

Teichmann, Isabel

**Article**

## Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten

DIW Wochenbericht

**Provided in Cooperation with:**

German Institute for Economic Research (DIW Berlin)

*Suggested Citation:* Teichmann, Isabel (2014) : Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten, DIW Wochenbericht, ISSN 1860-8787, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin, Vol. 81, Iss. 1/2, pp. 3-13

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/90632>

**Standard-Nutzungsbedingungen:**

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

**Terms of use:**

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*

# Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten

Von Isabel Teichmann

Seit einigen Jahren wird Biokohle – ein kohlenstoffreiches Produkt aus Biomasse – als eine viel versprechende Klimaschutzoption diskutiert. Insbesondere besteht die Möglichkeit, der Atmosphäre langfristig Kohlenstoffdioxid zu entziehen, indem Biokohle in den Boden eingearbeitet wird. Gleichzeitig könnte dadurch die Bodenfruchtbarkeit erhöht werden.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurden am DIW Berlin mögliche Potentiale und Kosten der Treibhausgasvermeidung durch einen Einsatz von Biokohle in der deutschen Landwirtschaft berechnet. Demnach könnte durch Biokohle ungefähr ein Prozent des für 2030 angestrebten Treibhausgasreduktionsziels erreicht werden, dies jedoch größtenteils zu Kosten von über hundert Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>. Dabei sind die Potentiale zur Treibhausgasvermeidung durch die Verfügbarkeit der Biomasse beschränkt. Der mögliche landwirtschaftliche Zusatznutzen der Biokohle in Form von erhöhter Bodenfruchtbarkeit könnte ihre Treibhausgasvermeidungspotentiale und -kosten verbessern. Dies dürfte in tropischen und subtropischen Regionen besonders relevant sein.

Die Bundesregierung beabsichtigt, die jährlichen Treibhausgasemissionen Deutschlands bis zum Jahr 2030 um 55 Prozent gegenüber dem Ausstoß von 1990 zu senken, und um 80–95 Prozent bis zum Jahr 2050.<sup>1</sup> Vor diesem Hintergrund wird Biomasse bislang in verschiedenen Formen als regenerative Energiequelle zur Erzeugung von Strom, Wärme und Kraftstoffen genutzt. Derzeit wird diskutiert, inwiefern künftig aus Biomasse gewonnene Biokohle einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann.

Biokohle, auch genannt Pflanzenkohle,<sup>2</sup> entsteht durch die Erhitzung von Biomasse unter nahezu vollständigem Ausschluss von Sauerstoff (unvollständige Verbrennung). Dabei zerfällt ein Teil der Biomasse in gasförmige und flüssige Bestandteile. Als Rest verbleibt eine feste Masse, die zu einem Großteil aus stabilem Kohlenstoff besteht – die Biokohle. Stark vereinfacht handelt es sich bei Biokohle um Holzkohle, die nicht nur aus Holz hergestellt werden kann, sondern aus jeglicher Biomasse, wie zum Beispiel aus Stroh, Grünschnitt, biogenem Hausmüll, Gülle, Gärresten oder Klärschlamm.

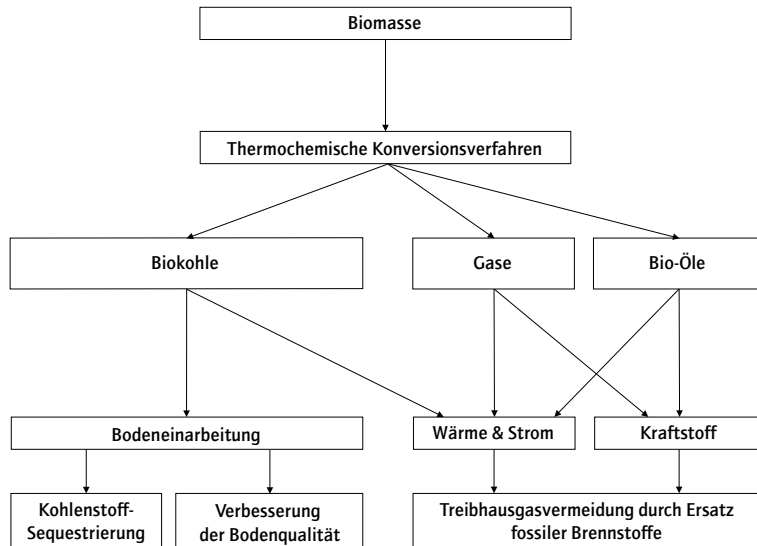
Biokohle kann – wie die ursprüngliche Biomasse auch – energetisch genutzt werden und fossile Brennstoffe ersetzen. Alternativ kann sie – anders als die ursprüngliche Biomasse – durch Einbringung in den Boden zur langfristigen Entfernung von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) aus der Atmosphäre (Kohlenstoff-Sequestrierung) bei-

<sup>1</sup> 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).

<sup>2</sup> Im Englischen werden die Begriffe *biochar* oder *black carbon* verwendet. Einige Autoren nutzen den Begriff Biokohle nur dann, wenn es um einen Einsatz in der Landwirtschaft geht, und behalten sich den Begriff Holzkohle für energetische Anwendungen vor. Vgl. Lehmann, J., Joseph, S. (2009): Biochar for environmental management: An introduction. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Hrsg.): Biochar for environmental management: Science and technology. Earthscan, London, UK und Sterling, VA, USA, 1–12. Dieser Bericht folgt einer breiteren Definition von Biokohle, welche die energetische Nutzung einschließt.

Abbildung 1

**Flussdiagramm Biokohle<sup>1</sup>**



<sup>1</sup> Die energetische Nutzung von Biokohle wird in dieser Studie nicht untersucht.

Quelle: Darstellung des DIW Berlin.

© DIW Berlin 2014

Durch Biokohlenutzung in der Landwirtschaft können Treibhausgase vermieden und die Bodenqualität verbessert werden.

tragen (Abbildung 1).<sup>3</sup> Der Kohlenstoff in Biokohle zeichnet sich durch eine hohe Stabilität aus, so dass er durch chemische und biologische Prozesse wesentlich langsamer in CO<sub>2</sub> zurückverwandelt wird als der Kohlenstoff in der ursprünglichen Biomasse.<sup>4</sup> Hinzu kommt, dass Biokohle die Nährstoff- und Wasserspeicherkapazität des Bodens verbessern kann.<sup>5</sup> Ihre Einarbeitung in den Boden könnte demnach zu einer Verbesserung der Bodenqualität und somit auch zu einer Erhöhung der landwirtschaftlichen Produktivität beitragen. Dies ist aufgrund der weltweit steigenden Nachfrage nach Nahrungsmitteln und Energiepflanzen von großer Bedeutung. Die

**3** In diesem Zusammenhang wird sie auch als sogenannte *Climate-Engineering*-Maßnahme diskutiert, das heißt als gezielter technischer Eingriff in das Klimasystem. Vgl. Rickels, W., Klepper, G., Dovern, J., Betz, G., Brachatzek, N., Cacean, S., Güssow, K., Heintzenberg, J., Hiller, S., Hoose, C., Leisner, T., Oshlies, A., Platt, U., Proelß, A., Renn, O., Schäfer, S., Zürn, M. (2011): Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering. Sondierungsstudie für das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Kiel Earth Institute.

**4** Zum Beispiel Lehmann, J., Czimczik, C., Laird, D., Sohi, S. (2009): Stability of biochar in the soil. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Hrsg.): Biochar for environmental management: Science and technology. Earthscan, London, UK und Sterling, VA, USA, 183–205.

**5** Lehmann, J. (2007): Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5(7), 381–387.

Bodenqualität wird dabei zu einem immer größeren Engpass, auch in Europa und Deutschland.<sup>6</sup>

Ein prominentes Beispiel für die nachhaltige Wirkung von Biokohle ist die sogenannte *Terra Preta (do Indio)*, eine besonders fruchtbare schwarze Erde, die in Teilen des Amazonasgebietes vorkommt. Durch ihre hohen Gehalte an Kohlenstoff und Nährstoffen – wie Stickstoff, Phosphor und Kalium – sowie ihre bessere Nährstoffspeicherkapazität unterscheidet sie sich wesentlich von den sonst üblichen Böden der feuchten Tropen. Die *Terra Preta* ist bereits in präkolumbianischer Zeit durch menschliches Zutun entstanden. Neben tierischen und menschlichen Exkrementen, Knochen, Fischgräten und Schildkrötenpanzern enthält sie einen hohen Anteil an Biokohle.<sup>7</sup> Während die Nährstoffe wohl in erster Linie durch die organischen Abfälle eingetragen wurden,<sup>8</sup> wird die Biokohle wesentlich für die hohe Stabilität und lang anhaltende Fruchtbarkeit von *Terra Preta* verantwortlich gemacht.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurden am DIW Berlin die Potentiale und Kosten der Kohlenstoff-Sequestrierung beziehungsweise Treibhausgasvermeidung durch einen Einsatz von Biokohle aus heimischer Biomasse in der Landwirtschaft berechnet.<sup>9</sup>

**Unterschiedliche Herstellungsverfahren und Ausgangsbiomassen**

Der Ertrag an Biokohle sowie ihre spezifischen Eigenschaften werden wesentlich von den für ihre Herstellung verwendeten Konversionsverfahren und den Biomasse-Ausgangsstoffen bestimmt.

**6** Jones, A., Panagos, P., Barcelo, S., Bouraoui, F., Bosco, C., Dewitte, O., Gardi, C., Erhard, M., Hervás, J., Hiederer, R., Jeffrey, S., Lükewille, A., Marmo, L., Montanarella, L., Olazábal, C., Petersen, J.-E., Penizek, V., Strassburger, T., Tóth, G., Van Den Eeckhaut, M., Van Liedekerke, M., Verheijen, F., Viestova E., Yigini, Y. (2012): The state of soil in Europe: A contribution of the JRC to the European Environment Agency's Environment State and Outlook Report - SOER 2010. JRC Reference Reports, EUR 25186 EN, European Commission, Luxemburg.

**7** Zum Beispiel Glaser, B., Haumeier, L., Guggenberger, G., Zech, W. (2001): The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* 88(1), 37–41.

**8** Glaser, B. (2007): Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 362(1478), 187–196.

**9** Die Analyse erfolgte im Rahmen des von der Leibniz-Gemeinschaft geförderten Projekts „Biokohle in der Landwirtschaft - Perspektiven für Deutschland und Malaysia“, [www2.atb-potsdam.de/biochar/biochar\\_start.htm](http://www2.atb-potsdam.de/biochar/biochar_start.htm). Die detaillierten Annahmen und Berechnungen werden zeitnah in einem DIW-Diskussionspapier veröffentlicht.

## Biokohle kann auf verschiedene Arten hergestellt werden

Biokohle entsteht in der Natur zum Beispiel als ein Nebenprodukt von Waldbränden oder anderen Feuern, wenn die Sauerstoffzufuhr eingeschränkt ist. Für die industrielle Herstellung von Biokohle eignen sich unterschiedliche thermochemische Konversionsverfahren (Abbildung 2).<sup>10</sup> Sie reichen von den trockenen Verfahren der Pyrolyse und Vergasung bis hin zu den nassen Verfahren der hydrothermalen Karbonisierung (*hydrothermal carbonization*, HTC).<sup>11</sup> Während die Biomasse bei der Pyrolyse ohne Sauerstoffzufuhr erhitzt wird, kommt es bei der Vergasung zu einem leichten Zusatz von Sauerstoff. Die HTC unterscheidet sich von den beiden zuvor genannten Prozessen grundlegend durch die Zugabe von Wasser. Biokohle aus dem HTC-Verfahren wird auch als HTC-Kohle oder, im Englischen, *hydrochar* bezeichnet.

Der Ertrag an Biokohle wird sowohl durch das genutzte Konversionsverfahren als auch durch die spezifischen Reaktionsbedingungen bestimmt, hier vor allem durch die maximale Prozesstemperatur und die Prozessdauer. Insbesondere sinkt der durchschnittliche Biokohle-Ertrag mit steigender Reaktionstemperatur von der langsamen Pyrolyse (*slow pyrolysis*) zur Vergasung. Die höchsten Biokohle-Ausbeuten werden im HTC-Verfahren erzielt.

Gleichzeitig bestimmen die Konversionsverfahren und Reaktionsbedingungen auch die Eigenschaften der Biokohle. So gilt zwar, dass mit steigender Temperatur der Ertrag der Biokohle sinkt, gleichzeitig nimmt dabei aber auch der Kohlenstoffgehalt der Biokohle zu.<sup>12</sup> Bei den trockenen Verfahren wird bei der langsamen Pyrolyse insgesamt am meisten Kohlenstoff von der Biomasse in die Biokohle transferiert.<sup>13</sup> Biokohlen aus den trockenen Verfahren sind stabiler als HTC-Kohlen.<sup>14</sup>

**10** Biokohle kann auf traditionelle Weise in einfachen, kleinen Brennöfen hergestellt werden. Im Folgenden stehen jedoch aufwändigere, industrielle Technologien im Fokus.

**11** Libra, J.A., Ro, K.S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N.D., Neubauer, Y., Titirici, M.-M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J., Emmerich, K.-H. (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.

**12** Zum Beispiel Mašek, O., Brownsort, P., Cross, A., Sohi, S. (2013): Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar. *Fuel* 103, 151–155.

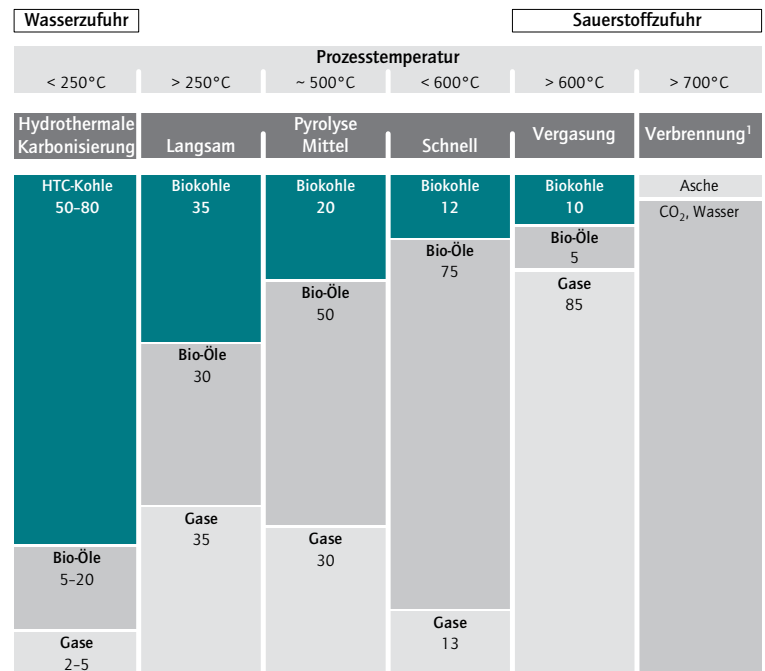
**13** Zum Beispiel Cantrell, K.B., Hunt, P.G., Uchimiya, M., Novak, J.M., Ro, K.S. (2012): Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology* 107, 419–428.

**14** Zum Beispiel Kammann, C., Ratering, S., Eckhard, C., Müller, C. (2012): Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, and methane) fluxes from soils. *Journal of Environmental Quality* 41(4), 1052–1066; Steinbeiss, S., Gleixner, G., Antonietti, M. (2009): Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology & Biochemistry* 41(6), 1301–1310; Kuzyakov, Y., Subbotina, I., Chen, H., Bogomolova, I., Xu, X. (2009): Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by <sup>14</sup>C labeling. *Soil Biology & Biochemistry* 41(2), 210–219.

Abbildung 2

### Thermochemische Konversionsverfahren zur Herstellung von Biokohle

Massenanteile in Prozent



<sup>1</sup> Bei der Verbrennung entsteht keine Biokohle. Sie ist nur zum Vergleich dargestellt.

Quellen: Quicker, P. et al. (2012), a. a. O.; Libra, J.A. et al. (2011), a. a. O.; Darstellung des DIW Berlin.

#### Der Ertrag an Biokohle hängt vor allem von der Prozesstemperatur ab.

In der Regel sind daher Biokohlen, die im (langsamen) Pyrolyse-Verfahren hergestellt worden sind, besonders für eine Kohlenstoff-Sequestrierung im Boden geeignet, während sich für die weniger stabilen HTC-Kohlen eher eine energetische Nutzung anbietet. Die Vergasung zielt in erster Linie auf die Gewinnung von Gasen für energetische Zwecke ab. Werden jedoch entsprechend hohe Kapazitäten errichtet, könnte die Biokohle aus diesem Prozess trotz des geringeren Biokohle-Ertrags auch für eine Kohlenstoff-Sequestrierung in Frage kommen.<sup>15</sup>

Unter Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit bietet die HTC als nasses Verfahren Vorteile bei der Umwandlung von Biomasse, die einen hohen Feuchtegehalt aufweist. Anders als bei der Pyrolyse oder Vergasung muss die Biomasse bei der HTC nicht erst aufwändig getrocknet werden.<sup>16</sup>

**15** Libra, J.A. et al. (2011), a. a. O.

**16** Libra, J.A. et al. (2011), a. a. O.

## Eigenschaften der Biokohle hängen wesentlich vom Ausgangsstoff ab

Im Spannungsfeld zwischen Herstellungsverfahren, Ertrag, Eigenschaften und angestrebter Verwendung der Biokohle spielt außerdem die Ausgangsbio­masse eine wichtige Rolle. Insbesondere der Ertrag und der Kohlenstoffgehalt der Biokohle hängen stark von der chemischen Zusammensetzung der Biomasse ab. So können zum Beispiel für ein gegebenes Konversionsverfahren häufig höhere Biokohle-Erträge aus solchen Biomassen gewonnen werden, die einen hohen Aschegehalt aufweisen.<sup>17</sup> Dies heißt jedoch, dass diese Biokohlen einen geringeren Kohlenstoffgehalt besitzen. Gleichzeitig geht ein höherer Aschegehalt, wie zum Beispiel bei Gülle und Festmist, einher mit einem höheren Nährstoffgehalt der Biokohlen, was wiederum für einen Einsatz in der Landwirtschaft bedeutsam ist.

## Mehrfacher Nutzen bei Einbringung von Biokohle in den Boden

Wird Biokohle nicht energetisch genutzt, sondern in den Boden eingebracht, kann dadurch nicht nur Kohlenstoff dauerhaft gebunden, sondern gleichzeitig auch die Bodenqualität verbessert werden. Daneben ermöglicht die Umwandlung von Biomasse in Biokohle eine hochwertige Verwertung von Reststoffen, wie zum Beispiel Gülle, die teilweise in so großen Mengen anfallen, dass sie landwirtschaftlich nicht mehr sinnvoll verwendet werden können.<sup>18</sup> Außerdem entstehen bei der Biokohle-Herstellung immer auch flüssige und gasförmige Stoffe, die der regenerativen Energieerzeugung dienen können (Abbildung 1).

## Kohlenstoff-Sequestrierung durch Biokohle

Wird Biokohle in den Boden eingearbeitet, kann sie als oberflächennahe Kohlenstoff-Senke dienen.<sup>19</sup> Ausschlaggebend hierfür ist der hohe Gehalt an stabilem Kohlenstoff in der Biokohle. Grob gerechnet bleibt rund die Hälfte des durch die Photosynthese aus der Atmosphäre aufgenommenen Kohlenstoffs in der Biomasse enthalten, wovon im Pyrolyse-Verfahren wiederum durchschnittlich die Hälfte in die Biokohle transferiert wird.<sup>20</sup>

Davon können im Boden möglicherweise bis zu 80 Prozent langfristig stabil bleiben. Somit könnten bei einer Umwandlung von Biomasse in Biokohle bis zu 20 Prozent des Kohlenstoffs, der ursprünglich von Pflanzen über die Photosynthese aufgenommen wurde, mittel- bis langfristig aus der Atmosphäre entzogen werden. Ohne die Umwandlung in Biokohle würde der Kohlenstoff über den Lebenszyklus einer Pflanze dagegen vollständig wieder freigesetzt – entweder durch natürliche Zersetzungsprozesse oder die energetische Nutzung der Biomasse.<sup>21</sup>

Die langfristige Stabilität von Biokohle im Boden ist bisher jedoch nicht genau quantifizierbar. Sie hängt von vielen Faktoren ab, wie der Biomasse, aus der die Biokohle hergestellt wird, dem konkreten Herstellungsverfahren, dem Boden, in den die Biokohle eingearbeitet wird, sowie den Klima- und Umwelteinflüssen, denen die Biokohle ausgesetzt ist. Generell sind Bodenprozesse sehr komplex und kaum quantifizierbar.<sup>22</sup> Außerdem verschwindet der Effekt der Kohlenstoff-Sequestrierung zum Beispiel, sobald es auf dem Boden, in den die Biokohle eingearbeitet wurde, zu einem Brand kommt. Der Kasten gibt einen Überblick über die aktuellen Möglichkeiten, die Stabilität von Biokohle zu bestimmen.

## Positive landwirtschaftliche Effekte möglich, aber nicht sicher

Der Kohlenstoffeintrag in den Boden sowie die Eigenschaften der Biokohle, Nährstoffe und Wasser besonders gut zu speichern, können dazu beitragen, die Bodenqualität zu verbessern und dadurch die landwirtschaftliche Produktivität zu fördern. Somit könnte der Zusatz von Biokohle das Pflanzenwachstum steigern. Denkbar ist auch eine Reduktion des Einsatzes von synthetischem Dünger. Dabei ist aber noch nicht abschließend geklärt, wie sich Biokohle auf das Pflanzenwachstum genau auswirkt, vor allem auf lange Sicht. Eine aktuelle Meta-Studie zu den kurz- bis mittelfristigen Effekten von Biokohle kommt auf eine Ertragssteigerung von durchschnittlich 10 Prozent, wobei die Ergebnisse im Bereich von -28 Prozent bis +39 Prozent schwanken.<sup>23</sup> Negative Wirkungen auf das Pflanzenwachstum können somit nicht ausgeschlossen werden. Letztlich hängen die Ef-

<sup>17</sup> Cantrell, K.B. et al. (2012), a. a. O.

<sup>18</sup> Libra, J.A. et al. (2011), a. a. O.

<sup>19</sup> Im Gegensatz dazu wird bei der Abscheidung und Einlagerung von Kohlenstoffdioxid (CCS oder CCTS), deren praktische Umsetzbarkeit in letzter Zeit stark diskutiert wurde, das CO<sub>2</sub> in geologischen Tiefen sequestriert. Vgl. von Hirschhausen, C., Herold, J., Oei, P.-Y., Haftendorn, C. (2012): CCTS-Technologie ein Fehlschlag: Umdenken in der Energiewende notwendig. Wochenbericht des DIW Berlin Nr. 6/2012.

<sup>20</sup> Lehmann, J. (2007): A handful of carbon. Nature 447, 143-144.

<sup>21</sup> Dieser Vergleich abstrahiert jedoch von einer möglichen Stabilisierung des Biomasse-Kohlenstoffs durch Bodenprozesse, wenn die Biomasse in den Boden gelangt.

<sup>22</sup> Schmidt, M.W.I., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., Trumbore, S.E. (2011): Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. Nature 478, 49-56.

<sup>23</sup> Jeffrey, S., Verheijen, F.G.A., van der Velde, M., Bastos, A.C. (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.

Kasten

### Bestimmung der Stabilität von Biokohle

Der Anteil an Biokohle-Kohlenstoff, der langfristig im Boden stabil bleibt, ist nicht exakt quantifizierbar. Es gibt jedoch eine Reihe von Methoden zur Messung der Stabilität von Biokohle, die Anhaltspunkte für mögliche Größenordnungen geben.

Diese Methoden setzen zunächst an der Charakterisierung der Biokohle selbst an. So gibt es verschiedene Indikatoren für den Gehalt an stabilem Kohlenstoff in der Biokohle. Dazu zählen zum Beispiel der Anteil an sogenanntem gebundenen Kohlenstoff, das Verhältnis von Sauerstoff zu Kohlenstoff<sup>1</sup> oder eine Kombination des Flüchtigengehalts der Biokohle mit dem Verhältnis von Sauerstoff oder Wasserstoff zu organischem Kohlenstoff.<sup>2</sup> Des Weiteren wurde ein sogenannter Rekalzitranz-Index entwickelt, der die thermische Stabilität von Biokohle gegenüber derjenigen von Graphit angibt.<sup>3</sup> Je höher dieser Index, je höher das Kohlenstoff-Sequestrierungspotenzial der Biokohle. Ein weiterer Indikator besteht in der Messung des Anteils an aromatischem Kohlenstoff.<sup>4</sup> Gemeinsam ist diesen Indikatoren jedoch, dass sie die Zersetzungsprozesse, denen die Biokohle im Boden ausgesetzt ist, nicht widerspiegeln können.

Zu den Methoden, die solche Zersetzungsprozesse nachzuziehen versuchen, gehören sogenannte Inkubationsstudien, bei denen Biokohle aus dem Labor mit Bodenproben vermengt wird und diese anschließend bestimmten thermischen, chemischen oder sonstigen Behandlungen unterzogen werden. Aus den Inkubationsstudien, die in der Regel auf eine kurze Dauer angelegt sind, lassen sich dann Rückschlüsse auf die Stabilität von Biokohle über lange Zeithorizonte ziehen. Die Ergebnisse solcher Studien weisen auf eine Langlebigkeit von

Biokohle hin. So wurden zum Beispiel für Biokohle in Böden der gemäßigten Breiten durchschnittliche Lebensdauern von mindestens 200 bis 2 000 Jahren hergeleitet.<sup>5</sup>

Eine weitere Herangehensweise besteht darin, die Stabilität von historischer Biokohle in ihrer natürlichen Umgebung zu messen. Für solche Biokohle, die unter natürlichen Bedingungen entstanden ist, variieren die Ergebnisse deutlich. So wurden für aus Vegetationsfeuern stammende Biokohle in australischen Böden durchschnittliche Lebensdauern von 718 bis 9 259 Jahren berechnet.<sup>6</sup> Dagegen scheinen natürlich vorkommende Biokohlen in den Böden Simbabwe nur Dekaden bis Jahrhunderte zu überdauern<sup>7</sup> und solche in den Böden Kenias nur durchschnittlich 8,3 Jahre.<sup>8</sup> Diese gemischten Resultate weisen darauf hin, dass die Stabilität von Biokohle von vielen Faktoren abhängt, nicht zuletzt von klimatischen Bedingungen und anderen Umwelteinflüssen. Außerdem bestehen erhebliche Schwierigkeiten und Differenzen in der Bestimmung der vorhandenen Menge an natürlicher Biokohle in Böden.

Schließlich geben wiederum die Befunde über die *Terra Preta* Hinweise darauf, dass Biokohle im Boden über einen Zeitraum von Jahrtausenden speicherbar ist. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Radiokarbondatierungen von Biokohle in bestimmten europäischen Böden mit einem Alter von 1 160 bis 5 040 Jahren.<sup>9</sup> Allerdings kennt man bei solchen Messungen nicht die Menge an Biokohle, die ursprünglich in den Boden eingetragen worden ist.

<sup>1</sup> Spokas, K.A. (2010): Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management* 1(2), 289–303.

<sup>2</sup> Enders, A. et al. (2012), a. a. O.

<sup>3</sup> Harvey, O.R., Kuo, L.J., Zimmerman, A.R., Louchouart, P., Amonette, J.E., Herbert, B.E. (2012): An index-based approach to assessing recalcitrance and soil carbon sequestration potential of engineered black carbons (biochars). *Environmental Science & Technology* 46(3), 1415–1421.

<sup>4</sup> Zum Beispiel Hammes, K., Smernik, R.J., Skjemstad, J.O., Herzog, A., Vogt, U.F., Schmidt, M.W.I. (2006): Synthesis and characterisation of laboratory-charred grass straw (*Oryza sativa*) and chestnut wood (*Castanea sativa*) as reference materials for black carbon quantification. *Organic Geochemistry* 37(11), 1629–1633.

<sup>5</sup> Kuzyakov, Y. et al. (2009), a. a. O.

<sup>6</sup> Lehmann, J., Skjemstad, J., Sohi, S., Carter, J., Barson, M., Falloon, P., Coleman, K., Woodbury, P., Krull, E. (2008): Australian climate-carbon cycle feedback reduced by soil black carbon. *Nature Geoscience* 1, 832–835.

<sup>7</sup> Bird, M.I., Moyo, C., Veenendaal, E.M., Lloyd, J., Frost, P. (1999): Stability of elemental carbon in a savannah soil. *Global Biogeochemical Cycles* 13(4), 923–932.

<sup>8</sup> Nguyen B.T., Lehmann, J., Kinyangi, J., Smernik, R., Riha, S.J., Engelhard, M.H. (2008): Long-term black carbon dynamics in cultivated soil. *Biogeochemistry* 89(3), 295–308.

<sup>9</sup> Schmidt, M.W.I., Skjemstad, J.O., Jäger, C. (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), 701–708.

Tabelle 1

**Biomasse- und Biokohle-Potentiale in Deutschland im Jahr 2030**

Substrate <sup>2</sup>	Biomasse-Potentiale		Biokohle		
	Für energetische Nutzung	Darunter: angenommene Nutzung für Biokohle	Ertrag	Kohlenstoffgehalt	Masse
	1 000 Tonnen Trockenmasse pro Jahr		Prozent		1 000 Tonnen Trockenmasse pro Jahr
Getreidestroh	2 971	1 040	34	70	354
Waldrest- und Schwachholz	9 534	3 337	30	81	1 001
Biomasse aus Offenland	1 264	442	31	69	137
Industrierestholz	3 098	1 084	29	82	314
Holzanteile im Hausmüll <sup>3</sup>	1 225	429	30	81	129
Grünschnitt aus Kompensationsflächen	570	200	32	63	64
Biomasse aus Biotopverbundflächen	1 100	385	31	69	119
Biomasse aus extensivem Grünland	1 630	571	31	69	177
Pappeln und Weiden auf Erosionsflächen	5 500	1 925	25	72	481
<b>Feste Biomasse</b>					
Klärschlamm	965	338	49	35	166
Rinder-Festmist	4 753	1 664	47	51	782
Schweine-Festmist	1 276	447	47	49	210
Geflügel-Festmist	814	285	44	46	125
Gülle (Rinder und Schweine)	8 967	3 138	45	44	1 412
Ernterückstände (Kartoffelkraut und Rübenblatt)	884	309	45 <sup>1</sup>	51 <sup>1</sup>	139
Abfälle aus Gewerbe und Industrie	595	208	37	66	77
Organische Siedlungsabfälle	2 296	804	45 <sup>1</sup>	63	362
Gärreste aus Energiepflanzen (Mais)	3 589	2 692	49	42	1 319
<b>Insgesamt</b>	<b>51 031</b>	<b>19 296</b>	-	-	<b>7 369</b>
<b>Vergärbare Biomasse</b>					

<sup>1</sup> Berechnet als Durchschnitt der entsprechenden Werte für vergärbare Biomasse.

<sup>2</sup> Die Auswahl folgt Nitsch, J. et al. sowie Fritsche, U. R. et al.

<sup>3</sup> Separat erfasste Holzanteile.

Quellen: Nitsch, J. et al. (2004), a. a. O.; Fritsche, U. R. et al. (2004), a. a. O.; Berechnungen des DIW Berlin.

Die größten Biokohlepotentiale bestehen bei Gülle, Gärresten und Waldrest- und Schwachholz.

fekte von vielen Faktoren ab, insbesondere der Art der Pflanze, der Art und Menge der zugegebenen Biokohle, der Art des Bodens und weiteren Umweltbedingungen. Tendenziell werden in den gemäßigten Breiten geringere Wachstumsimpulse erwartet als in tropischen oder subtropischen Regionen, die in der Regel weniger fruchtbare Böden aufweisen.

**Biokohle und die weiteren Konversionsprodukte können energetisch genutzt werden**

Alternativ zur Einbringung in den Boden kann Biokohle auch energetisch genutzt werden.<sup>24</sup> Dies kann dann interessant sein, wenn der Transport oder eine

direkte energetische Nutzung der ursprünglichen Biomasse nicht sinnvoll ist. Dabei ist zum Beispiel eine Mitverbrennung in konventionellen Kohlekraftwerken möglich. Die Heizwerte von Biokohle hängen von der Ausgangsbiomasse und dem gewählten Herstellungsverfahren ab. Bei der Nutzung von Holz im Pyrolyse-Verfahren können beispielsweise Heizwerte von bis zu 30 Megajoule pro Kilogramm (MJ/kg) erreicht werden, was ungefähr dem Heizwert von Steinkohle entspricht.<sup>25</sup> Typische Heizwerte für HTC-Kohlen liegen dagegen zwischen 20 MJ/kg und unter 30 MJ/kg, jedoch deutlich über dem Heizwert von Braunkohle.<sup>26</sup> Generell sind aber auch wesentlich geringere Heizwerte möglich.

<sup>24</sup> Darüber hinaus sind stoffliche Verwendungen der Biokohle denkbar, zum Beispiel als Futterzusatz, als Reduktionsmittel in metallurgischen Prozessen oder als Ausgangsstoff für Kohlefasern und Plastik.

<sup>25</sup> Quicker, P. (2012): Thermochemische Verfahren zur Erzeugung von Biokohle. In: Fricke, K., Bergs, C.-G., Kammann, C., Quicker, P., Wallmann, R. (Hrsg.): Biokohle im Blick - Herstellung, Einsatz und Bewertung. ORBIT, Weimar, 21-33.

<sup>26</sup> Quicker, P. (2012), a. a. O.

Unabhängig von der Verwendung der Biokohle selbst können die als Nebenprodukte der Biokohle-Herstellung entstehenden Bio-Öle und Gase ebenfalls energetisch genutzt werden. Für die Bio-Öle kommt zum Beispiel nach einer entsprechenden Aufbereitung zu Bio-Diesel ein Einsatz als Kraftstoff in Frage.<sup>27</sup> In Abhängigkeit vom gewählten Herstellungsverfahren setzen sich die Gase im Wesentlichen aus Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff, Methan und anderen Kohlenwasserstoffen zusammen. So kann beispielsweise eine Mischung aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff (Synthesegas) zur Erzeugung von Wärme und Strom genutzt werden oder in Kraftstoffe umgewandelt werden.<sup>28</sup>

### Potentiale für den Einsatz von Biokohle in der Landwirtschaft als Kohlenstoffsenke in Deutschland

Vor dem Hintergrund der Klimaziele der Bundesregierung ist von Interesse, welchen Klimaschutzbeitrag die Biokohle leisten könnte. Am DIW Berlin wurden die mögliche Treibhausgasvermeidung durch einen Einsatz von Biokohle in der Landwirtschaft und die entsprechenden Kosten berechnet. Dabei wurde ebenfalls die energetische Nutzung der bei der Biokohle-Herstellung entstehenden Bio-Öle und Gase berücksichtigt.

Auf Grund der großen Bedeutung der Ausgangsbio-masse für Ertrag und Eigenschaften der Biokohle wurden die Vermeidungsmöglichkeiten und -kosten nach der Art der Biomasse differenziert. Betrachtet wurden hier ausschließlich Biokohlen, die im Verfahren der langsamen Pyrolyse hergestellt werden, weil diese im Boden eine hohe Stabilität aufweisen und der Kohlenstofftransfer von der Biomasse zur Biokohle besonders hoch ist.

Exemplarisch werden im Folgenden die Ergebnisse eines ausgewählten Szenarios für das Jahr 2030 präsentiert.<sup>29</sup> Als Referenz dient ein sogenanntes Basis-Szenario, das heißt Annahmen über den alternativen Verbleib der Biomasse, wenn sie nicht in Biokohle umgewandelt wird. Obwohl die Kosten der Kohlenstoff-Sequestrierung mit Biokohle durch mögliche positive Effekte auf die Land-

wirtschaft reduziert werden können, bleiben diese Effekte hier unberücksichtigt.

### Klimaschutzpotential hängt wesentlich von der Biomasseverfügbarkeit ab

Das Treibhausgasvermeidungspotential durch Biokohle hängt neben der Wahl des Basis-Szenarios und anderen Annahmen stark von der angenommenen Biomasseverfügbarkeit ab. Um zu einer möglichst realistischen Abschätzung des Biomassepotentials zu gelangen, welches in Zukunft für die Biokohle-Herstellung in Deutschland zur Verfügung stehen könnte, haben sich die Berechnungen zunächst an Biomassepotentialen für die energetische Nutzung aus der Literatur orientiert.<sup>30</sup> Anschließend wurden Annahmen getroffen, welche Anteile dieses Potentials für die Biokohle genutzt werden könnten. Dabei lag der Fokus vor allem auf Biomasse-Reststoffen. Explizit wurden auch Gärreste aus der Biogas-Herstellung in die Analyse einbezogen, um einer sogenannten Kaskadennutzung Rechnung zu tragen, bei der ein Biomasse-Ausgangsstoff zunächst energetisch und anschließend zur Biokohle-Herstellung genutzt wird.<sup>31</sup>

Tabelle 1 zeigt die Biomassepotentiale, die den Berechnungen für das Jahr 2030 zu Grunde liegen. Dabei wird exemplarisch von relativ hohen Biomasse-Verfügbarkeiten für die Biokohle-Herstellung ausgegangen – 35 Prozent des energetischen Potentials fester und vergärbare Biomassen und 75 Prozent des Gärrestepotentials aus Energiepflanzen.<sup>32</sup> Die Tabelle zeigt auch die aus dieser Biomasse erzeugbare Menge an Biokohle. Die größten Biokohlemengen lassen sich demnach aus Gülle sowie Gärresten aus Energiepflanzen erzeugen, gefolgt von Waldrest- und Schwachholz. Insgesamt stehen in dem gewählten Szenario circa 19 Millionen Tonnen Biomasse-

<sup>27</sup> Slade, R., Saunders, R., Gross, R., Bauen, A. (2011): Energy from biomass: the size of the global resource. Imperial College Centre for Energy Policy and Technology and UK Energy Research Centre, London.

<sup>28</sup> Slade, R. et al. (2011), a. a. O.

<sup>29</sup> Hier wird davon ausgegangen, dass Biokohle in mittelgroßen Pyrolyseanlagen mit einer jährlichen Biomasse-Kapazität in Höhe von 16 000 Tonnen Trockenmasse hergestellt wird. Das demnächst erscheinende DIW-Diskussionspapier enthält eine Reihe weiterer Szenarien bis zum Jahr 2050. Sie unterscheiden sich insbesondere nach dem möglichen Aufkommen an Biomasse je Ausgangssubstrat, nach der Größe der Pyrolyseanlagen sowie nach der Menge an Biokohle, die in den Boden eingearbeitet wird.

<sup>30</sup> Nitsch, J., Krewitt, W., Nast, M., Viebahn, P., Gärtner, S., Pehnt, M., Reinhardt, G., Schmidt, R., Uihlein, A., Scheurlen, K., Barthel, C., Fishedick, M., Merten, F. (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, FKZ 901 41 803, Langfassung, Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal; sowie Fritsche, U. R., Dehoust, G., Jenseit, W., Hünecke, K., Rausch, L., Schüler, D., Wiegemann, K., Heinz, A., Hiebel, M., Ising, M., Kabasci, S., Unger, C., Thrän, D., Fröhlich, N., Scholwin, F., Reinhardt, G., Gärtner, S., Patyk, A., Baur, F., Bemann, U., Groß, B., Heib, M., Ziegler, C., Flake, M., Schmehl, M., Simon, S. (2004): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Verbundprojekt gefördert vom BMU im Rahmen des ZIP, Projektträger: FZ Jülich, Endbericht, Darmstadt, Berlin, Oberhausen, Leipzig, Heidelberg, Saarbrücken, Braunschweig, München.

<sup>31</sup> Vgl. Mumme, J. (2012): HTC, Biogas und Landwirtschaft – das APECS-Konzept. In: Fricke, K., Bergs, C.-G., Kammann, C., Quicker, P., Wallmann, R. (Hrsg.): Biokohle im Blick – Herstellung, Einsatz und Bewertung. ORBIT, Weimar, 135.

<sup>32</sup> Ein alternatives Szenario, auf das hier jedoch nicht näher eingegangen wird, besteht darin, die vergärbare Biomasse-Reststoffe zunächst für die Biogaserzeugung zu nutzen und anschließend die entstehenden Gärreste für die Biokohle-Herstellung zu verwenden.



Tabelle 2

**Potentiale und Kosten der Treibhausgasvermeidung durch Biokohle in Deutschland im Jahr 2030**

	Substrate <sup>2</sup>	Basis-Szenario	Vermeidungspotential		Vermeidungskosten
			Tonnen CO <sub>2</sub> -Äquivalent je Tonne Biomasse (Trockenmasse)	1 000 Tonnen CO <sub>2</sub> -Äquivalent	Euro je Tonne CO <sub>2</sub> -Äquivalent
Feste Biomasse	Getreidestroh	Verrottung im Feld	0,86	893	187
	Waldrest- und Schwachholz	Verrottung im Wald	0,93	3 088	256
	Biomasse aus Offenland	Kompostierung und Bodeneinarbeitung	1,24	547	76
	Industriestholz	Energieerzeugung	-0,19	-206	-
	Holzanteile im Hausmüll <sup>3</sup>	Kompostierung und Bodeneinarbeitung	1,34	575	68
	Grünschnitt aus Kompensationsflächen	Verrottung vor Ort	0,76	152	367
	Biomasse aus Biotopverbundflächen	Kompostierung und Bodeneinarbeitung	1,24	476	76
	Biomasse aus extensivem Grünland	Kompostierung und Bodeneinarbeitung	1,24	707	76
	Pappeln und Weiden auf Erosionsflächen	Energieerzeugung	-0,29	-566	-
Vergärbare Biomasse	Klärschlamm	Kompostierung und Bodeneinarbeitung	0,04	12	4044
	Rinder-Festmist	Lagerung und Bodeneinarbeitung	0,54	897	220
	Schweine-Festmist	Lagerung und Bodeneinarbeitung	0,90	404	148
	Geflügel-Festmist	Lagerung und Bodeneinarbeitung	0,68	194	151
	Gülle (Rinder und Schweine)	Lagerung und Bodeneinarbeitung	-0,62	-1 960	-
	Ernterückstände (Kartoffelkraut und Rübenblatt)	Verrottung im Feld	-0,46	-143	-
	Abfälle aus Gewerbe und Industrie	Kompostierung und Bodeneinarbeitung	0,92	192	119
	Organische Siedlungsabfälle	Kompostierung und Bodeneinarbeitung	0,46	371	277
	Gärreste aus Energiepflanzen (Mais)	Kompostierung und Bodeneinarbeitung	0,05	141	2 979
	<b>Insgesamt</b>	-	-	<b>8 648<sup>1</sup></b>	-

1 Enthält nur die positiven Vermeidungspotentiale.

2 Die Auswahl folgt Nitsch, J. et al. sowie Fritsche, U.R. et al.

3 Separat erfasste Holzanteile.

Quelle: Berechnungen des DIW Berlin.

Es ergeben sich stark unterschiedliche Vermeidungspotentiale und -kosten für die einzelnen Substrate.

se (Trockenmasse) zur Verfügung, aus der über 7 Millionen Tonnen Biokohle gewonnen werden können.

Basierend auf Annahmen in der Literatur wird davon ausgegangen, dass 68 Prozent<sup>33</sup> des Kohlenstoffs in Biokohlen aus fester Biomasse und 34 Prozent<sup>34</sup> des Kohlenstoffs in Biokohlen aus vergärbare Biomasse und Gärresten langfristig, das heißt mindestens hundert Jahre, stabil bleiben. Neben der Kohlenstoff-Sequestrierung durch die Einarbeitung der Biokohle in den Boden fließen außerdem die vermiedenen Emissionen an CO<sub>2</sub>, Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) in die Analyse ein, die durch die Veränderung des konventionellen Biomasse-Managements hin zur Biokohle-Herstellung entstehen. Dazu gehören zum Beispiel Emissionen aus herkömmlicher Güllebehandlung oder Kompostierung. Außerdem werden die vermiedenen Emissionen durch

die Substituierung fossiler Brennstoffe durch die Pyrolyseöle und -gase beachtet. Diese variieren je nachdem, ob man Braunkohle, Steinkohle oder Erdgas ersetzt und diese zur Herstellung von Wärme oder Strom nutzt.<sup>35</sup>

Die Herstellung und Nutzung der Biokohle führt jedoch ebenfalls zu Emissionen, zum Beispiel durch den Transport der Biomasse und Biokohle zwischen Pyrolyseanlage und Feld, durch die Einarbeitung der Biokohle in den Boden und durch Bodenprozesse. Außerdem muss Energie zur Trocknung der Biomassen und für den Pyrolyse-Prozess selbst zur Verfügung gestellt werden. Da die Nachfrage nach dieser Energie erst durch die Biokohle selbst geschaffen wird, geht die Studie davon aus, dass fossile Energiequellen zu ihrer Deckung genutzt werden. Mithin entstehen dabei also Treibhausgasemissionen.<sup>36</sup>

33 Shackley, S., Hammond, J., Gaunt, J., Ibarrola, R. (2011): The feasibility and costs of biochar deployment in the UK. Carbon Management 2(3), 335-356.

34 Eigene Annahmen basierend auf der geringeren Stabilität von Biokohlen mit hohen Aschegehalten. Vgl. Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S., Lehmann, J. (2012): Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. Bioresource Technology 114, 644-653.

35 Für den hier illustrierten Fall wird angenommen, dass bei der energetischen Nutzung der Pyrolyseöle und -gase Steinkohle in der Stromerzeugung ersetzt wird.

36 Es wird hier beispielhaft angenommen, dass die benötigte Wärme für den Pyrolyse-Prozess (inklusive der Trocknung der Biomasse) aus Erdgas gewonnen wird.

Tabelle 2 fasst die Treibhausgasemissionen zusammen, die im Endergebnis durch den Einsatz von Biokohle sowie der Pyrolyseöle und -gase sequestriert beziehungsweise vermieden werden. In dem hier gewählten Beispiel belaufen sie sich auf rund 8,6 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Jahr 2030. Dieses Potential entspricht ungefähr 1,3 Prozent des für 2030 angestrebten Reduktionsziels in Höhe von 678 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>.<sup>37</sup> Das größte Treibhausgasvermeidungspotential weist dabei Biokohle aus Waldrest- und Schwachholz auf, das heißt aus einem relativ trockenen Biomasse-Ausgangsstoff, der zudem in vergleichsweise großen Mengen anfällt.

Nicht eingerechnet in den 8,6 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> ist die Biokohlegewinnung aus den Substraten Industrierestholz, Pappeln und Weiden auf Erosionsflächen, Gülle (Rinder und Schweine) und Ernterückstände (Kartoffelkraut und Rübenblatt), die hier zu positiven Treibhausgasemissionen führen. Die Gründe für die zusätzlichen Treibhausgasemissionen bei der Verwendung von Industrierestholz sowie Pappeln und Weiden liegen in dem gewählten Basis-Szenario, das für beide Ausgangsbiomassen eine energetische Nutzung vorsieht. Dabei wird annahmegemäß Steinkohle ersetzt, was zu deutlichen Emissionsminderungen führt. Wird aus diesen Ausgangsbiomassen stattdessen Biokohle hergestellt, fallen die Emissionsminderungen vergleichsweise gering aus. Bei Gülle und Ernterückständen wiederum sind die bei der Trocknung dieser sehr feuchten Biomassen entstehenden hohen Emissionen Ausschlaggebend für die nachteilige Treibhausgasbilanz.

### Kosten für Kohlenstoff-Sequestrierung mit Biokohle variieren stark und sind teils erheblich

Tabelle 2 enthält auch die spezifischen Kosten, die im Vergleich zum Basis-Szenario mit der Herstellung der Biokohle und ihrer Einarbeitung in den Boden verbunden sind. Diese setzen sich im Wesentlichen zusammen aus den Investitions- und Betriebskosten für die Pyrolyseanlagen, den Substrat- und Transportkosten für die Biomasse sowie den Kosten für den Transport und die Lagerung der Biokohle und ihre Einarbeitung in den Boden. Von den Kosten müssen die Erlöse aus der Bereitstellung der Pyrolyseöle und -gase für energetische Zwecke abgezogen werden sowie die vermiedenen Kosten des Biomasse-Managements im Basis-Szenario.

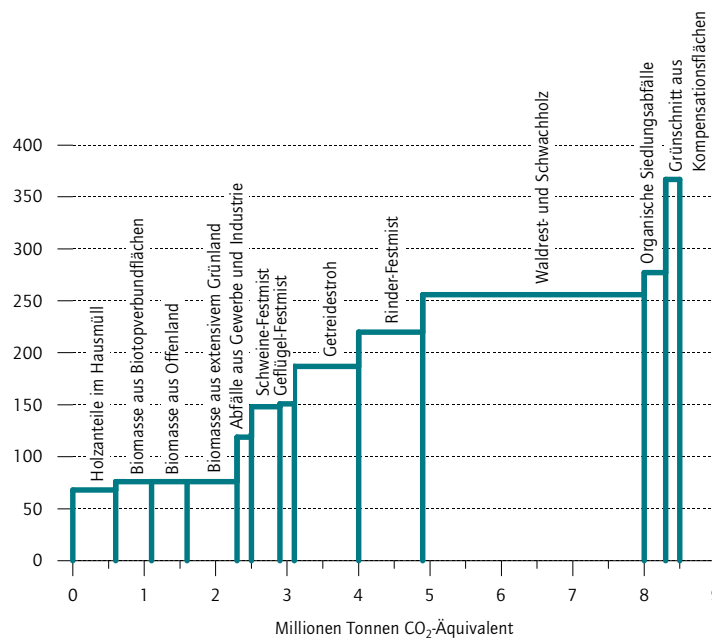
Es zeigt sich, dass sich die Kosten für die Treibhausgasvermeidung unter den hier getroffenen Annahmen für das Jahr 2030 von 68 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> für Holz-

<sup>37</sup> Die 678 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> berechnen sich auf Grundlage der Basisjahr-Emissionen Deutschlands in Höhe von 1 232,4 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> und des Reduktionsziels von 55 Prozent. Siehe UNFCCC (2007): Report of the review of the initial report of Germany.

Abbildung 3

### Grenzvermeidungskostenkurve<sup>1</sup> möglicher Biokohle-Optionen in Deutschland im Jahr 2030

Euro je Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent



<sup>1</sup> Es sind nur Optionen mit Vermeidungskosten unter 400 Euro je Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent dargestellt. Nicht abgebildet sind somit Biokohlen aus Klärschlamm sowie aus Gärresten von Energiepflanzen (Mais). Außerdem sind Optionen mit negativer Emissionsvermeidung nicht berücksichtigt (Industrierestholz, Pappeln und Weiden, Gülle, Ernterückstände).

Quelle: Berechnungen des DIW Berlin.

© DIW Berlin 2014

Gut 2,3 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> können zu Kosten von unter 100 Euro je Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent vermieden werden.

teile im Hausmüll bis über viertausend Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> für Klärschlamm bewegen. Die sehr hohen spezifischen Kosten für Klärschlamm sowie Gärreste aus Energiepflanzen (Mais) werden durch die sehr hohen Wasseranteile dieser Substrate verursacht.

Abbildung 3 fasst die Potentiale und Kosten der Kohlenstoff-Sequestrierung und Treibhausgasvermeidung durch Biokohle in einer sogenannten Grenzvermeidungskostenkurve zusammen. Dabei werden die möglichen Maßnahmen zur Treibhausgasvermeidung – hier basierend auf den Ausgangsbiomassen für die Biokohlen – zunächst nach aufsteigenden Kosten geordnet. Die Vermeidungspotentiale (in Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent) werden für jede Maßnahme an der horizontalen Achse abgetragen und die zugehörigen Kosten (in Euro pro vermiedene Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent) an der vertikalen Achse. Für eine gegebene Menge an Treibhausgasvermeidung erlaubt die so konstruierte Kurve, die Kosten abzulesen, die mit einer weiteren Einheit Treibhausgasvermeidung verbunden wären – die sogenannten Grenzver-

meidungskosten. Die Kurve zeigt damit an, durch welche Maßnahmen ein gesetztes Ziel zur Treibhausgasreduktion am effizientesten erreicht werden kann. Gleichzeitig kann man für einen gegebenen Kohlenstoffpreis – wie er sich zum Beispiel in einem Emissionshandelssystem einstellt – ablesen, wie viele Treibhausgasemissionen vermieden werden können, wenn man nur solche Maßnahmen zur Treibhausgasvermeidung berücksichtigt, deren Kosten maximal so hoch sind wie der Kohlenstoffpreis.

Für das Jahr 2030 ergibt sich aus Abbildung 3, dass im Bereich von unter 100 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent durch die Biokohle nur circa 2,3 Millionen Tonnen Treibhausgase vermieden werden können, das heißt nur ungefähr 0,3 Prozent des Reduktionsziels für das Jahr 2030. Dabei handelt es sich um Biokohle aus folgenden Ausgangsstoffen: Holzanteile im Hausmüll, Biomasse aus Biotopverbundflächen, Biomasse aus Offenland sowie Biomasse aus extensivem Grünland.

Die berechneten Werte sind vergleichbar mit den Ergebnissen einer ähnlichen Studie für das Vereinigte Königreich von Großbritannien.<sup>38</sup> Sie kommt zu dem Ergebnis, dass durch den Einsatz von Biokohle in der britischen Landwirtschaft in Abhängigkeit vom gewählten Biomasse-Aufkommen jährlich ungefähr ein bis sechs Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> vermieden werden können, allerdings zu einem Preis von nur 29 US-Dollar pro Tonne CO<sub>2</sub> (bezogen auf das Jahr 2007), das heißt zu circa 21 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>.<sup>39</sup>

Ein Vergleich der Biokohle mit anderen Treibhausgasvermeidungsmaßnahmen erlaubt kein pauschales Urteil. Verglichen mit einer – aus heutiger Sicht unrealistischen<sup>40</sup> – weitreichenden Implementierung von CCS im Energiesektor erscheinen ihr Treibhausgasvermeidungspotential gering und ihre Kosten hoch. McKinsey & Co. nehmen für das Jahr 2030 für CCS ein Vermeidungspotential von 66 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> an, zu Kosten von 30 bis 90 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>.<sup>41</sup> Dagegen wird für die energetische Nutzung von Biomasse – allerdings für das Jahr 2020 – in der gleichen Studie ein Vermeidungspotential von neun Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> angenommen, wobei die Kosten zum Großteil unter 30 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> liegen. Für Treibhausgasver-

meidung durch den Einsatz bestimmter Biokraftstoffe ist im Jahr 2020 mit Kosten von 190 bis 240 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> zu rechnen, bei einem nur geringen Vermeidungspotential von circa einer Million Tonnen CO<sub>2</sub>.

Das Treibhausgasvermeidungspotential durch Biokohle und die dazugehörigen Kosten sind in hohem Maße davon abhängig, welche Annahmen über die zukünftigen Entwicklungen getroffen werden. Dazu gehören insbesondere das gewählte Basis-Szenario, die fossilen Brennstoffe, die für Biomasse-Trocknung und Pyrolyse genutzt beziehungsweise durch Pyrolyseöle und -gase ersetzt werden, sowie Größe und Verteilung der Pyrolyse-Anlagen. So können durch eine Veränderung der Annahmen durchaus weitere Kostensenkungspotentiale bestehen beziehungsweise die Treibhausgasvermeidungspotentiale steigen.

### Fazit

Biokohle entsteht durch die Erhitzung von Biomasse unter nahezu vollständigem Sauerstoffausschluss. Sie ist durch einen hohen Kohlenstoffanteil gekennzeichnet, der zudem sehr stabil ist. Außerdem besitzt sie große Nährstoff- und Wasserspeicherkapazitäten. Diese Eigenschaften machen die Biokohle interessant für einen Einsatz in der Landwirtschaft. Durch ihre Einbringung in den Boden kann der Atmosphäre langfristig Kohlenstoff entzogen werden. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, die Bodenfruchtbarkeit zu erhöhen.

Unter der Annahme, dass sich in Zukunft genau quantifizieren lässt, wie viel Kohlenstoff durch Biokohle dauerhaft im Boden gespeichert werden kann, stellt der Einsatz von Biokohle in der deutschen Landwirtschaft grundsätzlich eine mögliche Option für den Klimaschutz dar, die andere Maßnahmen der Emissionsvermeidung ergänzen könnte. Der Beispielrechnung zufolge könnten durch den landwirtschaftlichen Einsatz von Biokohle in Deutschland ungefähr 1,3 Prozent des für 2030 angestrebten Treibhausgasreduktionsziels erreicht werden, davon ungefähr 0,3 Prozent zu Kosten von unter 100 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>.

Die konkreten Treibhausgasvermeidungspotentiale und dazugehörigen Kosten sind dabei von den gewählten Szenario-Annahmen abhängig, insbesondere vom zur Verfügung stehenden Biomasseaufkommen. Dabei sind auch Nutzungskonkurrenzen mit der Nahrungsmittelproduktion und der energetischen Nutzung von Biomasse zu beachten, die in einer Szenario-basierten Analyse kaum näher betrachtet werden können. Die zukünftige Forschung wird außerdem zeigen, inwieweit ein möglicher landwirtschaftlicher Zusatznutzen der Biokohle in Form von erhöhter Bodenfruchtbarkeit ihre Treibhausgasvermeidungspotentiale und -kosten verbessert.

<sup>38</sup> Shackley, S. et al. (2011), a. a. O.

<sup>39</sup> Die Umrechnung erfolgte auf Grundlage des durchschnittlichen Wechselkurses von 1,3705 US-Dollar je Euro im Jahr 2007. Siehe: Deutsche Bundesbank (2012): Euro reference exchange rates of the European Central Bank: End-of-year rates and annual averages. Exchange rate statistics as of Dec 31, 2012.

<sup>40</sup> Vgl. von Hirschhausen, C. et al. (2012), a. a. O.

<sup>41</sup> McKinsey & Company (2007): Costs and potentials of greenhouse gas abatement in Germany. A report by McKinsey & Company, Inc., on behalf of „BDI initiativ – Business for Climate“.

In anderen Klimaregionen könnte sich die Bewertung der Biokohle anders darstellen als in Deutschland. Insbesondere in den Tropen und Subtropen, die in der Regel stark degradierte Böden aufweisen, könnte der bodenverbessernde Effekt der Biokohle erheblich sein. Dies untermauert nicht zuletzt das Beispiel der *Terra Preta*.

Während sich die vorliegende Analyse auf die Einbringung der Biokohle in den Boden konzentriert hat, soll-

te ergänzend die energetische Nutzung von Biokohle näher untersucht werden. Dabei könnte insbesondere die Verwendung feuchter Biomasse-Reststoffe zur Herstellung von Biokohle im HTC-Verfahren und ihre energetische Verwendung eine wirtschaftliche Alternative darstellen. Durch optimierte Kombinationen von Ausgangsbiomassen, Biokohle-Herstellungsverfahren und Biokohleverwendung dürften sich die Einsatzmöglichkeiten vergrößern und die Kosten senken lassen.

Isabel Teichmann ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin | iteichmann@diw.de

## CLIMATE PROTECTION THROUGH BIOCHAR IN THE GERMAN AGRICULTURAL SECTOR: POTENTIAL AND COSTS

---

**Abstract:** In recent years, there has been much discussion about biochar—a carbonaceous product of heating biomass—as a promising technique for mitigating climate change. In particular, this method has the potential to remove carbon dioxide from the atmosphere in the long term by incorporating biochar into the soil while enhancing soil fertility at the same time.

A research project conducted by DIW Berlin calculates the greenhouse gas mitigation potential and possible costs

of using biochar in German agriculture. According to this study, approximately one percent of the greenhouse gas reduction target for 2030 could be met using biochar, but largely at a cost of over a hundred euros per tonne of CO<sub>2</sub>. With this technique, however, the potential for reducing greenhouse gas emissions is limited by the availability of biomass. The possible agricultural benefits of biochar in the form of enhanced soil fertility could improve the greenhouse gas reduction potential and costs. This may be of particular relevance in tropical and subtropical regions.

JEL: Q15, Q24, Q54

**Keywords:** Biochar, Soil Carbon Sequestration, Climate Change, Agriculture



DIW Berlin – Deutsches Institut  
für Wirtschaftsforschung e.V.  
Mohrenstraße 58, 10117 Berlin  
T +49 30 897 89 -0  
F +49 30 897 89 -200  
[www.diw.de](http://www.diw.de)  
81. Jahrgang

#### Herausgeber

Prof. Dr. Pio Baake  
Prof. Dr. Tomaso Duso  
Dr. Ferdinand Fichtner  
Prof. Marcel Fratzscher, Ph.D.  
Prof. Dr. Peter Haan  
Prof. Dr. Claudia Kemfert  
Prof. Karsten Neuhoff, Ph.D.  
Dr. Kati Schindler  
Prof. Dr. Jürgen Schupp  
Prof. Dr. C. Katharina Spieß  
Prof. Dr. Gert G. Wagner

#### Chefredaktion

Sabine Fiedler  
Dr. Kurt Geppert

#### Redaktion

Renate Bogdanovic  
Sebastian Kollmann  
Dr. Richard Ochmann  
Dr. Wolf-Peter Schill

#### Lektorat

Dr. Vanessa von Schlippenbach

#### Textdokumentation

Manfred Schmidt

#### Pressestelle

Renate Bogdanovic  
Tel. +49-30-89789-249  
[presse@diw.de](mailto:presse@diw.de)

#### Vertrieb

DIW Berlin Leserservice  
Postfach 74, 77649 Offenburg  
[leserservice@diw.de](mailto:leserservice@diw.de)  
Tel. 01806 - 14 00 50 25,  
20 Cent pro Anruf  
ISSN 0012-1304

#### Gestaltung

Edenspiekermann

#### Satz

eScriptum GmbH & Co KG, Berlin

#### Druck

USE gGmbH, Berlin

Nachdruck und sonstige Verbreitung –  
auch auszugsweise – nur mit Quellen-  
angabe und unter Zusendung eines  
Belegexemplars an die Serviceabteilung  
Kommunikation des DIW Berlin  
([kundenservice@diw.de](mailto:kundenservice@diw.de)) zulässig.

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier.