

FYI

LANDGEWINN
INSIGHTS



Pflanzenkohle als C-Senke: technische, ökonomische und ökologische Aspekte

Begleitdokument für die Datenzusammenstellung zur
Herstellung von Pflanzenkohle durch Pyrolyse

Elmar Zozmann und Clara Lenk

*Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
(IÖW)*

Existierende ökonomisch-ökologische Bewertungen zur Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle sind häufig aufgrund ihres Fallstudiencharakters nicht generalisierbar. Um eine aktuelle und generalisierbare Datengrundlage für weitere Analysen zu schaffen, werden in der Datenzusammenstellung drei generische Prozesskonfigurationen für die Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle definiert. Die Prozesskonfigurationen basieren auf empirisch erhobenen Daten, die um weitere Angaben aus der Literatur ergänzt werden. Dieser Begleittext beschreibt relevante technische, ökonomische und ökologische Parameter. Einleitend wird kurz der Pyrolyseprozess, die Vorgehensweise der Recherche und die Ableitung der Prozesskonfigurationen dargestellt.

Inhalt

Abkürzungen.....	2
1. Beschreibung des Pyrolyseprozess	3
2. Methodische Hinweise	5
2.1 Vorgehensweise der Recherche	5
2.2 Ableitung der Prozesskonfigurationen.....	5
3. Parameter	6
3.1 Technisch	6
3.1.1 Eigenschaften der Ausgangsbiomasse	6
3.1.2 Prozessführung während der Pyrolyse.....	7
3.2 Ökonomisch.....	8
3.3 Ökologisch.....	9
4. Literaturverzeichnis	11

Abkürzungen

PK	Pflanzenkohle
C	Kohlenstoff
O	Sauerstoff
H	Wasserstoff

1. Beschreibung des Pyrolyseprozess

Pyrolyse ist ein thermochemisches Umwandlungsverfahren, in dem organische wie nicht-organische Ausgangsstoffe in einer sauerstoffarmen Umgebung erhitzt und in feste, flüssige und gasförmige Komponenten umgewandelt werden. Durch die Abwesenheit von Sauerstoff findet keine Verbrennung statt, sondern es kommt zur sogenannten *pyrolytischen Zersetzung* des Ausgangsmaterials, die gleichzeitig die erste Stufe von Vergasungs- oder Verbrennungsprozessen darstellt. Die bei der pyrolytischen Zersetzung von Biomasse entstehenden festen, flüssigen und gasförmigen Produkte werden als Pflanzenkohle, Pyrolyseöl und Synthesegas bezeichnet (Roberts et al. 2010).

Pflanzenkohle (PK) ist ein festes, kohlenstoffreiches Material, das durch die Pyrolyse von Biomasse entsteht. Durch die Pyrolyse wird der von der Ausgangsbiomasse aufgenommene Kohlenstoff thermisch stabilisiert. Die Herstellung und Anwendung von PK bietet deshalb Möglichkeiten zur langfristigen Sequestrierung von Kohlenstoff (C) als Negativemissionstechnologie (Roberts et al. 2010; Schmidt et al. 2019). Wenn PK in landwirtschaftlich genutzten Böden ausgebracht wird, kann es zu einer Verbesserung der Mikrobiologie, des Nährstoffhaushalts, der Bodenstruktur und der Wasserspeicherfähigkeit führen (Schmidt et al. 2021b). Neben PK entsteht in der Pyrolyse dunkelbraunes **Pyrolyseöl**, das aus einer Vielzahl von chemischen Verbindungen besteht. Pyrolyseöl lässt sich aufgrund des vergleichsweise hohen Energiegehaltes als Kraftstoff verwenden¹ oder kann zur Energiegewinnung verbrannt werden. Die gasförmige Komponente des Pyrolyseprozess wird **Synthesegas** genannt und besteht unter anderem aus Kohlenstoffmonoxid und -dioxid, Wasserstoff und Methan. Synthesegas ist ein brennbares Gas und kann für die Bereitstellung von Prozess- oder zusätzlicher Wärmeenergie verwendet werden (Li et al. 2023; Tripathi et al. 2016). Die Herstellung und Anwendung von PK wird deshalb häufig als vielversprechende Technologie zur langfristigen Sequestrierung von C in Verbindung mit erneuerbarer Energiegewinnung bezeichnet.

Basierend auf der Ausgangsbiomasse und den gewünschten Proportionen der festen, flüssigen und gasförmigen Produkte existieren unterschiedliche Pyrolyseverfahren. Die Verfahren werden anhand der Reaktorverweildauer, der Reaktortemperatur und der Aufheizrate klassifiziert oder auch anhand weiterer Bedingungen, wie Reaktordruck oder der Zugabe von Wasserstoff. Die Reaktortemperatur und die Aufheizrate haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Mengenanteile der Pyrolyseprodukte. Eine schnelle Aufheizrate in Verbindung mit einer hohen Temperatur führt zu einer Maximierung des Pyrolyseölertrags. Umgekehrt führen geringere Temperaturen mit langsameren Aufheizraten zu einer Maximierung des Pflanzenkohleertrags. Bei der langsamen Pyrolyse ist ein typisches Ertragsverhältnis 35 % PK, 35 % Synthesegas und 30 % Pyrolyseöl (Roberts et al. 2010; Li et al. 2023; Tripathi et al. 2016).

Technologisch wird zwischen kontinuierlich betriebenen Reaktoren und sogenannten Batchreaktoren unterschieden. Kontinuierlich betriebene Reaktoren haben

¹ Dies ist typischerweise erst nach Upgrading möglich, da der Energiegehalt von Pyrolyseöl trotzdem noch wesentlich geringer ist als beispielsweise der Energiegehalt fossiler Energieträger.

einen durchgehenden Biomassedurchlauf, während Batchreaktoren nach jedem Pyrolyseprozess neu befüllt werden (Hofbauer et al. 2016; Li et al. 2023).

Da die langsame Pyrolyse auf die maximale Herstellung von Pflanzenkohle abzielt, fokussiert diese Datenzusammenstellung dieses Verfahren. Die Datenzusammenstellung beschreibt einige relevante technische, ökonomische und ökologische Parameter der Herstellung von PK mittels langsamer Pyrolyse. Im Folgenden wird das methodische Vorgehen geschildert und anschließend relevante Parameter zur technischen, ökonomischen und ökologischen Darstellung der Pflanzenkohleherstellung beschrieben. Die aus unterschiedlichen Quellen recherchierte Zusammenstellung der hier beschriebenen Parameter wird als gesonderte Tabelle veröffentlicht.

2. Methodische Hinweise

2.1 Vorgehensweise der Recherche

Zur Erhebung von Primärdaten wurden im Jahr 2022/23 Fragebögen an Hersteller von Pyrolyseanlagen versandt. Abgefragt wurden neben technischen Angaben zur Pyrolyseanlage und dem Pyrolyseprozess, wie Anlagenkennzahlen und In- und Outputdaten, auch ökonomische Angaben (Kosten, Finanzierung, Kostenentwicklung, Erlöse). Angefragt wurden insgesamt acht Unternehmen aus Deutschland und Österreich, von denen vier den Fragebogen, auch durch unterstützende Telefoninterviews, ausgefüllt haben, teilweise auch für mehrere Anlagengrößen. Aus Datenschutzgründen werden die erhobenen Daten als ein „best guess“ für drei unterschiedliche Anlagengrößen in der Datenzusammenstellung aufgeführt. Der „best guess“ stellt eine Mittelung der erhobenen Daten für eine durchschnittliche Anlagengröße basierend auf der subjektiven Einschätzung der Qualität der Daten dar.

Zusätzlich zur Primärdatenerhebung wurde eine Literaturrecherche zu technischen, ökonomischen und ökologischen Parametern durchgeführt. Die Recherche umfasst wissenschaftliche Literatur, Ergebnisse und Ergebnisberichte aus (Forschungs-)Projekten und öffentlich zugängliche Angaben von Anlagenherstellern. Für die Erhebung der ökologischen Parameter wurde außerdem auf die im Projekt Landgewinn durchgeführte Metastudie zurückgegriffen. Hier wurde Literatur zu Ökobilanzierung von Pflanzenkohle zusammengetragen und ausgewertet. Für die Datenzusammenstellung wurden 10 Studien aus der Metastudie ausgewählt und um eine Dissertation, Herstellerangaben und einen Datensteckbrief ergänzt.

2.2 Ableitung der Prozesskonfigurationen

Aus den zusammengestellten Daten wurden drei generische Prozesskonfigurationen abgeleitet. Diese umfassen Annahmen über technische, ökonomische und ökologische Faktoren der Herstellung und Anwendung von PK und sind im Tabellenblatt „Prozesskonfigurationen“ zu finden. Die Prozesskonfigurationen wurden hauptsächlich aus den Ergebnissen der Datenerhebung abgeleitet, da die Literaturdaten häufig veraltet sind oder nicht auf empirischen Daten basieren. Die Prozesskonfigurationen sollen als Ausgangspunkte für weitere Analysen dienen.

3. Parameter

Die hier vorgestellten Parameter haben einen Einfluss auf die Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle und stellen gleichzeitig das Analyseraster dar, mit dem die gesammelten Daten aus der Recherche strukturiert zusammengestellt wurden. Nicht alle der hier vorgestellten Parameter konnten in der Datenzusammenstellung erfasst werden, werden aber qualitativ als Einflussfaktoren andiskutiert.

3.1 Technisch

Für die Herstellung von Pflanzenkohle sind maßgeblich die *Eigenschaften der Ausgangsbiomasse* und die *Prozessführung während der Pyrolyse* relevant.

3.1.1 Eigenschaften der Ausgangsbiomasse

Die Ausgangsbiomasse hat einen wesentlichen Einfluss auf den Pyrolyseprozess und die Eigenschaften der Pyrolyseprodukte PK, Synthesegas und Pyrolyseöl. Zu den relevanten Eigenschaften der Ausgangsbiomasse gehören:

- **Art der Biomasse:** Biomasse kann in unterschiedliche Hauptgruppen eingeordnet werden, wie beispielsweise holzartige Biomasse, halmgutartige Biomasse oder aquatische Biomasse. Jede Biomasseart hat unterschiedliche Brennstoffeigenschaften. Die Brennstoffeigenschaften haben einen Einfluss auf den Pyrolyseprozess und auf die Eigenschaften der Pyrolyseprodukte (Hofbauer et al. 2016).
- **Brenn-/Heizwert:** Brennwert und Heizwert sind wichtige Kenngrößen zur Beschreibung der Brennstoffeigenschaften einer Biomasse. Der Heizwert beschreibt die Wärmemenge, die bei einer vollständigen Verbrennung ohne Berücksichtigung der Verdampfungswärme des in der Biomasse enthaltenen Wassers freigesetzt wird. Im Unterschied dazu berücksichtigt der Brennwert die Kondensationswärme des bei der Verbrennung gebildeten Wasserdampfes (Hofbauer et al. 2016). Ein hoher Heizwert bei der Ausgangsbiomasse bedeutet beispielsweise, dass im Pyrolyseprozess viel thermische Energie über eine Verbrennung von Synthesegas und Pyrolyseöls ausgekoppelt werden kann.
- **Wassergehalt:** Der Wassergehalt beschreibt den Anteil an Wasser in der Biomasse und beeinflusst den Heiz- und Brennwert der Biomasse (Hofbauer et al. 2016). Während der pyrolytischen Zersetzung reduziert die freigesetzte Reaktionsenergie die Feuchtigkeit in der Biomasse. Biomasse mit einem Wassergehalt von über 30 % ist nicht geeignet für die langsame Pyrolyse, da sonst während des Prozesses zu viel Energie zum Trocknen gebraucht wird. Biomasse mit einem höheren Wassergehalt kann deshalb vorgetrocknet werden. Grundsätzlich ist allerdings trockene Biomasse besser geeignet, da weniger Energie für die Pyrolyse gebraucht wird (Tripathi et al. 2016).
- **Partikelgröße:** Einige Studien zeigen, dass größere Partikel der Ausgangsbiomasse die Wärmeübertragung in die Biomasse verlangsamen und so die Bildung von PK begünstigen. Andere Studien haben allerdings widersprüchliche Ergebnisse. Die genaue Rolle der Partikelgröße ist noch unklar und weitere Forschung ist erforderlich (Tripathi et al. 2016).
- **Elementare Zusammensetzung:** Biomasse besteht chemisch hauptsächlich aus Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H). Die

Mengenanteile von C, O und H wirken sich maßgeblich auf die Pyrolyse-Outputs aus. Ein hoher Anteil an C in der Ausgangsbiomasse führt in der Regel zu mehr Pflanzenkohle (Tripathi et al. 2016). Gleichzeitig ist relevant, in welcher Bindungsform die Elemente vorliegen. Die Biopolymere *Lignin*, *Hemizellulose* und *Zellulose* sind Hauptbestandteile von biogenen Feststoffen und sind größtenteils aus den genannten Hauptelementen aufgebaut. Sie bestimmen die Struktur und Eigenschaften der Biomasse und beeinflussen entsprechend auch die Pyrolyse (Hofbauer et al. 2016). Ein hoher Anteil von Lignin führt in der Regel zu mehr Pflanzenkohle, während ein hoher Anteil von Zellulose zu mehr Synthesegas führt (Li et al. 2023).

In der Datenzusammenstellung werden von den oben genannten Parametern die Art der Biomasse, der Wassergehalt und der Heizwert der eingesetzten Biomasse erfasst.

3.1.2 Prozessführung während der Pyrolyse

Neben der Ausgangsbiomasse beeinflussen verschiedene Parameter des Pyrolyseprozesses die Ausbeuten sowie die Qualität und Zusammensetzung der Pyrolyseprodukte. Im Folgenden werden einige Parameter kurz diskutiert. Ein umfassender Überblick der Auswirkungen der Prozessparameter findet sich in der Studie von Li et al. (2023) oder Tripathi et al. (2016). Grundsätzlich beeinflussen die Parameter *Reaktionstemperatur*, *Aufheizrate* und *Verweildauer* sowohl die Erträge als auch die stofflichen Eigenschaften der Pyrolyseprodukte.

- **Reaktionstemperatur:** Die Temperatur im Pyrolysereaktor beeinflusst maßgeblich die Erträge der angestrebten Pyrolyseprodukte. Höhere Temperaturen führen in der Regel zu einer Zunahme von flüssigen und gasförmigen Produkten und zu einer Abnahme von PK (Li et al. 2023; Tripathi et al. 2016; Hofbauer et al. 2016). Unterschiedliche Quellen nennen als Maximaltemperatur für die langsame Pyrolyse ~400 °C (Hofbauer et al. 2016), 300-600 °C (Li et al. 2023) oder 550-950 °C (Tripathi et al. 2016).
- **Aufheizrate der Biomasse:** Die Aufheizrate beschreibt, wie schnell die Biomasse auf Reaktionstemperatur gebracht wird. Tendenziell führt eine langsamere Aufheizrate zu mehr PK und eine schnelle Aufheizrate zu mehr gasförmigen und flüssigen Outputs. Bei der Flashpyrolyse, wo der Fokus auf der Erzeugung von Pyrolyseöl liegt, wird die Biomasse innerhalb von einer Sekunde mit ca. 1000 °C aufgeheizt. Bei der langsamen Pyrolyse wird die Biomasse mit einer niedrigen Aufheizrate von bis zu 1 °C pro Sekunde erhitzt (Hofbauer et al. 2016; Li et al. 2023; Tripathi et al. 2016).
- **Verweildauer im Pyrolysereaktor:** Tendenziell fördert eine längere Verweildauer die Bildung von PK und führt zu einem höheren Kohlenstoffgehalt in der PK. Eine zu lange Verweilzeit kann die Ausbeute von PK aber auch reduzieren, wenn elementare Bindungen weiter zersetzt werden (Li et al. 2023; Tripathi et al. 2016). Unterschiedliche Quellen beziffern die Verweildauer für die langsame Pyrolyse auf Stunden bis Tage (Hofbauer et al. 2016), auf fünf Minuten bis zwei Stunden (Li et al. 2023) oder auch auf nur fünf bis zehn Minuten (Tripathi et al. 2016).

In der Datenzusammenstellung wird von den genannten Parametern lediglich die Reaktionstemperatur aufgeführt, da die anderen beiden Parameter selten angegeben werden. Stattdessen liegt der Fokus der Datenzusammenstellung bei den technischen Parametern auf der Anlagengröße (Biomassedurchsatz), dem Energieverbrauch, den Ausbeuten der Pyrolyseprodukte PK, Synthesegas und Pyrolyseöl sowie deren stofflichen Eigenschaften. Weiterhin wird die thermische und elektrische Auskopplung von Energie, sofern vorhanden, erfasst.

3.2 Ökonomisch

Für eine Wirtschaftlichkeitsbewertung der Herstellung von Pflanzenkohle mittels Pyrolyse sind einmalige *Investitionskosten* und periodische *Betriebskosten* relevant. Zu den einmaligen Investitionskosten gehört beispielsweise die Anfangsinvestition in den Anlagenbau. Periodische Betriebskosten beschreiben Kosten für Wartung und Instandhaltung, aber auch Kosten für Personal oder Versicherung. Auf eine Betrachtung von variablen Kosten für den Brennstoffeinsatz sowie andere Betriebsmittel wie Strom/Gas oder Wasser wird hier verzichtet, da diese projektspezifisch räumlich wie zeitlich stark variieren.

Die *Investitionskosten* für eine Pyrolyseanlage können in Kostenpositionen für die Biomassevorbereitung, den Pyrolyseaktor, die Nachbereitung und Verladung der PK, einer möglichen Energieauskopplung sowie baulichen Anlagen unterschieden werden. Zusätzlich entstehen Investitionsnebenkosten, die hauptsächlich die Kosten für Projektierung, Installation sowie Genehmigungs- und Prüfverfahren umfassen.

- **Biomassevorbereitung:** Zu Investitionskosten für die Biomassevorbereitung gehören – je nach eingesetzter Ausgangsbiomasse – Anlagen zur Trocknung, zur Zerkleinerung und Fördertechnik. Die erforderlichen Anlagen unterscheiden sich je nach notwendiger Vorbereitung. Werden beispielsweise fertig pelletierte, getrocknete Holzhackschnitzel angeliefert, besteht gegebenenfalls gar kein Investitionsbedarf. Wird feuchtes Waldrestholz verwendet, muss es vor der Pyrolyse getrocknet und zerkleinert werden. Wird eine feuchte Biomasse wie Klärschlamm eingesetzt, ist eine andere Fördertechnik und eine Vortrocknung notwendig.
- **Pyrolyseaktor:** Der Pyrolyseaktor unterscheidet sich nach eingesetzter Technologie.
- **Nachbereitung und Verladung der PK:** Nach Austritt aus dem Reaktor wird die PK in der Regel mit Wasser gekühlt, um die Gefahr von Bränden zu minimieren. Ein übliches Verpackungssystem für die Lagerung und den Transport ist die Befüllung in sogenannte „Big-Bags“. Wird die PK mit Nährstoffen aufgeladen, entstehen gegebenenfalls noch Extrakosten, beispielweise für einen Kompostwender.
- **Energieauskopplung:** Im Falle einer thermischen Energieauskopplung können Extrakosten für die Wärmeauskopplung und/oder für einen thermischen Speicher entstehen. Im Falle einer elektrischen Energieauskopplung entstehen Kosten für die Umwandlung von thermischer in elektrische

Energie, beispielsweise durch eine Heißgasturbine oder eine ORC-Anlage.²

- **Bauliche Anlagen:** Üblicherweise fallen bei Pyrolyseanlagen Kosten für ein Substratlager, einen Unterstand/Halle/Container für die Anlage selbst sowie für die Lagerung der PK an. Je nach Projekt können auch Kosten für das Grundstück anfallen.

In der Datenzusammenstellung sind die aufgeführten Kostenpositionen, sofern veröffentlicht, ausdifferenziert dargestellt.

Die *Betriebskosten* für eine Pyrolyseanlage können in Kosten für die Wartung und Instandhaltung, Personalkosten, Versicherungskosten, Kapitalkosten und sonstige Kosten unterschieden werden. Je nach Projekt/Unternehmung können unter sonstige Kosten beispielsweise Kosten für Marketing oder Werbung fallen. Anfallende Kapitalkosten sind stark von Zinssatz und Anteilen des eingesetzten Eigen- und Fremdkapitals abhängig. Da Kapitalkosten sehr projektspezifisch sind, werden diese nicht in der Datenzusammenstellung erfasst.

3.3 Ökologisch

Für eine ökologische Bewertung der Pflanzenkohletechnologie sind sowohl energetische Parameter als auch Eigenschaften der Pflanzenkohle relevant. Im Rahmen der Datenzusammenstellung wurden Energie-Inputs und -Outputs, der Ertrag der Pflanzenkohle im Verhältnis zum Biomasseinput, die Biomasseart, der Kohlenstoffgehalt der Pflanzenkohle und die Stabilität dieser ausgewertet. Weiterhin wurden auch die Applikationsraten der Pflanzenkohle in den Boden, sowie weitere Effekte auf den Boden ausgewertet. Zusammenfassend wurden, soweit angegeben, auch die Treibhausgaspotentiale in CO₂-Äquivalenten erhoben.

- Zu den Eigenschaften der **Biomassen** siehe Kapitel 3.1.1.
- **Kohlenstoffgehalt:** Die Pyrolyse von Biomasse zu Pflanzenkohle hat das Potential Kohlenstoff zu binden und weist als Prozess ein Sequestrierungspotential auf. Dieses basiert auf dem Kohlenstoffgehalt, dem Wassergehalt und der angenommenen Stabilität der Pflanzenkohle. Exemplarisch für eine Tonne produzierte Pflanzenkohle mit einem Wassergehalt von 0 %, einem C-Gehalt von 50 % und einer Stabilität von 80 % ergibt sich ein theoretisches Potential von 1468 kg CO₂-eq.
- Emissionen die bei der Bereitstellung von Biomasse, der Herstellung der Pflanzenkohle und dem Transport entstehen müssen bei der Berechnung auch miteinbezogen werden und verringern das Potential entsprechend.
- Im Pyrolyseprozess können **Strom und Wärme ausgekoppelt** und genutzt werden und es besteht die Möglichkeit in der Ökobilanz eine Gutschrift anzurechnen für vermiedene Energie aus dem Strommix bzw. Wärmemix.
- Auch **weitere Effekte auf den Boden** wurden in einigen Studien ausgewertet. In Pflanzenkohle in der Landwirtschaft werden mögliche Effekte zusammengefasst (Schmidt et al. 2021a): Unter anderem die

² Eine ORC-Anlage (Organic Rankine Cycle-Anlage) ist eine Art thermodynamisches Mikrokraftwerk, in dem aus thermischer Energie elektrische Energie erzeugt wird.

Verringerung von Bodenemissionen wie N_2O , die Verringerung von Düngemittleinsatz oder eine Erhöhung des Ertrags. In den ausgewerteten Studien werden vor allem reduzierte N_2O -Emissionen betrachtet. Zum Teil finden auch der verringerte Düngemittleinsatz und die Ertragssteigerung Einzug in die Berechnungen.

- Die Ergebnisse der unterschiedlichen Studien in Bezug auf das **THG-Potential** variieren pro Tonne Pflanzkohle zwischen -114 kg CO_2 -eq. und -3014 kg CO_2 -eq. Je nach Fokus der Studie wird die Wirkung auch in Bezug auf den Biomasseinput angegeben (Ibarrola et al. 2012; Mohammadi et al. 2019).

4. Literaturverzeichnis

- Hofbauer, Hermann, Martin Kaltschmitt, Frerich Keil, Dietrich Meier und Johannes Welling (2016): Pyrolyse. In: *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*, hg. v. Martin Kaltschmitt, Hans Hartmann, und Hermann Hofbauer, S. 1183–1265. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Ibarrola, Rodrigo, Simon Shackley und James Hammond (2012): Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: A life cycle carbon assessment. *Waste Management* 32, Nr. 5 (Mai): 859–868.
- Li, Yize, Rohit Gupta, Qiaozhi Zhang und Siming You (2023): Review of biochar production via crop residue pyrolysis: Development and perspectives. *Biore-source Technology* 369 (Februar): 128423.
- Mohammadi, Ali, Maria Sandberg, G. Venkatesh, Samieh Eskandari, Tommy Dalggaard, Stephen Joseph und Karin Granström (2019): Environmental analysis of producing biochar and energy recovery from pulp and paper mill biosludge. *Journal of Industrial Ecology* 23, Nr. 5 (Oktober): 1039–1051.
- Roberts, Kelli G., Brent A. Gloy, Stephen Joseph, Norman R. Scott und Johannes Lehmann (2010): Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic, and Climate Change Potential. *Environmental Science & Technology* 44, Nr. 2 (15. Januar): 827–833.
- Schmidt, Hans-Peter, Andrés Anca-Couce, Nikolas Hagemann, Constanze Werner, Dieter Gerten, Wolfgang Lucht und Claudia Kammann (2019): Pyrogenic carbon capture and storage. *GCB Bioenergy* 11, Nr. 4 (April): 573–591.
- Schmidt, Hans-Peter, Nikolas Hagemann, Fredy Abächerli, Jens Leifeld und Thomas Bucheli (2021a): Pflanzenkohle in der Landwirtschaft. Hintergründe zur Düngertilassung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken. Agroscope. <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/46567> (Zugriff: 5. Juli 2022).
- Schmidt, Hans-Peter, Claudia Kammann, Nikolas Hagemann, Jens Leifeld, Thomas D. Bucheli, Miguel Angel Sánchez Monedero und Maria Luz Cayuela (2021b): Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy* 13, Nr. 11 (November): 1708–1730.
- Tripathi, Manoj, J.N. Sahu und P. Ganesan (2016): Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55 (März): 467–481.