

DIW Roundup

Politik im Fokus

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung

2014

Biokohle in der Landwirtschaft als Klimarettter?

Isabel Teichmann und Claudia Kemfert

Biokohle in der Landwirtschaft als Klimaretter?

Isabel Teichmann | iteichmann@diw.de | Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin
Claudia Kemfert | ckemfert@diw.de | Leiterin Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin
18. November 2014

In Anbetracht des Klimawandels stehen wir vor großen Herausforderungen, Mittel und Wege zu finden, die Emissionen von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) zu reduzieren beziehungsweise diese Gase aus der Atmosphäre zu entfernen. Es wird verstärkt diskutiert, inwieweit aus Biomasse gewonnene Biokohle einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann, indem sie zur Kohlenstoffspeicherung in landwirtschaftlichen Boden eingearbeitet wird. Während einige Forscher und Interessensvertreter der Biokohle ein großes Potenzial zuschreiben und ihre Aufnahme in den internationalen Katalog der anrechenbaren Treibhausgasvermeidungsstrategien fordern, betonen andere den mangelnden Kenntnisstand über die Wirkung von Biokohle im Boden und stellen ihre Gefahren in den Vordergrund.

Bisher ist die Kohlenstoffsequestrierung (das heißt die Entfernung und Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre) durch Biokohle weder unter dem *Clean Development Mechanism* (CDM) des Kyoto-Protokolls noch unter regionalen Emissionshandelsystemen als Klimaschutzmaßnahme anerkannt ([Scholz et al. 2014](#)). Seit mehreren Jahren wird jedoch von einigen Seiten gefordert, Biokohle als Instrument zur Kohlenstoffsequestrierung in internationale Klimaschutzabkommen aufzunehmen und es somit zu ermöglichen, durch die Unterstützung von Biokohle-Projekten CO₂-Zertifikate zu erwerben (zum Beispiel [IBI 2014a](#)). Dagegen lehnen andere Forscher, wie zum Beispiel David Wardle, dieses Unterfangen momentan noch ab (siehe [Kleiner 2009](#)). Auch zahlreiche Nichtregierungsorganisationen haben sich dagegen ausgesprochen (siehe [Rainforest Rescue 2009](#)).

Im Hinblick auf eine angestrebte Aufnahme von Biokohle in CO₂-Märkte wird derzeit an Methoden gearbeitet, die eine zuverlässige Messung des langfristig stabilen Kohlenstoffanteils von Biokohle im Boden erlauben sollen ([IBI 2014b](#)). Außerdem entstehen Zertifikate, die das Ziel haben, Standards für die Herstellung und Anwendung von Biokohle zu schaffen ([European Biochar Foundation 2013](#); [IBI 2014c](#)).

Ungeachtet der Diskussion um eine Aufnahme von Biokohle in internationale Klimaschutzabkommen bestehen in Deutschland rechtliche Grenzen der Biokohle-Anwendung. So darf momentan nur Biokohle aus chemisch unbehandeltem Holz auf die Felder ausgebracht werden ([DüMV 2012: Tabelle 7](#)).

Was ist Biokohle?

Biokohle entsteht, wenn Biomasse unter Ausschluss von Sauerstoff erhitzt wird und dabei in gasförmige, flüssige und feste Stoffe zerfällt. Der feste Stoff, in dem sich der Kohlenstoff der Biomasse anreichert, wird als Biokohle bezeichnet. Biokohle kann auf verschiedene Arten hergestellt werden. Das Spektrum reicht vom traditionellen Verfahren der Pyrolyse über die Vergasung bis zum modernen Verfahren der hydrothermalen Karbonisierung (HTC). Im Durchschnitt können bei der Pyrolyse und Vergasung 10 bis 35 Prozent Biokohle aus einer Einheit trockener Biomasse ge-

wonnen werden und bei der HTC 50 bis 80 Prozent ([Libra et al. 2011](#)). Biokohle enthält dabei in der Regel 50 bis 80 Prozent Kohlenstoff ([Glaser et al. 2012](#)).

Biokohle kann nicht nur aus Holz (Holzkohle) hergestellt werden, sondern aus jeglicher Biomasse, wie Stroh, Grünschnitt, Festmist, Gülle, Klärschlamm oder Gärresten. Anders als bei Holzkohle hat man bei der Verwendung des Begriffs Biokohle außerdem nicht in erster Linie die energetische Verwertung im Blick, sondern vielmehr die Einarbeitung in den landwirtschaftlichen Boden, um langfristig Kohlendioxid zu speichern und die Bodenqualität zu verbessern ([Lehmann und Joseph 2009](#)).

Biokohle-Vision und grundlegende Eigenschaften von Biokohle

Mit der Einarbeitung von Biokohle in den landwirtschaftlichen Boden verbindet sich die Hoffnung, mehrere Fliegen mit einer Klappe zu schlagen. Zum einen könnte dem Klima geholfen werden, indem über die Biokohle Kohlenstoff im Boden sequestriert wird; zum anderen könnte gleichzeitig die Ernährung gesichert werden, indem der Boden verbessert wird ([Lehmann 2007a](#); [Lehmann et al. 2006](#); [Sohi 2012](#)). Da aus den flüssigen und gasförmigen Nebenprodukten der Biokohlegewinnung, den Bioölen und -gasen, außerdem Bioenergie hergestellt werden kann, wird sogar von einem „Win-Win-Win“-Szenario gesprochen ([Laird 2008](#)).

Ausgangspunkt sind die positiven Eigenschaften der Biokohle, insbesondere ihr großer Anteil an stabilem Kohlenstoff und ihre hohe Kapazität, Nährstoffe zu binden und Wasser zu speichern ([Lehmann 2007a](#)). Da sich Kohlenstoff in der Biokohle in der Regel schwerer zu CO₂ abbauen lässt als in der Ausgangsbiomasse, könnte die Herstellung von Biokohle dazu dienen, Kohlenstoff langfristig im Boden zu speichern ([Lehmann 2007b](#)). Durch ihre weiteren Eigenschaften, Nährstoffe, wie zum Beispiel Stickstoff, Phosphor und Kalium, besonders gut zu halten und die Speicherung von Wasser zu erleichtern, könnte sie zudem die Bodenqualität erhöhen. Hierbei kommt sie insbesondere für degradierte, von Auswaschung bedrohte Böden in Frage, wie sie häufig in den Tropen vorhanden sind ([Scholz et al. 2014](#)).

Die Biokohle-Vision stützt sich unter anderem auf Forschungen zur *Terra Preta* (*do Indio*), einer dunklen, sehr fruchtbaren Erde, die in Teilen des Amazonasgebietes vorkommt und durch menschliches Zutun in präkolumbischer Zeit entstanden ist. Es konnte gezeigt werden, dass die *Terra Preta* einen hohen Anteil an Biokohle enthält. Die Biokohle, teils Tausende Jahre alt, wird zu einem großen Teil für den anhaltend hohen Kohlenstoffgehalt und die dauerhafte Fruchtbarkeit der *Terra Preta* verantwortlich gemacht ([Glaser et al. 2001](#)).

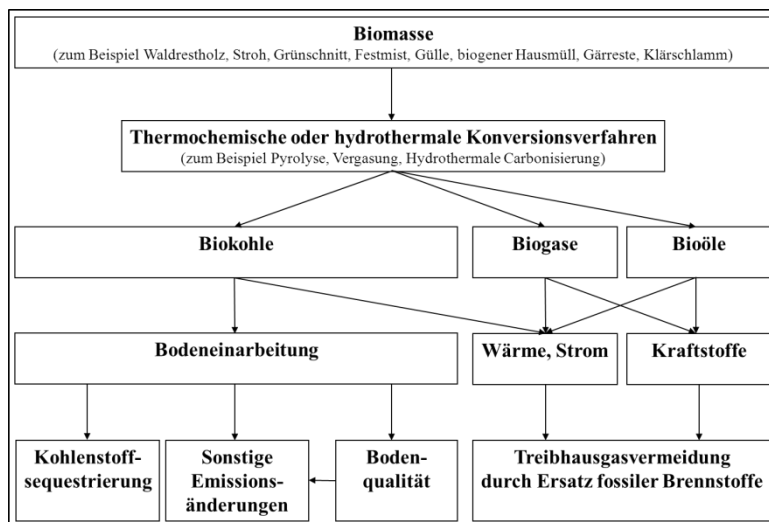
Wege des Klimaschutzes durch Biokohle

Im Detail könnte Biokohle auf folgenden Wegen zum Klimaschutz beitragen, die in der Abbildung dargestellt sind ([Gaunt und Cowie 2009](#); [Lehmann 2007a](#); [Woolf et al. 2010](#)): Neben der Kohlenstoffsequestrierung durch die Umwandlung von Biomasse in Biokohle und deren Einbringung in den Boden könnte Biokohle auch den Humusaufbau fördern und damit die Kohlenstoffspeicherfähigkeit des Bodens erhöhen. Weiterhin könnte Biokohle über die Verbesserung der Bodenqualität zu einem erhöhten Pflanzenwachstum führen, welches wiederum die Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre stärken könnte. Außerdem ist es möglich, dass sich die Methan- und Lachgasemissionen aus dem Boden verringern, nachdem dieser mit Biokohle versetzt wurde. Zu reduzierten Emissionen von CH₄ und N₂O könnte es zudem durch potenzielle Einsparungen an Mineraldünger kommen. Auch lassen sich Emissionen vermeiden, die bei der herkömmlichen Behandlung der Biomasse, wie der Kompostierung, anfallen. Nicht zuletzt können die Bioöle und -gase, die bei der

Biokohleherstellung entstehen, als erneuerbare Energiequellen genutzt werden und fossile Energieträger ersetzen.

Den möglichen Treibhausgaseinsparungen stehen dabei jedoch auch zusätzliche Emissionen gegenüber, zum Beispiel durch die Herstellung der Biokohle, den Transport der Biomasse und der Biokohle und die Einarbeitung der Biokohle in den Boden (zum Beispiel [Woolf et al. 2010](#)).

Abbildung: Wege der Treibhausgasreduktion durch Biokohle



Quelle: Eigene Darstellung

Technische Potenziale der Treibhausgasvermeidung

Unter bestimmten Annahmen zu den beschriebenen Wegen der Treibhausgasvermeidung durch Biokohle sind [Woolf et al. \(2010\)](#) zu dem Ergebnis gekommen, dass im Jahr 2050 netto weltweit jährlich bis zu 1.000 bis 1.800 Millionen Tonnen (Mt) Kohlenstoffäquivalente (3.700 bis 6.600 Mt CO₂-Äquivalente) vermieden werden könnten. Dies entspricht 7 bis 13 Prozent der aktuellen globalen Treibhausgasemissionen von 13.700 Mt Kohlenstoffäquivalenten pro Jahr (siehe [Ciais et al. 2013](#)).

Ohne mögliche landwirtschaftliche Effekte, wie Veränderungen des Pflanzenwachstums, zu betrachten, haben [Shackley et al. \(2011\)](#) in einer Studie für das Vereinigte Königreich von Großbritannien berechnet, dass dort unter wirtschaftlichen Aspekten jährlich bis zu 6 Mt CO₂-Äquivalente vermieden werden könnten. Eine ähnliche Untersuchung für Deutschland ([Teichmann 2014a](#)) hat ergeben, dass Biokohle ab 2030 mit einem technischen Treibhausgasvermeidungspotenzial in Höhe von jährlich 2,8 bis 10,2 Mt CO₂-Äquivalenten verbunden sein könnte und ab 2050 mit 2,9 bis 10,6 Mt CO₂-Äquivalenten pro Jahr. Die Potenziale für 2030 entsprechen dabei ungefähr 0,4 bis 1,5 Prozent der Menge an Emissionen, welche die Bundesregierung ab 2030 jährlich gegenüber dem Ausstoß von 1990 einsparen will. Die Potenziale für 2050 würden 0,3 bis 1,1 Prozent der für das Jahr 2050 angestrebten Treibhausgasreduktionen ausmachen (für einen Überblick über die Treibhausgasreduktionsziele der Bundesregierung, siehe [BMW i und BMU 2010](#)).

Grenzen und Gefahren

Die Gründe für die bisherige Ablehnung von Biokohle als international anerkannte Maßnahme zur Kohlenstoffsequestrierung sind vor allem in den bestehenden Un-

klarheiten über die langfristige Wirkung von (industriell hergestellter) Biokohle im Boden zu finden. Dies gilt insbesondere für die Stabilität von Biokohle und ihre Effekte auf die Bodenqualität und das Pflanzenwachstum. Neben dem Herstellungsverfahren und der Ausgangsbiomasse hängen sie von einer Vielzahl von Faktoren ab, wie zum Beispiel von der Art und Beschaffenheit des Bodens, des Bewuchses, des Klimas und anderer Umwelteinflüsse ([Schmidt et al. 2011](#)).

So kann die Stabilität des Biokohle-Kohlenstoffs im Boden stark variieren. Einerseits deuten einige Forschungsergebnisse darauf hin, dass Biokohle im Boden über Jahrhunderte und sogar Jahrtausende stabil bleiben kann (zum Beispiel [Schmidt et al. 2002](#); [Kuzuyakov et al. 2009](#); [Cheng et al. 2008](#)). Andere Untersuchungen wiederum haben ergeben, dass die durchschnittliche Verweildauer von (natürlich vorkommender) Biokohle im Boden auch wesentlich geringer sein kann, zum Beispiel im Bereich von Jahrzehnten bis Jahrhunderten ([Bird et al. 1999](#)) oder weniger als einem Jahrzehnt ([Nguyen et al. 2008](#)). Auch für HTC-Kohle haben [Steinbeiss et al. \(2009\)](#) mittlere Verweildauern von nur 4 bis 29 Jahren berechnet. Eine weitere Gefahr besteht darin, dass die im Boden befindliche Biokohle bei einem Brand auf einen Schlag in CO₂ umgewandelt werden könnte und somit ihre Wirkung als langfristiger Kohlenstoffspeicher verlieren würde ([Pratt und Moran 2010](#)).

Außerdem haben [Wardle et al. \(2008\)](#) in einem 10-jährigen Feldversuch gezeigt, dass Biokohle zu einer verstärkten Zersetzung von ursprünglich im Boden vorhandenen Kohlenstoff beitragen kann, zumindest in Wäldern Nordeuropas.

Des Weiteren kann man die Wirkung von Biokohle auf das Pflanzenwachstum nicht pauschal beurteilen. In einer Meta-Studie zu den kurzfristigen Effekten von Biokohle in der Landwirtschaft kommen [Jeffrey et al. \(2011\)](#) auf eine durchschnittliche Ertragssteigerung von 10 Prozent, wobei die Ergebnisse für bestimmte Datengruppierungen im Bereich von -28 Prozent bis +39 Prozent schwanken. Negative Wirkungen auf das Pflanzenwachstum können somit zumindest kurzfristig nicht ausgeschlossen werden. Die langfristigen Effekte sind weitgehend unbekannt.

Zusätzlich ist noch nicht geklärt, ob sich die Methan- und Lachgasemissionen aus dem Boden nach einer Zugabe von Biokohle tatsächlich verringern (für einen Überblick, siehe zum Beispiel [Van Zwieten et al. 2009](#)).

Es besteht auch die Möglichkeit, dass über die Biokohle sowohl Schwermetalle, die sich eventuell in der Ausgangsbiomasse befinden, als auch gesundheitsgefährdende polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die während des Herstellungsprozesses entstehen können, auf den landwirtschaftlichen Boden und damit in die Nahrungskette gelangen ([Hilber et al. 2012](#)). Gleichzeitig kann Biokohle unter Umständen jedoch auch organische und anorganische Schadstoffe binden (für einen Überblick, siehe [Hilber et al. 2012](#)).

Nicht zuletzt besteht nach [Ernsting \(2011\)](#) die Gefahr, dass tropische Regenwälder abgeholzt werden könnten, um Biokohle in Plantagenwirtschaft herzustellen. Diese Landnahme würde nicht nur die Nutzungskonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion verschärfen und somit insbesondere die Ernährungssituation von Kleinbauern in Entwicklungsländern gefährden, sondern durch die direkte und indirekte Landnutzungsänderung auch die Treibhausgasbilanz der Biokohle negativ beeinflussen ([Ernsting 2011](#)). Dagegen betonen [Lehmann und Rondon \(2006\)](#), dass gerade die Abholzung von Wäldern verlangsamt werden könnte, wenn die im Wanderfeldbau anfallende Biomasse nicht wie üblich an Ort und Stelle verbrannt wird („*slash-and-burn*“), sondern erst nach der Umwandlung in Biokohle zurück auf die jeweilige Fläche gebracht wird („*slash-and-char*“). Der Forscher Chris Turney argumentiert, dass die Nachfrage nach Biomasse zur Biokohleherstellung sogar zur Wiederaufforstung von degradiertem Land beitragen könnte (siehe [Kleiner 2009](#)).

Wirtschaftlichkeit

Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit von Biokohle stecken noch in den Anfängen. Nach bisherigem Stand rechnet sich die Herstellung von Biokohle zur großflächigen Einarbeitung in den Boden noch nicht. Laut [Laird \(2008\)](#) bestehen ohne staatliche Subventionen oder ausreichende Kompensationen durch den Verkauf von CO₂-Zertifikaten nur geringe Anreize für Landwirte, Biokohle in den Boden einzuarbeiten, da sie kurzfristig Kosten verursacht, aber erst langfristig Effekte verspricht. Auch für Hersteller sei es lohnender, Biomasse zur energetischen Nutzung zu verkaufen statt sie in Biokohle umzuwandeln. [Roberts et al. \(2010\)](#) unterstreichen ebenfalls, dass die Profitabilität von Biokohle wesentlich von der Vergütung der eingesparten Menge an Treibhausgasen abhängt.

Zu den Kosten des Einsatzes von Biokohle in der Landwirtschaft zählen die Investitions- und Betriebskosten für die Biokohleherstellung, die Substrat- und Transportkosten für die Biomasse sowie die Kosten für den Transport und die Lagerung der Biokohle und ihre Einarbeitung in den Boden (McCarl et al. 2009). Erlöse speisen sich dagegen vor allem aus der Bereitstellung der Bioöle und -gase für energetische Zwecke sowie aus möglichen Produktivitätssteigerungen in der Landwirtschaft – und aus dem potenziellen Verkauf von CO₂-Zertifikaten (McCarl et al. 2009).

Für die Herstellungskosten von Biokohle ist das Zusammenspiel von Ausgangsbiomasse und Produktionsverfahren von großer Bedeutung. So bietet zum Beispiel die HTC als nasses Verfahren wirtschaftliche Vorteile gegenüber der Pyrolyse und Vergasung bei der Umwandlung von Biomasse, die einen hohen Feuchtegehalt aufweist. Denn anders als bei der Pyrolyse oder Vergasung muss die Biomasse bei der HTC nicht erst aufwändig getrocknet werden ([Libra et al. 2011](#)). Darüber hinaus zeigen [Shackley et al. \(2011\)](#), [Roberts et al. \(2010\)](#) und [Teichmann \(2014b\)](#), dass die Herstellungs- beziehungsweise Treibhausgasvermeidungskosten von Biokohle für ein gegebenes Produktionsverfahren deutlich von der Ausgangsbiomasse abhängen.

Fazit

Biokohle könnte das Potenzial haben, Kohlenstoff langfristig im Boden zu binden und gleichzeitig den Boden zu verbessern. Momentan ist Biokohle für eine weiträumige Anwendung in der Landwirtschaft allerdings noch nicht wirtschaftlich. Außerdem bestehen noch erhebliche Unklarheiten in Bezug auf die langfristigen Effekte von Biokohle im Boden. Aus letzterem Grund wird kontrovers diskutiert, ob Biokohle zum jetzigen Zeitpunkt schon als Kohlenstoffspeicher in internationale Klimaschutzabkommen aufgenommen werden sollte. Selbst von Befürwortern einer solchen Aufnahme wird anerkannt, dass noch großer Forschungsbedarf zur Biokohle besteht (zum Beispiel [Laird 2008](#); [Scholz et al. 2014](#)).

Quellen

Bird, M. I., C. Moyo, E. M. Veenendaal, J. Lloyd, P. Frost. 1999. Stability of elemental carbon in a savannah soil. *Global Biogeochemical Cycles* 13(4): 923-932.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/1999GB900067/abstract;jsessionid=DECAF6160CEC6DE63F8F30C989D2E045.f02t04> [Zugriff am 3. November 2014]

BMWi und BMU (Hrsg.). 2010. *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
<http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.html> [Zugriff am 3. November 2014]

Cheng, C.-H., J. Lehmann, J. E. Thies, S. D. Burton. 2008. Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. *Journal of Geophysical Research* 113(G2): G02027.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007JG000642/full> [Zugriff am 3. November 2014]

- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quere, R. B. Myneni, S. Piao, P. Thornton. 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. In: *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> [Zugriff am 29. Oktober 2014]
- DüMV. 2012. *Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV)*. 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482). www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d_mv_2012/gesamt.pdf [Zugriff am 3. November 2014]
- Ernsting, A. 2011. Biochar – a climate smart solution? In: *Climate change and agriculture*. Misereor (Hrsg.): Report No. 1. <http://www.misereor.de/themen/klimawandel/downloads.html> [Zugriff am 3. November 2014]
- European Biochar Foundation. 2013. The European Biochar Certificate. <http://www.european-biochar.org/en> [Zugriff am 3. November 2014]
- Gaunt, J. und A. Cowie. 2009. Biochar, greenhouse gas accounting and emissions trading. In: *Biochar for environmental management: Science and technology*. Lehmann, J. und S. Joseph (Hrsg.). Earthscan, London, UK und Sterling, VA, USA: 317-340.
- Glaser, B., L. Haumaier, G. Guggenberger, W. Zech. 2001. The 'Terra Preta' phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* 88(1): 37-41. <http://link.springer.com/article/10.1007/s001140000193#page-1> [Zugriff am 29. Oktober 2014]
- Glaser, B., C. Kammann, J. Kern. 2012. Biochar research and technology in Europe – State of the art. In: *Biokohle im Blick – Herstellung, Einsatz und Bewertung*. Fricke, K., C.-G. Bergs, C. Kammann, P. Quicker, R. Wallmann (Hrsg.). ORBIT, Weimar: 11-20.
- Hilber, I., F. Blum, H.-P. Schmidt, S. Hale, G. Cornelissen, D. Bürge, T. D. Bucheli. 2012. Biochar: Contaminant source or sink? In: *Biokohle im Blick – Herstellung, Einsatz und Bewertung*. Fricke, K., C.-G. Bergs, C. Kammann, P. Quicker, R. Wallmann (Hrsg.). ORBIT, Weimar: 167-175.
- International Biochar Initiative (IBI). 2014a. International policy and regulations. <http://www.biochar-international.org/policy/international> [Zugriff am 3. November 2014]
- International Biochar Initiative (IBI). 2014b. Biochar carbon offset methodology. <http://www.biochar-international.org/protocol> [Zugriff am 3. November 2014]
- International Biochar Initiative (IBI). 2014c. IBI biochar standards. <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard> [Zugriff am 3. November 2014]
- Jeffrey, S., F. G. A. Verheijen, M. van der Velde, A. C. Bastos. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 144(1): 175-187. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880911003197> [Zugriff am 31. Oktober 2014]
- Kleiner, K. 2009. The bright prospect of biochar. *Nature Reports Climate Change* 3: 72-74. <http://www.nature.com/climate/2009/0906/full/climate.2009.48.html> [Zugriff am 31. Oktober 2014]
- Kuzyakov, Y., I. Subbotina, H. Chen, I. Bogomolova, X. Xu. 2009. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. *Soil Biology & Biochemistry* 41(2): 210-219. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071708003544> [Zugriff am 3. November 2014]
- Laird, D. A. 2008. The charcoal vision: A win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal* 100(1): 178-181. <http://naldc.nal.usda.gov/catalog/17624> [Zugriff am 3. November 2014]
- Lehmann, J. 2007a. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5(7): 381-387. <http://www.esajournals.org/doi/abs/10.1890/1540-9295%282007%295%5B381%3ABITB%5D2.0.CO%3B2> [Zugriff am 29. Oktober 2014]
- Lehmann, J. 2007b. A handful of carbon. *Nature* 447: 143-144. <http://www.nature.com/nature/journal/v447/n7141/full/447143a.html> [Zugriff am 29. Oktober 2014]
- Lehmann, J. und M. Rondon. 2006. Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics. In: *Biological approaches to sustainable soil systems*. Uphoff, N., A. S. Ball, E. Fernandes, H. Herren, O. Husson, M. Laing, C. Palm, J. Pretty, P. Sanchez, N. Sanginga, J. Thies (Hrsg.). CRC Press, Boca Raton, FL: 517-530. http://www.sswm.info/library?search_term=Bio-char%20soil%20management [Zugriff am 3. November 2014]
- Lehmann, J. und S. Joseph. 2009. Biochar for environmental management: An introduction. In: *Biochar for environmental management: Science and technology*. Lehmann, J. und S. Joseph (Hrsg.). Earthscan, London, UK und Sterling, VA, USA: 1-12. <http://www.biochar-international.org/projects/book> [Zugriff am 29. Oktober 2014]
- Lehmann, J., J. Gaunt, M. Rondon. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11(2): 403-427. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11027-005-9006-5#page-1> [Zugriff am 29. Oktober 2014]

- Libra, J. A., K. S. Ro, C. Kammann, A. Funke, N. D. Berge, Y. Neubauer, M.-M. Titirici, C. Fühner, O. Bens, J. Kern, K.-H. Emmerich. 2011. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels* 2(1): 89-124. http://karlheinzemmerich.de/Dokumente/HTC_Review_Biofuels_2011.pdf [Zugriff am 29. Oktober 2014]
- McCarl, B. A., C. Peacocke, R. Chrisman, C.-C. Kung, R. D. Sands. 2009. Economics of biochar production, utilization and greenhouse gas offsets. In: *Biochar for environmental management: Science and technology*. Lehmann, J. und S. Joseph (Hrsg.). Earthscan, London, UK und Sterling, VA, USA: 341-357.
- Nguyen B. T., J. Lehmann, J. Kinyangi, R. Smernik, S. J. Riha, M. H. Engelhard. 2008. Long-term black carbon dynamics in cultivated soil. *Biogeochemistry* 89(3):295-308. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10533-008-9220-9#page-1> [Zugriff am 3. November 2014]
- Pratt, K. und D. Moran. 2010. Evaluating the cost-effectiveness of global biochar mitigation potential. *Biomass and Bioenergy* 34(8): 1149-1158. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953410000991> [Zugriff am 3. November 2014]
- Rainforest Rescue. 2009. Declaration: 'Biochar', a new big threat to people, land, and ecosystems. <https://www.rainforest-rescue.org/news/1150/declaration-biochar-a-new-big-threat-to-people-land-and-ecosystems> [Zugriff am 3. November 2014]
- Roberts, K. G., B. A. Gloy, S. Joseph, N. R. Scott, J. Lehmann. 2010. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environmental Science & Technology* 44(2): 827-833. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es902266r> [Zugriff am 3. November 2014]
- Shackley, S., J. Hammond, J. Gaunt, R. Ibarrola. 2011. The feasibility and costs of biochar deployment in the UK. *Carbon Management* 2(3): 335-356. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.4155/cmt.11.22#.VFEOgffSic> [Zugriff am 29. Oktober 2014]
- Schol, S. M., T. Sembres, K. Roberts, T. Whitman, K. Wilson, J. Lehmann. 2014. Biochar systems for smallholders in developing countries: Leveraging current knowledge and exploring future potential for climate-smart agriculture. The World Bank, Washington, D. C. <http://documents.worldbank.org/curated/en/2014/06/19705161/biochar-systems-smallholders-developing-countries-leveraging-current-knowledge-exploring-future-potential-climate-smart-agriculture> [Zugriff am 3. November 2014]
- Schmidt, M. W. I., J. O. Skjemstad, C. Jäger. 2002. Carbon isotope geochemistry and nanomorphology of soil black carbon: Black chernozemic soils in central Europe originate from ancient biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles* 16(4): 70-1-70-8. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002GB001939/abstract> [Zugriff am 3. November 2014]
- Schmidt, M. W. I., M. S. Torn, S. Abiven, T. Dittmar, G. Guggenberger, I. A. Janssens, M. Kleber, I. Kögel-Knabner, J. Lehmann, D. A. C. Manning, P. Nannipieri, D. P. Rasse, S. Weiner, S. E. Trumbore. 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478: 49-56. <http://www.nature.com/nature/journal/v478/n7367/full/nature10386.html> [Zugriff am 3. November 2014]
- Sohi, S. P. 2012. Carbon storage with benefits. *Science* 338: 1034-1035. <http://www.sciencemag.org/content/338/6110/1034.short> [Zugriff am 29. Oktober 2014]
- Steinbeiss, S., G. Gleixner, M. Antonietti. 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology & Biochemistry* 41(6): 1301-1310. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071709001242> [Zugriff am 3. November 2014]
- Teichmann, I. 2014a. Technical greenhouse-gas mitigation potentials of biochar soil incorporation in Germany. DIW Discussion Paper 1406. http://www.diw.de/sixcms/detail.php?id=diw_01.c.479831.de [Zugriff am 3. November 2014]
- Teichmann, I. 2014b. Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten. DIW Wochenbericht 1+2/2014: 3-13. http://www.diw.de/sixcms/detail.php?id=diw_01.c.434521.de [Zugriff am 3. November 2014]
- Van Zwieten, L., B. Singh, S. Joseph, S. Kimber, A. Cowie, K. Y. Chan. 2009. Biochar and emissions of non-CO₂ greenhouse gases from soil. In: *Biochar for environmental management: Science and technology*. Lehmann, J. und S. Joseph (Hrsg.). Earthscan, London, UK und Sterling, VA, USA: 227-249.
- Wardle, D. A., M.-C. Nilsson, O. Zackrisson. 2008. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus. *Science* 320: 629. https://holzwirtschaft.com/sites/default/files/userfiles/1file/Wardle_Science_2008.pdf [Zugriff am 31. Oktober 2014]
- Woolf, D., J. E. Amonette, F. A. Street-Perrott, J. Lehmann, S. Joseph. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications* 1: 56. <http://www.nature.com/ncomms/journal/v1/n5/full/ncomms1053.html> [Zugriff am 29. Oktober 2014]

Impressum

DIW Berlin – Deutsches Institut
für Wirtschaftsforschung
Mohrenstraße 58, 10117 Berlin

Tel. +49 (30) 897 89-0
Fax +49 (30) 897 89-200
<http://www.diw.de>

ISSN 2198-3925

Alle Rechte vorbehalten
© 2014 DIW Berlin

Abdruck oder vergleichbare
Verwendung von Arbeiten
des DIW Berlin ist auch in
Auszügen nur mit vorheriger
schriftlicher Genehmigung
gestattet.