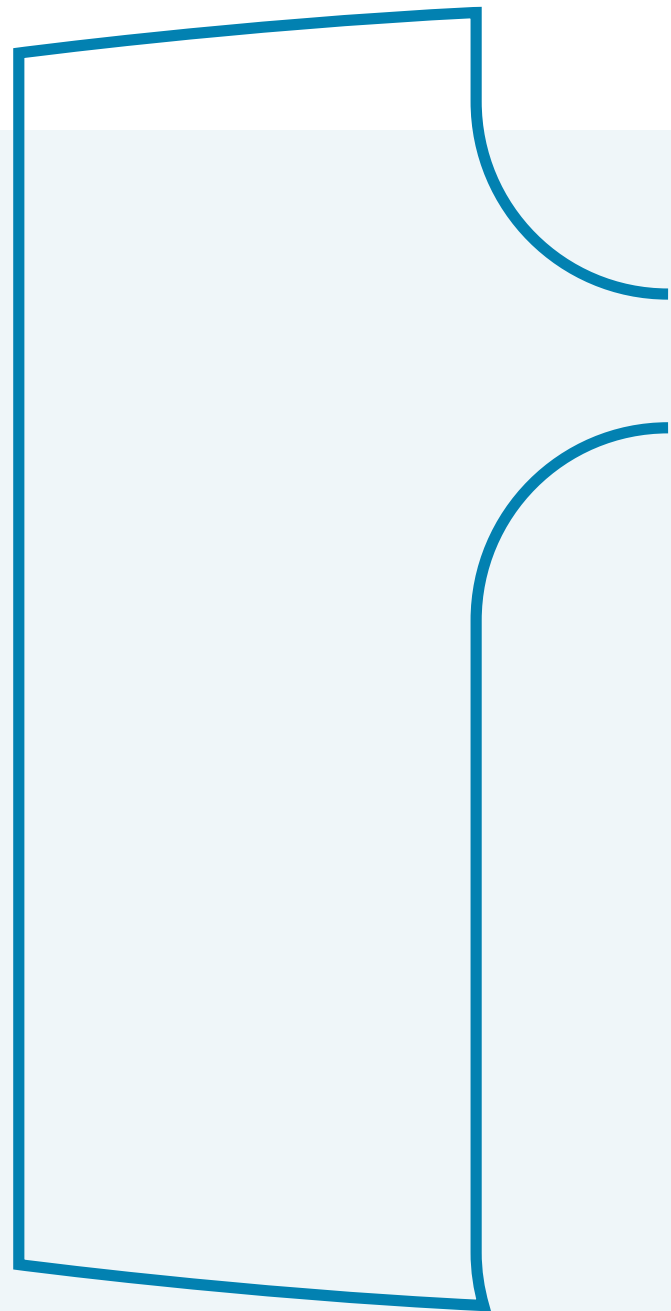


DAS UNTERSCHÄTZTE KLIMASCHUTZPOTENZIAL VON PFLANZENKOHLE (BIOCHAR)

Autor:innen:

Marleen Greenberg, Jana Kapfer,
Robert Werner

Hamburg, 03.12.2024





Ob Paris-Abkommen, Net Zero Act der EU oder die von der deutschen Bundesregierung angestrebte Klimaneutralität bis 2045: Diese und weitere Klimaziele werden ohne **negative Emissionen – also der aktiven Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre** – praktisch nicht zu erreichen sein. Allerdings werden in unternehmerischen und kommunalen Klimastrategien negative Emissionen – Removals – oftmals übergangen und konkrete Zielpfade für negative und auch nicht-energetische Emissionen fehlen meist.

Die Reduktion von Treibhausgasemissionen hat die höchste Priorität für den Klimaschutz. Negativemissionen adressieren schwer zu vermeidende oder unvermeidbare Restemissionen, die durch Kohlenstoffsinken ausgeglichen werden können. Zudem dienen sie auch der Wiedergutmachung historischer Emissionen.

Das Thema Negativemissionen rückt sektorübergreifend zunehmend in den Fokus. Die Bundesregierung hat mit der Entwicklung einer „Langfriststrategie Negativemissionen“ (LNe) begonnen. Biochar Carbon Removal (BCR) ist dabei Teil des Lösungsprofils. Sie hat das Potenzial, zu einem **wichtigen Lösungsbaustein im Bereich Carbon Management** zu werden. Durch den Pyrolyse-Prozess und die entsprechende Nutzung von Pflanzenkohle kann der Atmosphäre Kohlenstoff entzogen und langfristig gebunden werden. Doch um klimarelevante Dimensionen zu erreichen, benötigt diese Technologie **geeignete Rahmenbedingungen zur Skalierung**.

Diese Veröffentlichung gibt einen breiten Überblick zum aktuellen Stand im Themenfeld Biochar Carbon Removal und zeigt auf, warum BCR eine vielversprechende Methode im immer wichtiger werdenden Bereich der Negativemissionen ist. Die Biomasse-Technologie der Pyrolyse wird ebenso betrachtet wie Einsatzmöglichkeiten und die Marktlage von Pflanzenkohle. Welche Chancen sich **speziell für Kommunen** ergeben, wird in einem eigenen Kapitel beleuchtet. Der abschließende Ausblick fasst zusammen, was es jetzt braucht, um Biochar Carbon Removal zum Durchbruch zu verhelfen.

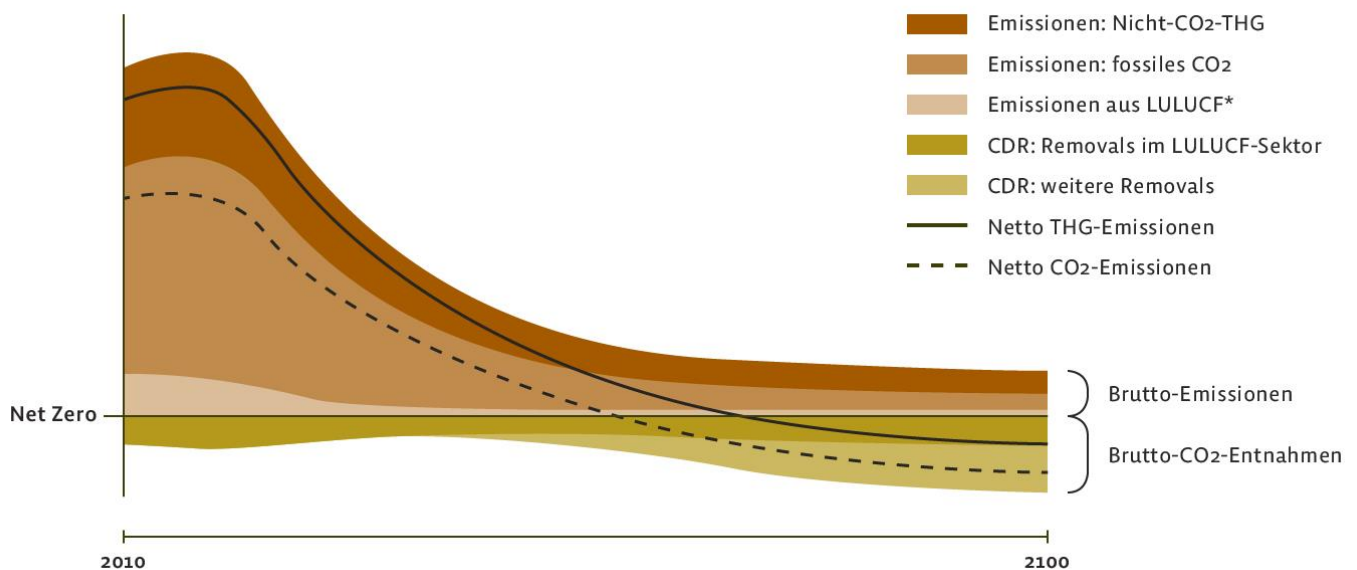


INHALT

1. Treibhausgasneutralität durch Negativemissionen	4
1.1 Der Stellenwert negativer Emissionen in der europäischen und deutschen Klimastrategie	5
1.2 Welche Technologien für negative Emissionen stehen zur Verfügung?	7
2. Biomasse-Pyrolyse – Einblick in die Technologie.....	9
2.1 Ablauf des technischen Verfahrens	10
2.2 Kriterien für geeignete Biomasse	12
2.3 Potenziale an ungenutzter Biomasse in Deutschland.....	12
2.4 Zertifizierung von Pflanzenkohle bzw. Pyrolyse-Anlagen	13
3. Einsatzmöglichkeiten für Pflanzenkohle	15
3.1 In der Landwirtschaft	15
3.2 In Materialien	16
3.3 Im kommunalen Umfeld.....	17
4. Wirtschaftlichkeit	18
5. Eine Chance für Kommunen?.....	20
5.1 Konkurrenz um Biomasse	21
5.2 Schadstoffbelastung	23
5.3 Fazit.....	23
6. Ausblick: Abbau von regulatorischen Hürden und wirtschaftliche Anreize nötig.....	24
6.1 Einfache und klare Regulatorik	25
6.2 Verbesserte Anreize für die Verbreitung	25
6.3 Aufnahme von Pflanzenkohle in Klimabilanzen.....	26
7. Quellenliste.....	27

1. TREIBHAUSGASNEUTRALITÄT DURCH NEGATIVEMISSIONEN

Treibhausgasneutralität, Net Zero – diese Begriffe beschreiben das Ziel, lediglich so viele Treibhausgasemissionen zu produzieren, wie wieder aus der Atmosphäre entnommen werden. Aber: Selbst bei weitgehender Reduzierung der menschengemachten Emissionen werden immer noch in einigen Sektoren Treibhausgase entstehen – bspw. in der Landwirtschaft oder durch industrielle Prozesse. Daher richtet sich der Fokus seit einigen Jahren verstärkt auf Methoden, die diese Restemissionen ausgleichen können – indem Kohlenstoffdioxid bzw. der darin enthaltene Kohlenstoff dauerhaft gebunden und auf diese Weise dem natürlichen Kreislauf entzogen wird. Übersteigt der gebundene Anteil sogar die Menge der aktuellen Emissionen, kann der Kohlenstoffdioxid-Gehalt der Atmosphäre langfristig gesenkt werden.



*Land Use, Land Use Change and Forestry (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft)

Rolle von CDR (Carbon Dioxide Removal), also der Entnahme von Kohlenstoff aus der Atmosphäre, in der Projektion des Weltklimarates IPPC. Quelle: Babiker et al. 2022

Abbildung 1: Der IPPC unterscheidet zwischen Treibhausgasen allgemein (inklusive z.B. Methan und Lachgas) und Kohlenstoffdioxid-Emissionen (CO₂). Derzeit gibt es nur Lösungen für die dauerhafte Bindung von Kohlenstoff. Die Klimawirkung anderer Treibhausgase muss durch die Bindung entsprechend größerer Mengen Kohlenstoff ausgeglichen werden.

Bereits 2018 stellte der Weltklimarat (IPCC 2018) klar, dass es nach seinen Berechnungen ohne die dauerhafte Generierung von Kohlenstoffsinken keinen Weg zum Erreichen der Klimaziele gebe. Das Gremium sprach sich gleichzeitig auch für den schnellen Einsatz entsprechender Maßnahmen aus: Je länger damit gewartet werde, desto stärker müsse später auf Kohlenstoffdioxidbindung gesetzt werden, damit die Erderwärmung noch auf das 1,5-Grad-Ziel begrenzt werden kann.

[Unter Expert:innen besteht Konsens, dass ohne die aktive Entnahme von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre weder das 1,5-Grad-Ziel noch die Netto-Null-Strategie der EU bis 2050 bzw. das deutsche Ziel der Klimaneutralität bis 2045 erreicht werden können.](#)

Auf kommunaler Ebene fehlen heute immer noch in vielen Fällen konkrete Zielpfade für die nicht-energetischen Emissionen sowie für Removals – häufig auch aus Unsicherheit hinsichtlich möglicher Handlungsoptionen. Pflanzenkohle kann hier eine Lösung sein, da sich mit ihr dezentral Negativemissionen erzielen lassen. Deshalb müssen dringend das verfügbare Wissen über die Potenziale dieser Technologie, ein beständiger rechtlicher Rahmen und eine Förderung zur Errichtung entsprechender Anlagen in die Breite getragen werden.

1.1 Der Stellenwert negativer Emissionen in der europäischen und deutschen Klimastrategie

Nachdem auch Modellierungen auf EU-Ebene ergaben, dass das ausgegebene Ziel der Klimaneutralität bis 2050 nur mit großen Mengen an gebundenem Kohlenstoff möglich ist, wurde mit dem European Green Deal im Jahr 2021 ein erster rechtlicher Rahmen für den Einsatz der nötigen Technologien und der Anrechnung entsprechender Zertifikate geschaffen (EU Climate Law (Regulation (EU) 2021/1119). Im selben Jahr veröffentlichte die Kommission außerdem eine Strategie für verbesserte Anreize, diese Technologien auch einzusetzen. So sollen forst- und landwirtschaftliche Betriebe einfacher Einkünfte durch die Schaffung von Kohlenstoffsinken erwirtschaften können. Vom gesamten Sektor sollen bis 2030 zusätzlich 42 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente in Pflanzen und Böden festgelegt werden. Finanzielle Anreize sollen auch durch die Budgets der Gemeinsamen Agrarpolitik und des Kohäsionsfonds ermöglicht werden. Gleichzeitig soll der industrielle Sektor im selben Zeitraum fünf Millionen Tonnen Kohlenstoff abscheiden. Über das EU-Rahmenprogramm für Forschung und Innovation (Horizon) werden vermehrt Forschungsgelder bereitgestellt (Schenuit & Geden 2022). Innerhalb der EU gelten vor allem die Niederlande, Norwegen, Dänemark und Schweden als Verfechter einer verstärkten Nutzung von Kohlenstoffdioxidbindung als Mittel zur Klimaneutralität (Schenuit et al. 2022).

Zwei wichtige Komponenten der Gesetzgebung in diesem Zusammenhang sind die Regularien für den Sektor Landnutzung und Forstwirtschaft (engl. Land-Use, Land-Use Change and Forestry LULUCF) und die weitere Ausgestaltung des EU-Emissionshandels (engl. Emissions Trading System ETS).

- Für den Sektor Landnutzung und Forstwirtschaft gilt seit 2018 die Vorgabe, dass verursachte Emissionen durch die Entfernung einer gleichen Menge an Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre ausgeglichen werden. Darüberhinausgehende Emissionsminderungen waren bisher durch das Europäische Klimagesetz auf 225 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid bis 2030 begrenzt. Damit sollte sichergestellt werden, dass in anderen Sektoren ausreichende Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden. Im März 2023 vereinbarten die Mitgliedsländer dann eine gesteigerte Treibhausgas-Emissionsreduktion von 310 Millionen Tonnen. Für die Jahre 2026 bis 2030 gelten verbindliche Ziele (Rat der EU 2023). Die Mitgliedsländer müssen ihre

Fortschritte zu diesem Ziel in detaillierten Berechnungen nachweisen. Außerdem ist es erlaubt, Emissionen aus anderen Sektoren zu einem gewissen Grad durch negative Emissionen in der Land- und Forstwirtschaft auszugleichen (Schenuit & Geden 2022). Mit diesen Entscheidungen steigt der Bedarf an Möglichkeiten zur Kohlenstofffestlegung in Forsten und Böden.

- In der derzeitigen Ausgestaltung des EU-Emissionshandels können sich Betriebe entnommenes Kohlenstoffdioxid auf ihre Zertifikate anrechnen lassen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2024). Es ist aber nicht möglich, dass z.B. Verursacher von Industrieemissionen Zertifikate aus Kohlenstoffdioxidentnahme durch Aufforstung erwerben können, um ihre Klimabilanz zu verbessern. Durch diese Maßnahme ließen sich allerdings stärkere finanzielle Anreize für eine Kohlenstoffdioxidfestlegung schaffen. Angesichts des großen Interesses in der Fachwelt, des ambitionierten Klimaziels der Kommission und der weiteren Ausgestaltung der gesamten Klimapolitik rückt das Thema negative Emissionen deswegen zunehmend auf die politische Agenda (Schenuit & Geden 2022).

Deutschland strebt sogar noch früher als die EU, nämlich bis 2045, eine Treibhausgasneutralität an. In den Jahren danach sollen negative Emissionen die historisch im weltweiten Vergleich hohen Emissionen zu einem Teil wieder ausgleichen. Um dieses Ziel zu erreichen, sind neben der Emissionsminimierung in allen Sektoren und einer geänderten Ernährung der Bevölkerung auch natürliche und technische Verfahren zur dauerhaften Bindung von Kohlenstoffdioxid nötig (Merfort et al. 2023; CDRterra 2024b). Der Bedarf richtet sich nach den Restemissionen, die auf jährlich 60 bis 130 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxidäquivalente geschätzt werden. Im Koalitionsvertrag vom 7. Dezember 2021 wird von etwa 5 Prozent¹ unvermeidbaren Restemissionen gesprochen, was rund 63 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente entspricht. Laut Klimaschutzgesetz (KSG) sollen bis 2045 40 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxidäquivalente durch den LULUCF-Sektor gebunden werden. Daraus ergibt sich eine Lücke von 23 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente. Der im KSG gesetzte Zielwert der LULUCF CO₂-Entnahmeleistung weicht derzeit jedoch noch deutlich von den aktuellen LULUCF-Nettoemissionen ab (CDRterra 2024a).

- Zu den natürlichen Verfahren der Kohlenstoffdioxid-Entnahme aus der Atmosphäre gehören u.a. die Steigerung der Bodenkohlenstoffaufnahme und die Aufforstung bzw. der Umbau von Wäldern und somit höhere Beiträge zum Klimaschutz für den LULUCF-Sektor. Derzeit gleichen sich die Produktion von Kohlenstoffdioxid durch den Sektor und die Bindung in Biomasse ungefähr aus. Die im KSG gesetzten Ziele geben bis 2045 Meilensteine für eine Steigerung auf eine Netto-Kohlenstoffdioxid-Entnahme von 40 Millionen Tonnen vor (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2024b). Wie auch auf EU-Ebene ergibt sich aus den höheren Zielen für den Sektor die Chance, die besonders unter dem Klimawandel leidenden Branchen wie Land- und Forstwirtschaft aktiv einzubinden.
- Die Diskussion in Deutschland zu technischen Lösungen zog sich länger hin, weil befürchtet wurde, sie könnten von den Branchen mit hohem Emissionsminderungsbedarf als Vorwand für weniger ambitionierte Ziele genutzt werden. Nun will die Bundesregierung mit einer Carbon Management-Strategie (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2024a) und einer

¹ 5 Prozent gemessen an den Gesamtemissionen des Jahres 1990.



Langfriststrategie Negativemissionen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2024b) einen Rahmen für die Nutzung von Kohlenstoffbindungstechnologien und für den Transport und die Speicherung von Kohlenstoffdioxid schaffen. Unterschiedlichste Technologien der Kohlenstoffdioxidabscheidung und -nutzung (CCU²) bzw. -speicherung (CCS, BECCS, DACCS³) sollen bewertet werden.

1.2 Welche Technologien für negative Emissionen stehen zur Verfügung?

Negative Emissionen werden erzielt, indem Kohlenstoffdioxid bzw. der darin enthaltene Kohlenstoff in sogenannten Kohlenstoffsenken dauerhaft gebunden und damit dem Kohlenstoffkreislauf entzogen wird. In der Natur kommen diese Senken bereits vor: Böden, Vegetation, Verwitterungskarbonate und fossile Brennstoffe enthalten große Mengen an gespeichertem Kohlenstoff. Mehrere Maßnahmen für eine gezielte Erhöhung der gebundenen Mengen werden bereits angewendet bzw. erprobt, insbesondere:

1. **Aufbau organischer Bodensubstanz:** Geänderte Anbau- und Nutzungsmethoden erhöhen den Kohlenstoffgehalt im Humus und gleichzeitig die Bodenfruchtbarkeit. Der Kohlenstoff kann allerdings bei einer Nutzungsänderung auch schnell wieder entweichen.
2. **Aufforstung:** Kohlenstoff wird in den Bäumen gespeichert. Zudem kann durch ihre Verwendung als Bauholz Kohlenstoff längerfristig gebunden werden.
3. **Gezielte Gesteinsverwitterung:** Durch die Zerkleinerung von Gestein wird seine Verwitterung beschleunigt und Kohlenstoff langfristig in Carbonaten gebunden. Das Gesteinsmehl kann auf Ackerböden aufgetragen werden – und je nach Gesteinsart deren Gehalt an Nährstoffen erhöhen. Die Zerkleinerung erfordert allerdings einen hohen Energieeinsatz. Die Methode wurde in Deutschland bisher nur zu Forschungszwecken und kleinen Pilotprojekten eingesetzt.
4. **Kohlenstoffdioxidabscheidung und -lagerung:** Kohlenstoffdioxid wird direkt aus der Luft (DACCS) oder aus dem Rauchgas von Biomasseverbrennungen (BECCS) gebunden und dauerhaft in unterirdische Lagerstätten verpresst. Die Methode erfordert hohen technischen Einsatz und hat hohen Regulierungsbedarf. Auch ist die Akzeptanz der Lagerstätten durch die Bevölkerung nicht

² CCU (engl. Carbon Capture and Utilization): Kohlenstoffdioxid-Emissionen werden in bestimmten Bereichen bzw. Prozessen abgeschieden und anschließend genutzt, z. B. in der Industrie und der Abfallwirtschaft. Wichtig: Hierbei werden keine Negativemissionen erzielt.

³ CCS (engl. Carbon Capture and Storage): Das abgeschiedene Kohlenstoffdioxid wird nicht genutzt, sondern in tiefliegenden geologischen Gesteinsschichten gespeichert, z.B. unter der Nordsee. Durch eine dauerhafte und sichere Speicherung würde eine Kohlenstoffsenke geschaffen.

BECCS (engl. Bioenergy and Carbon Capture and Storage): Bei der Erzeugung von Bioenergie entstehendes Kohlenstoffdioxid kann abgeschieden und gelagert werden.

DACCS (engl. Direct Air Capture and Storage): Kohlenstoffdioxid kann auch direkt aus der Luft gebunden und dann gespeichert werden.

immer gegeben.

- 5. Biochar Carbon Removal:** Über Pyrolyse kann der in Biomasse enthaltene Kohlenstoff über Jahrhunderte bis Jahrtausende gebunden und vielfältig genutzt werden. Wird die Pflanzenkohle in eine geeignete, langlebige Speichermatrix eingebracht, entstehen negative Emissionen.

Removals			Abscheidung
(Wieder-)Aufforstung, Agroforst, Forstmanagement	Speicherung von Bio-Öl	Enhanced Weathering	CCS/CCU in der Industrie
Restaurierung von (Küsten) Feuchtgebieten	Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)	Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS)	CCS/CCU bei der Nutzung von Prozessemissionen
Langlebige Holzprodukte	Ozeandüngung	Direct Ocean Carbon Capture and Storage	
Kohlenstoffspeicherung in Böden (Acker & Grünland)	Vergraben/Versenken von Biomasse	CO ₂ -Speicherung langlebigen Produkten (Holz, Mineralisch)	
Biochar Carbon Removals (BCR)			

Auswahl an Methoden zur Kohlenstoffdioxidentnahme. Quelle: Eigene Darstellung, 2024

Abbildung 2: Neben Reduktion und Vermeidung von Treibhausgasemissionen werden konventionelle biologische Methoden (Aufforstung und Aufbau von Bodensubstanz) sowie hybride biologisch-technische Methoden (Kohlenstoffdioxidabscheidung, BCR) zur Entnahme von Kohlenstoff aus der Atmosphäre in Deutschland bereits eingesetzt. Zum physikalisch-chemischen Verfahren der Gesteinsverwitterung (Enhanced Weathering) laufen derzeit eine Vielzahl an Forschungsprojekten, u.a. ein EU-gefördertes Forschungsvorhaben (Europäische Kommission, 2020).

Konventionelle biologische Maßnahmen zielen darauf ab, die Menge des durch die Photosynthese in Pflanzen gespeicherten Kohlenstoffs zu erhöhen und langfristig zu speichern. Im Jahr 2020 betrug die Menge des in Deutschland durch Aufforstung und Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten der Atmosphäre entzogenen Kohlenstoffdioxids 64 Millionen Tonnen (Merfort et al. 2023). Die größten möglichen Senken für Kohlenstoff bieten allerdings die Böden: In Deutschland speichern sie etwa fünf Milliarden Tonnen Kohlenstoff (CDRterra 2024). Durch geeignete Ackerbau- bzw. forstwirtschaftliche Nutzungsmethoden ließe sich der Kohlenstoffgehalt der Böden noch weiter steigern. Die Verfahren können auch dem Arten- oder Hochwasserschutz zugutekommen. Sie haben allerdings den Nachteil, keine besonders langfristigen und



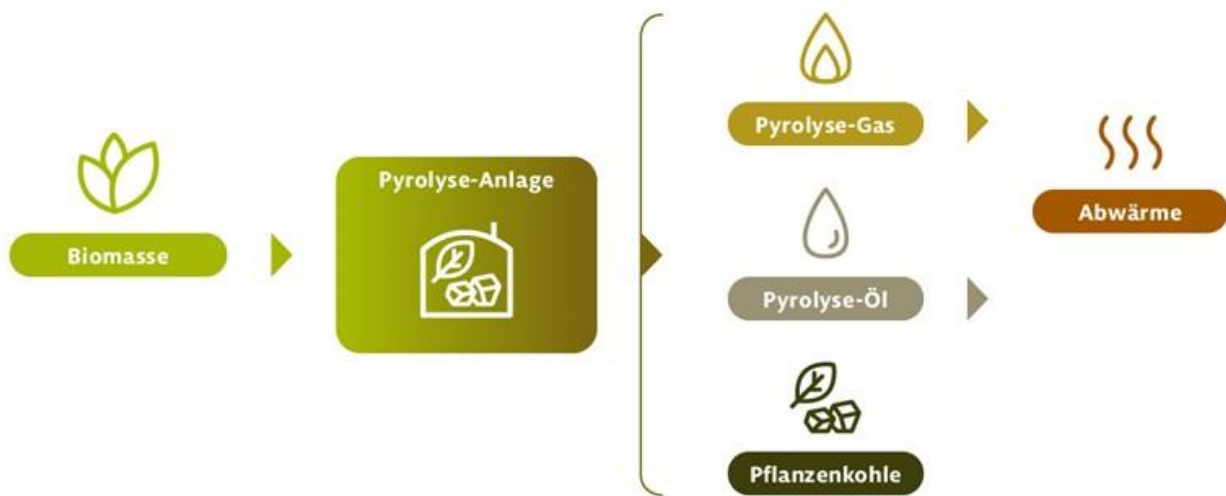
sicheren Speicher zu sein. Bei Waldbränden, Dürre oder Schädlingsbefall sterben die Bäume, und auch der im Boden gespeicherte Kohlenstoff wird durch die Änderung der Bewirtschaftungsform in unterschiedlichem Umfang wieder freigesetzt. Zudem sind die in Deutschland zur Verfügung stehenden Flächen und ihr Fassungsvermögen an Kohlenstoff begrenzt.

Die lange Lebensdauer der entstehenden Kohlenstoffsene ist auch das Hauptargument für biologisch-technische Verfahren. Sie wandeln die Biomasse in stabile Kohlenstoffformen um, die im optimalen Fall über Jahrhunderte bis Jahrtausende nicht in die Atmosphäre gelangen (CDRterra 2024). So kann das bei der Gewinnung von Energie aus Biomasse entstehende Kohlenstoffdioxid auf dem Rauchgas abgeschieden und in unterirdischen Hohlräumen verpresst gespeichert werden. Auch die durch Pyrolyse hergestellte Pflanzenkohle überführt den Kohlenstoff in ein sehr langlebiges Speicherprodukt. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass in den heutzutage erhältlichen modernen Anlagen ein einfach weiterzuverwendender Feststoff entsteht und keine Infrastruktur für die Verflüssigung und Weiterleitung des Kohlenstoffdioxids vorhanden sein muss. Wie lange der Kohlenstoff in Form von Pflanzenkohle der Atmosphäre entzogen bleibt, ist abhängig von der anschließenden Verwendung.

Während abgeschiedenes und verpresstes Kohlenstoffdioxid nicht weiter genutzt wird, entsteht bei der Pyrolyse ein marktfähiges Endprodukt, das als Futterkohle, Bodenverbesserungsmittel und als Grundstoff für Kunststoffe und Baumaterial eingesetzt werden kann.

2. BIOMASSE-PYROLYSE – EINBLICK IN DIE TECHNOLOGIE

Pflanzenkohle entsteht, wenn Biomasse bei hohen Temperaturen unter Sauerstoffmangel erhitzt wird. Dieser thermo-chemische Umwandlungsprozess wird Pyrolyse oder pyrolytische Zersetzung genannt. Durch die hohen Temperaturen und die limitierte Sauerstoffverfügbarkeit kann die Biomasse nicht vollständig zu Asche verbrennen. Im Material vorhandene größere Moleküle werden allerdings aufgespalten und in kleinere Verbindungen umgewandelt. Die Biomasse trennt sich in feste, flüssige und gasförmige Bestandteile. Es entstehen ein kohlenstoffreicher Feststoff (die Pflanzenkohle, engl. Biochar) sowie in Abhängigkeit von Temperatur und Dauer der Zersetzung unterschiedlich große Mengen an Pyrolyse-Gas und einer Flüssigkeit namens Pyrolyse-Öl.



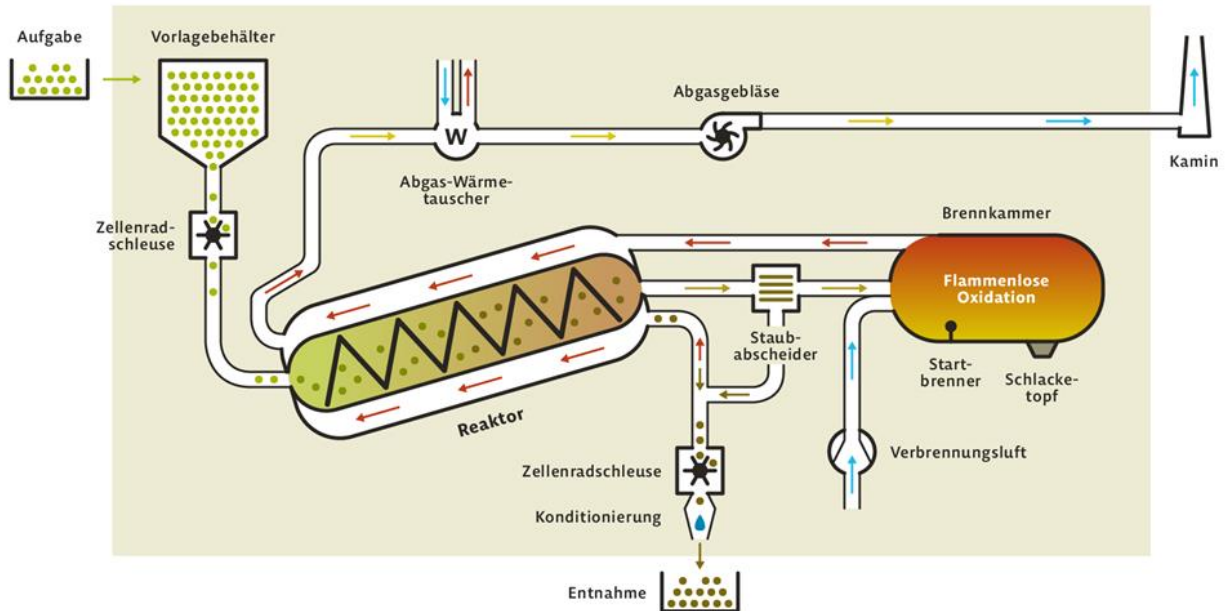
Darstellung der entstehenden Endprodukte. Quelle: Eigene Darstellung, 2024

Abbildung 3: Bei der Verarbeitung von Biomasse in Pyrolyseanlagen entstehen mehrere Produkte. Der Feststoff Pflanzenkohle kann für diverse Anwendungen genutzt werden, u.a. zum Erzeugen von negativen Emissionen. Durch die Verbrennung von Pyrolyse-Gas und -Öl entsteht Abwärme, welche z.B. für die Trocknung des Ausgangsmaterials oder zur Einspeisung in Wärmenetze genutzt werden kann. Alternativ bestehen für Pyrolyse-Gas und -Öl noch weitere Anwendungsoptionen.

2.1 Ablauf des technischen Verfahrens

Grundsätzlich können heutzutage alle Arten organischer Reststoffe für die Produktion von Pflanzenkohle verwendet werden, die auch für die Energieerzeugung in Biogasanlagen in Frage kommen: Dazu zählen Reststoffe aus der Land- und Forstwirtschaft (z.B. Gülle, Holzhackschnitzel) sowie organische Reststoffe aus der Zellstoffproduktion, der Lebensmittelindustrie oder der Biotonne, außerdem Klärschlamm und nachwachsende Rohstoffe wie z.B. Maisstroh. Pro Tonne produzierte Pflanzenkohle werden zwischen 114 und 3.014 Kilogramm CO₂-Äquivalente festgelegt (Zozmann & Lenk 2023).

Die verschiedenen Reaktoren, die zur Pyrolyse genutzt werden, wenden alle ein ähnliches Prinzip an. Variierende Faktoren sind etwa die Menge an zugeführtem Sauerstoff, die Verweildauer im Reaktor, die Erhitzungsrate und die finale Temperatur. All diese Faktoren nehmen Einfluss auf die Qualität und Verteilung der Endprodukte (Zozmann & Lenk 2023): Ein schnelles Aufheizen in Verbindung mit hohen Temperaturen resultiert in höherem Ertrag an Pyrolyse-Öl. Umgekehrt steigern geringere Temperaturen, langsames Aufheizen und längere Verweildauer den Pflanzenkohleertrag. Zu unterscheiden sind außerdem kontinuierlich laufende Anlagen und sogenannte Batchreaktoren, die nach jedem Prozess neu befüllt werden.



Beispielhafte Darstellung des Ablaufs einer Biomasse-Pyrolyse. Quelle: Eigene Darstellung basierend auf dem PYREG-Verfahren (PYREG GmbH o.D.).

Abbildung 4: Der Prozess der Herstellung von Pflanzenkohle beinhaltet immer die drei Schritte Biomassevorbereitung (z.B. Zerkleinerung und Trocknung), Erhitzung in der Anlage und Weiterverarbeitung bzw. -nutzung der Endprodukte und der Abwärme. Die Prozessenergie moderner Anlagen kann durch die Abkopplung der Wärme bzw. über die Verbrennung des selbsthergestellten Pyrolyse-Gases bzw. -Öls gedeckt werden.

Beim Vergleich mit einer Verbrennungsanlage für Biomasse zur Wärmeerzeugung werden die Unterschiede der Verfahren deutlich: Die Verbrennungsanlage ist dafür optimiert, mit hohem Wirkungsgrad Biomasse in Wärmeenergie umzuwandeln. Moderne Pyrolyse-Anlagen mit langsamer Verkohlung sind darauf ausgelegt, einen maximal hohen Anteil an Pflanzenkohle zu erzeugen. Die entstehende Wärme steht für die Trocknung des Ausgangsmaterials zur Verfügung. Überschüsse können ggf. in entsprechende Wärmenetze eingespeist werden.

Die Pyrolyse dient also der langfristigen Bindung von Kohlenstoff zum Ausgleich von klimawirksamen Emissionen in Verbindung mit der Erzeugung erneuerbarer Energie.

- Das Pyrolyse-Gas besteht aus Kohlenstoffmonoxid und -dioxid, Wasserstoff und Methan (Zozmann & Lenk 2023). Es kann mit dem sogenannten FLOX-Verfahren (Flammlose Oxidation des Brennstoffs) zur Aufrechterhaltung des Temperaturniveaus bei der Verkohlung in der Anlage oder auch über einen Wärmetauscher zu Heizzwecken verwendet werden (Bauböck & Karpenstein-Machan 2021).

- Das entstehende Pyrolyse-Öl kann abgeschieden und energetisch bzw. zur Herstellung von Biokraftstoffen genutzt werden sowie als weitere Option für Kohlenstoffspeicherung dienen. Die Ölabscheidung ist derzeit noch keine gängige Praxis, kann aber in Zukunft ein relevanter Aspekt werden. In der chemischen Industrie kommen außerdem stoffliche Anwendungen in Frage.
- Die Pflanzenkohle kann je nach Qualität für eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten genutzt werden. Als freiwilliger Branchenstandard hat sich das European Biochar Certificate (EBC) durchgesetzt, das neben Qualitätsanforderungen auch den geplanten Einsatz der Pflanzenkohle in den Blick nimmt.

2.2 Kriterien für geeignete Biomasse

Der Pyrolyseprozess und seine Ergebnisse werden stark von den Eigenschaften der Ausgangsmaterialien bestimmt. Teilweise können die Anlagen technisch an bestimmte Qualitätsunterschiede angepasst oder entsprechend erweitert werden. Grundlegend unterscheiden sich die Materialien z.B. bezüglich ihres Heizwertes, des Wassergehaltes, der Größe der Materialstücke und der elementaren Zusammensetzung (Zozmann & Lenk 2023):

- Ein hoher Heizwert bedeutet, dass mehr thermische Energie entsteht – die entsprechend genutzt werden kann.
- Materialien mit geringem Wassergehalt reduzieren Aufwand und Energieeinsatz für die Trocknung.
- Größere Partikel verlangsamen die Geschwindigkeit, mit der die Verkohlungstemperatur erreicht wird.
- Je nach elementarer Zusammensetzung verändern sich die Anteile der Endprodukte - hohe Kohlenstoff- und Ligningehalte führen zu einem hohen Anteil an Pflanzenkohle, hohe Gehalte an Zellulose zu einer höheren Gasproduktion.

2.3 Potenziale an ungenutzter Biomasse in Deutschland

Grundsätzlich kann jede Biomasse für die Pyrolyse und die Herstellung von Pflanzenkohle genutzt werden. Der gezielte Anbau von Pflanzen für die Verkohlung ist allerdings aufgrund des hohen Flächenbedarfes und der Konkurrenz zur Wärme- und Kraftstofferzeugung durch Biomasse problematisch. Als Ausgangsstoffe mit in Deutschland noch ungenutzten Potenzialen sind aufgrund der derzeitigen Rechtslage vor allem Stroh, Gärreste und Landschaftspflegeholz interessant (Bauböck & Karpenstein-Machan 2021).

- Jedes Jahr fallen in Deutschland etwa zehn Millionen Tonnen Stroh von Getreide und Mais an (Bauböck & Karpenstein-Machan 2021). Das Angebot variiert lokal stark je nach der hauptsächlichen Landnutzung. Der Preis wird durch die Nachfrage vor allem nach Getreidestroh als Tierfutter, Stalleinstreu und als Dämmmaterial bestimmt. Aufgrund seines hohen Ligningehaltes kommt Stroh nicht ohne weitere Aufbereitung als Rohstoff für Biogasanlagen in Frage. Sein geringer Wasseranteil und der hohe Kohlenstoffgehalt sind aber gute Voraussetzungen für die Pyrolyse.
- Gärreste bleiben bei der Vergärung von Biomasse in einer Biogasanlage zurück. Pro Jahr sind das in Deutschland über 80 Millionen Tonnen (Bauböck & Karpenstein-Machan 2021). Sie werden vor

allen als Dünger auf Acker- und Grünflächen genutzt. Da der Gesetzgeber allerdings aufgrund regional hoher Einträge von Nitrat in Grund- und Oberflächengewässer die erlaubten Mengen an ausgebrachten Gärresten bzw. Gülle beschränkt, entsteht bei einer größeren Anzahl an Betrieben ein Überangebot an Gärresten im Verhältnis zu den vorhandenen Acker- und Grünlandflächen. Auch durch die vorgeschriebenen Lagerzeiten von Gärresten stellen sie für einige Betreiber einen Kostenfaktor dar. Da Gärreste ein sehr feuchter Rohstoff sind, ist vor der Nutzung in der Pyrolyse-Anlage eine Entwässerung (z.B. Pressung mit Pressschnecke) und Trocknung (z.B. Bandtrockner) nötig. Die Investitionskosten für die Herstellung der Pflanzenkohle erhöhen sich dementsprechend. Moderne Anlagen generieren allerdings Strom und/oder Wärme aus dem Betrieb und mindern die laufenden Kosten bzw. neutralisieren sie.

- Landschaftspflegeholz umfasst sämtliches Material, das bei der Pflege von Gehölzen in der Forstwirtschaft und im Straßengrün anfällt. In Deutschland wird die jährlich verfügbare Menge auf 1,8 Millionen Tonnen (Bauböck & Karpenstein-Machan 2021) geschätzt. Das anfallende Material wird von kommunalen oder privaten Betrieben gesammelt und entweder selbst genutzt (z.B. als Brennstoff oder Kompost) oder zur entsprechenden Weiterverwertung verkauft. Als direktes Ausgangsmaterial für die Pyrolyse eignen sich etwa Holzhackschnitzel oder Siebüberläufe aus Kompostierungsanlagen.

Als weitere im kommunalen Zusammenhang anfallende Ausgangsmaterialien eignen sich Klärschlämme für die Pyrolyse. Klärschlamm-Pyrolyse ist eine klimafreundliche Alternative zur Verbrennung und ermöglicht zudem die Rückgewinnung des enthaltenen Phosphors. Allerdings ist Pflanzenkohle aus Klärschlamm in Deutschland noch nicht als Düngemittel zugelassen und muss bislang als Abfallstoff thermisch entsorgt werden. Studien haben gezeigt, dass enthaltene organische Schadstoffe wie per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS), polychlorierte Biphenyle (PCB) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sowie Arzneimittelrückstände und Mikroplastikpartikel bei hohen Pyrolyse-Temperaturen weitgehend bis vollständig zerstört werden (Kundu et al. 2021; Moško et al. 2021; Stenzel et al. 2019; Ni et al. 2020). Zudem besitzt die entstehende Pflanzenkohle aufgrund ihrer großporigen Oberfläche eine besonders gute Fähigkeit, PFAS aus der Umgebung zu binden (Kundu et al. 2021; Krahn et al. 2023). Mit Dänemark, Schweden und der Tschechischen Republik haben bereits drei EU-Mitgliedsländer Pflanzenkohle aus Klärschlämmen für die Verwendung in der Landwirtschaft freigegeben. In Deutschland und auf EU-Ebene wird die Zulassung noch diskutiert.

2.4 Zertifizierung von Pflanzenkohle bzw. Pyrolyse-Anlagen

Anlagen, die mindestens eine Tonne chemischen Stoff pro Jahr produzieren, sind verpflichtet, das REACH-Zertifizierungsverfahren⁴ zu durchlaufen und im Zuge dessen Stoffe bei der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) zu registrieren. Dies betrifft entsprechend auch Anlagenbetreiber mit einer Jahresproduktion von mindestens einer Tonne Pflanzenkohle. REACH ist eine Verordnung der Europäischen

⁴ REACH steht für Registrierung, Evaluierung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe („Registration, Evaluation, Authorisation, and Restriction of Chemicals“).



Union, die eine umwelt- und gesundheitsverträgliche Verwendung von Chemikalien sicherstellt (ECHA European Chemicals Agency o.D.).

Die European Biochar Certification (EBC) zertifiziert die Einhaltung von Mindeststandards für die chemische Zusammensetzung und Produktion von Pflanzenkohle und soll so eine nachvollziehbare und gleichbleibende Qualität sicherstellen. Die Zertifizierung ist freiwillig. Noch kann Pflanzenkohle aus nicht-pflanzlichen Biomassen wie Klärschlamm oder Gülle kein Zertifikat erhalten. Bei ausreichender Faktenbewertung hinsichtlich der Produktsicherheit sollen diese Materialien allerdings in die Positivliste aufgenommen werden (EBC 2022). Die EBC-Richtlinien unterscheiden Zertifizierungsklassen basierend auf nationalen und internationalen Verordnungen (Nitsch 2023). Die Pflanzenkohleprodukte werden anhand ihrer Eigenschaften nur für bestimmte Verwendungen zugelassen.

1. **EBC-Rohstoff:** Definiert, was als Pflanzenkohle angesehen und als nachhaltiger Rohstoff verwendet werden kann
2. **EBC-Gebrauchsmaterial:** Für Pflanzenkohle, die in Produkten verwendet wird, die in direkten Kontakt mit Haut oder Lebensmitteln kommen können - gilt jedoch nicht für Medizin- und Gesundheitsprodukte oder Lebensmittelverpackungen
3. **EBC-Urban:** Standard für die Verwendung von Pflanzenkohle bei der Baumbepflanzung, bei der Pflege von Parks, der Verschönerung von Gehwegen, für Zierpflanzen und bei der Regenwasserableitung und -filterung, da städtische Anwendung von Pflanzenkohle nicht der landwirtschaftlichen Gesetzgebung unterliegt
4. **EBC-Agro und EBC-AgroBio:** Erfüllt alle Anforderungen der EU-Düngemittelverordnung, allerdings müssen auch die Anforderungen in den Ländern beachtet werden, z.B. verlangt Deutschland derzeit einen Mindestgehalt an Kohlenstoff von 80 Prozent, der aus unbehandeltem Holz hergestellt werden muss
5. **EBC-Futter und EBC-FutterPlus:** Erfüllt alle Anforderungen der EU-Futtermittelverordnung. Zusätzlich sind Futterkohlen noch über QS⁵ oder GMP+⁶ zu zertifizieren. Außerdem müssen die Hersteller als Futtermittelhersteller gemäß den jeweiligen nationalen Anforderungen zugelassen sein

Da sich die bei der Herstellung von Pflanzenkohle eingesetzte Menge Kohlenstoff berechnen lässt und diese Menge über Jahrhunderte der Atmosphäre entzogen werden kann, zertifiziert die EBC seit 2020 auch die Leistung von Pflanzenkohle als Kohlenstoff-Senke. Das Gütesiegel wird nur vergeben, wenn der darin enthaltene Kohlenstoff auf Dauer gebunden bleibt. Vor dem Hintergrund der EU-Pläne zur Zertifizierung von Senken entsteht hier ein großes Potenzial für den Einsatz von Pyrolyse-Technologien (Nitsch 2023).

Seit 2019 gibt es auch eine VDI-Norm zur Erzeugung von Biomassekarbonisaten (VDI-Richtlinie 3933). Sie beschreibt den Stand der Technik bei der Erzeugung, bildet innerbetriebliche Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von Emissionen ab und stellt rechtliche Grundlagen dar.

⁵ Der QS-Standard (Qualität und Sicherheit) ist ein Qualitätssicherungssystem für frische Lebensmittel (<https://www.qs.de/>).

⁶ Der GMP+ („Good Manufacturing Practice“) Feed Certification Standard ist ein international anerkannter Standard für sicher hergestellte Futtermittel und beinhaltet eine wachsende Anzahl an internationalen Standards für nachhaltige Futtermittel (<https://www.gmpplus.org/en/>).

Zudem ist zu beachten, dass Pyrolyseanlagenbetreiber generell den Bestimmungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) und der entsprechenden Verordnung unterliegen. Welche Verordnung auf eine geplante Anlage zutrifft, variiert z.B. aufgrund des Eingangsmaterials (Quicker & Weber 2016). Gängig ist z.B. die Einordnung in die 1. (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen) oder die 4. (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen) Verordnung des BImSchG. Entsprechend ist im Rahmen der Planung einer Pyrolyseanlage die Genehmigungspflicht der Anlagen sowie das Einhalten von Emissionsgrenzwerten und deren Überwachung und Dokumentation zu beachten.

3. EINSATZMÖGLICHKEITEN FÜR PFLANZENKOHLE

Die Anwendung von Pflanzenkohle führte in zahlreichen Studien zu einer erhöhten Wasserretentionsfähigkeit des Bodens, Reduktion von Nitratauswaschung sowie teilweise erhöhtem Pflanzenwachstum im Vergleich zu nicht behandelten Böden. Als Beimischung in Biogasanlagen, die Gülle verwerten, kann sie den Prozess stabilisieren und Säurestauproblematiken beheben. Auch in der Industrie kann beigemischte Pflanzenkohle die Materialeigenschaften vielfach verbessern oder klimaschädliche Stoffe ersetzen. Zudem kann Pflanzenkohle organische Schadstoffe binden und damit zur Abwasserreinigung und der Behandlung kontaminierter Böden eingesetzt werden (Schmidt et al. 2021).

3.1 In der Landwirtschaft

Verbesserung der Bodenqualität, Futtermittel, effizienterer Umgang mit Kompostierung und Gärung: In der Landwirtschaft sind diverse Anwendungen denkbar. In Deutschland darf allerdings derzeit laut der Düngemittelverordnung (DüMV) lediglich Holzkohle aus chemisch unbehandeltem Holz mit einem Kohlenstoffgehalt von mindestens 80 Prozent auf landwirtschaftlich genutzten Flächen aufgebracht werden. Die Ausgangsstoffe und das Endprodukt müssen außerdem Schadstoffgrenzwerte einhalten, die in der DüMV festgelegt sind. Die dort aufgelisteten Schadstoffe und Schadstoffgrenzen sind nicht explizit auf Pflanzenkohle zugeschnitten. Die Auflistung⁷ beinhaltet beispielsweise keine Grenzwerte für polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), nicht dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (ndl-PCB) oder Chlor, sowie weniger ambitionierte Maximalwerte für Schwermetalle als die EU-Verordnung (Nitsch 2023). Das aktuelle Verbot von Pflanzenkohle aus anderen Ausgangsstoffen schränkt in Deutschland daher aktuell zusätzliche Anwendungsoptionen ein, die zu negativen Emissionen beitragen würden. Vor allem die Nutzung von Reststoffen wie Klärschlamm, Siebüberläufen oder Gärresten als Ausgangsstoffe wäre naheliegend, um lokale Kreisläufe zu optimieren. Forderungen, die Regulatorik zu überarbeiten und Pflanzenkohle aus

⁷ Für Details siehe DüMV §3 sowie Anlage 2.



weiteren Ausgangsstoffen zuzulassen, werden allerdings lauter und durch die Gesetzeslage in anderen Ländern gestärkt.

Ein anderes Bild zeigt sich auf europäischer Ebene. Die EU-Kommission hat 2021 durch Pyrolyse oder Vergasung gewonnene Materialien als Komponentenmaterialkategorie in EU-Düngeprodukten aufgenommen und damit Pflanzenkohle auch aus anderen Rohmaterialien für die landwirtschaftliche Nutzung zugelassen. Das Joint Research Center der EU sieht deren positive agronomische Wirksamkeit als erwiesen an. Demnach können entsprechende Materialien Pflanzen mit Nährstoffen versorgen und die Ernährungseffizienz steigern. Die delegierte Verordnung gilt seit dem 16. Juli 2022 (Europäische Kommission 2021). Durch diesen delegierten Rechtsakt können Pflanzenkohle-Düngeprodukte seit 2022 auch in Deutschland vermarktet werden, wenn die ein entsprechendes Konformitätsverfahren durchlaufen haben (Nitsch 2023). Auf die positiven Eigenschaften von Pflanzenkohle für die Landwirtschaft wird mittlerweile auch von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE 2023) verwiesen. Eine Überarbeitung der DüMV und die Berücksichtigung von Pflanzenkohle erscheinen vor diesem Hintergrund realistisch.

Pflanzenkohle der entsprechenden Qualität ist auch als Futtermittel geeignet, um z.B. die Gesundheit und Milchleistung von Rindern zu erhöhen (Schmidt et al. 2016) und wird bereits heutzutage eingesetzt, um Nitrat und Wasser im Weinanbau oberflächennah zu binden. Auch zur Prozessstabilisierung bei Kompostierungen und Gärungen in Biogasanlagen wurde ein günstiger Effekt von Pflanzenkohle beschrieben (Wilken & Paterson 2021; Rödger et al. 2014; Zhao et al. 2021).

Über die derzeitige Nutzung von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft in Deutschland ist nicht viel bekannt. Entsprechende Produkte werden vor allem als Futtermittel und als Bodenverbesserungsmittel (z.B. Terra-Preta-Erde) angeboten. Die Preise für Endverbrauchende liegen zwischen 100-900 Euro pro Tonne. Die Futterkohle liegt im oberen Drittel dieser Spanne, Pflanzenkohle für Boden Anwendungen im mittleren Bereich. Aufgrund des hohen Preises ist in der Tierhaltung bisher nur ein kleiner Markt vorhanden. In Pflanzenkulturen mit hoher Wertschöpfung (z.B. Wein und Spargel) kommen die Produkte ebenfalls bereits zum Einsatz. Hier können sie gezielt und effizient im Wurzelbereich ausgebracht werden (Nitsch 2023). Bei einem Großteil der Betriebe scheint das Wissen über die Einsatzmöglichkeiten und Vorteile aber noch zu fehlen oder die Investition wird als zu hoch eingeschätzt.

Um eine größere Skalierung im landwirtschaftlichen Bereich zu ermöglichen, bedarf es neben besserer Information und klarerer Richtlinien wohl auch einer finanziellen Förderung.

3.2 In Materialien

Bei einigen Materialien bietet sich eine Beimischung von Pflanzenkohle an. In Beton, Ziegelsteinen, Asphalt und Verbundwerkstoffen sowie Dämmstoffen kann dieser Anteil die Klimabilanz bereits bei der Herstellung senken und durch die langfristige Einlagerung von Kohlenstoff (vor allem in langlebigen Baustoffen) ein Negativemissions-Effekt realisiert werden (Osman et al. 2023; Wyrzykowski et al. 2024). Teilweise verbessern sich sogar die Produkteigenschaften durch die Beimischungen (Zhao et al. 2014; Zhang et al. 2017; Dong et al. 2020; Legan et al. 2022; Zhang et al. 2022).

Die Produktion von Pflanzenkohle für Baustoffe und weiteren Materialien wird in Deutschland bereits umgesetzt. So initiierte beispielsweise das Baseler Tiefbauamt ein Projekt zur Integration von Pflanzenkohle

in Asphalt (Bessenich 2023). Durch die Beimischung von zunächst zwei Prozent und später vier Prozent Pflanzenkohle in die Asphalttragschicht werden zunächst die CO₂-Emissionen der Schicht und später des gesamten Straßenabschnittes kompensiert. Zudem führt die Beimischung der Pflanzenkohle zu einer Steigerung der strukturellen Stabilität des Asphalts.

3.3 Im kommunalen Umfeld

Interessant ist Pflanzenkohle auch im städtischen bzw. kommunalen Umfeld. Ihre Qualitäten, Stoffe im Boden binden, speichern und filtern zu können, lassen sich in der Stadtplanung strategisch nutzen – beispielsweise beim Bau von Straßen oder zur Gestaltung von Wasserwegen. Wie in der Landwirtschaft hat die Beimischung von Pflanzenkohle zu dem Bodensubstrat in Pflanzbeeten (besonders für Stadtbäume) positive Auswirkungen (Alvem & Grönjard 2017). In Bioretentionssystemen kann die Nutzung der hohen Wasserabsorptionsfähigkeit von Pflanzenkohle bei der Anpassung an Starkregenereignisse helfen. Die Pflanzenkohle filtert bei dieser Anwendung auch Schadstoffe aus dem Wasser, die sonst ins Grundwasser gelangen können (Premarathna et al. 2023). Auch auf Gründächern erhöht eine Beimischung zum Pflanzsubstrat das Wasserrückhaltevermögen und gleichzeitig die Kühlung der Dächer (Tan & Wang 2023; Gan et al. 2021). Aktivkohle als Wasser- oder Gasfilter lässt sich außerdem durch Pflanzenkohle ersetzen und absorbiert Schwermetalle ebenso gut, hat dabei aber einen deutlich niedrigeren Kohlenstoffdioxid-Fußabdruck (Alhashimi & Aktas 2017). Die praktische Anwendung von Pflanzenkohle findet in Deutschland und Europa größtenteils im Rahmen von Pilotprojekten statt.

- Seit 2017 wird in **Stockholm** ein städtisches Modellprojekt betrieben, welches beispielhaft aufzeigt, wie vielfältig Pflanzenkohle im kommunalen Rahmen eingebettet werden kann. Die Pyrolyseanlage wird mit städtischem und privatem Grünschnitt versorgt und wandelt diesen in Pflanzenkohle um. Die Pflanzenkohle wird an die Stadt u.a. zur Nutzung in Parkanlagen verkauft bzw. bei der privaten Abgabe von Grünschnitt verteilt. Zudem generiert die Anlage Energie für das Bezirkswärmenetz durch das Pyrolyse-Gas (Nordregio 2018). Der Erfolg dieses Modellprojektes hat die Nachfrage zur Implementierung von Pflanzenkohleherstellung im kommunalen Rahmen europaweit gesteigert.
- Die **Stadt Freiburg** betreibt seit 2018 eine Pyrolyse-Anlage auf der Deponie Eichelbuck im Regelbetrieb. Die erzeugte Pflanzenkohle wird u.a. am Standort dem Kompost beigemischt, was zu einer besseren Qualität und schnelleren Reife des Komposts führt und Lagerkapazitäten einspart (Roth 2020).
- Seit 2022 wandelt der **Darmstädter Eigenbetrieb für kommunale Aufgaben und Dienstleistungen** (EAD) mit seiner neugebauten Pyrolyse-Anlage im Zuge einer regionalen Kreislaufwirtschaft jährlich 4.000 Tonnen holzigen Grünschnitt und aufgearbeiteten Bioabfall zu 1.000 Tonnen Pflanzenkohle um. Die Anlage wurde auf dem Gelände der ebenfalls betriebenen Kompostanlage gebaut (EAD 2020).



- Im schweizerischen **Basel** wird Landschaftspflegeholz in der Pyrolyse-Anlage der Industriellen Werke Basel (IWB) zu Pflanzenkohle verarbeitet und ebenfalls an die privaten Anlieferer des Ausgangsmaterials ausgegeben. Zudem gibt es Sonderaktionen, in dessen Rahmen Christbäume, Tannenäste und Adventskränze pyrolysiert werden (SRF 2023).

4. WIRTSCHAFTLICHKEIT

Das Thema Pflanzenkohle umfasst eine große Branchen- und Akteurslandschaft. Das nötige Ausgangsmaterial kann von Kommunen, der Abfallwirtschaft, forst- und landwirtschaftlichen Betrieben oder Industrien mit Anfall an organischen Reststoffen wie z.B. bei der Papierindustrie oder Lebensmittelindustrie stammen. Diese Biomasseproduzenten können durch eigene Anlagen selbst Anwender werden. Die Hersteller der Anlagen, Verbände, Forschungseinrichtungen sowie Händler von Zertifikaten sind als weitere Stakeholder beteiligt – genauso wie alle Branchen, die Pflanzenkohle bzw. zukünftig Pyrolyse-Öl einsetzen können. Diese Vielfalt spiegelt sich auch in den Einsatzmöglichkeiten für das Material und seinen Herstellungsprozess wider.

Laut dem Interessensverband European Biochar Industry Consortium (EBI) wuchs die europäische Produktion von Pflanzenkohle im Jahr 2023 auf 75.000 Tonnen – eine Steigerung um 41 Prozent gegenüber dem Vorjahr. Für 2024 wird mit einer noch höheren Wachstumsrate und einer produzierten Menge von über hunderttausend Tonnen gerechnet. 48 neue Anlagen wurden 2023 installiert, bis Ende 2024 ist mit einer Gesamtzahl von über 220 Anlagen zu rechnen. In Europa gibt es über 30 Hersteller von Pyrolyseanlagen unterschiedlicher Größen. Etwa 26 Prozent der installierten Kapazität befindet sich in Deutschland (EBI 2024).

Für eine Pyrolyse-Anlage entstehen Investitions- und Betriebskosten. Investitionskosten entstehen vor allem für die Anlage zur Vorbereitung der Biomasse, für den Reaktor, für die Nachbereitung der Pflanzenkohle (z.B. Abkühlung, Verpackung und Lagerung) und für die Energieauskoppelung (Wärmeableitung und -speicherung) bzw. Umwandlung in elektrische Energie. Außerdem benötigt die Anlage sowie die Materiallagerung Platz – ggf. fallen also Kosten für das Grundstück an. Als Nebenkosten müssen Projektplanung, Installation sowie Genehmigungsverfahren budgetiert werden (Zozmann & Lenk 2024).

Die Betriebskosten der laufenden Anlage setzen sich aus Kosten für Ausgangsmaterial, Wartung, Personal, Versicherungen und ggf. Kapitalkosten zusammen. Voraussetzung für eine rentable Pyrolyse sind möglichst kostengünstiges Ausgangsmaterial und Einnahmen aus dem Verkauf der entstandenen Pflanzenkohle und ggf. dem Pyrolyse-Öl. (Universität Kassel & Georg-August Universität Göttingen 2022). Die höchste Kohlequalität entsteht aus holzigen Ausgangsmaterialien wie Holzhackschnitzeln (Bauböck & Karpenstein-Machan 2021). Die Verwendung von Gärresten erfordert umfänglichen Wasserentzug, der den Kostenvorteil des Materials schmälert. Und zertifizierte Qualität kann die höchsten Preise erzielen. Ein Betreiben von



Pyrolyse-Anlagen nur zur Wärmeproduktion rentiert sich dagegen nicht (Universität Kassel & Georg-August Universität Göttingen 2022).

Campion et al. (2023) hat 400 Studien zum Thema Wirtschaftlichkeit von Pflanzenkohle tiefergehend analysiert. Diese systematische Analyse kam ebenfalls zu dem Ergebnis, dass vor allem Faktoren wie Ausgangsmaterial und Pflanzenkohlepreis großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit nehmen, aber auch Aspekte wie Standort, Größenordnung der Anlage und Pyrolysebedingungen in die Abschätzung einfließen müssen. Die Variabilität der Verkaufspreise für Pflanzenkohle reichte von null bis etwa 2.500 Euro pro Tonne, wobei der Median in den Studien bei etwa 370 Euro pro Tonne lag. Die Autor:innen kommen zu dem Schluss, dass für landwirtschaftliche Betriebe der Erwerb und das großflächige Ausbringen von Pflanzenkohle erst dann wirtschaftlich lohnend sei, wenn sie Pflanzenkohle zu einem Preis von unter etwa neun Euro pro Tonne erwerben können (Campion et al. 2023). Ob die Nutzung von Pflanzenkohle als Düngemittel in Europa zukünftig den Hauptnutzen ausmachen wird, oder z.B. die Regenerierung von mit Schwermetallen belasteten Böden oder die Anwendung in Baustoffen überwiegen werden, ist noch unklar. Welche Preise für diese Branchen wirtschaftlich darstellbar wären, wurde nicht untersucht.

Die Nutzung von zuvor ungenutztem (u. U. kostenlosem) Ausgangsmaterial und die Generierung von Kohlenstoffdioxid-Zertifikaten können den Ertrag einer Pyrolyse-Anlage (und die Investitionsbereitschaft von landwirtschaftlichen Betrieben) erhöhen (Campion et al. 2023; Universität Kassel & Georg-August Universität Göttingen 2022). Dies steigert auch den Anreiz, nicht nur Holz als Ausgangsmaterial für Pflanzenkohle zu verwenden. Außerdem kommen mehrere Studien zu dem Ergebnis, dass das Verfahren der Fast Pyrolysis (und/oder hohe Temperaturen) die Wirtschaftlichkeit von Pyrolyse-Anlagen deutlich erhöht. Hier ist die Ausbeute an Pflanzenkohle zwar geringer, jedoch bringen die weiteren Pyrolyseprodukte, insbesondere das Pyrolyse-Öl, höhere Einkünfte (Campion et al. 2023; Brown et al. 2011). In dem Kontext ist zu beachten, dass in der aktuellen Praxis in Deutschland das Pyrolyse-Öl mit dem entstehenden Synthesegas zusammen verbrannt wird. Die Abscheidung und Vermarktung von Pyrolyse-Öl stellt entsprechend ein zukünftiges Konzept dar.

Generell wird für den Zeitraum von 2022 bis 2027 ein weltweites Wachstum des Marktes für Pflanzenkohle von 15 Prozent prognostiziert (Mordor Intelligence 2023).

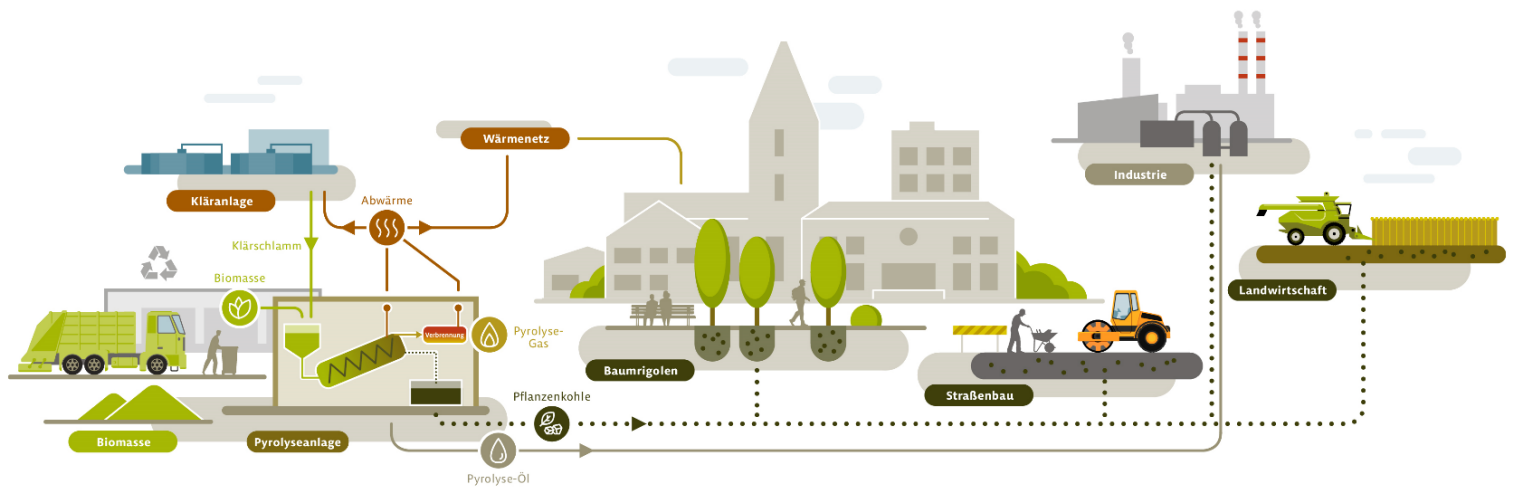
Die hier dargestellten Aspekte geben einen ersten Einblick in das sehr umfassende Thema der Wirtschaftlichkeit von Pflanzenkohleprojekten. Die Autor:innen befassen sich derzeit weiterführend mit der Thematik der Wirtschaftlichkeit sowie der Regulatorik und werden die erarbeiteten Erkenntnisse in Anschlussveröffentlichungen weiter ausführen (Stand Dezember 2024).

5. EINE CHANCE FÜR KOMMUNEN?

Viele Kommunen legen derzeit ihren Fokus auf die Minimierung von energiebezogenen Treibhausgasemissionen, also den Emissionen aus der Erzeugung von Strom, Wärme sowie Kraftstoffen für den Verkehrssektor. Vielerorts vernachlässigt werden dagegen die nicht-energetischen Emissionen und wie sie zukünftig ausgeglichen werden sollen. Doch auch im Bereich der nicht-energetischen Emissionen – bspw. in der Landwirtschaft und Abfallwirtschaft – und der negativen Emissionen besteht ein Einflusspotenzial durch die Kommune. Die Potenziale für konventionelle biologische Maßnahmen wie Aufforstungen oder Renaturierung von Feuchtgebieten zum Aufbau von Kohlenstoffsenken im städtischen Bereich sind oft räumlich stark begrenzt. Umso wichtiger ist es, alle vorhandenen Potenziale zu nutzen, die im kommunalen Handlungsspielraum liegen. Für Pflanzenkohle sprechen in diesem Zusammenhang mehrere Punkte:

Es handelt sich um eine ausgereifte Technologie, die auch in Deutschland in zahlreichen Pilotprojekten bereits angewendet wird. In vielen Kommunen fallen geeignete Ausgangsstoffe kostengünstig an. Auch sind wichtige Stakeholder für die Aufnahme der Produktion oft in kommunaler Hand und können mit entsprechenden Partner:innen einen geschlossenen Kreislauf aufbauen.

Vielerorts gibt es bereits Strukturen, in die die Produktion von Pflanzenkohle sinnvoll eingebettet werden kann. Die bereits existierenden Projekte in Kommunen zeigen, dass es lokal Potenziale gibt und die Synergien zunehmend wahrgenommen werden. Generell fehlt es aber noch an Wissen und Aufklärung – nicht nur in der Gesellschaft, sondern auch bei Entscheidungsträger:innen. Für Kommunen gilt es daher zuerst zu analysieren, ob sich ausreichend Anknüpfungspunkte für Pflanzenkohle finden, z.B. verfügbares Ausgangsmaterial und geeignete Standorte für Anlagen (ggf. mit Anschluss ans Wärmenetz). Und ob es potenzielle Abnehmer für die hergestellten Pyrolyse-Produkte gibt.



Mögliche Anknüpfungspunkte und Anwendungen für Pflanzenkohle im kommunalen Rahmen.

Quelle: Eigene Darstellung, 2024

Abbildung 5: Für erfolgreiche Projekte sollten Kommunen wichtige Akteur:innen für die Produktion von Pflanzenkohle in einem Netzwerk organisieren, z.B. land- und forstwirtschaftliche Betriebe, die Abfallwirtschaft (oft sogar in kommunaler Hand), Wärmenetzbetreiber, Grünpflege-Unternehmen sowie weitere potenzielle Akteur:innen, die Ausgangsmaterial bereitstellen und die erzeugten Produkte nutzen könnten (z.B. Ausbringungen in Baumrigolen, Grünflächen, Zusatz in Baumaterialien, etc.).

5.1 Konkurrenz um Biomasse

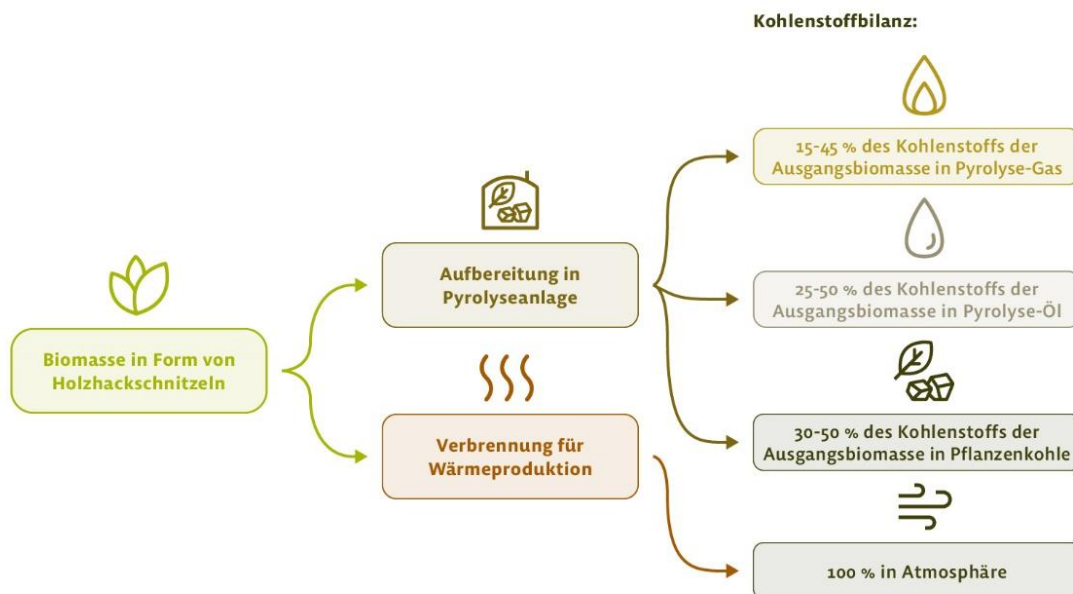
Ein großer Kritikpunkt bezüglich der Pyrolyse von Pflanzenkohle ist die Konkurrenz um den Ausgangsstoff. Biomasse ist ein gefragtes Material für andere Nutzungsarten. So verwenden Heizkraftwerke und die Papierindustrie z.B. Holzhackschnitzel, Gülle und Pflanzenreste werden in Biogasanlagen vergärt. Allerdings gibt es weiterhin viele Kommunen bzw. Landkreise oder Abfallwirtschaftsbetriebe, in denen bestimmte Reststoffe derzeit noch nicht verwertet werden.

Ob die Herstellung von Pflanzenkohle sinnvoller als andere Nutzungen der jeweils vorhandenen Biomasse ist, hängt von lokalen Gegebenheiten ab. Es gilt vor allem da anzusetzen, wo Materialien regional noch keine zufriedenstellende Verwendung haben, seien es Siebüberläufe, Grünschnitt aus der Straßenpflege oder Reststoffe aus Sägewerken. Auch für Biomasse aus bewirtschafteten Moorstandorten (Paludikulturerzeugnisse, z.B. Schilf) ist das Fehlen lokaler Märkte oft das größte Hemmnis für die Umstellung auf diese. Zudem gibt es eine Diskussion um die mögliche Verwendung von Zellulosedämmstoffen in der Pyrolyse, um so das Abfallaufkommen in der Bauwirtschaft zu reduzieren.

Mit der Erzeugung von Pflanzenkohle könnten in einigen Kommunen also mehrere Probleme gleichzeitig adressiert werden.

Mehr Auftrieb für die Produktion von Pflanzenkohle könnte sich auch aus dem weiteren Verlauf der Diskussion um die Einordnung der Klimaneutralität der Energieerzeugung durch Biomasse ergeben. Aktuell wird die gewonnene Wärme aus Holzhackschnitzeln als klimaneutral bewertet, obwohl das bei der

Verbrennung entstehende Kohlenstoffdioxid in einem großen Umfang in die Atmosphäre gelangt. Die Einstufung der Klimaneutralität basiert auf dem Gedanken einer nachhaltigen Waldnutzung, welche die bei der Verbrennung freigesetzten CO₂-Emissionen durch den im jährlich nachwachsenden Waldholz gebundenen Kohlenstoff ausgleicht. Trotzdem wird heutzutage z.B. vom BMUV⁸ die Ansicht vertreten, dass diese Kohlenstoffsенke zum Ausgleich von anderen, nicht vermeidbaren CO₂-Emissionen zur Verfügung stehen sollte, da die Kohlenstoffspeicherung im Waldholz unabhängig von der Holzverbrennung stattfindet (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz 2022). Auf regulatorischer Ebene wird weiterhin die Einstufung als klimaneutral betont, z.B. durch die neue Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (RED III) und das Gebäudeenergiegesetz der Bundesregierung. Sollte es jedoch dazu kommen, dass die Einordnung der Klimaneutralität angepasst wird, könnte dies die Attraktivität der Verwendung von Holzhackschnitzeln für die Pflanzenkohleproduktion als nachhaltige Verwertung dieser Biomasse, bei der geringere Mengen an Treibhausgasen emittiert werden, steigern. Es ist jedoch zu beachten, dass bei der Pyrolyse von Holzhackschnitzeln zu Pflanzenkohle auch weniger Energie zur Verfügung steht als bei der reinen Verbrennung. Eine Definitionsänderung von Klimaneutralität würde zudem auch Pyrolyseanlagen betreffen und auch hier die CO₂-Abscheidung zum Erlangen der Klimaneutralität notwendig machen.



**Kohlenstoffbilanz von Holzhackschnitzeln abhängig von der Verwertung. Der Kohlenstoffanteil in den verschiedenen Pyrolyseprodukten variiert abhängig von den genauen Parametern der Pyrolyse.
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Schmidt et al. 2019**

Abbildung 5: Der Klimaeffekt der Herstellung von Pflanzenkohle zielt auf die Festlegung des im Ausgangsmaterial enthaltenen Kohlenstoffs. Bei entsprechender Anwendung hält die Kohle den Kohlenstoff der Atmosphäre entzogen.

⁸ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz



5.2 Schadstoffbelastung

Eine weitere oft vorgebrachte Kritik an Pflanzenkohle basiert auf Bedenken bezüglich einer möglichen Schadstoffbelastung. Die Befürchtung ist, dass mit dem Eintrag schadstoffbelasteter Pflanzenkohle in Böden die Umwelt gefährdet werde. Diese Bedenken spiegeln sich bis heute in der deutschen Gesetzgebung wider, obwohl Studien schon vor Jahren differenziertere Ergebnisse zeigten (z.B. Qadeer 2017).

Bereits heute gilt für Pflanzenkohle im europäischen Raum ein freiwilliger Industriestandard: das in Kapitel 2.4 dargestellte European Biochar Certificate (EBC), das entsprechende Grenzwerte aus Bodenschutzverordnung und Düngeverordnung berücksichtigt. Entsprechende Bedenken zur Schadstoffbelastung werden hier bedacht. Für die EBC-Zertifizierung ist zudem die Produktprüfung durch unabhängige und akkreditierte Labore verpflichtend. Werden neue Ausgangsstoffe für die Pyrolyse erprobt, ist es wichtig, mögliche Gefahren bzgl. Umweltbelastung zu untersuchen. Um diese erkennen zu können und gleichzeitig unbegründete Bedenken auszuräumen, muss die Forschung vorangetrieben und die Standards entsprechend fundierten Forschungsergebnissen angepasst bzw. neu geschaffen werden.

5.3 Fazit

Die Stärke der Pflanzenkohle liegt in ihren vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten begründet. Sie hat nicht eine hauptsächliche Funktion – und genau da liegt ihre Stärke.

Vielfältige Argumente für Pflanzenkohle	
Klimaeffekt	Abhängig von der finalen Nutzung der Pflanzenkohle wird Kohlenstoff dauerhaft der Atmosphäre entzogen (Kohlenstoffsenke) und bildet einen Ausgleich für nicht-energetische Emissionen bzw. Restemissionen, die trotz weitestgehender Vermeidung weiter entstehen.
Verbesserung der Böden	In Böden eingebrachte Pflanzenkohle erhöht die Wasserretentionsfähigkeit, reduziert Nitratauswaschung und kann in Kombination mit veränderter landwirtschaftlicher Praxis langfristig den Humus-Aufbau unterstützen.
Substitutionen von emissionsintensiven Baustoffen	Pflanzenkohle ersetzt klimaschädliche Materialien wie erdölbasierte Kunststoffe und kann Produkteigenschaften verbessern.
Verwertung von Reststoffen, die ansonsten emittieren	Anders als bei der Verbrennung oder Vergärung entstehen aus anfallender Biomasse weniger Treibhausgase, und es können sogar negative Emissionen erzielt werden.

Klimaanpassung	In der Landwirtschaft und im städtischen Bereich hilft Pflanzenkohle dabei, möglichst viel anfallendes Regen- bzw. Oberflächenwasser vor Ort aufzunehmen und zu speichern.
Bodensanierung	Pflanzenkohle bindet organische Schadstoffe und kann für die Abwasserreinigung und die Behandlung kontaminierter Böden eingesetzt werden.
Optimierung der Kreislaufwirtschaft	Anfallende und bisher ungenutzte Reststoffe können sinnvoll verwertet werden.
Weitere Nebenprodukte der Pflanzenkohle-Herstellung	Bei der Pyrolyse von Pflanzenkohle entstehen Nebenprodukte, die potenziell ebenfalls verwendet werden können: Abwärme, Pyrolyse-Öl und -Gas.

Nicht in jedem Pflanzenkohleprojekt werden alle möglichen Vorteile bedacht oder genutzt werden können. Trotzdem bietet die große Auswahl an positiven Synergien eine gute Voraussetzung, um die Produktion von Pflanzenkohle an vielen Standorten mit diversen Gegebenheiten in lokale Strukturen sinnvoll zu integrieren.

6. AUSBLICK: ABBAU VON REGULATORISCHEN HÜRDEN UND WIRTSCHAFTLICHE ANREIZE NÖTIG

Anders als in Deutschland hat sich unser Nachbar Dänemark bereits für Pflanzenkohle als Mittel zur Erzielung von negativen Emissionen entschieden. Mit einem 2024 veröffentlichtem Strategiepapier soll die Technologie gestärkt und bestehende Hemmnisse überwunden werden. Die dafür nötigen Schritte eignen sich auch für ein entsprechendes Programm in Deutschland. Die dänische Strategie stellt drei Punkte in den Fokus (Pyrolyse Danmark 2024).

- **Einfache und klare Regulatorik:** Bis zum Jahr 2026 sollen innerhalb der EU klare Vorgaben gelten. Die Planung der Anlagen in Dänemark soll vereinfacht, die Schadstoffproblematik und die Nutzungsmöglichkeiten besser erforscht und Kommunen besser beraten werden. Es wird eine Taskforce wichtiger Stakeholder gegründet und ein Budget von 13,5 Millionen Euro für die Erarbeitung einfacher Regularien bereitgestellt.
- **Verbesserte Anreize für die Verbreitung:** Die Bindung von Kohlenstoff durch den Einsatz in der Landwirtschaft wird ab dem Jahr 2027 subventioniert, zusätzlich wird Forschung für Innovationen im



Einsatzbereich von Pflanzenkohle gefördert. EU-weit soll die einfachere Anrechnung von in Pflanzenkohle gespeichertem Kohlenstoff im Handel mit Klimazertifikaten und entsprechende Subventionen im Rahmen der gemeinsamen Agrarpolitik ermöglicht werden.

- **Aufnahme in Klimabilanzen:** Ab dem Jahr 2027 soll die Anwendung von Pflanzenkohle in die nationalen Treibhausgasberechnungen einfließen können – und entsprechende Berechnungsmethoden vorliegen.

6.1 Einfache und klare Regulatorik

Besonders die Regulatorik stellt heutzutage in Deutschland eine Hürde dar. So wird z.B. Pflanzenkohle aus Klärschlamm bereits hergestellt. Die Inverkehrbringung des Pyrolysats ist allerdings – mit Ausnahme von Forschungsprojekten – untersagt und es muss thermisch entsorgt werden. Gerade hinsichtlich des Potenzials an bisher ungenutzten Reststoffen ist die Ausweitung der Nutzungsmöglichkeiten von zentraler Bedeutung. Länder, die aufzeigen, wie es gehen kann sind z.B. Schweden und Dänemark mit ihrer angepassten Regulatorik zur Pflanzenkohle (Lerchenmüller 2021, Pyrolyse Danmark 2024). Das gleiche gilt für die Regulatorik, die bei der Errichtung der Anlagen beachtet werden muss. Je nach Bundesland gelten unterschiedliche Vorgaben, teilweise sind aufwändige Genehmigungsverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) nötig.

6.2 Verbesserte Anreize für die Verbreitung

Für ein weiteres Vorgehen in Deutschland ist es wichtig, keine Strategie im luftleeren Raum zu erzeugen. Das frühzeitige Einbinden von Stakeholdern und Akteur:innen lässt die Erfolgsaussichten von Projekten steigen. Dazu gehören auch die potenziellen Nutzer:innen von Pflanzenkohle im landwirtschaftlichen Bereich. Mit der Einbringung des Produktes in die bewirtschafteten Böden als Speichermatrix erbringen sie eine gesamtgesellschaftliche Leistung – sie stellen den Speicherort für die Kohlenstoffsenken bereit, die dem Klimawandel entgegenwirken. Bedenken und Hürden müssen auf Augenhöhe adressiert werden, um nachhaltig und langfristig positive Ergebnisse zu erzielen. Die Landwirtschaft ist Beitragender und Leidtragender des Klimawandels gleichermaßen. Deshalb ist es naheliegend, für den Sektor Modelle zu entwickeln, die Klimaanpassung und Klimaschutz kombinieren.

Aber auch abseits landwirtschaftlicher Akteur:innen benötigt es verstärkt lokale und regionale Kommunikation, um eine optimale Einbindung von Pflanzenkohle in die Strukturen zu ermöglichen und gemeinsam an einem Strang zu ziehen.

Zudem wird Pflanzenkohle oft noch als Nischenthema wahrgenommen. In der breiten Gesellschaft ist wenig Wissen darüber vorhanden, was hinter dem Begriff steckt und was negative Emissionen sind bzw. warum sie für das Erreichen von Klimazielen und Klimaneutralität benötigt werden. Insbesondere bei Entscheidungsträger:innen in der kommunalen Verwaltung bzw. Politik und Klimaschutzbeauftragten gilt es Wissenstransfer zu leisten, um Skalierungseffekte zu erlangen.

Ohne finanzielle Hilfen werden sich die Potenziale von Pflanzenkohle nicht heben lassen. Die Investitionskosten für den Einstieg in die Technologie stellen viele Kommunen vor große Schwierigkeiten.



Nötig sind daher Förderprogramme bzw. Investitionszuschüsse für die Initialfinanzierung neuer Pyrolyseanlagen sowie für die Anwendung von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft.

6.3 Aufnahme von Pflanzenkohle in Klimabilanzen

Handlungsbedarf besteht in Deutschland und innerhalb der EU bei der Entwicklung von Methoden zur Zertifizierung und für das Monitoring. Die Klimaschutzwirkung von Pflanzenkohle muss einheitlich und realistisch zu quantifizieren sein. An dieser Aufgabe wird im Rahmen der EU derzeit von einer Vielzahl an Experten gearbeitet (EU Carbon Removals and Carbon Farming Certification (CRCF) Regulation). Neben anderen Forschungseinrichtungen wurde auch das deutsche Fraunhofer-Institut mit der Entwicklung einer Zertifizierungsmethode beauftragt (Europäische Kommission 2024).

Ein möglicher Weg wäre, Pflanzenkohle in das bestehende Programm der Klimaschutzverträge (Carbon Contracts for Difference) aufzunehmen. Das Förderprogramm finanziert die Errichtung und den Betrieb von Produktionsverfahren in emissionsintensiven Branchen, die mit einer hohen Einsparung an Treibhausgasen verbunden sind. Gefördert werden dabei die Mehrkosten der emissionsarmen Herstellung der Produkte, für die im jeweiligen Förderaufruf (es gibt verschiedene Gebotsrunden) ein Referenzsystem definiert ist. Die Referenzsysteme orientieren sich an effizienten und emissionsarmen Verfahren für die Herstellung eines Produkts. Im aktuellen Gebotsverfahren (zweites Gebotsverfahren) ist der Bau von Pyrolyseanlagen jedoch nicht als Referenzsystem definiert.

Für zukünftige Gebotsverfahren im Rahmen des Förderprogramms Klimaschutzverträge sollte geprüft werden, ob zusätzlich zur emissionsarmen Herstellung von Produkten auch die Errichtung und der Betrieb von Pyrolyseanlagen gefördert werden können.

7. QUELLENLISTE

Alhashimi, H. A., & Aktas, C. B. (2017). Life cycle environmental and economic performance of biochar compared with activated carbon: a meta-analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 118, 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.11.016> [29.10.2024].

Alvem, B. M. & Grönjard, R. (2017). Plant beds in Stockholm city – a handbook. https://www.biochar.info/docs/urban/Planting_beds_in_Stockholm_2017.pdf [10.01.24].

Merfort, A., Stevanović, M., Strefler, J. (2023). Energiewende auf Netto-Null: Passen Angebot und Nachfrage nach CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre zusammen? Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.

Babiker, M., Berndes G., Blok K., Cohen B., Cowie A., Geden O., Ginzburg V., Leip A., Smith P., Sugiyama M., Yamba F. (2022). Cross-sectoral perspectives, in: IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Shukla, P.R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D., Pathak, M., Some, S., Vyas, P., Fradera, R., Belkacemi, M., Hasija, A., Lisboa, G., Luz, S., Malley, J., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter12.pdf [30.10.2024]

Bauböck, R. & Karpenstein-Machan, M. (2021). Bioenergiedörfer im Wandel, in: *Berichte über Landwirtschaft*, Band 99, Ausgabe 3.

Bessenich, S. (2023). Basels «grüner» Asphalt, Espazium. <https://www.espazium.ch/de/impressum> [29.10.2024].

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. (2023). Pflanzenkohle: Das Klima schützen und Böden verbessern, Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, <https://www.praxis-agrar.de/pflanze/ackerbau/pflanzenkohle> [29.10.2024].

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. (2022). Ist Heizen mit Holz klimaneutral? <https://www.bmuv.de/heizen-mit-holz/umwelt/klimaauswirkungen-von-heizen-mit-holz> [30.10.2024]

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2024a). Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management-Strategie. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-cms.pdf?__blob=publicationFile&v=12 [26.09.2024].

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2024b). CCU/CCS: Baustein für eine klimaneutrale und wettbewerbsfähige Industrie <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html> [29.10.2024].

Brown, T. R., Wright, M. M., & Brown, R. C. (2011). Estimating profitability of two biochar production scenarios: slow pyrolysis vs fast pyrolysis. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(1), 54-68. <https://doi.org/10.1002/bbb.254> [24.01.2024].

Campion, L., Bekchanova, M., Malina, R., & Kuppens, T. (2023). The costs and benefits of biochar production and use: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 137138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137138> [24.01.2024].



CDRterra. (2024a). Policy Brief. Empfehlungen für eine deutsche Langfriststrategie zur Kohlendioxidentnahme im großen Maßstab. https://cdrterra.de/wp-content/uploads/2024/07/CDRterra_Policy_Brief_11_240524_Hyperlinks.pdf [29.10.2024]

CDRterra. (2024b). Factsheet CO₂-Entnahmeverfahren an Land. <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.10997201> [29.10.2024].

Dong, W., Ma, F., Li, C., Fu, Z., Huang, Y., & Liu, J. (2020). Evaluation of anti-aging performance of biochar modified asphalt binder. *Coatings*, 10(11), 1037. <https://doi.org/10.3390/coatings10111037> [29.10.2024].

EAD. (2020). Mit Pflanzenkohle und Kreislaufwirtschaft für das Klima, <https://ead.darmstadt.de/aktuelles/detail/mit-pflanzenkohle-und-kreislaufwirtschaft-fuer-das-klima/> [29.10.2024].

EBC. (2012-2023). European Biochar Certificate - Richtlinien für die Zertifizierung von Pflanzenkohle. Ithaka Institute, Arbaz, Switzerland. Version 10.3G vom 5. April 2023. <https://www.european-biochar.org/>

EBC. (2020). Zertifizierung des C-Senken Potentials von Pflanzenkohle. Ithaka Institute, Arbaz, Switzerland. Version 2.1D vom 25. Januar 2021 <https://www.european-biochar.org/>

ECHA European Chemicals Agency. (o.D.) Understanding REACH - ECHA. <https://echa.europa.eu/regulations/reach/understanding-reach> [01.11.2024]

Europäische Kommission. (2020). CORDIS - Forschungsergebnisse der EU. Projektbeschreibung BAM - Super Bio-Accelerated Mineral weathering: a new climate risk hedging reactor technology. <https://cordis.europa.eu/project/id/964545/de> [29.10.2024].

Europäische Kommission. (2021). Delegierte Verordnung (EU) 2021/2088 Der Kommission vom 7. Juli 2021 zur Änderung der Anhänge II, III und IV der Verordnung (EU) 2019/1009 des Europäischen Parlaments und des Rates zwecks Aufnahme von durch Pyrolyse oder Vergasung gewonnenen Materialien als Komponentenmaterialkategorie in EU-Düngeprodukten. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R2088&from=DE> [22.03.2024].

Europäische Kommission. (2024). Biochar Methodology Online Workshop, https://climate.ec.europa.eu/document/download/7a749fe8-c036-4001-b74b-3cee9ce46eed_en?filename=Compiled%20presentation%20biochar%20workshop%2018June2024.pdf [31.10.2024].

Europäisches Parlament, Rat der EU. (2021). Verordnung (EU) 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119> [29.10.2024].

Gan, L., Garg, A., Wang, H., Mei, G., & Liu, J. (2021). Influence of biochar amendment on stormwater management in green roofs: experiment with numerical investigation. *Acta Geophysica*, 69, 2417-2426. <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00685-4> [29.10.2024].

Geden, O. & Schenuit, F. (2020). Unkonventioneller Klimaschutz. Gezielte CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre als neuer Ansatz in der EU-Klimapolitik. Stiftung Wissenschaft und Politik, Berlin.

IPCC. (2018). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani,



W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)). In Press.

Kundu, S., Patel, S., Halder, P., Patel, T., Marybali, M. H., Pramanik, B. K., Praz-Ferreiro, J., Figueiredo, C. C., Bergmann, D., Surapaneni, A., Megharaj, M., Shah, K. (2021). Removal of PFASs from biosolids using a semi-pilot scale pyrolysis reactor and the application of biosolids derived biochar for the removal of PFASs from contaminated water, *Environmental Science: Water Research & Technology* Issue 3, 2021 <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ew/d0ew00763c> [29.10.2024].

Krahn, K., Cornelissen, G., Castro G., Arp, H.P., Asimakopoulos, A., Wolf, R., Holmstad, R., Zimmerman, A., Sørmo, E. (2023). Sewage sludge biochars as effective PFAS-sorbents, *Journal of Hazardous Materials* Volume 445, 5 March 2023, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389422022439> [29.10.2024].

Lerchenmüller, H. (2021). CO₂ raus–Pflanzkohle rein!. *Wald. Holz. Energie*, 64. https://www.igwaldviertel.at/wp-content/uploads/2022/02/Wald_Holz_Energie_2022_Biomasseverband.pdf#page=64 [30.10.2024]

Lombardo, U., Arroyo-Kalin, M., Schmidt, M., Huisman, H., Lima, H. P., De Paula Moraes, C., Neves, E. G., Clement, C. R., Da Fonseca, J. A., De Almeida, F. O., Alho, C. F. B. V., Ramsey, C. B., Brown, G. G., Cavallini, M. S., Da Costa, M. L., Cunha, L., Anjos, L. H. C. D., Denevan, W. M., Fausto, C., . . . Teixeira, W. G. (2022). Evidence confirms an anthropic origin of Amazonian Dark Earths. *NATURE COMMUNICATIONS* | (2022) 13:3444 | <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31064-2> [29.10.2024].

Legan, M., Gotvajn, A. Ž., & Zupan, K. (2022). Potential of biochar use in building materials. *Journal of environmental management*, 309, 114704. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114704> [29.10.2024].

Mordor Intelligence. (2023). Analyse der Marktgröße und des Anteils von Pflanzkohle - Wachstumstrends und Prognosen (2023 - 2028), <https://www.mordorintelligence.com/de/industry-reports/biochar-market>. [19.01.24].

Moško, J., Pohořelý, M., Cajthaml, T., Jeremiáš, M., Robles-Aguilar, A., Skoblia, S., Beňo, Z., Innemanová, P., Linhartová, L., Michalíková, K., Meers, E. (2021). Effect of pyrolysis temperature on removal of organic pollutants present in anaerobically stabilized sewage sludge, *Chemosphere* Volume 265, February 2021, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653520332793> [29.10.2024].

Nordregio. (2018). Stockholm Biochar Project. https://nordregio.org/sustainable_cities/stockholm-biochar-project/ [29.10.2024].

Ni, B., Zhu, Z., Li, W., Yan, X., Wei, W., Xu, Q., Xia, Z., Dai, X., & Sun, J. (2020). Microplastics Mitigation in Sewage Sludge through Pyrolysis: The Role of Pyrolysis Temperature. *Environmental Science and Technology Letters*, 7, 961-967 [29.10.2024].

Nitsch, H. (2023). Einsatz von Pflanzkohle in der Landwirtschaft: Chancen und Herausforderungen. https://www.ifls.de/fileadmin/user_upload/Pflanzkohle_Bericht_IfLS_Rentenbank.pdf [22.03.23]

Osman, A. I., Farghali, M., Dong, Y., Kong, J., Yousry, M., Rashwan, A. K., ... & Yap, P. S. (2023). Reducing the carbon footprint of buildings using biochar-based bricks and insulating materials: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-34. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01662-7> [29.10.2024].

Premarathna, K. S. D., Biswas, J. K., Kumar, M., Varjani, S., Mickan, B., Show, P. L., ... & Vithanage, M. (2023). Biofilters and bioretention systems: the role of biochar in the blue-green city concept for stormwater management. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 9(12), 3103-3119. <https://doi.org/10.1039/D3EW00054K> [29.10.2024].



PYREG GmbH (2024). Premium Karbonisierungstechnologie für ein tragfähiges Business. <https://pyreg.com/de/unsere-technologie/>. [04.12.2024].

Pyrolyse Danmark. (2024). Memo based on a document originally written in Danish by the Ministry of Climate, Energy and Utilities. https://www.pyrolysedanmark.dk/en/_files/ugd/6b993d_36462effbe11482c8b3ec724edb58671.pdf [31.10.2024].

Qadeer, S., Anjum, M., Khalid, A., Waqas, M., Batool, A., & Mahmood, T. (2017). A dialogue on perspectives of biochar applications and its environmental risks. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228, 1-26.

Quicker, P., & Weber, K. (2016). Biokohle. Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten. Wiesbaden.

Rat der EU (2023): Paket „Fit für 55“. Rat verabschiedet Verordnungen über Lastenteilung sowie über Landnutzung und Forstwirtschaft. Pressemitteilung von 28.03.23. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/03/28/fit-for-55-package-council-adopts-regulations-on-effort-sharing-and-land-use-and-forestry-sector/> [26.04.23].

Rickels, W., Rothenstein, R., Schenuit, F., Fridahl, M. (2022). Procure, Bank, Release: Carbon Removal Certificate Reserves to Manage Carbon Prices on the Path to Net-Zero, *Energy Research & Social Science* 9.

Rödger, J.-M., Ganagin, W., Krieg, A., Roth, C. und Loewen, A. (2014). Steigerung des Biogasertrages durch die Zugabe von Pflanzenkohle. <https://pflanzenkohle.de/wp-content/uploads/2016/06/Artikel-Steigerung-des-Biogasertrages-durch-Pflanzenkohle.pdf> [02.05.23].

Roth. (2020). Verwertung biogener Abfälle zur Erzeugung stofflicher, thermischer und elektrischer Energieträger und deren Nutzung, Abschlussbericht.

Schenuit, F. & Geden, O. (2022). Carbon Dioxide Removal. Climbing up the EU Climate Policy Agenda, SWP Working Paper NR. 01, MAY 2022.

Schenuit, F., Böttcher, M., Geden, O. (2022). CO₂-Entnahme als integraler Baustein des Europäischen »Green Deal«, SWP-Aktuell Nr. 37 Juni 2022.

Schmidt, H.-P., Kammann, C., Gerlach, A. und Gerlach, H. (2016). Der Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierfütterung. https://freisl-krafftfutter.de/wp-content/uploads/2017/10/Schmidt_et_al_2016_Einsatz-von-Pflanzenkohle-in-der-Tierf%C3%BCtterung.pdf [25.04.23].

Schmidt, H. P., Anca-Couce, A., Hagemann, N., Werner, C., Gerten, D., Lucht, W., & Kammann, C. (2019). Pyrogenic carbon capture and storage. *Gcb Bioenergy*, 11(4), 573-591.

Schmidt, H. P., Hagemann, N., Abächerli, F., Leifeld, J., Bucheli, T., AG, M. S., & Berggebiet, M. Z. (2021). Pflanzenkohle in der Landwirtschaft. Hintergründe zur Düngertilassung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken. *Agroscope Science*. Zürich.

SRF. (2023). Basel macht aus alten Weihnachtsbäumen Pflanzenkohle, <https://www.srf.ch/news/schweiz/projekt-fuer-nachhaltigkeit-basel-macht-aus-alten-weihnachtbaeumen-pflanzenkohle> [29.10.2024].

Stenzel, F., Jung, R., Wiesgickl, S., Dexheimer, K., Eißing, M., Mundt, M. (2019). Arzneimittelrückstände in Rezyklaten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen, Abschlussbericht im Auftrag des



Umweltbundesamtes, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/anzneimittelrueckstaende-in-rezyklaten-der> [29.10.2024].

Tan, K., & Wang, J. (2023). Substrate modified with biochar improves the hydrothermal properties of green roofs. *Environmental Research*, 216, 114405. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114405> [29.10.2024].

Universität Kassel & Georg-August Universität Göttingen. (2022). Leitfaden. Vom Bioenergiedorf zum Energiewendedorf. <https://xn--energiewendedrfer-c0b.de/wp-content/uploads/2022/04/Leitfaden-Perspektiven-BED-final.pdf> [24.01.2024].

Wilken, V. & Paterson, M. (2021). Herstellung von Pflanzenkohle aus Gärresten zur stofflichen Nutzung, Veröffentlichung im Rahmen des Projektes „Biogas Progressiv: Zukunftsweisende Strategien für landwirtschaftliche Biogasanlagen“ (ProBiogas), BMEL und FNR, https://www.zukunftbiogas.de/fileadmin/user_upload/Zukunftbiogas/4_Praxisempfehlungen/Exposes/ProBiogas-Expose_Pflanzenkohle_2021.pdf [29.10.2024].

Wyrzykowski, M., Toropovs, N., Winnefeld, F., & Lura, P. (2024). Cold-bonded biochar-rich lightweight aggregates for net-zero concrete. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140008. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140008> [29.10.2024].

Zhao, S., Huang, B., Shu, X., & Ye, P. (2014). Laboratory investigation of biochar-modified asphalt mixture. *Transportation Research Record*, 2445(1), 56-63. <https://doi.org/10.3141/2445-07>.

Zhao, W., Yang, H., He, S., Zhao, Q., & Wei, L. (2021). A review of biochar in anaerobic digestion to improve biogas production: performances, mechanisms and economic assessments. *Bioresource Technology*, 341, 125797. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125797>.

Zhang, Q., Cai, H., Yang, K., & Yi, W. (2017). Effect of biochar on mechanical and flame retardant properties of wood–plastic composites. *Results in physics*, 7, 2391-2395. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.04.025>.

Zhang et al. (2022). Biochar as construction materials for achieving carbon neutrality. *Biochar* 4 (59). <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00182-x>. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42773-022-00182-x> [25.04.23].

Zozmann & Lenk. (2023). Pflanzenkohle als Kohlenstoffsенke: Technische, ökonomische und ökologische Aspekte. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) https://fyi-landgewinn.de/wp-content/uploads/2024/03/240102_LANDGEWINN_Datenzusammenstellung_Begleittext_v3.pdf



Das unterschätzte Klimaschutzpotenzial von Pflanzenkohle (Biochar)

Von

Marleen Greenberg, Jana Kapfer, Robert Werner

Herausgeber

HIR Hamburg Institut Consulting gGmbH

Paul-Neumann-Platz 5

22765 Hamburg

Zitiervorschlag

Greenberg, M., Kapfer, J., Werner, R., 2024. Das unterschätzte Klimaschutzpotenzial von Pflanzenkohle (Biochar). HIR Hamburg Institut Research, Hamburg.

Text & Lektorat

Inke Suhr

Grafik

Lars Gehlau

KONTAKT

Marleen Greenberg

Tel.: +49 (0)40-39106989-34

greenberg@hamburg-institut.com

www.hamburg-institut.com