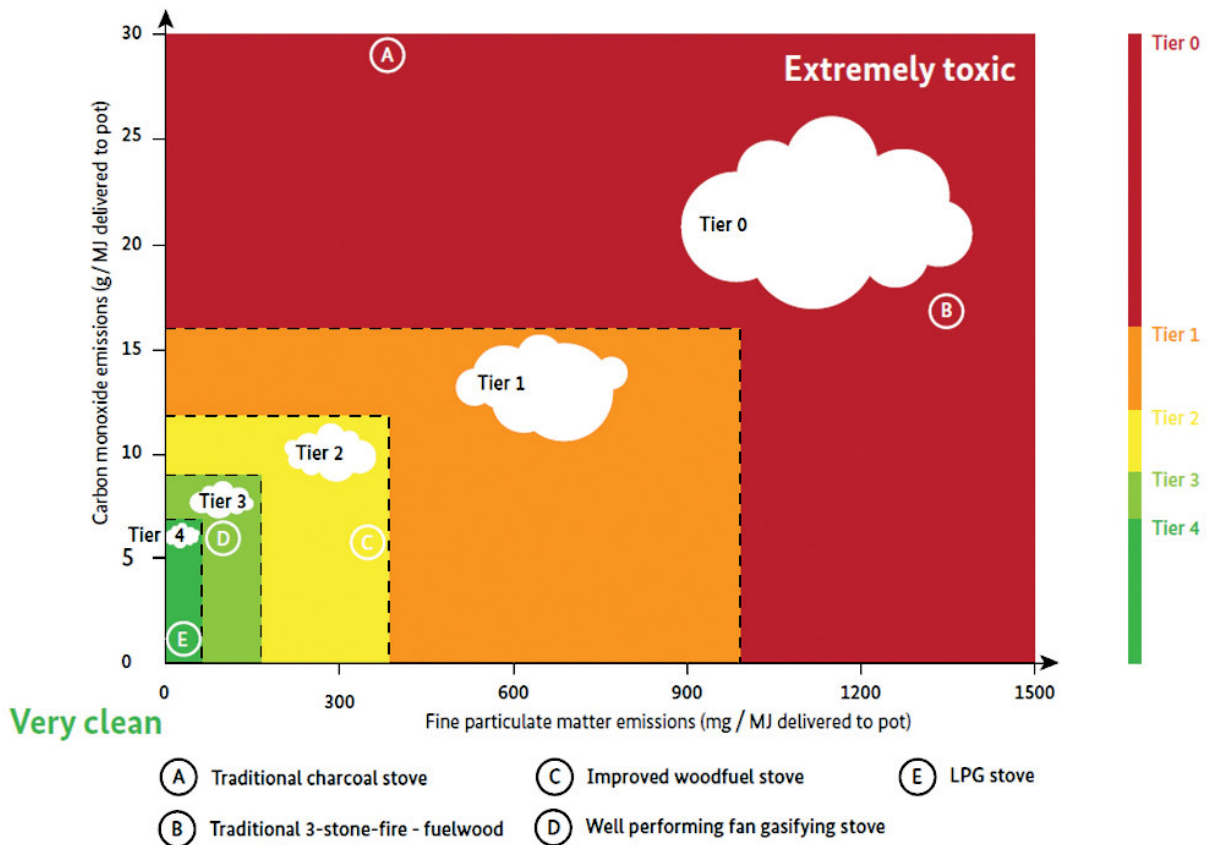
Grafik 1

Quelle: giz2014-en-micro-gasification.pdf, 159 Seiten

Autorin: Christa Roth, with contributions by Dr. Paul Anderson, Dr. Hugh McLaughlin, Thayer Thomlinson and Kelpie Wilson

Herausgeber: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Figure 1.4 Tiers for emissions of cookstoves operated at high power



Source: adapted from Jetter (2012)

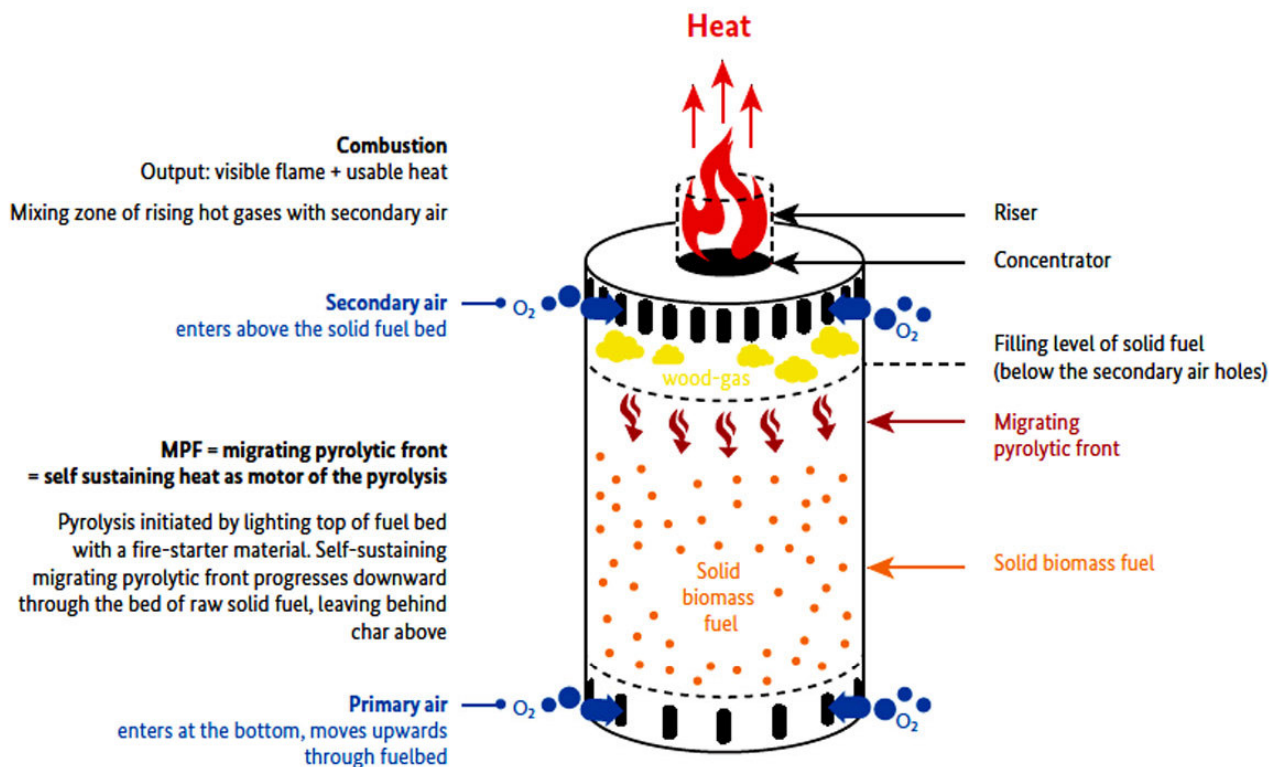
Grafik: 2

Quelle: giz2014-en-micro-gasification.pdf, 159 Seiten

Autorin: Christa Roth, with contributions by Dr. Paul Anderson, Dr. Hugh McLaughlin, Thayer Thomlinson and Kelpie Wilson

Herausgeber: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

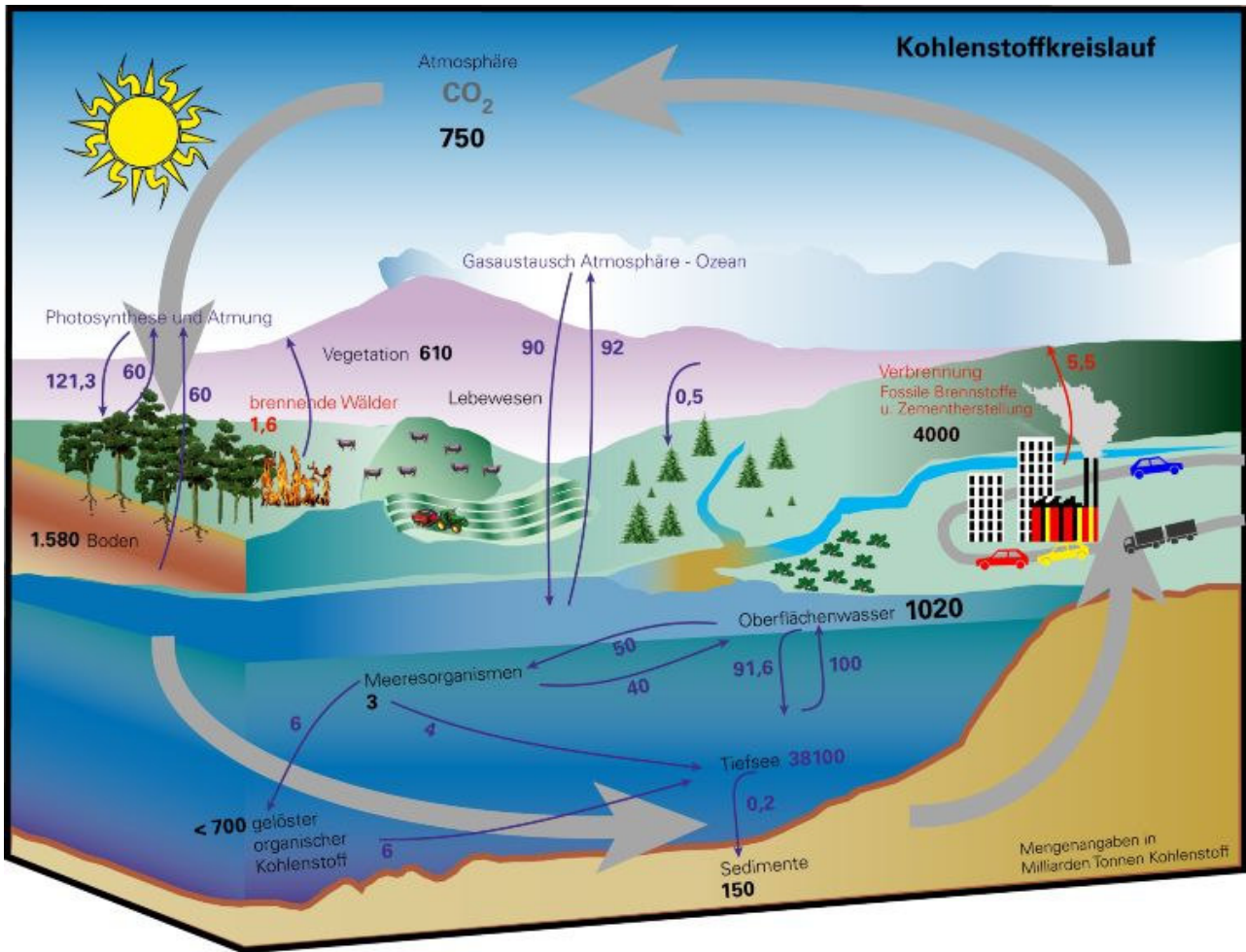
Figure 2.5 Basic design features of a char-making TLUD micro-gasifier




In TLUD gasifiers, fuel does not get moved, the only movement being a decrease in volume during pyrolysis. Two other things do move:

- A hot *migratory pyrolytic front* moves downward through the mass of solid raw fuel, converting the biomass into char. This is also referred to as a *flaming pyrolysis front*.
- The gases created travel upwards towards the combustion zone while char remains behind above the pyrolysis front.

The first known micro-gasifiers by Tom Reed and Paal Wendelbo were char-making TLUDs with a migratory pyrolytic front (MPF) and a restricted supply of primary air. Char gasification can be suppressed and the char conserved if no primary air reaches the hot char at the end of the pyrolysis phase. This is the reason that TLUDs are also called *pyrolytic stoves*.



Quelle:  **Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg**

Kohlenstoffkreislauf

(© Public domain, Autor: NASA (verändert))

Kohlenstoffkreislauf der Erde: Die Abbildung zeigt Kohlenstoffspeicher (schwarz) und jährliche Kohlenstoffflüsse zwischen den Speichern (blau). Durch menschliche Aktivitäten kommen pro Jahr etwa 6 Milliarden Tonnen hinzu (rot).