



Institut für Ländliche Strukturforschung e.V.
an der Goethe-Universität Frankfurt am Main



Einsatz von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft: Chancen und Herausforderungen

Heike Nitsch

Frankfurt am Main, den 19.01.2023

Institut für Ländliche Strukturforschung e.V. (IfLS)
an der Goethe-Universität Frankfurt am Main



Institut für Ländliche Strukturforschung e.V.
an der Goethe-Universität Frankfurt am Main

Ansprechperson: Heike Nitsch
Email: nitsch@ifls.de
Kurfürstenstraße 49
60486 Frankfurt a.M.
Tel.: 069-9726683-13
Fax: 069-9726683-22
Website: www.ifls.de

Bildnachweis:

Titelfotos (von links nach rechts): Jörg Lange, Hansjörg Lerchenmüller, Heike Nitsch

Das Projekt wurde gefördert durch die Landwirtschaftliche Rentenbank



Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	1
1 Einführung	3
1.1 Projekthintergrund und Zielsetzung	3
1.2 Vorgehen	4
1.2.1 Auswertung von Literaturquellen und Informationen im Internet	4
1.2.2 Expertenbefragung	5
1.3 Berichtsgliederung	5
2 Klimaschutz und die Notwendigkeit von Negativemissionen	7
2.1 Klimaziele sind ohne Negativemissionen nicht erreichbar	7
2.2 Techniken und Verfahren zur CO ₂ -Entnahme aus der Atmosphäre	9
3 Pflanzenkohle: Definition, Herstellung und Eigenschaften	13
3.1 Was ist Pflanzenkohle?	13
3.2 Ausgangsstoffe	14
3.3 Techniken und Anlagen	15
3.3.1 Kleinanlagen	15
3.3.2 Industrielle Anlagen	16
3.4 Einflüsse des Herstellungsprozesses auf die Eigenschaften der Pyrolyseprodukte	17
3.4.1 Einfluss von Substraten und Pyrolysetemperatur	17
3.4.2 Beispiele für weitere Varianten des Pyrolyseprozesses und für Vor- und Nachbehandlung	19
4 Einsatzmöglichkeiten von Pflanzenkohle	21
4.1 Pflanzenkohle in der Tierfütterung	22
4.1.1 Berichtete positive Wirkungen von Pflanzenkohle in der Fütterung	23
4.1.2 Mögliche unerwünschte Wirkungen von Pflanzenkohle in der Fütterung	25
4.2 Pflanzenkohle als Bodenhilfsstoff	26
4.2.1 „Aufladen“ von Pflanzenkohle mit Nährstoffen	26
4.2.2 Wechselwirkungen zwischen Pflanzenkohle und Boden	28
4.2.3 Ertragswirkungen von Pflanzenkohle	30
4.2.4 Verringerung von Nährstoffverlusten und THG-Emissionen aus Böden	32
4.2.5 Wechselwirkungen mit Schadstoffen und Pflanzenschutzmitteln	34
4.3 Optionen zur Verwendung von Pflanzenkohle außerhalb der Landwirtschaft	36
5 Rechtlicher Rahmen zur Verwendung von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft	39
5.1 Pflanzenkohle als Bodenverbesserungsmittel	39
5.2 Pflanzenkohle in der Tierfütterung	40
5.3 Pflanzenkohle im Ökolandbau	41

5.4	Beispiele anderer europäischer Länder	41
5.4.1	Schweiz	41
5.4.2	Österreich	42
6	Zertifizierung im Bereich Pflanzenkohle	43
6.1	International Biochar Initiative (IBI)	43
6.2	Das Europäische Pflanzenkohle Zertifikat (EBC)	43
6.3	Zertifizierung von Kohlenstoffsinken	45
6.3.1	EBC-Zertifizierung	45
6.3.2	Weitere globale Standards zur Zertifizierung von Kohlenstoffsinken	47
6.3.3	Vorschläge zur Zertifizierung der Entnahme von CO ₂ aus der Atmosphäre auf EU-Ebene	47
7	Produktionsmengen an Pflanzenkohle	49
7.1	Produktion von Pflanzenkohle in Europa	49
7.2	Produktion von Pflanzenkohle in Deutschland	50
8	Pflanzenkohle in der öffentlichen Wahrnehmung in Deutschland: Beispiele für aktuelle Forschung und Stellungnahmen	53
8.1	Beispiele für Pflanzenkohle in der Forschung	53
8.2	Positionen zu Pflanzenkohle: Verbände und beispielhafte Stellungnahmen und eine einordnende Bewertung	55
9	Biomasseverfügbarkeit, Konkurrenzen und Biomasseherkunft für die Pflanzenkohleproduktion	57
9.1	Exkurs: Biomasseentnahme und die Klimaziele für den LULUCF-Sektor in Deutschland	57
9.1.1	Biomasseströme in Deutschland	57
9.1.2	Bedeutung der Kohlenstoffsinke Wald	59
9.2	Biomassepotenziale und Biomassestrategie	60
9.2.1	Absehbar erhöhte Konkurrenz um Biomasse	60
9.2.2	Biomassepotenziale von Reststoffen	61
9.2.3	Lenkung von Biomasseströmen notwendig	64
10	Zusammenfassung und Resümee	67
10.1	Pflanzenkohle als Option für Negativemissionen	67
10.2	Vielfacher Anwendungsnutzen von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft	68
10.3	Sicherstellung der Pflanzenkohlequalität durch Zertifizierung	70
10.4	Eine Honorierung der Kohlenstoffsinke ist Voraussetzung für einen breiteren Einsatz von Pflanzenkohle	70
10.5	Biomasseherkunft als zentraler Aspekt der Nachhaltigkeit	71
10.6	Forschungsbedarf zu Pflanzenkohle im Bereich Landwirtschaft	72
	Literaturverzeichnis	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über die sechs Negativemissionstechnologien, die heute als die aussichtsreichsten Lösungsoptionen zur Schaffung von Kohlenstoffsenken angesehen werden können.....	9
Abbildung 2: Pflanzenkohle aus Holzhackschnitzeln	13
Abbildung 3: Aggregierter Stoffstrom der Bioökonomie in Deutschland 2015	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Potenziale zur CO ₂ -Entnahme aus der Atmosphäre.....	11
Tabelle 2: Laut EBC für Pflanzenkohle verwendbare Biomassen	14

Abkürzungsverzeichnis

AUKM	Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BECCS	Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (<i>Bioenergy with Carbon Capture and Storage</i>)
BfN	Bundesamt für Naturschutz
C	Kohlenstoff
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>
CCU	<i>Carbon Capture and Use oder Utilisation</i>
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalente
C _{org}	organischer Kohlenstoff
DACCS	<i>Direct Air Carbon Capture and Storage</i>
DüngG	Düngegesetz
EBC	Europäisches Pflanzenkohle Zertifikat (<i>European Biochar Certificate</i>)
EBCI	<i>European Biochar Industry Consortium e.V.</i>
EU	Europäische Union
F+E	Forschungs- und Entwicklungsvorhaben
gfP	gute fachliche Praxis
Gt	1 Gigatonne = 1 Milliarde Tonnen
H	Wasserstoff
IBI	<i>International Biochar Initiative</i>
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K	Kalium
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft an (<i>Land Use, Land Use Change and Forestry</i>)
Mt	1 Megatonne = 1 Million Tonnen
NH ₃	Ammoniak

N ₂ O	Lachgas (Distickstoffoxid)
NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
O	Sauerstoff
P	Phosphor
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und -Furane
PyCCS	Einfangen und Lagern von pyrogenem Kohlenstoff (<i>Pyrogenic Carbon Capture and Storage</i>)
RED II	Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (<i>Renewable Energy Directive</i>)
THG	Treibhausgase
TM	Trockenmasse
VCS	<i>Voluntary Carbon Standard</i>

Kurzzusammenfassung

Pflanzenkohle („*biochar*“) gehört zu den Optionen für eine CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre, die ein nennenswertes Potenzial haben zu Negativemissionen beizutragen. Hinzu kommt die energetische Nutzungsmöglichkeit von Abwärme, Pyrolysegas und Pyrolyseöl, um fossile Energien zu ersetzen und vielfacher möglicher Anwendungsnutzen der Pflanzenkohle in und außerhalb der Landwirtschaft.

In der Landwirtschaft kann Pflanzenkohle in der Tierhaltung und zur Bodenverbesserung eingesetzt werden. Mittlerweile werden Ausbringungsmengen von 0,5 bis 2 Tonnen Pflanzenkohle pro Hektar favorisiert, „aufgeladen“ mit Nährstoffen oder im Zusammenhang mit einer Düngemittelgabe. Diese Vorgehensweise erscheint vielversprechend, um mit einer vergleichsweise geringen Menge an Pflanzenkohle Ertragszuwächse zu erreichen oder die Aufbringung zusätzlicher Düngemittel zu reduzieren. Einen Humusaufbau und eine Steigerung der Bodenfruchtbarkeit durch „traditionelle“ Praktiken (Fruchtfolge, Zwischenfrüchte, organische Düngung etc.) kann und soll Pflanzenkohle nicht ersetzen, aber ergänzen.

Insbesondere an Pflanzenkohle, die in Böden eingebracht und in der Tierfütterung verwendet wird, sind strenge Qualitätsanforderungen (u.a. an Schadstoffgehalte) zu stellen und diese wirksam zu überwachen. Unbedingt zu empfehlen ist die ausschließliche Verwendung zertifizierter Pflanzenkohle.

Grundsätzlich ist ausreichend Wissen vorhanden, um bereits jetzt Pflanzenkohle sinnvoll und sicher anwenden zu können. Aufgrund des Variantenreichtums von Pflanzenkohlen in Abhängigkeit von den verwendeten Biomassen und der Herstellungstechniken sowie der zahlreichen Verwendungsmöglichkeiten (in und außerhalb der Landwirtschaft) gibt es jedoch noch vielfältige weitergehende Fragestellungen für die Forschung.

Über die Produktion von Pflanzenkohle kommt eine zusätzliche Nachfrage nach Biomasse hinzu. Soll die Festlegung von Kohlenstoff über Pflanzenkohle zukünftig in größerem Ausmaß stattfinden, müssen nicht nur in der Verwendung von Biomasse andere Prioritäten gesetzt (z. B. Pyrolyse anstatt Biomasseverbrennung), sondern Biomasse auch zusätzlich z. B. über verstärkte Anpflanzung von holziger Biomasse in der Agrarlandschaft gezielt erzeugt werden. Systemvergleiche verschiedener Verwertungswege von Biomasse müssen Pyrolyse und die Produktion von Pflanzenkohle für verschiedene Verwendungsoptionen mit einbeziehen. Bei der Ausarbeitung der Nationalen Biomassestrategie muss die Produktion von Pflanzenkohle berücksichtigt werden.

Es ist erforderlich, dass sich Politik und Öffentlichkeit mit dem Thema verstärkt auseinandersetzen und die Chancen von Pflanzenkohle als risikoarme Senkentechnologie für die nächsten Jahrzehnte wahrnehmen und zur Umsetzung der Klimaziele nutzen.

1 Einführung

1.1 Projekthintergrund und Zielsetzung

Aufgrund der Notwendigkeit, den Klimawandel einzudämmen, kommen Optionen für Negativemissionen bzw. *Carbon Removal*, eine gezielte Entfernung des Treibhausgases Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre durch menschliche Aktivitäten, verstärkt in den Fokus. Eine Möglichkeit, Kohlenstoff in eine sehr stabile Form zu überführen und so bis zu mehreren 1.000 Jahren zu konservieren, bietet die Umwandlung von Biomasse in Pflanzenkohle über Pyrolyse.

In der Landwirtschaft kann Pflanzenkohle als Bodenhilfsstoff eingesetzt werden, als Trägersubstanz für Düngemittel und als Zusatz zu Tierfutter und Einstreu, zur Güllebehandlung oder zu Komposten. Neben Klimaschutzeffekten durch die CO₂-Festlegung werden weitere Vorteile in der Anwendung des Materials erwartet: Unter anderem verbessertes Tierwohl und geringere Geruchsentwicklung im Stall, ein Beitrag zur Nährstoff- und Wasserhaltung in Böden und positive Auswirkungen auf das Bodenleben. Zu Anwendungsmöglichkeiten außerhalb der Landwirtschaft gehören beispielsweise eine Einbindung in Baustoffe und dadurch ebenfalls eine langfristige Bindung von Kohlenstoff, die Aufbereitung zu Aktivkohle oder die Verwendung als Pflanzsubstrat für Stadtbäume.

In Deutschland ist die Anwendung in der landwirtschaftlichen Praxis bisher ein Nischenthema und betrifft insbesondere den Einsatz in der Tierhaltung. Das Interesse an Pflanzenkohle als Bodenverbesserungsmittel nimmt zu, und es zeichnen sich Vorteile der gezielten Anwendung mit Nährstoffen aufgeladener Pflanzenkohle ab.

In den vergangenen Jahren gab es eine rasante Entwicklung sowohl in der Forschung und Entwicklung zum Thema Pflanzenkohle als auch bei der Produktion und der Anwendung in der Praxis. Sie wurde von einzelnen Arbeitsgruppen an Hochschulen, Forschungsinstituten und Verbänden und Pionieren in der Praxis vorangetrieben. Inzwischen wird der Einsatz von Pflanzenkohle aber vor allem aufgrund der dringenden Notwendigkeit von Negativemissionen verstärkt diskutiert. Parallel werden Zertifizierungsansätze weiterentwickelt. So setzt das Europäische Pflanzenkohle Zertifikat (EBC, *European Biochar Certificate*) Standards für hochwertige Pflanzenkohle und zertifiziert mittlerweile auch die Menge an CO₂, die bei der Anwendung von Pflanzenkohle dauerhaft sequestriert wird. Die Produktionskapazität von Pflanzenkohle und die Zahl an Anbietern von Pflanzenkohle-Produkten steigt. Seit Juli 2022 kann Pflanzenkohle aus einer Reihe von Ausgangssubstraten nach EU-Düngemittelrecht zugelassen werden.

Andererseits ist Pflanzenkohle noch wenig in der breiteren Öffentlichkeit bekannt und wird auch in Szenarien zum Klimaschutz bisher nur selten berücksichtigt. Kritische Stimmen stellen die Frage nach der Verfügbarkeit geeigneter Substrate und der Konkurrenz zu deren alternativen Verwendung (z. B. Verbrennung zur energetischen Nutzung, stoffliche Nutzung, Humusaufbau). Sorgen bestehen ebenfalls bezüglich eventueller Schadstoffgehalte.

Die Diskussionen um Pflanzenkohle bewegen sich daher im Spannungsfeld zwischen hohen Erwartungen an eine vergleichsweise rasch zu schaffende CO₂-Senke mit geringem ökologischem Risiko, an der die Landwirtschaft maßgeblich beteiligt sein und von der sie auch profitieren kann, und bestehenden Vorbehalten und Hindernissen.

Die Dynamik der Entwicklungen bei den Themen Klimaschutz und CO₂-Senken im Allgemeinen und der Pflanzkohle im Speziellen sind hoch. Daher soll in diesem Vorhaben, welches durch die Landwirtschaftliche Rentenbank gefördert wird, vor dem Hintergrund Klimaschutz ein Überblick über den aktuellen Kenntnisstand zum Thema Pflanzkohle und ihren Verwendungsmöglichkeiten in der Landwirtschaft gegeben werden. Der regionale Schwerpunkt ist Deutschland.

1.2 Vorgehen

1.2.1 Auswertung von Literaturquellen und Informationen im Internet

In einem ersten Schritt wurde aktuelle Literatur zu Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten von Pflanzkohle und ihren Wirkungen gesichtet und ausgewertet. Dies beinhaltet *peer-reviewte* wissenschaftliche Veröffentlichung und „graue Literatur“ (z. B. Projektberichte, „Whitepaper“).

Die Menge an Veröffentlichungen zum Thema Pflanzkohle erfuhr allerdings im letzten Jahrzehnt ein ungeheures Wachstum. So erwähnen Conte et al. (2021), dass die Anzahl der Publikationen, die im *Web of Science* unter dem Stichwort „*biochar*“ gefunden wurden, von weniger als 50 Ende der 90er Jahre zu mehr als 3.500 alleine im Jahr 2020 anstieg. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde eine Suche über google scholar für die Jahre 2017 bis 2022 vorgenommen, die alleine zum Stichwort „*biochar*“ 69.600 Treffer ergab; eingegrenzt auf die Jahre 2020-2022 und kombiniert mit dem Stichwort „*agriculture*“ blieben 17.000 Treffer. Zum deutschen Stichwort „Pflanzkohle“ ergaben sich für die letzten fünf Jahre 277 Literaturtreffer. Über eine grobe Sichtung dieser Fundstellen hinaus wurde eine Suche im Internet nach Veröffentlichungen vorgenommen und auch aus Literaturverzeichnissen von Publikationen teilweise weitere Literatur übernommen.

In jüngster Zeit erschienen diverse Reviews zum Thema Pflanzkohle: U.a. legen Schmidt et al. (2021a) den Stand der Wissenschaft bezüglich der Verwendung von Pflanzkohle in der Landwirtschaft und Schmidt et al. (2019b) speziell in der Tierfütterung dar, analysieren Kammann et al. (2017) den Beitrag von Pflanzkohle zum Klimaschutz im Sektor Landwirtschaft und fassen Schmidt et al. (2019a) das Wissen zu Pflanzkohle als Negativemissionstechnologie zusammen. Lehmann et al. (2021) thematisieren in ihrem Review den Beitrag von Pflanzkohle zum Klimaschutz im Vergleich zur ausschließlichen Verwendung der Biomasse für energetische Zwecke. Schmidt et al. (2021b) werten Aussagen von 26 globalen Meta-Studien zur Wirkung von Pflanzkohle auf verschiedene agronomische Parameter aus, und Joseph et al. (2021) stellen den Stand der Forschung zu Interaktionen zwischen Pflanzkohle und Boden dar. Weitere aktuelle Meta-Analysen widmen sich u.a. dem Einfluss von Pflanzkohleeigenschaften und Bodenbedingungen auf das Pflanzenwachstum (Dai et al. 2020), dem Einfluss von Pflanzkohle auf bodenbürtigen Kohlenstoff (Ding et al. 2018), den Ertrag von Kulturpflanzen (Jeffery et al. 2017), den Stickstoffkreislauf (Liu et al. 2018) und spezifischer die Nitrat-Auswaschung und Lachgasemissionen (Borchard et al. 2019) und auf THG-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden (Zhang et al. 2020). Für Details wird unter anderem auf diese Publikationen verwiesen.

Aufgrund der großen Menge an Veröffentlichungen zu Pflanzkohle lag der Zeithorizont der in diesem Vorhaben berücksichtigten Literatur insgesamt auf Veröffentlichungen der letzten fünf Jahre, wobei einzelne ältere wissenschaftliche „Schlüsselstudien“ ebenfalls berücksichtigt wurden. Im Fokus standen Eigenschaften und Wirkungsweisen von Pflanzkohle, die für eine Anwendung in der

Landwirtschaft in gemäßigten Klimazonen und für das Ziel Klimaschutz relevant sind. Die Darstellung des aktuellen Kenntnisstandes zu Wirkungen von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft in diesem Bericht stützt sich stark auf Meta-Analysen und Reviews der letzten Jahre. Es wurde darüber hinaus darauf Wert gelegt, ganz aktuelle Publikationen zu berücksichtigen.

Zu Studien, die sich mit der Verfügbarkeit von Biomasse befassen, zu Klimaschutzpolitiken und zum aktuellen rechtlichen Rahmen für den Einsatz von Pflanzenkohle auf EU- und nationaler Ebene wurde ergänzend gezielt recherchiert. Zusätzlich wurden Internetquellen genutzt, um einen Überblick zu aktuellen Entwicklungen im Bereich Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle zu erhalten, z. B. Webseiten von Herstellern, Vertreibern oder Zertifizierern von Pflanzenkohle, von Forschungs- und Pilotprojekten oder von Verbänden, die sich dem Thema Pflanzenkohle widmen oder sich dazu positionieren.

1.2.2 Expertenbefragung

Um Aspekte, die sich aus der Recherche ergaben, abzusichern und zu vertiefen, wurden einzelne Expertengespräche geführt, – als telefonische oder persönliche Interviews sowie Gespräche im Rahmen der Internationalen Fachtagung 2022 „Alles außer Holz“ des Fachverbands Pflanzenkohle e.V. Die Befragten waren Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, Personen, die Pflanzenkohle herstellen, vertreiben oder anwenden, und Vertreterinnen und Vertreter von Verbänden. Ziel war nicht eine repräsentative Befragung, sondern eine Ergänzung der Literatur- und Internetrecherche.

Fragen betrafen wissenschaftliche Themen, Rahmenbedingungen sowie aktuelle Entwicklungen und Perspektiven. Zudem wurden Vorschläge zu zukünftigen Maßnahmen abgefragt, die einen Einsatz von Pflanzenkohle voranbringen bzw. flankieren können.

1.3 Berichtsgliederung

Im folgenden Kapitel 2 werden die Notwendigkeit für Negativemissionen zum Erreichen der Klimaschutzziele und hierfür grundsätzlich in Frage kommende Verfahren erläutert.

Nach einer Einführung zu Definition, Herstellung und Eigenschaften von Pflanzenkohle in Kapitel 3 folgt in Kapitel 4 eine Übersicht zu den Verwendungsmöglichkeiten. Ausführlicher wird dabei auf den Einsatz in der Landwirtschaft eingegangen. Unterlegt mit Literaturquellen werden die Wirkungen von Pflanzenkohle bei der Verwendung in der Tierhaltung und im Boden zusammengefasst.

Wichtige rechtliche Rahmenbedingungen für eine Anwendung von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft werden in Kapitel 5 skizziert. Kapitel 6 widmet sich der Zertifizierung, insbesondere dem Europäischen Pflanzenkohlezertifikat. Kapitel 7 enthält Informationen zu Produktionsmengen von Pflanzenkohle in Europa und in Deutschland.

Kapitel 8 führt Beispiele für aktuelle Forschungsprojekte in Deutschland auf und benennt Aspekte der öffentlichen Diskussion zu Pflanzenkohle, und Kapitel 9 schlägt den Bogen zum Thema Biomasseherkunft.

Eine Zusammenfassung findet sich in Kapitel 10.

2 Klimaschutz und die Notwendigkeit von Negativemissionen

2.1 Klimaziele sind ohne Negativemissionen nicht erreichbar

UN-Generalsekretär Guterres hat es in seiner Rede zum Weltklimagipfel 2022, der COP 27, deutlich gemacht: Wir befinden uns auf dem Weg in eine Klimakatastrophe. Um diese noch zu begrenzen, hat die Vermeidung und die Reduktion von Treibhausgas(THG-)emissionen oberste Priorität. Mittlerweile wird allerdings deutlich, dass die international festgesetzten Klimaziele ohne Negativemissionen, also der gezielten Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre durch menschliche Aktivitäten, nicht erreichbar sind (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2022). Aus Modellierungen wird geschätzt, dass zum Zeitpunkt, an dem global netto Null CO₂-Emissionen erreicht werden (sollen), verbleibende 5-16 Gigatonnen (Gt) CO₂ jährlich durch Negativemissionen ausgeglichen werden müssen (ebd). (Zum Vergleich: Die globalen anthropogenen THG-Emissionen betragen im Jahr 2019 etwa 59 Gt CO₂e).

Das Klimaziel des Paris-Abkommens sieht „Treibhausgas-Neutralität“ in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts vor, d.h. es dürfen global nicht mehr klimaschädliche Gase ausgestoßen werden, als der Atmosphäre aktiv entnommen und in sogenannten Senken festgelegt werden. Das Erreichen einer Treibhausgas-Neutralität bis 2050 findet sich auch im Klimaziel der EU.

In Deutschland wurden mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) 2019 nationale Klimaschutzziele erstmals gesetzlich verankert. Nach dem Urteil des Bundesverfassungsgerichts vom April 2021 musste die Bundesregierung dieses Gesetz bereits nachschärfen. Nach der am 31.8.2021 in Kraft getretenen Novelle¹ muss Deutschland bereits im Jahr 2045 klimaneutral sein. Nach dem Jahr 2050 sollen dann mehr THG in Senken eingebunden werden als ausgestoßen werden. Vorgesehen ist zudem eine Verringerung der Emissionen (jeweils gegenüber dem Jahr 1990) um 65 % bis 2030 und um 88 % bis 2040. Die im Jahr 2045 verbleibenden Restemissionen sollen durch den Sektor der Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (*Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF*) mit mindestens 40 Megatonnen (Mt) CO₂ pro Jahr ausgeglichen werden. Konkrete Ausbauziele für Technologien zur Generierung negativer Emissionen außerhalb des LULUCF-Sektors werden nicht genannt.

Die im KSG anvisierten Ziele sind ambitioniert. Laut Wissenschaftsplattform Klimaschutz (WPKS) (2022) ist es dafür notwendig, „1) energiebedingte CO₂-Emissionen nahezu vollständig zu vermeiden, 2) Emissionen aus industriellen Prozessen beispielsweise Emissionsquellen, bei denen ein hochkonzentrierter und großskaliger CO₂-Strom auftritt (zum Beispiel Zementindustrie und Abfallverbrennung), weitgehend durch CO₂-Abscheidung und Speicherung in geologischen Formationen zu vermeiden und 3) die Tierbestände zu reduzieren“. Ein aktueller Bericht des Bundesrechnungshofes weist auf die Gefahr hin, bereits die für das Jahr 2030 gesetzten Emissionsminderungsziele deutlich zu verfehlen und kritisiert die bislang mangelhafte Steuerung des Klimaschutzes in Deutschland, hohe klimaschädliche Subventionen und zu wenig wirksame Maßnahmen in den bisherigen Klimaschutzprogrammen (Bundesrechnungshof 2022).

Diverse Studien haben mittlerweile Szenarien für eine Minderung der THG-Emissionen erstellt und damit die **Höhe an notwendigen Negativemissionen für Deutschland** abgeschätzt:

¹ Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist

- So rechnet die Studie „Klimaneutrales Deutschland“ mit Restemissionen in Höhe von 63 Mt CO₂e² im Jahr 2045 (Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende, Agora Verkehrswende 2021).
- Laut dem Ariadne-Report „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045“ werden auch bei einem weitgehenden Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energien „jährlich CO₂-Senken im Umfang von mindestens 41-74 Mt CO₂ benötigt, um verbleibende Treibhausgasemissionen zu kompensieren – insbesondere schwer vermeidbarer prozessbedingte CO₂-Emissionen der Industrie sowie Methan (CH₄)- und Lachgas (N₂O)- Emissionen aus der Landwirtschaft. ... Die Emissionen könnten auch höher ausfallen, wenn zum Beispiel die vollständige Vermeidung energiebedingter CO₂-Emissionen oder eine deutliche Reduktion der Emissionen aus der Viehzucht nicht realisiert werden“ (Kopernikus-Projekt Ariadne Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) 2021).
- In dieser Größenordnung liegen auch die Langfristszenarien des Fraunhofer ISI und seiner Projektpartner, die rund 60 Mt CO₂/Jahr Negativemissionen nach 2050 für notwendig halten (Consentec GmbH, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Technische Universität Berlin 2021), und die Leitstudie der Deutschen Energie-Agentur, die auf 70 Mt CO₂/Jahr Negativemissionen über natürliche und technische Senken kommt (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2021).
- Edenhofer et al. (2021) gehen für das Jahr 2050 von höheren Werten für Restemissionen aus: rund 70 Mt CO₂/Jahr vorrangig aus der Industrie, dazu rund 40-60 Mt CO₂e N₂O- und CH₄-Emissionen vorrangig aus der Landwirtschaft.

Die verschiedenen Szenarien kommen demnach für Deutschland auf verbleibende THG-Restemissionen in der Mitte dieses Jahrhunderts von rund 40 bis 130 Mt CO₂e., die durch negative Emissionen ausgeglichen werden müssen. Die meisten Studien nennen Zahlen zwischen 60 und 70 Mt CO₂e. Diese Menge geht über die im KSG festgeschriebene Ziele für den LULUCF-Sektor hinaus. Die Senkenleistung dieses Sektors basiert zudem ganz entscheidend auf der Speicherung von Kohlenstoff auf Waldflächen. Eine hohe Entnahme von Holz und zunehmende klimawandelbedingte Störungen setzen diese allerdings deutlich herab (siehe Kapitel 9.1.2).

Zum Vergleich: In 2019 wurden in Deutschland (ohne LULUCF) ca. 800 Mt CO₂e emittiert; in 2020 sanken die Emissionen auf 729 Mt CO₂e (Umweltbundesamt (UBA) 2022). Für das Jahr 2021 ist nach vorläufigen Daten aus der THG-Berichterstattung (Stand 15.3.2022) wiederum ein Anstieg auf 762 Mt CO₂e zu verzeichnen³. Wie sich der Ukrainekrieg auf THG-Emissionen und das Erreichen der Klimaziele auswirkt, ist noch nicht abzusehen. Zu berücksichtigen ist, dass sich die nationale Berichterstattung jeweils nur auf THG-Emissionen bezieht, die innerhalb eines Landes anfallen. Emissionen, die aus hier konsumierten, aber in anderen Ländern produzierten Gütern anfallen, werden den produzierenden Ländern zugeschlagen.

Es wird deutlich, dass für einen wirksamen Klimaschutz primär massive THG-Emissionsminderungen in allen Sektoren notwendig sind. Parallel muss eine gezielte Entnahme und langfristige Speicherung von CO₂ vorangetrieben werden, auch über den LULUCF-Sektor hinaus. Dazu bedarf es eines nennenswerten Einstiegs in entsprechende Technologien noch in diesem Jahrzehnt.

² Das weitaus dominierende Treibhausgas ist CO₂. Die Angabe von CO₂-Äquivalenten bezieht auch weitere Treibhausgase außer CO₂ mit ein, wobei die Klimawirkung über einen definierten Zeitraum von jeweils einem Kilogramm dieser Stoffe ins Verhältnis zu einem Kilogramm CO₂ gesetzt wird.

³ siehe <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>

2.2 Techniken und Verfahren zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre

Diverse Techniken und Verfahren, CO₂-durch zusätzliche anthropogene Eingriffe aus der Atmosphäre zu entnehmen, sind perspektivisch möglich. Große Unterschiede bestehen bezüglich der jeweiligen Kosten und Potenziale, dem Stadium der Entwicklung, den Auswirkungen auf die Biodiversität, Wasser und Boden sowie etwaiger Nutzungskonkurrenzen.

Im Folgenden werden die grundsätzlichen Optionen (illustriert in Abbildung 1) kurz aufgeführt, um aufzuzeigen, wie sich die Produktion von Pflanzenkohle in diese Verfahren einordnet. Ausführlicher dargestellt und diskutiert werden die Verfahren und Techniken u.a. in Fuss et al. (2021), Edenhofer et al. (2021), Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2021) oder Kopernikus-Projekt Ariadne Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2021).

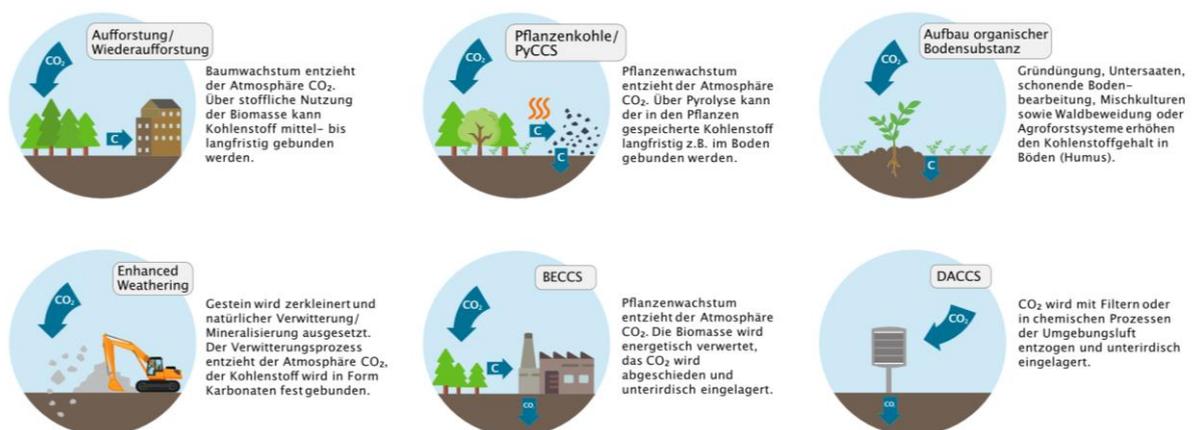


Abbildung 1: Überblick über die sechs Negativemissionstechnologien, die heute als die aussichtsreichsten Lösungsoptionen zur Schaffung von Kohlenstoffsenken angesehen werden können

Quelle: European Biochar Industry Consortium e.V. (EBI) (2020); abgeändert aus Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH (2016) und Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2020).

BECCS (Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung; Bioenergy with Carbon Capture and Storage): Pflanzen nutzen mithilfe von Photosynthese CO₂ aus der Atmosphäre für ihr Wachstum. In industriellen Prozessen kann Energie aus Biomasse gewonnen und anschließend das dabei entstehende CO₂ abgeschieden und unterirdisch gespeichert werden.

DACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage): Direkte Abscheidung von CO₂ aus der Umgebungsluft mithilfe chemischer und mechanischer Prozesse und nachfolgende geologische Speicherung.

Pflanzenkohle (Einfangen und Lagern von pyrogenem Kohlenstoff; Pyrogenic Carbon Capture and Storage, PyCCS⁴): Pflanzenkohle wird durch Pyrolyse (thermischer Abbau von organischem Material unter weitgehendem Ausschluss von Sauerstoff) pflanzlicher Biomasse gewonnen und besteht zu einem Großteil aus organischen Kohlenstoffverbindungen, die eine hohe Stabilität aufweisen und so dem Kohlenstoffkreislauf für sehr lange Zeit entzogen werden, solange die Pflanzenkohle nicht verbrannt wird. Für die entstehende Pflanzenkohle gibt es zahlreiche Verwendungsmöglichkeiten.

⁴ Der Ausdruck PyCCS wurde 2018 durch ein Grundlagenpapier zu „Pyrogenic Carbon Capture and Storage“ (Schmidt et al. 2019a) eingeführt.

Beschleunigte Verwitterung (*Enhanced weathering*): Durch Aufbringen von Gesteinspulver (z. B. Basalt, evtl. auch Verwertung alkalischer Abfallprodukte aus der Industrie) auf den Boden wird durch den dadurch beschleunigten Prozess der natürlichen Verwitterung CO₂ aus der Atmosphäre in stabilen Mineralien gebunden und so langsam eine CO₂-Senke geschaffen.

Als naturbasierte Ansatzpunkte gelten insbesondere **Aufforstung** und damit die Aufnahme von CO₂ und Bindung in der Biomasse und im Boden sowie die **verstärkte Bindung von Kohlenstoff im Bodenumus** durch veränderte landwirtschaftliche Praktiken (z. B. über humusmehrende Fruchtfolgen, Aufbringung organischer Dünger, Agroforstsysteme) (vgl. auch Fuss et al. 2018 und Smith et al. 2019 sowie die in diesem Unterkapitel bereits zitierten Studien). Diese Ansätze sind in vielerlei Hinsicht höchst sinnvoll: Bezüglich ihrer Funktion als Kohlenstoffsенke sind sie aber gekennzeichnet von schwieriger Bilanzierung und geringer Dauerhaftigkeit bzw. möglicher Reversibilität. Ob gepflanzte Baumsetzlinge überhaupt nennenswert zur Speicherung von Kohlenstoff beitragen werden oder im Zuge des Klimawandels verstärkt Waldbränden, Trockenheit oder Schädlingen zum Opfer fallen, ist zum Zeitpunkt der Pflanzung bei weitem nicht gesichert, und auch bestehende Wälder sind diesen Risiken ausgeliefert. Bei Humusaufbau in landwirtschaftlichen Böden durch die Zugabe von Ernteresten oder organischer Düngung wird nach einer gewissen Erhöhung ein neues Gleichgewicht erreicht, bei dem sich Humusauf- und -abbau die Waage halten. Die Bewirtschaftungsform muss dauerhaft weitergeführt werden, um das erreichte Niveau zu halten, da die organischen Stoffe vergleichsweise schnell wieder mineralisieren (Joseph et al. 2021). Als Humus gespeicherter Kohlenstoff kann durch geänderte Managementpraktiken oder auch Klimaveränderungen also schnell wieder frei werden.

Immer wieder wird die **Wiedervernässung von Mooren** im Zusammenhang mit einer CO₂-Senke genannt. Tatsächlich sind entwässerte organische Böden aufgrund des dadurch stattfindenden Torfschwundes „Hotspots“ für THG-Emissionen (Smith et al. 2019; Tiemeyer et al. 2017; Umweltbundesamt (UBA) 2022a). Durch eine Erhöhung des Wasserstandes bis hin zur Wiedervernässung können CO₂-Emissionen verringert oder gestoppt werden. Erst sehr langfristig und bei optimalen Bedingungen kann durch Torfbildung – wie in natürlichen Mooren – eine C-Senke entstehen (Tiemeyer et al. 2017). Allerdings werden Emissionen aus entwässerten organischen Böden, die z. B. als Acker- oder Grünlandfläche bewirtschaftet werden, nach der aktuell geltenden EU-Verordnung 2018/841 zur Einbeziehung des LULUCF-Sektors⁵ mit der Differenz zum Basisjahr 2005 angerechnet. Da die betreffenden Flächen i.d.R. schon seit Jahrzehnten entwässert sind, führt eine Wiedervernässung von organischen Böden in der Bilanzierung zu Emissionen mit negativem Vorzeichen, ohne dass CO₂ aus der Atmosphäre entnommen wird. Mit dem am 14. Juli 2021 vorgestellten „Fit-for-55“-Paket der EU-Kommission wurde vorgeschlagen, die Anrechnungsvorgaben für den LULUCF-Sektor zu ändern und stattdessen direkt die Nettoemissionen aus den nationalen Treibhausgasinventaren zur Zielerreichung zu verwenden. Im Fall der organischen Böden würde eine Wiedervernässung dann als THG-Minderungsoption bilanziert und nicht mit einer CO₂-Senke verwechselt werden (vgl. auch Fuss et al. 2021 (S. 21) und Kopernikus-Projekt Ariadne Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) 2021 (S. 227/228)).

⁵ Verordnung (EU) 2018/841 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die Einbeziehung der Emissionen und des Abbaus von Treibhausgasen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft in den Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030 und zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 und des Beschlusses Nr. 529/2013/EU

Weitere mögliche Ansatzpunkte⁶, THG-Emissionen aus der Atmosphäre zu entfernen, werden diskutiert (Fuss et al. 2018). Diese widmen sich THG wie CH₄, der Zugabe beispielsweise von Löschkalk in Küstengewässer, um die CO₂-Bindung in stabilen Karbonaten zu erhöhen (Ozean-Alkalisierung/Ozeankalkung) und dem Management von Seegras, Mangroven oder Salzmarschen (*blue carbon*) und deren Potenzial als Kohlenstoffsenken. CO₂ (gewonnen z. B. aus der direkten Abscheidung aus der Umgebungsluft oder aus der Verbrennung von Biomasse) kann auch als Ausgangsstoff für die Herstellung diverser Stoffe (Kunststoffprodukte, Naphtha, Methanol) gewonnen werden. Im Gegensatz zur geologischen Speicherung von CO₂ hängt das Senkenpotenzial bei der stofflichen Verwendung ganz maßgeblich von der Langlebigkeit und der Gebrauchsdauer der daraus hergestellten Produkte ab⁷.

Das größte Potenzial für Deutschland, abgesehen von den o.g. naturbasierten Lösungen, schreiben die meisten genannten Studien BECCS und DACCS zu (siehe z. B. Tabelle 1). Die anderen Ansatzpunkte werden teilweise nicht in allen Studien genannt.

Tabelle 1: Potenziale zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre

Szenarien für Deutschland unter der Annahme stringenter Klimapolitik und entsprechender Vergütung; hier dargestellt ohne bestehende Waldsenke

Quelle: Kopernikus-Projekt Ariadne Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2021), Tab. 8.1

	2030	2045
DACCS	Anlagen werden verwendet für CCU	16 Mt CO ₂ /Jahr
BECCS	1 Mt CO ₂ /Jahr	24 Mt CO ₂ /Jahr
Pflanzenkohle	5 Mt CO ₂ /Jahr	10 Mt CO ₂ /Jahr
(Wieder-)aufforstung	1 Mt CO ₂ /Jahr	2 Mt CO ₂ /Jahr
Beschleunigte Verwitterung	3 Mt CO ₂ /Jahr	9 Mt CO ₂ /Jahr
Bodenkohlenstoffanreicherung (durch Fruchtfolgen, Bodendecker, Dauerkulturen)	2-4 Mt CO ₂ /Jahr	3-6 Mt CO ₂ /Jahr
Agroforst	2-6 Mt CO ₂ /Jahr	4-14 Mt CO ₂ /Jahr

Die Potenziale, die tatsächliche Umsetzbarkeit und Umweltauswirkungen hängen von diversen Annahmen ab, u.a. ob eingesetzte Biomasse aus Reststoffen verwendet oder extra auf Ackerflächen angebaut oder aus Wäldern entnommen wird mit Folgen für Landnutzung und damit Biodiversität, Boden und Wasser (z. B. BECCS, Pflanzenkohle), wie viel Energie benötigt wird und aus welchen Quellen diese stammt (hoher Energieverbrauch z. B. bei DACCS) und wie aufwändig die Errichtung von Infrastruktur ist (z. B. BECCS, DACCS). Die genannten Verfahren und Technologien können auch gegenseitig in Konkurrenz stehen, insbesondere um Biomasse (z. B. BECCS, Pflanzenkohle, langlebige

⁶ Nicht enthalten in der Aufzählung ist die Ozean-Düngung. Eine Steigerung der marinen Biomasseproduktion und damit der CO₂-Bindung soll durch Zugabe von Nährstoffen, die das Pflanzenwachstum limitieren wie z. B. Eisen erreicht werden. Große Risiken liegen hier in der unvorhergesehenen Beeinflussung von Stoffkreisläufen.

⁷ Eine Abscheidung von CO₂ aus der Verbrennung fossiler Energiequellen entzieht der Atmosphäre kein zusätzliches CO₂, sondern verringert diese Emissionen aus der Nutzung fossiler Energiequellen. Dieses sogenannte *Carbon Capture and Storage* (CCS) (bei geologischer Speicherung) oder *Carbon Capture and Use oder Utilisation* (CCU) (bei stofflicher Nutzung des abgeschiedenen CO₂) ist daher nicht als negative Emissionstechnologie zu betrachten.

Produkte aus Biomasse) oder geologische Speichermöglichkeiten für CO₂ (BECCS, DACCS). Für die Senkenwirkung entscheidend ist zudem nicht nur die Menge der der Atmosphäre entnommene CO₂-Menge, sondern auch deren Lagerung außerhalb der Atmosphäre über möglichst lange Zeit (unsicher z. B. bei Humusaufbau und Aufforstung).

Das KSG nennt im Zusammenhang mit Negativemissionen bisher nur den Beitrag des LULUCF-Sektors. Allerdings wird es in diesem Sektor zukünftig ganz überwiegend um eine weitgehende Erhaltung aktueller Kohlenstoffvorräte gehen; die Senkenwirkung des Forstsektors ist in ihrer aktuellen Höhe bei weitem nicht gesichert.

DACCS und BECCS befinden sich aktuell noch in der Erprobungsphase und sind auf einzelne Demonstrationsprojekte beschränkt. Die geologische Speicherung von CO₂ trifft zudem auch auf Akzeptanzprobleme. Gesteinsmehle werde bisher kleinskalig im Düngebereich verwendet und es besteht noch Forschungsbedarf bezüglich der zukünftigen Relevanz der beschleunigten Verwitterung als CO₂-Senke.

Laut Kopernikus-Projekt Ariadne Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2021) könnte Pflanzkohle ab dem Jahr 2045 für Deutschland ein Senkenpotenzial von 10 Mt CO₂ pro Jahr beitragen (Tabelle 1). Da die Technik im Prinzip marktreif ist, dezentral eingesetzt werden kann und nicht an das Vorhandensein einer CO₂-Infrastruktur gebunden ist, könnte die Herstellung von Pflanzkohle grundsätzlich auch schon im Jahr 2030 nennenswert dazu beitragen, CO₂ zu speichern.

Auf globaler Ebene schreibt Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022) Pflanzkohle ein „*moderates bis großes Potenzial*“ zu, durch CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre und Verringerung von THG-Emissionen zur Eindämmung des Klimawandels beizutragen. Das technische Potenzial wird auf 2,6 (0,2-6,6) Gt CO₂e pro Jahr beziffert. Das ökonomische Potenzial (Kosten von bis zu 100 US-Dollar/t CO₂) sei in den nächsten Dekaden am höchsten in Asien (Roe et al. 2021). Als besonders effektiv für den Klimaschutz bewertet IPCC (2022) eine Verwendung auf sauren oder wenig fruchtbaren Böden, an Standorten mit hohen N₂O-Emissionen (z. B. intensiver Gemüsebau, bewässerte Böden) und den Ersatz fossiler Brennstoffe durch die energetische Nutzung der bei der Pyrolyse freiwerdenden Energie. In die Modellierungen, die IPCC zur Quantifizierung von Klimaschutzmaßnahmen heranzieht, ist Pflanzkohle – anders als BECCS und DAACS und der Sektor LULUCF – noch nicht einbezogen. Lehmann et al. (2021) schreiben der Pflanzkohle ein globales technisches Klimaschutzpotenzial von 3,4 bis 6,3 Gt CO₂e pro Jahr zu, wobei rund die Hälfte davon aus der Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre und dessen langfristiger Speicherung resultiert, der andere Teil aus der Minderung von THG-Emissionen, beispielweise durch den Ersatz fossiler Energien durch überschüssige Energie aus der Pyrolyse oder durch verringerte N₂O- und CH₄-Emissionen aus Böden. Würden nur organische Reststoffe und Abfälle genutzt bliebe ein technisches Potenzial von 2,4 bis 3,9 Gt CO₂e.

Die notwendige Größenordnung an zusätzlicher Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre ist nicht durch eine einzelne Technik erreichbar. Pflanzkohle gehört zu den Optionen für Negativemissionen, die ein nennenswertes Potenzial haben. Ebenso wie bei anderen Techniken bestehen Chancen für positive Sekundäreffekte, aber auch Risiken und Konkurrenzen um Biomasse, die bei einer großskaligen Umsetzung berücksichtigt werden müssen. Unter diesem Blickwinkel sollen sich die folgenden Kapitel der Produktion und den Einsatzmöglichkeiten von Pflanzkohle widmen. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Verwendung in der Landwirtschaft.

3 Pflanzenkohle: Definition, Herstellung und Eigenschaften

3.1 Was ist Pflanzenkohle?

Das wissenschaftliche Interesse am Themenfeld Pflanzenkohle ging aus der Forschung zu *Terra Preta* (portugiesisch für „Schwarze Erde“) hervor, die sich insbesondere auf das Amazonasgebiet konzentrierte. Dort entstand *Terra Preta* im Laufe von Jahrhunderten durch Flächenkompostierung von Verkohlungsrückständen, Küchenabfällen einschließlich Knochen sowie Exkrementen und führte zu sehr fruchtbaren Böden mit einem hohen und stabilen Humusanteil; – ein großer Kontrast zu normalerweise stark verwitterten und humusarmen tropischen Böden. Als Quelle für die stabilen Kohlenstoffanteile wurden die Verkohlungsrückstände (Pflanzenkohle) identifiziert (Glaser et al. 2001). Die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit, insbesondere in den Tropen, stand bei der Forschung zu *Terra Preta* zunächst im Vordergrund (Glaser et al. 2002; Lehmann et al. 2006). Seit den 90er Jahren und insbesondere in der letzten Dekade gewann der mögliche Beitrag von Pflanzenkohle für die langfristige Speicherung von Kohlenstoff und damit für den Klimaschutz an Bedeutung (Conte et al. 2021; Schmidt et al. 2019a).

Pflanzenkohle (englisch „*biochar*“) entsteht durch Umwandlung von Biomasse über Pyrolyse. Dabei wird Biomasse unter weitgehendem Ausschluss von Sauerstoff zwischen 350°C und 750°C (seltener bis zu 900 oder 1.000°C) erhitzt. Es entstehen neben dem kohlenstoffreichen Feststoff (Pflanzenkohle) und Abwärme ein brennbares Gas (Pyrolysegas) und, je nach Prozessführung, eine kohlenstoffreiche Flüssigkeit (Pyrolyseöl).



Die European Biochar Foundation definiert Pflanzenkohle wie folgt (European Biochar Certification (EBC) 2022):

„Pflanzenkohle ist ein poröses, kohlenstoffhaltiges Material, das durch Pyrolyse aus klar definierten, pflanzlichen Biomassen hergestellt und so angewendet wird, dass der enthaltene Kohlenstoff langfristig und klimarelevant als C-Senke gespeichert bleibt oder in industriellen Fertigungsprozessen fossilen Kohlenstoff ersetzt.“

Abbildung 2: Pflanzenkohle aus Holzhackschnitzeln

Pflanzenkohle besteht vor allem aus aromatischen⁸ Kohlenwasserstoffen sowie anorganischen Stoffen, die in der Biomasse enthalten waren. Bis zu 60 % des mit der Biomasse eingebrachten Kohlenstoffs verbleiben in der Pflanzenkohle (Conte et al. 2021). Anders als beim Verrotten oder Verbrennen von Biomasse ist ein großer Anteil des Kohlenstoffs in Pflanzenkohle für lange Zeit – Einschätzung reichen von mehreren 100 bis zu mehreren 1.000 Jahren – vor biologischer oder chemischer Zersetzung geschützt (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2019a; Lehmann und Joseph 2015; Wang et al. 2016).

⁸ chemische Stoffklasse mit besonderem Bindungssystem (mindestens ein Ringsystem), die u.a. für stärkere Stabilität sorgt

Abgrenzung zu „Biokohle“:

Der Begriff „Biokohle“ (Übersetzung von *biochar*) wurde früher als Synonym für Pflanzkohle gebraucht und wird teilweise auch weiterhin als unspezifischer Sammelbegriff für verschiedene Herstellungsverfahren verwendet, die auch andere Verkohlungsprozesse bei niedrigeren Temperaturen beinhalten (Schmidt et al. 2016). Sogenannte HTC-Kohlen aus der Hydrothermalen Karbonisierung beispielsweise haben Braunkohle-ähnliche Eigenschaften. Sie weisen eine weitaus geringere Stabilität als Pflanzkohlen nach der obigen Definition auf und werden häufig energetisch verwertet. Diese Kohleprodukte werden in diesem Bericht nicht weiter betrachtet. Der Ausdruck „Biokohle“ kann außerdem irritieren, da eine Verbindung mit der Zertifizierung nach Richtlinien des ökologischen Landbaus gezogen werden könnte. Im Bericht wird daher für Pyrolysekohlen ausschließlich der Begriff „Pflanzkohle“ verwendet.

3.2 Ausgangsstoffe

Grundsätzlich ist die Herstellung von Pflanzkohle aus einer breiten Palette an biogenen Ausgangsstoffen möglich. Besonders geeignete Substrate sind landwirtschaftliche oder andere Reststoffe beispielsweise aus der Lebensmittelverarbeitung, Landschaftspflegerückstände und kommunale Grüngutabfälle, schnell nachwachsende Biomasse oder auch Holz aus der Waldbewirtschaftung sowie rezykliertes Bau- und Nutzholz. Nasse oder feuchte Biomasse muss zu einem Trockenmassegehalt von mindestens 65 %, besser 80 %, aufbereitet werden. Rechtliche Vorgaben und Zertifizierungsanforderungen schränken die Substratauswahl ein und unterscheiden dabei auch je nach Verwendungszweck der Pflanzkohle.

Tabelle 2 zeigt die nach dem Europäischen Pflanzkohle Zertifikat (EBC, *European Biochar Certification*) zugelassene Biomasse. Je nach Einsatzfeld und Ausgangsmaterial können weitere Restriktionen gelten. So ist bei der Herstellung von zertifizierter Pflanzkohle, die in der Tierfütterung genutzt wird, die Auswahl an Biomassen deutlich beschränkter und dürfen z. B. nur die erlaubten Substrate aus Forst- und Holzwirtschaft uneingeschränkt verwendet werden. Für den Einsatz in der Landwirtschaft generell sind u.a. Substrate aus der Recyclingwirtschaft nur sehr eingeschränkt zugelassen (z. B. kein Altpapier, kein behandeltes Altholz).

Tabelle 2: Laut EBC für Pflanzkohle verwendbare Biomassen⁹

Quelle: EBC-Positivliste (zusammengefasst und verkürzt dargestellt)

(https://www.european-biochar.org/media/doc/2/positivliste_de_2022_v10_1.pdf)

Herkunft	Ausgangsmaterial
Landwirtschaft	Ein- und mehrjährige Energiepflanzen; holzige Biomasse aus Kurzumtriebsplantagen; Baum-, Reben- und Strauchschnitt; Ernterückstände wie Stroh, Kraut, Blätter, Spelzen, Strünke; Altstroh und Getreidestaub; Gemüse; Saatgut
Forstwirtschaft und Holzverarbeitung	Rinde Holzschäl- und Häckselgut, nur mechanisch behandeltes Holz (reines Feuerholz); Holz, Holzreste aus mechanischer Bearbeitung (jeweils nur aus zertifiziertem, nachhaltigem Anbau stammend) Sägemehl, Sägespane, Holzwolle aus nicht-chemisch behandeltem Holz
Landschaftspflege	Laub; Wurzelstöcke; Schnittgut aus Naturschutzpflege; Landschaftspflegematerial allgemein

⁹ Nicht-pflanzliche Biomassen wie Klärschlamm, Viehdung, Gülle mit Biogasgärresten oder Knochen und Schlachthofabfälle werden ab 2023 in die EBC-Positivliste aufgenommen.

Recycling-Wirtschaft:	Urbanes Grüngut; Altpapier; Unbehandeltes Altholz, Sägespäne, Rinde, Holzwohle; Behandeltes Altholz (geleimt, gestrichen, beschichtet) (verschiedene Klassen: ohne PVC oder Schwermetallanreicherung oder Holzschutzmittel / mit PVC-Anteilen oder Schwermetallanreicherung / ohne Holzschutzmittel / mit Holzschutzmitteln); Reststoffe aus industrielle Biomasseverarbeitung; Papierfaserschlamm
Küchen- und Kantinenabfälle	Küchen-, Kantinen und Restaurantrückstände
Nahrungs- und Genussmittelverarbeitung auf pflanzlicher Basis	Material aus Wasch-, Reinigungs-, Schäl-, Zentrifugier- und Trester, Kerne, Schalen, Schrote oder Pressrückstände Abtrennprozessen; Überlagerte Nahrungs-, Lebens- und Genussmittel; Fabrikationsrückstände aus der Herstellung von Nahrungsmittelkonserven; Würzmittelrückstände; Rückstände aus der Kartoffel-, Mais- oder Reisstärkeherstellung; Obst-, Getreide- und Kartoffelschlempen, Alkoholbrennereirückstände; Malztreber, -keime und -staub aus der Bierproduktion Hopfentreber, Trub und Schlamm aus Brauereien; Trester, Weintrub, Schlamm aus der Weinbereitung; Tabak, Tabakstaub, -grus, -rippen, -schlamm; Tee- und Kaffeesatz; Früchte; Melasserückstände; Speisepilzsubstrate; Rückstände aus der Verarbeitung von Kaffee (Silberhütchen), Kakao (Pressrückstände) oder Tee
Bewirtschaftung von Gewässern	Rechengut, Schwemmgut, Abfischgut, Mähgut; Wasserpflanzen
Textilindustrie	Zellulose-, Baumwoll- und Pflanzenfasern; Fasern von Hanf, Sisal, etc.
Biogasanlagen	Nicht tierische Gärreste

3.3 Techniken und Anlagen

Für die Pyrolyse existieren unterschiedliche Techniken. Der Pyrolysevorgang kann modifiziert und darauf ausgerichtet werden, welche Substrate in welcher Menge verarbeitet werden, welches Produkt (Pflanzenkohle, Pyrolyseöl oder Pyrolysegas) das primäre Ziel ist und welche Eigenschaften der Pflanzenkohle besonders erwünscht sind.

Der Fachverband Pflanzenkohle e.V.¹⁰ unterscheidet als Herstellungstechnologien „manuelle Jedermannanlagen“ zur Herstellung von Pflanzenkohle in kleinem Maßstab und „industrielle Produktionsanlagen“.

3.3.1 Kleinanlagen

Inspiziert von traditionellen Herstellungsmethoden wurde vom Ithaka Institut¹¹ der Prototyp des sogenannten **Kon-Tiki** entwickelt und seitdem weiter optimiert, um mit einer einfachen und kostengünstigen Lösung kleine Mengen von Pflanzenkohle von hoher Qualität für den eigenen Einsatz in der Landwirtschaft oder im Gartenbau herzustellen. In einem nach oben offenen Stahlbehälter wird Biomasse (z. B. Äste, Scheitholz, Rebstöcke, Wurzelholz, Maisspindeln) auf einem Glutbett erhitzt. Nach und nach werden weitere Schichten an Biomasse aufgebracht. Die aufsteigenden Gase

¹⁰ <https://fachverbandpflanzenkohle.org/pflanzenkohle/>

¹¹ Das Ithaka Institut (*Ithaka Institute for Carbon Strategies*) (<https://www.ithaka-institut.org/de>) mit Hauptsitz in der Schweiz ist ein internationales Netzwerk für Kohlenstoff-Strategien und Klimafarming. Besonders bekannt ist das Institut für seine Expertise im Bereich der Herstellung, Charakterisierung, Zertifizierung und Anwendung von Pflanzenkohle. Das Institut kooperiert mit zahlreichen Universitäten und staatlichen wie privaten Forschungsinstituten und vermittelt die gewonnenen Erkenntnisse durch Lehre, Beratung, Publikationen und Medienauftritte den interessierten Fachkreisen, aber auch der breiten Öffentlichkeit.

entzünden sich, halten den Prozess am Laufen und verhindern gleichzeitig, dass Sauerstoff an die unteren Schichten gelangt. Auf diese Weise werden Temperaturen von über 600°C erreicht und ein Veraschen der Biomasse verhindert. Am Ende wird die Pflanzenkohle z. B. mit Wasser abgelöscht. In einem Kon-Tiki mittlerer Größe entsteht so in etwa drei Stunden 1 m³ Pflanzenkohle¹². Anleitungen zum Bau und Betrieb der Kon-Tikis wurden frei zur Verfügung gestellt und die Anlagen werden mittlerweile in über 80 Ländern verwendet und inzwischen in verschiedenen Modellen gebaut. Die Prozesswärme kann allerdings nicht genutzt werden und die Abgase aus der Verbrennung des Pyrolysegases gelangen ungefiltert in die Atmosphäre. Laut (European Biochar Certification (EBC) 2020) kann „*bei Pyrolyseanlagen ohne gesteuerte Nachverbrennung der Pyrolysegase (z. B. Kon-Tiki) ... der Klimaerwärmungseffekt der Methanemissionen in den ersten 20 Jahren den klimapositiven Effekt der Pflanzenkohle sogar übersteigen*“.

Weitere Kleinst-Pyrolysegeräte werden von verschiedenen Anlagenherstellern produziert.

3.3.2 Industrielle Anlagen

Weitgehend automatisierte Großanlagen eignen sich für Kommunen, Entsorgungsunternehmen, landwirtschaftliche Betriebe und weitere Hersteller oder Nutzende in industriellem Maßstab. In solchen Anlagen können die Pyrolysebedingungen exakt reguliert werden. Die Anteile der Biomasse, die nicht zu Pflanzenkohle umgewandelt werden, erzeugen durch den Verbrennungsprozess Abwärme, die für Wärmenetze, Verarbeitungsprozesse oder zur Stromproduktion zur Verfügung stehen. Anlagen enthalten geprüfte Abgassysteme und optional können Pyrolyseöle separat abgeschieden werden. Die Ausgangssubstrate müssen i.d.R. aufbereitet werden (z. B. Anforderungen an Rieselfähigkeit). Es gibt eine wachsende Anzahl von Anlagenbauern, überwiegend sind dies mittelständische Unternehmen. Zu europäischen Anlagenherstellern, deren Anlagen bereits Verbreitung finden, gehören:

- **PYREG**¹³: PYREG als ein Pionier für Pyrolyseanlagen in Deutschland produziert Anlagen für eine sehr breite Palette von Biomassen wie Gärreste, Mist, Getreideabfälle, Silage-Abfälle, Schlachtabfälle, Heu, Stroh, Hackschnitzel, Grünschnitt, Obststeine, Nussschalen, Baumwolle, Papier und Pappe. Voraussetzung ist u.a. ein Trockenmassegehalt von mindestens 65 % und die Schütt- oder Rieselfähigkeit des Substrats. Die Prozesswärme wird ausschließlich durch die entstehenden Pyrolysegase bereitgestellt. Die Anlage Pyreg P500 kann im Jahr bis 1.100 Tonnen Biomasse umsetzen, die PX1500 etwa 3.300 Tonnen. Die überschüssige nutzbare Wärmeenergie kann in Heißwasser, Dampf oder Thermoöl umgewandelt werden.
- **SynCraft**¹⁴: Die österreichische SynCraft baut seit über 10 Jahren Holzkraftwerke, die aus Hackschnitzeln Strom und Wärme erzeugen und nebenbei zertifizierte Pflanzenkohle erzeugt. Das meistverkaufte System ist das CW1800x2-1000 mit 1 MW elektrische Leistung, 1,4 MW nutzbarer Wärmeleistung und einer Jahresproduktion an Pflanzenkohle von rund 1.000 t. Der Biomassebedarf liegt bei rund 5.000 t Hackschnitzeln aus Durchforstung oder Landschaftspflege pro Jahr.

¹² <https://www.ithaka-institut.org/de/ct/101-Kon-Tiki>

¹³ <https://pyreg.com/de/>

¹⁴ <https://www.syncraft.at/>

- **Carbon Technik Schuster (CTS)¹⁵**: Mit einem sogenannten E900-Meiler können in einem Jahr bis zu 1.600 Tonnen Pflanzkohle z. B. aus Holzhackschnitzeln oder Biomassepellets hergestellt werden. Nachschaltmodule ermöglichen u.a. eine Wärmenutzung, die Erzeugung von Strom über ein Blockheizkraftwerk, eine Abscheidung von Pyrolyseölen und die Herstellung von Aktivkohle. Das CTS-Standard-Modul besteht aus vier E900-Meilern und kann individuell auf Kundenwünsche angepasst werden.
- **Biomacon¹⁶** bieten Pyrolyseheizkessel an und werben mit der Verbindung der Produktion von Pflanzkohle und Wärme. Angeboten werden Maschinen für zwei unterschiedliche Leistungsklassen (Edition FARM und INDUSTRIE), je nach benötigter thermischer Leistung.

Weitere Anlagenbauer sind in der Mitgliederliste des Fachverbands Pflanzkohle aufgeführt.

Mittlerweile gibt es eine VDI-Norm zur Erzeugung von Biomassekarbonisaten (VDI-Richtlinie 3933)¹⁷. Sie beschreibt den Stand der Technik bei der Erzeugung von Biomassekarbonisaten mittels Pyrolyse, hydrothormaler Karbonisierung und ähnlicher Prozesse, bildet innerbetriebliche Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von Emissionen ab und stellt rechtliche Grundlagen dar.

3.4 Einflüsse des Herstellungsprozesses auf die Eigenschaften der Pyrolyseprodukte

Die Anteile der im Pyrolyseprozess entstehenden Produkte und ihre Eigenschaften werden insbesondere vom verwendeten Substrat und vom Pyrolysevorgang (u.a. Maximaltemperatur, Tempo der Temperaturerhöhung, Verweilzeiten des Substrats, Druck, Zusammensetzung der Pyrolyseatmosphäre) geprägt (siehe auch Conte et al. 2021; Ippolito et al. 2020; Joseph et al. 2021; Schmidt et al. 2019a). Hinzu kommen Vorbehandlung des Substrats und Nachbehandlung der Produkte. Wichtige Einflussfaktoren werden im Folgenden kurz skizziert.

3.4.1 Einfluss von Substraten und Pyrolysetemperatur

Verschiedene Substrate haben unterschiedliche Eigenschaften. So variiert die Zusammensetzung verschiedener Biomassen beispielsweise bezüglich des Gehalts an Zellulose, Lignin und anorganischer Komponenten. Bei Erhitzen verhalten sich diese Stoffe unterschiedlich z. B. was die Temperatur betrifft, die zur Umwandlung benötigt wird. Als Faustregel kann gelten, dass Pflanzkohle aus Holz einen hohen Kohlenstoffanteil hat, während jene aus Ernteresten wie Stroh oder Getreidespelzen, Gras oder Wirtschaftsdünger höhere Anteile an Aschen (die aus im Substrat enthaltenen mineralischen Stoffen entstehen), Stickstoff, Phosphor, Kalium und Schwefel aufweist (Conte et al. 2021). Im Pyrolyseprozess beeinflussen Temperatur und Atmosphäre die Eigenschaften der produzierten Pflanzkohle.

Je nach verwendeter Biomasse und Prozesstemperatur bewegt sich der **Gehalt an organischem Kohlenstoff** in der Pflanzkohle zwischen etwa 35 und 95 % der Trockenmasse. Im Fall von Stroh liegt der Kohlenstoffgehalt meist zwischen 40 und 50 %, bei Holz und Nusschalen zwischen 70 und 90 % (European Biochar Certification (EBC) 2022). Neben dem Gerüst an aromatischen Kohlenwasserstoffen

¹⁵ <https://ct-schuster.de/>

¹⁶ <https://www.biomacon.com/>

¹⁷ <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3933-emissionsminderung-erzeugung-von-biomassekarbonisaten>

enthält Pflanzkohle eine Vielzahl volatiler und/oder auswaschbarer organischer Kohlenstoffverbindungen. Mit steigender Temperatur und längerer Verweilzeit im Pyrolysereaktor nimmt der Anteil an Kohlenstoff in der Pflanzkohle zu. So entsteht bei niedrigen Pyrolysetemperaturen von unter 350°C Pflanzkohle mit einem Kohlenstoffgehalt von unter 60 % (Conte et al. 2021). Pflanzkohlen, die bei Temperaturen von über 500°C produziert werden, haben einen höheren Kohlenstoffgehalt und sind auch chemisch stabiler und damit stärker von Abbau geschützt. Holziges Substrat, das bei Temperaturen von über 500°C behandelt wird, ergibt Pflanzkohlen mit einem Kohlenstoffgehalt von über 80 % (ebd.).

Stabilität des gebundenen Kohlenstoffs

Aus Sicht des Klimaschutzes bei der Verwendung von Pflanzkohle in Böden ist insbesondere die Stabilität des gebundenen Kohlenstoffs wichtig. Die Langlebigkeit des Kohlenstoffs in der Pflanzkohle ergibt sich aus der chemischen Transformation der Biomasse, der zu aromatischen Strukturen führt (Joseph et al. 2021). Abhängig ist dies vom Tempo der Temperaturerhöhung, dem Verhältnis von Lignin zu Zellulose und Hemizellulose, der maximalen Pyrolysetemperatur und der Verweilzeit und dem Mineralgehalt des Ausgangssubstrats (Joseph et al. 2021; Leng und Huang 2018).

Schmidt et al. (2021a) geben einen Überblick über Forschungsergebnisse zur Permanenz von in landwirtschaftliche Böden aufgebrauchte Pflanzkohle. Das Verhältnis von Wasserstoff (H) und organischem Kohlenstoff (C_{org}) der Pflanzkohle (H/C_{org} -Verhältnis, das insbesondere von der Pyrolysetemperatur abhängig ist) ist ein guter Indikator für die Dauerhaftigkeit der Kohlenstoffspeicherung (Lehmann et al. 2021). Liegt es unter 0,4, so kann eine jährliche Abbaurate von 0,3 % des Kohlenstoffs als konservative Obergrenze angenommen werden. Diese angenommene jährliche Abbaurate basiert auf Daten aus Meta-Analysen und unterschätzt die Stabilität des Kohlenstoffs vermutlich deutlich (Schmidt et al. 2021a). Man geht mittlerweile davon aus, dass Pflanzkohle einen (geringeren) Anteil an schnell abbaubarem Kohlenstoff enthält und einengrößeren Pool anschwer abbaubaren aromatischen Kohlenstoffverbindungen. Wird die Abbaurate – wie in wissenschaftlichen Versuchen üblich – nur über wenige Jahre beobachtet, wird diese überschätzt (ebd.). Je nach Aromatisierungsgrad ergeben sich eher Halbwertszeiten von mehreren 100 bis mehreren 1.000 Jahren (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2019a; Kuzyakov et al. 2014; Lehmann und Joseph 2015; Liu et al. 2018a). Untersuchungen zu aus Wald- und Steppenbränden entstandenem natürlichen pyrogenen Kohlenstoffweisen ebenfalls auf Halbwertszeiten in dieser Größenordnung hin (Schmidt et al. 2021a).

IPCC hat mittlerweile eine Methode veröffentlicht, um abzuschätzen, wie sich das Einbringen von Pflanzkohle auf den Kohlenstoffgehalt in Mineralböden für einen Zeitraum von 100 Jahren auswirkt. Auf den Kohlenstoffgehalt der Pflanzkohle wird dabei aus den verwendeten Substratgruppengeschlossen, auf die Stabilität aus der Pyrolysetemperatur (siehe Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2019a). Bei Pyrolysetemperaturen zwischen 350-450°C kann demnach damit gerechnet werden, dass nach 100 Jahren noch mindestens 65 % des organischen Kohlenstoffs der auf landwirtschaftlich genutzten Böden aufgebrauchten Pflanzkohle erhalten sind. Von bei 450 und 600°C hergestellten Kohlen verbleiben noch mindestens 80 % und bei einer Pyrolysetemperatur von über 600°C 89 % des Kohlenstoffs (ebd.).

Wichtige **Pflanzennährstoffe** wie Phosphor (P) und Kalium (K) bleiben bei üblichen Pyrolysetemperaturen in der Pflanzkohle erhalten. Hingegen können je nach Biomasse und Pyrolyseintensität 50 % oder mehr des ursprünglich im Ausgangssubstrat vorhandenen Stickstoffs (N) verloren gehen (Joseph et al. 2021). Nährstoffhaltige Biomasse ergibt auch Pflanzkohlen mit höheren Nährstoffgehalten (Hossain et al. 2020). Ippolito et al. (2020) fanden in einer Metaanalyse N-, P-, und K-Konzentrationen in Pflanzkohle aus Holz von durchschnittlich 1,0 %, 0,4 %, bzw. 1,9 %. Pflanzkohlen aus landwirtschaftlichen Pflanzenresten hielten demnach Anteile von jeweils 1,5 %, 0,8 %, und 4,1 %. Vergleichsweise hohe Anteile an N und P waren in Pflanzkohlen aus nährstoffreichem Substrat wie Wirtschaftsdünger oder Klärschlamm vorhanden (jeweils 2,4 %, 2,6 %, und 2,5 %).

Mit einer Oberfläche von 200-500 m² pro Gramm und einer hohen **Porosität** kann Pflanzenkohle bis zum Fünffachen ihres Eigengewichts an Wasser und sowohl Nähr- als auch diverse Schadstoffe binden. Die Poren bilden eine große Oberfläche für die Besiedlung mit Mikroorganismen. Diese Eigenschaft und damit die Adsorptionskapazität wird ebenfalls von der pyrolysierten Biomasse bestimmt (Lehmann und Joseph 2015), daneben auch von den Pyrolysebedingungen. Holziges Ausgangssubstrat ergibt grundsätzlich Pflanzenkohlen mit sehr hoher Oberfläche (Ippolito et al. 2020). Mit höheren Pyrolysetemperaturen nehmen die spezifische Oberfläche der Pflanzenkohle, aber auch pH-Wert und Mineralstoffgehalte tendenziell zu (Ippolito et al. 2020; Tenic et al. 2020).

Schwermetalle, die im Ausgangssubstrat enthalten waren, finden sich weitgehend in der Pflanzenkohle wieder. Ausnahmen sind Stoffe, die bei den erreichten Pyrolysetemperaturen flüchtig sind, wie z. B. Quecksilber (European Biochar Certification (EBC) 2022).

Bei der Pyrolyse können **organische Schadstoffe** wie Polychlorierte Biphenyle (PCB), polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und -Furane (PCDD/F) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) entstehen:

- Die Gehalte an PCB und PCDD/F sind hauptsächlich vom Chlorgehalt der pyrolysierten Biomasse abhängig. Werden Ausgangsstoffe mit geringem Chlorgehalt eingesetzt (zu diesen gehören die auf der Positivliste des EBC stehenden Stoffe, siehe Tabelle 2), entstehen in modernen Pyrolyseanlagen laut EBC nur äußerst geringe Gehalte dieser unerwünschten Stoffe.
- PAK können während der Pyrolyse in der Gasphase gebildet werden. Sie werden teilweise während des Pyrolysevorgangs wieder zerstört oder mit dem Gas abgeschieden und nachfolgend verbrannt (Schmidt et al. 2021a). Der PAK-Gehalt von Pflanzenkohle hängt in erster Linie von der Prozesssteuerung ab. So können bei zu starker Abkühlung des Pyrolysegases in Anwesenheit der Pflanzenkohle erhebliche Mengen an PAK an der Pflanzenkohle kondensieren. Eine Trennung von Pflanzenkohle und Pyrolysegasen im Reaktor beim Austrag (z. B. durch Verwendung von Inertgas oder durch ausreichende Gegenstromlüftung) beugt einer PAK-Belastung der Pflanzenkohle vor. Eine Herstellung von Pflanzenkohle mit sehr niedrigen PAK-Gehalten ist technisch machbar und ist bei Verwendung von EBC-zertifizierter Pflanzenkohle gewährleistet (European Biochar Industry Consortium e.V. (EBI) 2020).

3.4.2 Beispiele für weitere Varianten des Pyrolyseprozesses und für Vor- und Nachbehandlung

Variiert werden im Pyrolyseprozess kann auch das Tempo der Temperaturerhöhung und die Verweilzeit des Substrats bei maximaler Temperatur (Conte et al. 2021). So entsteht bei einer sehr schnellen Pyrolyse (Flash-Pyrolyse) mit einer Verweilzeit von weniger als zwei Sekunden (< 550°C) vor allem Pyrolyseöl (70-80 %) aus der Kondensation freiwerdender volatiler organischer Stoffe. Voraussetzung für dieses Vorgehen ist u.a. eine Partikelgröße des Substrats von < 1 mm, was einen hohen Aufwand für die Vorbehandlung bedeutet. Findet die schnelle Pyrolyse bei Temperaturen zwischen 700 und 1.000°C statt, entsteht ein hoher Anteil an Pyrolysegas. Die energetische Verwendbarkeit der entstehenden Stoffe steht dabei im Vordergrund.

Durch eine spezielle Nachbehandlung können z. B. Aktivkohlen hergestellt werden, die u.a. in der Abwasser- oder Abgasreinigung oder der Trinkwasseraufbereitung verwendet werden können. Dabei wird die Pflanzenkohle bei hohen Temperaturen mit Säuren, Basen, Metallen oder über 800°C heißem Wasserdampf behandelt. Die spezifische Oberfläche der auf diese Weise aktivierten Pflanzenkohle

erhöht sich dadurch von ca. 300 m²/g auf mehr als 900 m²/g (Schmidt et al. 2019b). Waschen mit Säure kann den Kohlenstoffgehalt von Aktivkohle weiter erhöhen und den Aschegehalt senken. Für bestimmte Verwendungszwecke (z. B. die Zulassung als Nahrungsergänzungsmittel) kann dies notwendig sein (Schmidt et al. 2016).

Einen Einfluss auf die Eigenschaften der Pflanzenkohle hat auch die Vorbehandlung des Substrates. Abgesehen von der i.d.R. notwendigen Zerkleinerung und Trocknung wird bei der Herstellung von Pflanzenkohle für besondere Zwecke das Ausgangssubstrat z. B. mit Säuren oder Basen gewaschen, was einen großen Teil der Mineralien entfernt (Conte et al. 2021).

Ausrichtung der Pyrolyse im Hinblick auf die Sequestrierung von Kohlenstoff

Wenn die langfristige Speicherung von Kohlenstoff im Vordergrund steht, sollte die Pyrolyse so ausgerichtet werden, dass möglichst viel stabile Pflanzenkohle und insbesondere wenig Pyrolysegas entsteht, denn bei Letzterem wären Optionen zur Sequestrierung des darin enthaltenen Kohlenstoffs am aufwändigsten und am teuersten (Schmidt und Kammann 2018). Dies bedeutet laut Schmidt et al. (2019a) Pyrolysetemperaturen zwischen 450 und 700°C. Eine schnelle Pyrolyse sollte nicht vorgenommen werden.

Im Pyrolysegas verbleiben je nach Prozessführung 15-45 % des ursprünglichen Kohlenstoffs (ebd.). Das Gas wird i.d.R. direkt energetisch genutzt, um die notwendige Energie für die Pyrolyse bereitzustellen. Auch das Pyrolyseöl wird bisher – nach einer Aufbereitung – vor allem energetisch genutzt. Schmidt et al. (2019a) diskutieren Optionen, die den Kohlenstoff aus Pyrolysegas und -öl nicht sofort wieder in die Atmosphäre entlassen. Für Pyrolyseöl bietet sich eine stoffliche Nutzung an, beispielsweise als Zusatz zu Asphalt oder zu Baustoffen. In Zukunft wird die Verwendung als Rohstoff in der chemischen Industrie interessant, um fossile Rohstoffe zu ersetzen, z. B. bei der Produktion von Kunststoffen. Auch geologische Speicherung ist denkbar. Bei thermischer Nutzung ist Abscheidung und Speicherung des CO₂ aus dem Abgas (CCS) möglich.

4 Einsatzmöglichkeiten von Pflanzenkohle

Pflanzenkohle ist ein sehr vielseitiges Material mit einer Vielzahl möglicher Anwendungen in der Landwirtschaft, der Umwelttechnik und der Grundstoffindustrie. In Deutschland, Österreich und der Schweiz werden nach Experteneinschätzungen bisher rund 90 % der gehandelten Pflanzenkohle in der Landwirtschaft eingesetzt. Allerdings ist der Gebrauch von Pflanzenkohle bisher nicht verbreitet.

In der Landwirtschaft kann Pflanzenkohle direkt als Bodenhilfsstoff eingesetzt werden, als Trägersubstanz für Düngemittel und als Zusatz zu Tierfutter und Einstreu, zur Behandlung von Wirtschaftsdünger oder zu Komposten. Als Anwendungsnutzen werden unter anderem verbessertes Tierwohl und geringere Geruchsentwicklung im Stall, ein Beitrag zur Nährstoff- und Wasserhaltung in Böden und positive Auswirkungen auf das Bodenleben erwartet (Lehmann und Joseph 2015; Schmidt und Kammann 2018). Pflanzenkohle wird auch als Zusatzstoff in der Biogasproduktion beworben. Während Schmidt et al (2021a) und Rödger et al. (2013) von einer Erhöhung des spezifischen Gasertrags durch die Zugabe von Pflanzenkohle berichten, konnten Zimmermann et al. (2021) keinen signifikanten Effekt auf den Gasertrag und die Umwandlungseffizienz von Biomasse zu Biogas feststellen.

Bei einem Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierhaltung und beim Düngemittelmanagement ergibt sich eine Kaskadennutzung. Die Pflanzenkohle gelangt nach einer Zugabe zu Silage oder anderen Futtermitteln, einer Verwendung mit der Einstreu im Stall oder aufgrund direkter Zugabe im Wirtschaftsdünger letztendlich in den Boden und entfaltet dort ihre Wirkung als langfristiger Kohlenstoffspeicher.

Damit in der Landwirtschaft Pflanzenkohle eingesetzt wird, müssen die Anwendenden davon ausgehen, dass die positiven Wirkungen die Kosten rechtfertigen. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022) benennt – neben der Tatsache, dass Pflanzenkohle eine langfristige Kohlenstoffsene darstellt – als mögliche Vorteile einer Zugabe von Pflanzenkohle zu Böden u.a. erhöhte Erträge insbesondere in tropischen Gebieten, eine Zunahme des Bodenkohlenstoffs über die mit der Pflanzenkohle eingebrachte Menge hinaus, geringere Stickstoffverluste, reduzierte THG-Emissionen aus Böden oder mit Pflanzenkohle versetzten Komposten und eine erhöhte Wasserhaltefähigkeit. Solche Vorteile zahlen sich allerdings in unseren Breiten finanziell allenfalls längerfristig aus.

Preise für Pflanzenkohle liegen für den Endverbrauch aktuell in einer Größenordnung von 1.000 € pro Tonne. In Deutschland wird Pflanzenkohle vor allem als Futterkohle und in Form von weiter veredelten Bodenhilfsstoffen (z. B. als *Terra-Preta*-Erde) angeboten, häufig über den Weg der Direktvermarktung der Produzenten. Bei der Verwendung in der Tierhaltung ist bereits jetzt ein – kleinerer – Markt vorhanden und sind die Anwendenden überzeugt, dass sich die Investition lohnt. Die Ausbringung kleiner Mengen¹⁸ von Pflanzenkohle, möglichst noch gezielt in Wurzelnähe, wird aufgrund des effizienten Einsatzes der Pflanzenkohle zunehmend interessant. Insbesondere für Kulturen mit hoher Wertschöpfung (wie z. B. Wein oder Spargel) werden Pflanzenkohleprodukte nachgefragt, da hier auch kleine Ertragszuwächse den Aufwand finanziell lohnend erscheinen lassen. Wie viele

¹⁸ Früher übliche hohe Ausbringungsmengen von 10 oder mehr Tonnen Pflanzenkohle pro Hektar sind insbesondere in den gemäßigten Gebieten ökonomisch nicht attraktiv (Joseph et al. 2021). Sie werden aber in Sonderfällen angewandt z. B. bei der Wiederherstellung degradiertes Böden (Abraumhalden, kontaminierte Böden), bei sehr unfruchtbaren Böden wie Ferrosolen, die vor allem in den Tropen zu finden sind, in Sandböden mit sehr geringem Gehalt an organischen Stoffen, oder mit dem Hauptziel der Kohlenstoffspeicherung (ebd.).

landwirtschaftliche Betriebe in Deutschland in welchen Mengen Pflanzkohle einsetzen, dazu gibt es keinen Überblick.

Auf globaler Ebene nimmt die Anwendung von Pflanzkohle in der Landwirtschaft zu, insbesondere in China (Ren et al. 2019), aber auch in Nordamerika, Australien und Europa (Robb et al. 2020). In Ländern wie Indien und auch China hat auch die Bedeutung der Abfallverwertung bei der Produktion von Pflanzkohle einen nicht unwesentlichen Stellenwert. So werden Stroh und Reisstreu bislang noch häufig verbrannt mit negativen Auswirkungen auf Feinstaubbelastung und dem Entstehen von THG-Emissionen; die Herstellung von Pflanzkohle ist hier eine sehr sinnvolle Alternative. Teilweise sind auch die Verwertung von Abfällen wie Klärschlamm, Fäkalien und weiterer organische Abfälle durch Umwandlung in Pflanzkohle, die Sanierung schadstoffbelasteter Böden oder auch die Behandlung von Abwasser oder Trinkwasser mittels Pflanzkohle wichtige Themen.

Zu Anwendungsmöglichkeiten außerhalb der Landwirtschaft gehören beispielsweise eine Einbindung in Baustoffe und dadurch ebenfalls eine langfristige Festlegung von Kohlenstoff, die Aufbereitung zu Aktivkohle oder die Verwendung als Pflanzsubstrat für Stadtbäume.

Die folgenden Abschnitte widmen sich der Verwendung und der Wirkung von Pflanzkohle in der Tierfütterung (4.1) und als Bodenhilfsstoff (4.2). In Kapitel 4.3 wird ein Ausblick auf Optionen zur Anwendung von Pflanzkohle außerhalb der Landwirtschaft gegeben.

4.1 Pflanzkohle in der Tierfütterung

Pflanzkohle ist ein traditioneller Futterzusatzstoff zur Behandlung von Verdauungsstörungen und Vergiftungen bei Nutztieren (z. B. Kammann et al. 2017; Schmidt et al. 2019b). Die Verwendungsmöglichkeiten von Pflanzkohle als Futterzusatz wurde Anfang der 2010er-Jahre wiederentdeckt und seitdem wird Pflanzkohle in Deutschland, Österreich und der Schweiz vermehrt als Zusatz zur regulären Futtermischung verwendet (Kammann et al. 2017). Pflanzkohle kann auch bereits als Zuschlagstoff bei der Silierung eingesetzt werden. Die Verwendung von Pflanzkohle in der Fütterung wird mit einer besseren Futterverwertung, einer Absorption von Giftstoffen und generell einer verbesserten Tiergesundheit in Verbindung gebracht (Schmidt et al. 2019b).

Wie wird Pflanzkohle in der Fütterung eingesetzt?

Die Pflanzkohle kann dem üblichen Futter untergemischt, dem Trinkwasser zugesetzt oder je nach Tierart separat verabreicht werden. Die Dosierung variiert je nach Angaben von Hersteller und liegt in einer Größenordnung von bis zu täglich 100 g pro Großvieheinheit für eine permanente Zufütterung.

Oft wird Pflanzkohle auch mit beliebten Ergänzungsmitteln wie Molasse gegeben oder zusammen mit Stoffen, die die Wirkung verbessern sollen (z. B. Huminsäuren, Holzessig, Sauerkrautsaft, Flüssigkeiten mit erwünschten Mikroorganismen, Nitrat oder Tanninen) (Schmidt et al. 2019b). Es bietet sich ein weites Feld, die Wirkung solcher Mischungen systematisch zu erforschen und Futtermittel für spezielle Zwecke und Tierarten zu entwickeln, bei denen Pflanzkohle als Trägermaterial für weitere Substanzen eingesetzt wird (ebd.).

Als Silagezusatz stabilisiert Pflanzkohle die Fermentierung und verringert das Risiko von Pilzbelastung (Schmidt et al. 2019b). Ebenfalls wird der Anteil an unerwünschter Buttersäure in der Silage reduziert (ebd.). Die Silagequalität wird Versuchen zufolge nicht negativ beeinflusst (Calvelo Pereira et al. 2014). Die Tiere nehmen die Pflanzkohle mit dem Silagefutter auf.

Zu Einsatz kommen sollte ausschließlich Pflanzkohle, die kontrolliert und zertifiziert ist und die Einhaltung sämtlicher Futtermittelgrenzwerte garantiert.

Eine Zugabe von 1 Gewichts-% Pflanzenkohle zur Futtermittelration (Trockenmasse), die in der Praxis durchaus eingesetzt werden kann, würde bei Ausbringung des entstehenden Wirtschaftsdüngers bei zwei Großvieheinheiten pro Hektar einer jährlichen Ausbringungsrate von ca. 0,5 Tonnen Pflanzenkohle in den Boden entsprechen (Schmidt et al. 2021a).

4.1.1 Berichtete positive Wirkungen von Pflanzenkohle in der Fütterung

Die meisten wissenschaftlichen Untersuchungen zur Wirkung von Pflanzenkohle in der Tierernährung beziehen sich auf Rinder und Hühner (Kammann et al. 2017). Schmidt et al. (2016) und Schmidt et al. (2019b) fassen die Veröffentlichungen insbesondere seit 2010 zur Verwendung von Pflanzenkohle als Futterzusatz zusammen. Laut Schmidt et al. (2019b) wurden häufig eine oder mehrere der folgenden positiven Wirkungen verzeichnet, wenn ein regelmäßiges Zufüttern von Pflanzenkohle stattfand:

- Zunahme der Futteraufnahme und Gewichtszunahme
- Erhöhung der Futtereffizienz
- Zunahme der Eierproduktion und Eierqualität bei Geflügel
- Verbesserung der Fleischqualität
- Stärkung des Immunsystems
- Verbesserung der Stallhygiene und der Geruchsbelastung
- Verringerung der Klauen- und Fußballenkrankheiten
- Verringerung der Tierarztkosten.

Über verschiedene Tierarten hinweg zeigten demnach die meisten Studien positive Effekte auf Parameter wie die Bindung von Toxinen, Verdauung, Blutwerte, Futtermittelverwertung, Zellzahlen in der Milch und Gewichtszunahme der Tiere. Die positive Wirkung von Pflanzenkohle als Futterzusatz erklärt sich demnach (hier nur sehr verkürzt dargestellt) insbesondere über folgende Eigenschaften:

- Die Porosität und damit die hohe spezifische Oberfläche der Pflanzenkohle führt zu einem hohen Adsorptionspotenzial für diverse Stoffe und ist der Hauptfaktor für die Wirkungsweise bei der Tierfütterung.
 - Eine Reihe von Studien zeigen, dass Pflanzenkohle schädliche **Mykotoxine** adsorbiert oder die Belastung z. B. im Futter oder in der Milch durch solche Stoffe reduziert. Es gibt jedoch auch widersprüchliche oder nicht eindeutige Ergebnisse. In vielen Versuchen wurde handelsübliche Aktivkohle verwendet; zudem können Ergebnisse von Labor-Versuchen nicht ohne Weiteres auf Wirkungen bei lebenden Tieren übertragen werden. Schmidt et al. (2019b) schließen jedoch aus ihrem Review, dass schädliche Auswirkungen bestimmter Mykotoxine bereits durch eher niedrige Gaben von Pflanzenkohle effektiv reduziert werden können. Es besteht weiterer Forschungsbedarf, der systematisch die Wirkung unterschiedlicher Pflanzenkohlen berücksichtigt.
 - Diverse Studien zeigen auch, dass Pflanzenkohle als Futterzusatz **Pathogene (Bakterien, Parasiten, Viren)** und deren Stoffwechselprodukte reduziert, z B. Botulinus toxin, Salmonellen, Rota- und Coronaviren (Schmidt et al. 2019b). Versuche mit Rinderkälbern ergaben, dass Pflanzenkohle Infektionen mit häufigen Parasiten kontrollieren und Durchfälle stoppen konnte (ebd.).

- Pflanzkohle weist sehr gute Adsorptionseigenschaften in Bezug auf zahlreiche **Pestizide** auf. So war in Experimenten laut Herath et al. (2016) in saurem Milieu bei einem pH-Wert von 4 die Adsorption von in Wasser gelöstem Glyphosat an Pflanzkohle mit 82 % am höchsten. Im sauren Magenmilieu könnte dieser Mechanismus ebenfalls zum Tragen kommen. Inwieweit Glyphosat möglicherweise im weiteren Verlauf der Verdauung auch wieder mobilisiert werden kann, dazu besteht noch Forschungsbedarf. Gerlach et al. (2014) zeigten, dass eine Zufütterung von Huminsäuren oder eine Kombination von Pflanzkohle und Sauerkrautsaft die Konzentration von (mit dem Futter aufgenommenen) Glyphosat im Urin von Rindern signifikant senken konnte. Diverse frühere Untersuchungen mit Organophosphor-Insektiziden, Dieldrin und DDT weisen ebenfalls auf adsorbierende Eigenschaften der Pflanzkohle hin.
- PCDD/PCDF („Dioxine“) und PCB als allgegenwärtige **Umweltgifte** weisen ebenfalls eine starke Affinität zu Pflanzkohle auf. Bei Legehennen konnte nach Zugabe von Pflanzkohle zu belastetem Futter eine deutliche Verringerung dieser Verbindungen im Fettgewebe und in den Eiern festgestellt werden (Fujita et al. 2012).
- Pflanzkohle kann auch gegen negative Wirkungen **pflanzlicher Toxine** bis hin zu Vergiftungen wirksam sein.
- Pflanzkohle übt vermutlich einen elektrochemischen Einfluss auf die Verdauungsreaktionen aus; die Forschung dazu steht allerdings noch am Anfang. Pflanzkohle, die bei Temperaturen von über 600°C hergestellt wurde, kann als guter elektrischer Leiter in chemischen und mikrobiellen Redoxreaktionen als Elektronen-Vermittler die vielfältigen Redoxreaktionen, die für den biologischen Abbau der Futterstoffe bei der Verdauung notwendig sind, begünstigen. Dies erhöht die Energieausbeute und damit die Futtereffizienz.

Auch die in einigen Studien festgestellte starke Erhöhung von Lactobazillen und eine Verringerung gram-negativer Bakterien im Pansen scheint im Zusammenhang mit verbesserter Tiergesundheit zu stehen (Kammann et al. 2017). Dies eröffnet Optionen, Pflanzkohle zusammen mit solchen erwünschten Bakterien zu verabreichen (Schmidt et al. 2019b). Mit Lactobazillen besprühte Pflanzkohle als Futterzusatz kann nach Angaben von Anwendenden den Antibiotikaeinsatz verringern und zu geringeren Tierarztkosten führen (Kammann et al. 2017). Die Kosten für die Pflanzkohle und die Bakterien wöge dies wieder auf (ebd.).

Die **Auswirkungen von Pflanzkohlegaben mit der Fütterung auf THG-Emissionen** wurde bisher kaum untersucht (Kammann et al. 2017). Vielversprechend scheint die Wirkung bei gleichzeitiger Zugabe von Kaliumnitrat zu sein. Systematische Forschung hierzu ist notwendig, u.a. zu geeigneten Typen an Pflanzkohle inklusive spezifischer Nachbehandlung, zur gleichzeitigen Verabreichung von Zusatzstoffen wie Nitraten, Harnstoff oder Huminsäuren oder zum Beimpfen mit Methan abbauenden Bakterien (Schmidt et al. 2019b).

Über verschiedene Tierarten hinweg zeigten Studien häufig positive Effekte einer Zugabe von Pflanzkohle mit der Fütterung auf Parameter wie die Bindung von Toxinen, Verdauung, Blutwerte, Futterverwertung, Zellzahlen in der Milch und Gewichtszunahme der Tiere. Es besteht weiter Forschungsbedarf zur konkreten Wirkungsweise, zu optimierten Anwendung und zu Effekten auf THG-Emissionen.

Beispiele im Rahmen der Europäischen Innovationspartnerschaft (EIP-Agri) geförderte Projekte zum Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierhaltung

- **„Beimischung von zertifizierter Pflanzenkohle im Mischfutter von Putenhähnen und Masthühnern unter besonderer Berücksichtigung von Tierwohlaspekten (CarboFeet)“** (2016-2019, Niedersachsen)¹⁹: Getestet wurde eine kontinuierliche Zufütterung von 2 kg aktivierter²⁰ Pflanzenkohle pro Tonne Mischfutter bei Masthühnern und Putenhähnen sowie eine Kombination mit rohproteinreduzierter Fütterung. Eine alleinige Pflanzenkohlezugabe ins Futter führte bei Masthühnern zu besserer Einstreuqualität und damit zu leicht verbesserter Fußballengesundheit, die maßgeblich von der Feuchtigkeit der Einstreu abhängig ist. Bei den Putenhähnen konnte dies nicht beobachtet werden. Eine rohproteinreduzierte Fütterung in Kombination mit Pflanzenkohle bewirkte bei beiden Tierarten eine trockenere Einstreu. Die Wachstumsleistung der Putenhähne verringerte sich trotz Proteinreduzierung nicht, die Masthühnern zeigten aber geringere Mastleistungen. Insgesamt wurde der finanzielle Mehraufwand nicht durch verbesserte Leistungen der Tiere ausgeglichen. Weiterer Forschungsbedarf wurde formuliert in Bezug auf die konkrete Wirkungsweise der Pflanzenkohle im tierischen Organismus, die qualitative Beurteilung von Pflanzenkohlen auf ihre Eignung für bestimmte Tierarten und eine nach Tierart optimierten Dosisform (z. B. optimales Dosierverhältnis, permanente Zugabe oder Intervallfütterung).
- **„Gärprodukte zur Verbesserung der Stallhaltung und der Bodenstruktur“** (2016-2021; Brandenburg): Das Vorhaben widmete sich der Entwicklung einer alternativen Einstreuvariante unter Verwendung von Pflanzenkohle aus Gärresten und Holz mit dem Ziel eines geringeren Strohverbrauchs, der Förderung der Tiergesundheit und positiven Effekten auf die Bodenfruchtbarkeit²¹. Eine 5 %ige Zugabe von Pflanzenkohle im Festmiststall bei Mastrindern führte zu trockenerer Einstreu und verminderten CH₄-Emissionen aus der Einstreu. Es wird vermutet, dass auch der NH₃-Gehalt in der Stallluft verringert wird (Ergebnisse aus Vortrag Plöchl am 8.11.2022 auf der Internationalen Fachtagung des Fachverbands Pflanzenkohle e.V.).

4.1.2 Mögliche unerwünschte Wirkungen von Pflanzenkohle in der Fütterung

Negative Wirkungen auf die Tiere auch bei einer regelmäßigen Zufütterung von Pflanzenkohle wurden bisher nicht berichtet und auch von Landwirten und Landwirtinnen, die seit Jahren Pflanzenkohle anwenden, scheinbar nicht beobachtet (Schmidt et al. 2019b). Es gibt jedoch kaum wissenschaftliche Langzeituntersuchungen, die solche Wirkungen beobachten.

Mögliche unerwünschte Effekte eines langfristigen Einsatzes von Pflanzenkohle könnten sich ergeben aus einer Veränderung des Mikrobioms im Verdauungssystem und durch eine Adsorption essenzieller Futterinhaltsstoffe oder von Medikamenten (ebd.). Zwar scheint die Zugabe von Pflanzenkohle das Verhältnis von Bakterien zugunsten mancher „guter“ Bakterien auf Kosten pathogener zu verschieben, aber zu wenig ist noch bekannt in Bezug auf das gesamte Mikrobiom im Verdauungstrakt von Nutztieren. Es gibt jedoch Hinweise, dass Pathogene grundsätzlich stärker an Pflanzenkohle gebunden werden als solche der nativen Darmflora. Fujita et al. (2012) fanden, dass in Hühnereiern, der Vitamin E-Gehalt um 40 % verringert war, wenn die tägliche Futtermenge von Hennen 0,5 % Pflanzenkohle enthielt.

Bevor Pflanzenkohle als regelmäßiger Futterzusatz breit und uneingeschränkt empfohlen wird, sollten solche Fragen geklärt sein. Das Risiko eines Einsatzes von Pflanzenkohle kontrollierter Qualität als Futter scheint allerdings sehr gering, nicht zuletzt im Vergleich zu anderen Futterzusatzstoffen und der Belastung von Futter mit Pestiziden oder Mykotoxinen (Schmidt et al. 2019b).

¹⁹ <https://projekte.eip-nds.de/wp-content/uploads/2021/04/Abschlussbericht-EIP-CarboFeet.pdf>

²⁰ Durch eine „Aktivierung“ der gemahlten Pflanzenkohle durch Behandlung mit organischem Säureprodukt (z. B. fermentierte Kräuterextrakte) sollte deren Oberfläche und Adsorptionskapazität erhöht und positive Wirkungen auf die Darmgesundheit erreicht werden.

²¹ https://eip-agri.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/EIP_Gaerprodukte_06-11-18.pdf

Das Risiko eines Einsatzes von Pflanzkohle kontrollierter Qualität als Futter scheint sehr gering. Negative Wirkungen von Pflanzkohle als Futterzusatz auf die Tiere wurden bisher nicht berichtet. Es besteht jedoch noch Forschungsbedarf in Bezug auf Wechselwirkungen mit dem Mikrobiom im Verdauungstrakt von Nutztieren.

4.2 Pflanzkohle als Bodenhilfsstoff

Pflanzkohle wurde in den 90er Jahren, anknüpfend an Forschungen zu Terra Preta, insbesondere als Zugabe zu landwirtschaftlich genutzten Böden angewandt und untersucht. Es handelte sich dabei meist um die Ausbringung erheblicher Mengen von mehr als 10 Tonnen pro Hektar (Joseph et al. 2021; Lehmann und Joseph 2015). Wenn Pflanzkohle als Nährstoffträger verwendet wird, geht es bei der Ausbringung meist um Mengen von 0,5 bis 2 Tonnen Pflanzkohle pro Hektar, die auch wiederholt eingebracht werden können (Joseph et al. 2021; Schmidt et al. 2021a). Das Einbringen großer Mengen unbehandelter Pflanzkohle auf landwirtschaftlicher Fläche wird mittlerweile nicht mehr empfohlen (ebd).

4.2.1 „Aufladen“ von Pflanzkohle mit Nährstoffen

Die hohe Bodenfruchtbarkeit, die der *Terra Preta* zugeschrieben wird, stammt nicht aus der Pflanzkohle alleine, sondern aus dem Zusammenspiel mit weiteren organischen zugesetzten Stoffen und der Biochemie des Bodens (Schmidt et al. 2021a). Pflanzkohle war historisch gesehen wohl Teil eines umfassenderen Stoffstrommanagements, das neben der Pflanzkohle auch organische Abfälle beinhaltet (ebd.). Aufgrund der geringen Nährstoffverfügbarkeit insbesondere bei Stickstoff ist Pflanzkohle alleine als Düngemittel nicht geeignet. Dies ändert sich, wenn die Adsorptionsfähigkeit der Pflanzkohle genutzt wird, um ihre Oberflächen mit Nährstoffen anzureichern.

In den letzten Jahren rückten die Vorzüge solch einer Anreicherung von Pflanzkohle mit Nährstoffen in den Vordergrund (siehe u.a. Godlewska et al. 2017; Kammann et al. 2016; Schmidt et al. 2017; Schmidt et al. 2021a). Dies geschieht z. B. wenn Pflanzkohle den Verdauungsprozess von Nutztieren durchläuft, eine Co-Kompostierung oder Vermischung mit Wirtschaftsdünger oder Kompost stattfindet oder mineralische oder organische Nährstoffe zugesetzt werden. Das gezielte „Aufladen“ von Pflanzkohle mit Nährstoffen wird erst seit einigen Jahren systematisch untersucht. Laut Schmidt et al. (2021a) erschienen erst ab 2015 „*vermehrt Studien über Topf- und Feldversuche, bei denen die [Pflanzkohle] zunächst mit Nährstoffen beladen wurde und dann in niedriger Dosierung in die Wurzelzone von Pflanzen eingebracht wurde*“. Die Pflanzkohle wird dabei mit nährstoffreicher Lösung (z. B. Rinderurin, Biogasgülle, Kompostextrakte, kommerzielle organische oder mineralische Flüssigdünger) versetzt (ebd.). Mineralische Dünger können auch als gut lösliches Granulat nach dem Einbringen von Pflanzkohle auf dem Boden ausgebracht werden. Die hoch poröse Oberfläche der Pflanzkohle wird so mit Nährstoffen angereichert die nach und nach wieder abgegeben werden.

Anwendungen zum „Aufladen“ von Pflanzkohle mit Nährstoffen

Anbieter von **Pflanzkohle zur Einstreu** empfehlen eine Zugabe von bis zu 10 % Pflanzkohle zur üblichen bisherigen Einstreu. Wird dem Futter bereits Pflanzkohle beigemischt, kann die Menge entsprechend reduziert werden. Anwendende berichten, dass Hufkrankheiten, Gerüche und Nährstoffverluste reduziert werden (Schmidt et al. 2019b). Gezielt auf feuchten Flächen und auf Laufflächen aufgebracht wird die Trittsicherheit erhöht und kann der Strohverbrauch

verringert werden. Im Tiefstreulaufstall fördert Pflanzenkohle an feuchten Stellen die Verrottung und hemmt die Entwicklung von Fliegenlarven

Nach Erfahrungen aus der landwirtschaftlichen Praxis kann **Pflanzenkohle als Zugabe zum Güllelager** Gerüche und Verluste flüchtiger Nährstoffe reduzieren (Kammann et al. 2017). Die Düngewirkung der Gülle wird damit verbessert. Hersteller empfehlen die Zugabe von rund 1 Vol.-% Pflanzenkohle mindestens vier Wochen vor der Ausbringung der Mischung vorzunehmen.

Bei der Kompostierung organischer Materialien werden u.a. CO₂, CH₄ und N-Verbindungen frei. Durch optimiertes Management, das insbesondere für ausreichende Sauerstoffverfügbarkeit sorgt, können die Emissionen der beiden letzten Komponenten deutlich verringert werden. Solche Maßnahmen sind aber nicht einfach steuerbar und teilweise kostenintensiv. Es gibt Hinweise, dass eine **Zugabe von Pflanzenkohle im Kompostierungsprozess** (Co-Kompostierung) Emissionen von CH₄ und N-Emissionen reduziert:

- So berichten Jia et al. (2016) bei Zugaben von 20 % Pflanzenkohle zur Kompostierung von Hühnermist von einer Abnahme der CH₄-Emissionen von 55 %. Wang et al. (2022) beschreiben einen Rückgang der CH₄-Emissionen bei der Kompostierung um 43 % bei einer Beimischung von 10 % Pflanzenkohle. Niedrigere Beimischungsquoten (z. B. 3 %) (siehe Sánchez-García et al. 2015) führten zu keinen signifikanten Änderungen. Kammann et al. (2017) schließen daraus, dass eine gewisse Beimischungsquote notwendig ist, um Effekte auf CH₄-Emissionen zu erreichen.
- Laut einer globalen Meta-Analyse von Zhao et al. (2020) zur Kompostierung geht bei diesem Prozess durchschnittlich ein knappes Drittel des im Ausgangssubstrat vorhandenen Stickstoffs verloren, rund zur Hälfte als Ammoniak (NH₃). Dies ist allerdings stark abhängig von der verwendeten Biomasse und Methode und Dauer der Kompostierung, die z. B. das C/N-Verhältnis, den pH-Wert und die Feuchtigkeit beeinflussen. Zugabe von Pflanzenkohle zur Kompostierung erweist sich laut diesen Auswertungen als effektive Möglichkeit, diese Verluste signifikant zu verringern (Verringerung der Verluste von Gesamt-Stickstoff um 30 %, NH₃-Emissionen um 53 %, N₂O-Emissionen um 66 %). Ein zu starker Anstieg des pH-Wertes durch sehr hohe Gaben an Pflanzenkohle sollte allerdings vermieden werden, da bei pH-Werten über 8 erhöhte NH₃-Emissionen resultieren könnten (Kammann et al. 2017). Weitere Untersuchungen mit vergleichsweise niedrigen Zumischungsraten (etwa 3-4 %) zeigten teilweise Rückgänge von N₂O-Emissionen bei der Kompostierung, teilweise keinen Effekt (ebd.). Laut Wang et al. (2022) reduzierte eine 10 %ige Zugabe von Pflanzenkohle zu Kompost sowohl die NH₃- als auch die N₂O-Emissionen signifikant; die N-Verluste insgesamt wurden um 16 % verringert.

Insgesamt scheint die Zugabe von Pflanzenkohle im Kompostierungsprozess geeignet, die Kompostierung zu optimieren, die Kompostqualität zu verbessern, Pflanzenkohle mit Nährstoffen aufzuladen, und CH₄-Emissionen und N-Verluste zu verringern, insbesondere bei feuchten nährstoffreichen Materialien und einer Kompostierung, bei der wenig gewendet wird (Kammann et al. 2017). Die Umweltbilanz der Kompostierung würde dadurch deutlich verbessert. Erhöhte N-Gehalte in Komposten müssen dann selbstverständlich bei der Düngeplanung berücksichtigt werden. Rombel et al. (2022) beschreiben in ihrem Review die vielfachen Vorteile einer Co-Kompostierung. Einen guten Überblick zu den Mechanismen von Pflanzenkohle im Kompostierungsprozess bieten Kammann et al. (2016) und Godlewska et al. (2017). Es besteht allerdings weiterhin Forschungsbedarf zu Wirkungen unter Praxisbedingungen und im Zusammenhang mit unterschiedlichen Kompostsubstraten (u.a. hoher und niedriger N-Gehalt) und Pflanzenkohlen. Dabei sollte die Produktqualität und auch THG-Emissionen nach der Aufbringung in Böden einbezogen werden (Kammann et al. 2017).

Pflanzenkohle kann **auch reifen Komposten oder Wirtschaftsdünger beigemischt** werden (empfohlen werden etwa 10 Vol-%). Aus Kostengründen werden Pflanzenkohle-Komposte bisher allerdings kaum in der Landwirtschaft, sondern vor allem im Gartenbau, bei der Pflanzung von Sonderkulturen, im Hobbybereich und bei der Pflanzung von Stadtbäumen eingesetzt (Schmidt et al. 2021a). Pflanzenkohle-basierte Substrate für Garten- und Gemüsebau enthalten in der Regel 10 - 30 % Pflanzenkohle. Deutliche höhere Anteile können für Spezialsubstrate für urbane Grünflächen oder Straßenbegleitgrün sinnvoll sein, wenn im Stadtbereich vorkommende Schadstoffe immobilisiert werden sollen (ebd.).

Pflanzenkohle kann auch zu einem **Düngemittelpräparat** (Pellets oder Granulat) verarbeitet werden, das außer Pflanzenkohle Nährstoffe, weitere Mineralien und Bindemittel beinhaltet (z. B. Joseph et al. 2021; Rombel et al. 2022). Gao et al. (2022) zeigen mögliche Herstellungsmöglichkeiten auf. Es besteht eine starke Evidenz, dass Pflanzenkohle-basierte N-Düngemittel die Nährstoffeffizienz steigern und Nährstoffverluste verringern können (ebd.). Das Interesse an solchen Produkten und Anwendungsmöglichkeiten steigt (Melo et al. 2022). Insbesondere in China werden Pflanzenkohle-basierte Düngemittelpräparate entwickelt und bereits angewendet (Ren et al. 2019). Auch Pflanzenkohlehändler in Deutschland bieten solche Produkte bereits teilweise an.

Pflanzenkohle wird in Kombination mit Nährstoffen zu einem Substrat, das Nährstoffe speichert und langsam wieder abgibt und damit auch dazu beiträgt, Nährstoffe aus Wirtschafts- und Mineraldünger effizient zu nutzen und Nährstoffverluste zu verringern.

4.2.2 Wechselwirkungen zwischen Pflanzenkohle und Boden

Eine Vielzahl von Studien berichten über den Einfluss von Pflanzenkohle auf physikalische, chemische und biologische Bodeneigenschaften. Generell werden Aussagen zu Wirkungen der Verwendung von Pflanzenkohle allerdings dadurch erschwert, dass in vielen früheren Versuchen einmalig große Mengen an reiner Pflanzenkohle (z. B. 20-30 Tonnen pro Hektar) ausgebracht wurden (oft in Gefäßversuchen). Viele Meta-Analysen unterscheiden bei der Auswertung nicht unbedingt, ob reine Pflanzenkohle verwendet wurde oder eine Aufladung mit Düngemitteln vorausging.

Joseph et al. (2021) fassen die vergangenen 20 Jahre an Forschung zu Wirkungen von Pflanzenkohle auf den Boden und das Pflanzenwachstum zusammen. Sie unterscheiden nach der Aufbringung der Pflanzenkohle drei Phasen (die einzelnen Wechselwirkungen sind sehr komplex, für Details wird auf Joseph et al. (2021) verwiesen):

- **In den ersten Wochen nach der Aufbringung lösen sich organische oder mineralische Substanzen von der Oberfläche der Pflanzenkohle.** Es wurden sowohl positive als auch hemmende Wirkungen auf Keimung und Aufgang der Saat berichtet. Beeinflusst wird dies unter anderem von Ausgangssubstrat, Pyrolysetemperatur und Ausbringungsmenge sowie der Pflanzenart. Insgesamt scheint die Aufbringung von Pflanzenkohle i.d.R. nicht nachteilig und häufig sogar förderlich zu sein. Verantwortlich für positive Wirkungen auf Keimung und frühem Wachstum sind vermutlich lösliche organische Substanzen, die diese Vorgänge stimulieren, oder eine Abschwächung hemmender Faktoren (wie eventuelle Belastungen des Bodens durch Schwermetalle oder phytotoxische organische Substanzen). Bei der Aufbringung sehr hoher Mengen an Pflanzenkohle (z. B. von mehr als 40 oder 50 Tonnen pro Hektar) können sich aber freiwerdende Salze oder phytotoxische Stoffe aus der Pflanzenkohle negativ auswirken.
- In einer weiteren Phase, etwa bis zu einem halben Jahr nach der Aufbringung, werden die **Interaktionen zwischen Pflanzenkohle, Wurzeln und Mikroorganismen** wichtiger. Die spezifische Oberfläche der Pflanzenkohle und die Porosität nehmen zu, die Poren füllen sich mit organischer Substanz, Mikroorganismen siedeln sich an und auf den Oberflächen der Pflanzenkohlepartikel bilden sich organisch-mineralische Beschichtungen. Auch Gase wie NH_3 , CH_4 und N_2O können mit funktionalen Gruppen auf der Oberfläche der Pflanzenkohle reagieren.
- Langfristig bilden sich durch die Interaktion von Pflanzenkohle und Boden **organisch-mineralische Mikroagglomerate auf der Oberfläche der Pflanzenkohle**, die die Kapazität erhöhen, Nährstoffe zu speichern. Neben der Zufuhr von langfristig stabilem Kohlenstoff in den Boden durch die Pflanzenkohle selber kann die Zugabe von Pflanzenkohle den Kohlenstoffgehalt im Boden weiter erhöhen durch eine verringerte Mineralisierung von bereits im Boden vorkommender organischer Substanz. Dieser Effekt wird auch als „negativer Priming-Effekt²²“ bezeichnet. Ding et al. (2018) werteten 27 Inkubationsstudien aus und kamen zu dem Schluss, dass die Zeit, die nach dem Aufbringen der Pflanzenkohle verstreicht, der wichtigste Einflussfaktor für Effekte auf den

²² In der Bodenkunde bedeutet Priming, dass sich Abbau- und Mineralisationsprozesse bereits vorhandener organischer Bodensubstanz durch den Eintrag von Substraten verändern. Ein verstärkter Abbau („positives Priming“) wird z. B. bei Zugabe leicht abbaubarer Stoffe wie Glucose beobachtet.

Bodenkohlenstoff ist. Verstärkter Abbau des originären Bodenkohlenstoffs („positives Priming“) war nur in den ersten 775 Tagen zu beobachten. Die Zufuhr auch von labilem Kohlenstoff mit der Pflanzenkohle und die dadurch angeregte mikrobielle Aktivität kann hierfür eine Erklärung sein. Im weiteren Verlauf nahm die organische Bodensubstanz jedoch deutlich zu und blieb nach rund drei Jahren weitgehend stabil.

Laut einer neueren Studie (Blanco-Canqui et al. 2020) zeigte erstmals ein Feldversuch ein „**negatives Priming**“ durch die Zugabe von Pflanzenkohle. Das Einbringen von neun Tonnen Pflanzenkohle pro Hektar in verschiedene Biomassekulturen (Mais, Rutenhirse, Gras) führte nach sechs Jahren zu einer Zunahme von durchschnittlich sieben Tonnen nicht-pyrogenem Kohlenstoff pro Hektar. Die Mechanismen, die zu negativem Priming führen sind noch nicht ganz klar (ebd.), aber Lehmann et al. (2021) folgern dennoch, dass dieses Phänomen ein wichtiger zusätzlicher Beitrag der Pflanzenkohle-Verwendung sein kann. In einer aktuellen Studie weisen Weng et al. (2022) ebenfalls einen zusätzlichen Aufbaueffekt für Bodenkohlenstoff in subtropischem Grasland nach und führen dies auf eine verstärkte Retention von Wurzelexsudaten und von mikrobieller Biomasse in Aggregaten und eine effizientere Kohlenstoffnutzung durch Mikroorganismen zurück.

Es gibt zudem Hinweise, dass Pflanzenkohle das **Wurzelwachstum** stimuliert (Schmidt et al. 2021b). Nach einer Meta-Analyse von Xiang et al. (2017), in die 136 Studien einbezogen wurden, erhöhte die Aufbringung von Pflanzenkohle die Wurzelbiomasse im Mittel um 32 %, die Wurzellänge nahm um gut 50 % zu. Bei einjährigen Nutzpflanzen war der Effekt auf die Wurzelbiomasse größer als bei mehrjährigen, und bei Leguminosen stärker als bei Nicht-Leguminosen. Bei Leguminosen erhöhte sich bei Pflanzenkohleanwendung zudem die Anzahl von Knöllchen, die für die biologische N-Fixierung wichtig sind, um 25 %. Die P-Konzentration in den Wurzeln war um durchschnittlich 20 % erhöht. Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass dies die Aufnahme von Nährstoffen und Wasser erhöht und damit auch das Pflanzenwachstum verbessert. Ein weiterer möglicher Effekt kann sein, dass die größere Wurzelmasse mehr Wurzelexsudate absondert und dies wiederum verstärkt zur Bildung von organischer Bodensubstanz beiträgt (Kätterer et al. 2011; Sokol et al. 2019). Die Erhöhung von Wurzelbiomasse scheint zudem eine entscheidende Variable für die Halbwertszeit von organischen Kohlenstoff in Böden zu sein und diese zu erhöhen (Poeplau et al. 2021).

Wie oben beschrieben, siedeln sich Mikroorganismen auf den Oberflächen der Pflanzenkohlepartikel an. Mehrere Meta-Analysen weisen darauf hin, dass die Zugabe von Pflanzenkohle die **biologische Aktivität** im Boden deutlich erhöht (Hossain et al. 2020; Schmidt et al. 2021b). Laut Pokharel et al. (2020) steigt die mikrobielle Biomasse durch Pflanzenkohleaufbringung am stärksten in sauren Böden und solchen mit einem geringen Gehalt an organischer Bodensubstanz. Eine erhöhte mikrobielle Aktivität fördert die Umsetzung organischer Substanz in Böden und damit die Nährstoffversorgung von Pflanzen. Während der in der reinen Pflanzenkohle enthaltene Stickstoff weitgehend nicht direkt pflanzenverfügbar ist und Pflanzenkohle auch Nährstoffe aus Düngemitteln erst einmal speichern (und so auch z. B. vor Auswaschung schützen) kann, kann die Stimulierung der mikrobiellen Aktivität andererseits die Mineralisierung organischer Substanz und auch die Aktivität von Mykorrhiza und damit die Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen erhöhen (Solaiman et al. 2019). Über die Stimulierung N-fixierender Bakterien durch Pflanzenkohle kann auch eine Steigerung der N-Fixierung durch Leguminosen erfolgen (Liu et al. 2018a). Schmidt et al. (2021a) schließen aus der Auswertung wissenschaftlicher Studien, dass die Applikation von Pflanzenkohle „in der Regel zu **höherer Biodiversität** sowohl hinsichtlich der Anzahl der Arten als auch hinsichtlich der funktionalen

Biodiversität [führt]. Nachteilige Langzeitwirkungen konnten nicht nachgewiesen werden, sofern für kontrollierte Qualität der Pflanzenkohle gesorgt wurde.“

Meta-Analysen zeigen, dass die Aufbringung von Pflanzenkohle die **Verfügbarkeit von Phosphor** durchschnittlich um den Faktor 4,6 erhöht (Joseph et al. 2021). Pflanzenkohle hat je nach Eigenschaften der jeweiligen Pflanzenkohle einen **Kalkungseffekt** und führt damit zu einer geringeren Pflanzenverfügbarkeit von Aluminium auf sauren Böden, welches die Phosphorverfügbarkeit behindert und das Pflanzenwachstum beeinträchtigt. Hinzu kommt der P-Gehalt der Pflanzenkohle selber.

In vielen Studien wurde eine **Abnahme der Lagerungsdichte** von Böden und eine **höhere Wasserspeicherkapazität** durch die Aufbringung von Pflanzenkohle festgestellt (siehe Edeh et al. 2020 und Meta-Analyse von Omondi et al. 2016). Die Wasserspeicherkapazität nimmt insbesondere in grobkörnigen Böden und bei hohen Aufbringungsmengen zu (siehe Meta-Analyse von Edeh et al. 2020). Diese Wirkung macht man sich z. B. bei Pflanzenkohle-haltigen Substraten für Stadtbäume zunutze (siehe Kapitel 4.3). Bei niedrigen Aufbringungsmengen von 0,5-2 Tonnen Pflanzenkohle pro Hektar ist der Effekt auf die Wasserspeicherkapazität vermutlich nur gering. Allerdings kann möglicherweise mit einer konzentrierten Applikation in Wurzelnähe die Pflanzenkohle dort zu einer höheren Wasserverfügbarkeit beitragen (Schmidt et al. 2021a).

Insgesamt kann Pflanzenkohle Bedingungen im Boden schaffen, die Nährstoffangebot und -aufnahme fördern, phytotoxische Substanzen immobilisieren oder deaktivieren und Substanzen freisetzen, die das Pflanzenwachstum und nützliche Mikroorganismen stimulieren. Auf Pflanzenkohlepartikeln entstehen zusätzliche Nischen für Mikroorganismen. Die Wasserspeicherkapazität von Böden profitiert insbesondere von höheren Aufbringungsmengen. Neben der Zufuhr von langfristig stabilem Kohlenstoff in den Boden durch die Pflanzenkohle selber kann die Zugabe von Pflanzenkohle den Kohlenstoffgehalt im Boden weiter erhöhen. Damit kann Pflanzenkohle im Boden Pflanzenwachstum und -gesundheit unterstützen.

4.2.3 Ertragswirkungen von Pflanzenkohle

Eine globale Meta-Analyse von Jeffery et al. (2017) zeigte durchschnittliche Ertragserhöhungen von 25 % in tropischen Regionen, wo nährstoffarme und saure Böden verbreitet sind, bei einer Aufbringungsmenge von im Mittel 15 Tonnen Pflanzenkohle pro Hektar. Nährstoffreichere Pflanzenkohlen z. B. aus Wirtschaftsdünger erwiesen sich dabei als wirksamer als nährstoffarme aus Holz oder Stroh (ebd.). Die erhöhte Verfügbarkeit von Phosphor durch das Einbringen von Pflanzenkohle (siehe Meta-Analysen von Gao et al. 2019 und Glaser und Lehr 2019 sowie Review von Joseph et al. 2021) ist auf solchen Böden besonders relevant.

Eine Meta-Analyse von Dai et al. (2020) berichtet von durchschnittlichen Ertragserhöhungen von 16 %, allerdings mit einer großen Variabilität, die unter anderem mit unterschiedlichen Qualitäten der verwendeten Pflanzenkohle (pH-Wert, Mineralstoffgehalt, C/N-Verhältnis) und unterschiedlichen Bodeneigenschaften begründet wird. Ertragssteigerungen werden vor allem auf sandigen, sauren Böden sowie Böden mit höheren Stickstoffgehalten erreicht. Ein hoher Aschegehalt der Pflanzenkohle ist ebenfalls günstig.

Vor allem in ariden und semi-ariden Gebieten kann eine erhöhte Wasserhaltefähigkeit ertragssteigernd wirken (Edeh et al. 2020).

In gemäßigten Gebieten führt die Zugabe reiner Pflanzenkohle auch bei Mengen von 30 t pro Hektar i.d.R. nicht zu weiteren Ertragszuwächsen (Jeffery et al. 2017). Es waren sogar negative Wirkungen möglich, die die Autoren darauf zurückführen, dass sehr hohe Gaben von Pflanzenkohle den pH-Wert im Boden über das Optimum hinaus erhöhen können. Laut Kammann et al. (2015) können sich negative Ertragseffekte bei der Verwendung reiner Pflanzenkohle durch eine Immobilisierung von Stickstoff ergeben, insbesondere bei hohen Pflanzenkohlegaben; die Autoren wiesen aber auch nach, dass die Aufbringung von mit Pflanzenkohle versetztem Kompost Erträge im Vergleich zur Kontrolle (Kompost ohne Pflanzenkohle) signifikant erhöhen kann.

Ye et al. (2020) werteten erstmals in einer Meta-Analyse Veröffentlichungen zu Wirkungen der Kombination von Pflanzenkohle und Düngemitteln auf den Ertrag aus. Im Vergleich zur alleinigen Verwendung mineralischer Düngemittel führte die Zugabe von Pflanzenkohle (mit Aufwandmengen deutlich unter 10 Tonnen pro Hektar) in Kombination mit Düngemitteln kurzfristig zu einer durchschnittlichen Ertragssteigerung von 15 %. Die Verwendung von Pflanzenkohlen aus eher ligninarmen und mineralstoffreichen Biomassen wie Stroh resultierten in höheren Ertragszuwächsen als die Beigabe von Pflanzenkohle aus Holz. Die alleinige Verwendung von Pflanzenkohle führte nicht zu höheren Ernteerträgen.

Bai et al. (2022) führten ebenfalls eine Meta-Analyse zur Kombinationswirkung von Pflanzenkohle und Düngung durch. Die Ertragswirkung einer Kombination war höher als die alleinige Verwendung von Pflanzenkohle oder Düngung. Die höchsten Ertragszuwächse wurden auch hier auf sauren Böden verzeichnet, und sie bestehen i.d.R. über mehrere Jahre. Die Autoren schließen, dass Pflanzenkohle die Effizienz von (organischer und anorganischer) Düngung erhöhen kann.

Eine weitere aktuelle Meta-Analyse von Melo et al. (2022) zeigt, dass Pflanzenkohle-basierte Düngemittel bei einer niedrigen Aufbringungsrate (durchschnittlich 0,9 Tonnen Pflanzenkohle pro Hektar) das Pflanzenwachstum im Vergleich zu gedüngten Anbauvarianten ohne Pflanzenkohle um 10 % erhöhen. Dies weist auf eine erhöhte Düngemittelleffizienz durch die Anwesenheit der Pflanzenkohle hin. Der Effekt war auf stark verwitterten und wenig entwickelten Böden am größten.

Eine neuere Untersuchung (Grafmüller et al. 2022) wies in einem Treibhausversuch nach, dass auch auf fruchtbaren Böden unter gemäßigten Klimabedingungen das Einbringen niedriger Dosen von Pflanzenkohle (1,3 Tonnen pro Hektar) in der Wurzelzone und in Kombination mit Mineraldüngung zu einer Erhöhung des Ertrags von Weißkohl führte (durchschnittlich 12 % im Vergleich zu einer Variante mit Düngung ohne Pflanzenkohle). Pflanzenkohle-basierter Dünger fungiert dann als Nährstoffdepot in der Wurzelzone.

Schmidt et al. (2021a) erwarten perspektivisch den größten Nutzen von einer konzentrierten Einbringung Pflanzenkohle-basierter Dünger in die Wurzelzone (Applikation in Streifen, Unterfußgabe bei Pflanzung oder Aussaat, direkte Wurzelinjektion dickflüssiger Pflanzenkohlesuspensionen). Um das Potenzial der Kombination von Pflanzenkohle mit Düngung bzw. Pflanzenkohle-basierter Düngemittel zu erschließen, sollten über gezielte Studien folgende weitere Fragen geklärt werden:

- Optimale Ausbringungsform (homogenes Einpflügen, streifenweise Einbringung, Injektion, als Suspension in der Tröpfchenbewässerung, etc.)
- Mischung von Pflanzenkohle und Dünger (separate Ausbringung, Flüssigmischung, Feststoffmischung, Partikelgröße, etc.)

- Art der Pflanzenkohle und mögliche Vorbehandlung (Wahl des Ausgangsmaterials und der Pyrolysebedingungen, Dampfbehandlung, Kompostierung, Fermentierung, Ansäuerung, etc.).

Schmidt et al. (2021a) weiter: „Mit solcherart spezifisch für den Anwendungszweck entwickelten [Pflanzenkohle]-Düngern ist zu erwarten, dass sich auch in der breiten Anwendung positive Effekte auf den Ertrag erzielen lassen, oder dass durch Anwendung von Pflanzenkohle in Hohertragssystemen die Aufwandsmengen an Düngemitteln bei gleichbleibendem Ertrag reduziert werden können. Der letztgenannte Aspekt war jedoch bisher kaum Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen.“

Ertragserhöhungen durch eine Verwendung von Pflanzenkohle zeigen sich vor allem in den Tropen, wo nährstoffarme und saure Böden verbreitet sind. In gemäßigten Gebieten führt die Zugabe von Pflanzenkohle i.d.R. nicht zu relevanten Ertragszuwächsen; bei sehr hohen Gaben reiner Pflanzenkohle können auch negative Ertragseffekte entstehen. Neue Untersuchungen zeigen, dass auch unter gemäßigten Klimabedingungen das Einbringen niedriger Dosen von Pflanzenkohle in Kombination mit Düngemitteln in der Wurzelzone und zu Ertragserhöhungen führen kann. Pflanzenkohle, die in Kombination mit Düngemitteln verwendet wird, kann auch dazu beitragen, Düngemittel einzusparen, ohne Erträge zu vermindern. Zur Optimierung solcher Anwendungsmöglichkeiten besteht noch Forschungsbedarf.

4.2.4 Verringerung von Nährstoffverlusten und THG-Emissionen aus Böden

Stickstoff

Stickstoff liegt im Boden in unterschiedlichen Verbindungen vor, zwischen denen es vielfache Umwandlungswege gibt. Die Wirkung von Pflanzenkohle ist noch nicht im Detail geklärt und es besteht weiterer Forschungsbedarf. Für eine hohe N-Effizienz und um Umweltschäden zu vermeiden, ist eine Verringerung von N-Verlusten in Atmosphäre oder Gewässer zentral. Es gibt Hinweise, dass die Zugabe von Pflanzenkohle solche Verluste reduzieren kann:

Lachgas (Distickstoffmonoxid, N₂O) wirkt als THG. Im Vergleich zu CO₂ ist sein THG-Potenzial bezogen auf 100 Jahre rund 265-mal höher; die Verweilzeit in der Atmosphäre beträgt rund 121 Jahre. Die wichtigste Quelle für N₂O sind mikrobielle Abbauprozesse von N-Verbindungen in Böden. Global gesehen gehen 81 % der menschengemachten N₂O-Emissionen auf die Landnutzung zurück (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2019b). N₂O-Emissionen aus Böden entstehen durch unterschiedliche Pfade mikrobieller Umsetzung verschiedener N-Komponenten aus mineralischer und organischer Düngung, Ernteresten, Bindung von Luftstickstoff durch Leguminosen oder dem Abbau organischer Bodensubstanz.

Die Ausbringung von Pflanzenkohle wird häufig mit der Verringerung von N₂O-Emissionen in Verbindung gebracht. Eine Reihe an Meta-Analysen haben versucht, Ergebnisse von Studien, die den Effekt von Pflanzenkohle auf diese THG-Emissionen in Laborstudien aber auch unter Feldbedingungen untersuchten, zusammenzuführen. Nach wie vor gibt es Wissenslücken, aber es gibt reelle Hinweise, dass Pflanzenkohle insbesondere N₂O-Emissionen aus Böden zumindest kurz- und mittelfristig reduzieren kann (Joseph et al. 2021). Cayuela et al. (2014) gaben in ihrer Meta-Analyse an, dass über alle berücksichtigten Studien hinweg der Einsatz von Pflanzenkohle N₂O-Emissionen aus dem Boden um rund die Hälfte reduzierte; eine Meta-Analyse von Liu et al. (2018a) nannte eine Reduktion um durchschnittlich 32 %. Eine weitere Meta-Analyse von Borchard et al. (2019) zeigte Emissionsminderungen von 38 % im ersten Jahr nach der Ausbringung, die sich auf 46 % erhöhten,

wenn Pflanzenkohle in Kombination mit mineralischen Düngemitteln eingesetzt wurde. Über mehrere Jahre konnten Netto-Reduktionen von N_2O -Emissionen um mehr als 10 % dokumentiert werden. Applikationsmengen unter 10 Tonnen pro Hektar hatten geringere Effekte. Wenn Pflanzenkohle im Lauf der Zeit im Boden altert, kann sich die Wirkung auf die N_2O -Emissionen möglicherweise verringern (ebd.). Eine aktuelle globale Meta-Analyse von Zhang et al. (2020) bestätigt die früheren Ergebnisse; die N_2O -Emissionen wurden um durchschnittlich 38 % reduziert (die Abnahme variierte zwischen 11-61%), gleichzeitig ergab sich ein Ertragszuwachs von 21 %. Die Wirkung scheint abhängig zu sein von den Charakteristiken der jeweiligen Pflanzenkohle, den Bodeneigenschaften (u.a. deutlich stärkerer Effekt auf alkalischen bis leicht sauren sowie auf sandigen Böden) und den Umweltbedingungen (Kammann et al. 2017; Zhang et al. 2020). Gerade in Kulturen mit sehr hohem N-Bedarf und damit einem hohen Risiko an N_2O -Emissionen könnte Pflanzenkohle dazu beitragen, diese Emissionen zu senken (Kammann et al. 2017).

Es gibt noch keine Meta-Studien, die die Wirkung von Pflanzenkohle-basierter Düngemittel, die gezielt z. B. in den Wurzelbereich eingebracht werden, auf die N_2O -Emissionen untersuchen. Nichts desto trotz schließen Kammann et al. (2017) aus den bisherigen Forschungsergebnissen, dass die Zugabe von Pflanzenkohle in dieser Form N_2O -Emissionen bezogen auf den Ertrag reduzieren kann und stellen dafür folgende Hypothesen auf: (1) In Pflanzenkohle-basierten Düngemitteln wird die Pflanzenkohle in konzentrierter Form direkt zusammen mit den Nährstoffen in den Boden eingebracht und liegt damit in Umgebung dieser eingebrachten Nährstoffe in einem vergleichsweise hohen Anteil vor, der die N_2O -Emissionen in Böden nach den o.g. Meta-Analysen deutlich reduziert; (2) wenn das Pflanzenwachstum stimuliert wird, erhöht dies die N-Aufnahme und die Konzentration von N-Komponenten, die zu N_2O umgewandelt werden können, nimmt ab; (3) bei einer Unterfußdüngung ist die Fläche, aus der N_2O -Emissionen aufgrund der Zugabe dieser Düngemittel entstehen können, geringer als bei einer flächigen Düngung; (4) bei einer Düngung im Wurzelbereich kann die Düngemenge i.d.R. reduziert werden und (5) Pflanzenkohle kann die Lagerungsdichte von Böden verringern und die Luftkapazität erhöhen, was ebenfalls N_2O -Emissionen verringert.

Bezieht man ein, dass eine Erhöhung von organischem Kohlenstoff in Böden i.d.R. mit erhöhten N_2O -Emissionen einhergeht, so werden die Vorzüge von Pflanzenkohle im Vergleich zu anderen Strategien, den Kohlenstoffgehalt im Boden mit leichter abbaubaren Stoffen zu steigern, besonders deutlich (vgl. auch Joseph et al. 2021).

In einzelnen Untersuchungen wurden jedoch auch keine oder widersprüchliche Effekte auf die N_2O -Emissionen gefunden (Kammann et al. 2017). Wie Pflanzenkohle mit den unterschiedlichen Wegen der N_2O -Genese interagiert, bedarf daher noch weiterer Forschung; wichtig ist dabei insbesondere auch der langfristige Effekt (ebd.).

Borchard et al. (2019) untersuchten in einer Meta-Analyse den Einfluss von Pflanzenkohle auf die **Auswaschung von Nitrat (NO_3)**. Bei Studien mit einer Versuchsdauer von über 30 Tagen verringerte sich die NO_3 -Auswaschung um 26 bis 32 %. Gründe hierfür können – insbesondere auf sauren Böden – ein erhöhter pH-Wert durch die Pflanzenkohle und damit eine Verschiebung zu mehr NH_3 -Emissionen sein, und eine verstärkte Adsorption und Immobilisierung von NO_3 -Ionen (und NO_2^-) an und in Pflanzenkohlepartikeln. Auf die Konzentrationen von Nitrat im Boden zeigte sich insgesamt kein Einfluss. Liu et al. (2018a) kamen in ihrer Meta-Analyse auf ähnliche Ergebnisse; die NO_3 -Auswaschung wurde durch die Zugabe von Pflanzenkohle um durchschnittlich 29 % verringert. Für eine detaillierte Diskussion der Einflussfaktoren soll hier auf Borchard et al. (2019) verwiesen werden.

Weitere Wirkungsfaktoren von Pflanzkohle im Zusammenhang mit N-Verlusten wie indirekt verringerte N_2O -Emissionen aufgrund geringerer Auswaschungsverluste oder Wirkungen auf NH_3 -Emissionen sind noch weniger gut quantifiziert (Lehmann et al. 2021). Der Einfluss von Pflanzkohle auf **NH_3 -Ausgasungen** aus dem Boden wird laut einer Meta-Studie von Sha et al. (2019) vom pH-Wert sowohl von Boden als auch von der Pflanzkohle beeinflusst. Alkalische Bedingungen verschieben das chemische Gleichgewicht zwischen Ammonium (NH_4) und dem gasförmigen NH_3 hin zur letzteren Form. Auf stark sauren Böden wurden NH_3 -Emissionen durch die i.d.R. leicht alkalische Pflanzkohle daher erhöht (so auch Liu et al. 2018a). Die Kombination von Pflanzkohle mit organischer Düngung oder die Ansäuerung der Pflanzkohle hingegen verringerte die NH_3 -Emissionen (Sha et al. 2019).

Methan (CH_4)

Das THG-Potenzial von Methan (CH_4) ist rund 28-mal höher als jenes von CO_2 . Die Verweildauer in der Atmosphäre beträgt jedoch im Vergleich zum CO_2 nur 12 Jahre.

Bezüglich der Wirkung von Pflanzkohle auf CH_4 -Emissionen aus Böden besteht noch Forschungsbedarf (Kammann et al. 2017; Schmidt et al. 2021a). So verringerte laut Jeffery et al. (2016) die Zugabe von Pflanzkohle die Emissionen aus Reisfeldern (die sonst aufgrund der Überstauung mit Wasser starke CH_4 -Quellen sind) und aus wassergesättigten organischen Böden, während die Effekte auf Böden mit ausreichender Sauerstoffzufuhr nicht eindeutig waren. CH_4 -Emissionen aus mineralischen Böden sind unter den Bedingungen in Deutschland allerdings im Vergleich zu den N_2O -Emissionen aus solchen Böden oder den CH_4 -Emissionen aus der Tierhaltung von sehr untergeordneter Bedeutung.

Es gibt reelle Hinweise, dass Pflanzkohle insbesondere N_2O -Emissionen aus Böden zumindest kurz- und mittelfristig reduzieren kann. Wirkungsmechanismen müssen im Detail noch weiter geklärt werden. Es besteht außerdem das Potenzial, die Auswaschung von NO_3 zu verringern. Wirkungen auf NH_3 -Emissionen sind noch weniger gut quantifiziert, und bezüglich der Wirkung von Pflanzkohle auf CH_4 -Emissionen, insbesondere aus mineralischen Böden, gibt es noch Forschungsbedarf

4.2.5 Wechselwirkungen mit Schadstoffen und Pflanzenschutzmitteln

Immobilisierung schädlicher Stoffe im Boden

Durch ihre große Oberfläche eignet sich Pflanzkohle grundsätzlich als Adsorber von Schadstoffen (Conte et al. 2021; Tisserant und Cherubini 2019). Dabei immobilisieren Pflanzkohlen, die bei eher höheren Temperaturen ($> 600^\circ C$) erzeugt wurden, im Allgemeinen besonders effektiv organische Stoffe, während bei niedrigeren Temperaturen produzierte Pflanzkohlen eher geeignet sind, anorganische Schadstoffe festzulegen (Ahmad et al. 2014).

Eine Reihe von Studien zeigt, dass die Zugabe von Pflanzkohle die Aufnahme von **Schwermetallen** aus dem Boden in die Pflanzen verringert, indem sie diese Stoffe immobilisiert (z. B. Meta-Analysen von Chen et al. 2018; Neogi et al. 2022 und Peng et al. 2018). Wirksam sind insbesondere Aufbringungsmengen von mehr als 10 Tonnen pro Hektar (Joseph et al. 2021). Weitere Variablen sind Bodeneigenschaften, Pflanzkohletyp, Pflanzenart und welche Schwermetalle betrachtet werden (Chen et al. 2018). Pflanzkohle bietet damit die Chance, auf belasteten Böden die Schwermetallverfügbarkeit so zu senken, dass ein Anbau z. B. von Biomasse wieder möglich ist, und auch auf leicht belasteten Standorten kann Pflanzkohle dazu beitragen, dass in dort kultivierten

Pflanzen der Schwermetallgehalt verringert wird (Schmidt et al. 2021b). Stark belastete Böden müssen allerdings weiter überwacht werden, da die Schwermetalle nicht entfernt, sondern nur ihre biologische Verfügbarkeit verringert wird. Bei geänderten Bedingungen, z. B. sinkenden pH-Werten, können diese Stoffe nach und nach auch wieder mobilisiert werden (O'Connor et al. 2018).

Auch **organische Stoffe** wie pharmazeutische Wirkstoffe, die z. B. mit Abwasser oder Wirtschaftsdünger auf landwirtschaftliche Flächen gelangen können, werden durch Pflanzenkohle adsorbiert und damit weniger pflanzenverfügbar (Li et al. 2020; Neogi et al. 2022). Studien zeigten, dass die Wirkstoffe dadurch teilweise länger im Boden nachweisbar waren; mögliche langfristige Auswirkungen auf die Bodenqualität müssen noch untersucht werden (Li et al. 2020). Quilliam et al. (2013) wiesen darauf hin, dass der Abbau von PAK durch die verstärkte Adsorption in Pflanzenkohle behindert werden kann und die Dynamik zwischen Adsorption, mikrobieller Aktivität, der Konzentration von PAK im Bodenwasser und der Persistenz dieser Stoffe weiter untersucht werden sollte.

Pestizide können durch die adsorbierenden Eigenschaften von Pflanzenkohle einerseits eventuell weniger wirksam sein und andererseits über eine längere Zeit im Boden erhalten bleiben und sich dadurch möglicherweise akkumulieren (siehe Review von Liu et al. 2018b). Maurer (2021) hält eine Anreicherung von Pestiziden in Pflanzenkohle für möglich mit entsprechend negativen Auswirkungen z. B. auf Bodenorganismen oder erhöhten Pestizid-Rückständen auf Wurzelgemüse und mahnt eine Abklärung der Risiken an und ggf. Einschränkungen bezüglich maximaler Ausbringungsmengen (z. B. 10 Tonnen in 10 Jahren). Schmidt et al. (2021a) betonen, dass adsorbierte Schadstoffe keinen Nachteil bedeuten, solange sie nicht desorbieren, und es sei nicht zu erwarten, dass adsorbierte Stoffe plötzlich verstärkt in die Bodenmatrix eintreten. Auf hoch belasteten Böden ist ohnehin die biologische Aktivität eingeschränkt und damit auch der Stoffabbau gehemmt. Eine Bindung von Schadstoffen an Pflanzenkohle wäre eine Chance, dass sich Bodenleben wieder entwickeln könnte.

Aufbringung von Schadstoffen mit Pflanzenkohle

Der prozentuale **Schwermetallgehalt** in der Pflanzenkohle ist höher als in der Ausgangsbiomasse, da sich deren ursprüngliches Gewicht vor allem durch den Verlust an Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff während der Pyrolyse um über 50 % reduziert. Laut European Biochar Certification (EBC) (2022) ist diese Aufkonzentrierung jedoch unkritisch, sofern die Biomasse nicht auf kontaminierten Böden aufwuchs oder durch weitere Einflüsse (z. B. Kupferspritzung im Weinbau) oder Verunreinigung (z. B. bleihaltige Farben) erhöhte Schwermetallkonzentrationen enthält. Über die erforderliche Quantifizierung der Schwermetallgehalte im Fall einer Zertifizierung nach EBC besteht eine zusätzliche Kontrolle der Biomassequalität. Schwermetallgehalte jenseits der Grenzwerte weisen auf eine Kontaminierung der verwendeten Biomassen hin.

Bei der Pyrolyse können **organische Schadstoffe wie PAK** entstehen. Diese können über Pflanzenkohle in den Boden gelangen (Wang et al. 2019). Andererseits wirkt Pflanzenkohle durch ihre poröse Struktur wie oben beschrieben als starker Adsorber für organische Schadstoffe. Pflanzenkohle mit niedrigen PAK-Gehalten wirkt im Boden eher als Senke denn als Quelle von PAK, indem sie diese mittlerweile allgegenwärtigen Stoffe bindet (Hilber et al. 2017). Eine Herstellung von Pflanzenkohle mit sehr niedrigen PAK-Gehalten ist technisch machbar (siehe Kapitel 3.4.1) und kann durch eine Zertifizierung nach EBC (siehe Kapitel 6.2) gewährleistet werden (European Biochar Industry Consortium e.V. (EBI) 2020).

Weitere unerwünschte Stoffe wie z. B. Mikroplastik (Ni et al. 2020), Biozide (Ross et al. 2016), Antibiotika (Tian et al. 2019), Antibiotika-resistente Keime (Kimbell et al. 2018) und Hormone wie Östrogene (Hoffman et al. 2016) oder weitere organische Schadstoffe und Verunreinigungen, die möglicherweise in bestimmten Ausgangssubstraten vorkommen können, werden durch die Pyrolysetemperaturen zerstört oder gelangen in die Gasphase und können anschließend verbrannt werden (Schmidt et al. 2021a).

Durch ihre große Oberfläche adsorbiert Pflanzenkohle Schadstoffe wie Schwermetalle und diverse organische Stoffe. Diese werden dadurch immobilisiert und weniger pflanzenverfügbar, können aber auch länger im Boden erhalten bleiben. Pflanzenkohle eignet sich daher für die Behandlung belasteter Böden. Mögliche langfristige Auswirkungen müssen jedoch noch untersucht werden. Mit der Pflanzenkohle können Schadstoffe aufgrund schlechter Prozessführung oder aus kontaminierten Ausgangssubstraten in den Boden gelangen. Eine wirkungsvolle Zertifizierung von Pflanzenkohle beinhaltet strenge Grenzwerte und kann damit problematische Konzentrationen unerwünschter Stoffe ausschließen.

4.3 Optionen zur Verwendung von Pflanzenkohle außerhalb der Landwirtschaft

Neben den „klassischen“ Anwendungen von Pflanzenkohle als Bodenhilfsstoff und in der Tierhaltung in der Landwirtschaft sowie im Garten- und Landschaftsbau kann Pflanzenkohle auch in der Industrie verwendet werden. Adsorptionsfähigkeit, Leitfähigkeit und Farbe sind wichtige Eigenschaften, die Pflanzenkohle für verschiedene Anwendungen interessant machen.

Bereits Schmidt (2012) listet „55 Anwendungen von Pflanzenkohle“ auf. So kann Pflanzenkohle in der Gebäudekonstruktion dem Innen- oder Außenputz zugesetzt werden und aufgrund der sehr geringen Wärmeleitfähigkeit von Pflanzenkohle und ihrer Fähigkeit, Wasser zu speichern und Schadstoffe zu adsorbieren, dabei u.a. auch zur Wärmedämmung, zur Regulation der Luftfeuchtigkeit oder zur Dekontamination von Luft oder Bodenfundamenten beitragen. Pflanzenkohle kann die Dekontaminierung belasteter Böden und die Reinigung von Abwässern, insbesondere schwermetallbelasteter Stadtabwässer, unterstützen und Pestizide und Düngemittel adsorbieren (z. B. bei der Teich- und Seewasserbehandlung oder in Form von Puffermauern aus Pflanzenkohle zwischen landwirtschaftlichen Flächen und Oberflächengewässern; in der Abwasser- oder Trinkwasserbehandlung kann Pflanzenkohle mit unterschiedlichen Techniken als Filtermaterial eingesetzt werden, z. B. als Aktivkohle). Ein weiteres Einsatzfeld ist die Verwendung als Abgasfilter. Stoffliche Verwertungsmöglichkeiten sind auch die Verwendung als Füllstoff in der Produktion z. B. als Kohlefasern, Kunststoff oder als Ausgangsmaterial zur Herstellung von Elektroden. Auch Verwendungen in der Textilindustrie (z. B. Gewebezusatz für Funktionskleidung, Deodorant für Schuhsohlen, Füllstoff für Matratzen und Kopfkissen) und Kosmetik oder der Arzneimittelproduktion sind denkbar (z. B. Entgiftung, Trägermittel für Arzneimittelwirkstoffe). In elektrischen Geräten kann Pflanzenkohle eingesetzt werden, um elektromagnetische Strahlungen abzuschirmen.

Der **Einsatz von Pflanzenkohle in Baustoffen und weiteren Materialien** wird bereits erforscht²³ und in Pilotprojekten umgesetzt. So begann die carbonauten GmbH im Jahr 2022 in Eberswalde mit der

²³ siehe z. B.

<https://www.madeofair.com/>; https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/forschung_tech_nik_trends/biokohle-baustoffe-karbonisierungsanlage-forestfinance/;
<http://carboninstead.de/>

Produktion von Kunststoffgranulaten mit bis zu 70 % Pflanzenkohlenstoffanteil²⁴. Eine ebenfalls interessante Perspektive ist die Beimischung zu Beton²⁵.

Eine aktuelle Entwicklung mit hoher Dynamik ist die Verwendung **von Pflanzenkohle als Zusatz in Substraten beim Pflanzen von Stadtbäumen**. Vorreiter dieser Entwicklung ist Schweden. In Stockholm werden mittlerweile Substrate aus groben Steinen, Kompost und Pflanzenkohle flächendeckend bei Baumpflanzungen eingesetzt. Diese Mischung stellt einen gut durchlüfteten Wurzelraum sicher, fungiert als Wasser- und Nährstoffspeicher sowie als Adsorber von Umweltgiften und kann damit das Überleben von Bäumen auch unter Extremsituationen ermöglichen (Embrén 2016). Auch in weiteren Ländern gibt es bereits Pilotprojekte. So werden in Basel mit Pflanzenkohle angereicherte Substrate für die Baumpflanzung in einem großen Feldversuch untersucht²⁶. In Österreich und in Deutschland werden ebenfalls erste Projekte nach diesem Konzept umgesetzt.

Experimentiert wird mittlerweile auch mit **Pflanzenkohle als Substratbeimischung in der Fassadenbegrünung**. Pflanzenkohle soll dort einen maßgeblichen Beitrag zur Reinigung des Grauwassers leisten, mit dem die Fassadenbegrünungsmodule bewässert werden (siehe Wißmann et al. 2019 und Projekt Vertikka²⁷).

Bei einer stofflichen Nutzung dienen die jeweiligen Produkte als Kohlenstoffsenke, solange sie im Gebrauch bleiben bzw. nach Gebrauch stofflich weiterverwendet werden. Baustoffe oder auch Asphalt wären Beispiele für langlebige Materialien, während z. B. bei der Verwendung von Pflanzenkohle in Kunststoffen für Abwasserrohre, Elektroleitungen oder Karosserien eher kurzlebige Produkte entstehen. Die Speicherung von Kohlenstoff ist dann abhängig davon, was mit den Materialien nach der Nutzung geschieht.

Nach wie vor überwiegt der landwirtschaftliche Verwendungszweck deutlich (Schmidt et al. 2021a). Es wird insgesamt eine weitere Beschleunigung sowohl des landwirtschaftlichen als auch des industriellen Einsatzes von Pflanzenkohle erwartet (European Biochar Certification (EBC) 2022). Das Ithaka-Institut schätzt, dass Pflanzenkohle „in den nächsten Jahrzehnten vermutlich zu einem der entscheidenden Rohstoffe der biobasierten Wirtschaft“ wird; genannt wird u.a. der Einsatz in Elektronik, Bauindustrie, Papierherstellung und der Abwasserreinigung. Auch der Ersatz von fossilem Kohlenstoff in der Metallurgie scheint sich zu einer relevanten Anwendung für biogenen Kohlenstoff zu entwickeln (European Biochar Industry (EBI) 2022). Da Prozesse in der Metallurgie stofflichen auf Kohlenstoff angewiesen sind, ersetzt Pflanzenkohle dort den Gebrauch von Steinkohle. Der gespeicherte Kohlenstoff wird dabei allerdings ganz überwiegend wieder frei.

²⁴ <https://carbonauten.de/weniger-erdoel-in-co2-senkenden-kunststoffen/>

²⁵ siehe z. B. <https://carstorcon.technology/home/technologie/> oder

²⁶ <https://www.zhaw.ch/de/forschung/forschungsdatenbank/projektde tail/projektid/4900/>

²⁷ <https://vertikka.de/vertikka-entwicklung/funktion>

<https://fachverbandpflanzenkohle.org/vertikka-vertikale-klima-klaer-anlage/>

5 Rechtlicher Rahmen zur Verwendung von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft

5.1 Pflanzenkohle als Bodenverbesserungsmittel

Die aktuelle **Verordnung zur Bereitstellung von EU-Düngemitteln 2019 (Verordnung (EU) 2019/1009)**²⁸, die am 16. Juli 2022 vollständig in Kraft getreten ist, weitet den Geltungsbereich des EU-Düngerechts auf Bodenverbesserungsmittel, Kultursubstrate und Biostimulatoren aus. Erstmals sind im EU-Düngemittelrecht Schadstoffgrenzwerte (insbesondere für Schwermetalle) sowie Hygienebedingungen für einzelne Produkte geregelt. Sofern ein Produkt den Anforderungen der EU-Verordnung entspricht und erfolgreich ein entsprechendes Konformitätsbewertungsverfahren²⁹ durchlaufen hat, kann es mit einer CE-Kennzeichnung versehen und in der EU vermarktet werden.

In der Bewertung von Pflanzenkohle gelangte das *Joint Research Center*, die gemeinsame Forschungsstelle der Kommission (JRC) zu dem Schluss, dass durch Pyrolyse gewonnene Materialien Pflanzen mit Nährstoffen, insbesondere Phosphor, versorgen oder die Nährstoffeffizienz verbessern können und somit die agronomische Wirksamkeit sichergestellt sei (Huygens et al. 2019). Allgemeine nachteilige Folgen für die Umwelt oder die Gesundheit des Menschen seien nicht vorhanden, wenn bestimmte Verwertungsvorschriften befolgt würden. Am 7. Juli 2021 wurde eine delegierte Verordnung³⁰ verabschiedet, die ebenfalls ab dem 16. Juli 2022 gilt, und „durch Pyrolyse oder Vergasung gewonnene Materialien“ in die zugelassenen „Komponentenmaterialkategorien“ aufnimmt. Die erlaubten Ausgangsmaterialien umfassen eine breite Palette organischer Substanzen. Ausgenommen sind aber u.a. Materialien aus gemischten Siedlungsabfällen, Klär-, Industrie- oder Baggerschlamm und bestimmte tierische Nebenprodukte. Es werden Anforderungen an den Herstellungsprozess gestellt und zusätzlich Grenzwerte für PAK³¹, PCDD/F und nicht dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (ndl-PCB) festgelegt. Für EU-Düngeprodukte, die durch Pyrolyse oder Vergasung gewonnene Materialien enthalten oder daraus bestehen, sind außerdem Maximalwert für Chlorid und Thallium vorgesehen.

Die **deutsche Düngemittelverordnung (DüMV)**³² von 2012, die im Jahr 2019 zum letzten Mal geändert wurde, lässt aktuell Holzkohle mit einem Kohlenstoffgehalt von mindestens 80 % in der Trockenmasse aus chemisch unbehandeltem Holz als Ausgangsstoff für Kultursubstrate und als Trägersubstanz in Verbindung mit der Zugabe von Nährstoffen über zugelassene Düngemittel zu. Eine konkretere Definition der Kohleprodukte wird nicht vorgenommen. Die DüMV schränkt damit Pflanzenkohle sehr stark ein, ungeachtet dessen, dass ein höherer Mineralstoffanteil (der z. B. in Pflanzenkohlen aus Stroh vorhanden ist) für eine Anwendung in der Landwirtschaft eher vorteilhaft wäre (siehe Kapitel 4.2.3).

²⁸ Verordnung (EU) 2019/1009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003

²⁹ Konformitätsbewertungsstelle in Deutschland ist die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE)

³⁰ 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

³¹ PAK 16: Summe von Naphthalen, Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen, Fluoranthren, Pyren, Benzo[a]anthracen, Chrysen, Benzo[b]fluoranthren, Benzo[k]fluoranthren, Benzo[a]pyren, Indeno [1,2,3-cd]pyren, Dibenzo[a,h]anthracen und Benzo[ghi]perylen.

³² Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414) geändert worden ist

Die Ausgangsstoffe und das Endprodukt (z. B. Kultursubstrat aus/unter Verwendung von Holzkohle) müssen die Schadstoffgrenzwerte der DüMV einhalten (siehe DüMV Anlage 2 Tabelle 1.4). Diese Liste enthält allerdings keine Grenzwerte für PAK, ndl-PCB oder Maximalwerte für Chlor und bezüglich Schwermetallen teilweise weniger anspruchsvolle Grenzwerte als die EU-Verordnung.

Der Fachverband Pflanzkohle e.V. hatte im August 2019 einen Antrag gestellt, Pflanzkohle, die den EBC-Kriterien (siehe Kapitel 6.2) entspricht, in die deutsche DüMV aufzunehmen. Der Wissenschaftliche Beirat für Düngungsfragen beim BMEL, der sich mit der Anfrage befasste, hatte in einer Reaktion im Februar 2020 betont, dass eine abschließende Stellungnahme noch nicht möglich sei und auch Zweifel an den angeführten nützlichen Wirkungen von Pflanzkohle geäußert. Auf eine kleine Anfrage im Bundestag antwortete im Mai 2020 die damalige Bundesregierung³³, dass aus ihrer Sicht positive Effekte für die Landwirtschaft durch den Einsatz von Pflanzkohle nicht hinreichend nachgewiesen seien und das BMEL keine Ausweitung der Anwendung von Pflanzkohle über die aktuelle Zulassung in der DüMV hinaus plane. Die Meinungsbildung innerhalb der Bundesregierung zur Verwendung von Pflanzkohle wurde damals als noch nicht abgeschlossen bezeichnet.

Das Düngemittelrecht ist in Bezug auf Pflanzkohle zwischen Deutschland und der EU also (noch) nicht vollständig harmonisiert. Hersteller von Pflanzkohle können für ihre Produkte zur Verwendung als Bodenverbesserungsmittel auf dem Europäischen Markt nun jedoch zwischen zwei Optionen wählen:

- a) EU-Düngeprodukte mit einer CE-Kennzeichnung nach der Verordnung (EU) 2019/1009 oder
- b) nach nationalem Recht hergestellte und zugelassene Düngemittel. Hierbei müssen die Regeln nach der Verordnung (EU) 2019/515³⁴ für die gegenseitige Anerkennung befolgt werden, um die Produkte in einem anderen Mitgliedstaat auf den Markt zu bringen.

Pflanzkohlehersteller können damit seit Juli 2022 Pflanzkohle nach der EU-Verordnung 2019/1009 als EU-Düngeprodukt zulassen und diese in der EU und damit auch in Deutschland vermarkten. Die Palette der möglichen Ausgangssubstrate für die Herstellung solcher Produkte hat sich durch diese Regelung deutlich erweitert.

5.2 Pflanzkohle in der Tierfütterung

Die Verordnung (EG) Nr. 68/2013³⁵ führt im Verzeichnis der Einzelfuttermittel „Pflanzliche Kohle [Holzkohle]“, definiert als „Erzeugnis, das durch Verkohlung von Pflanzenmasse gewonnen wird“. Richtlinie 2002/32/EG³⁶ legt erlaubte Höchstwerte für eine Vielzahl von Stoffen u.a. Schwermetalle und organische Chlorverbindungen für Futtermittel fest. Grenzwerte für PAK existieren bisher nicht. Nach Verordnung (EG) Nr. 396/2005³⁷ müssen außerdem Grenzen für eine Belastung mit Pestiziden

³³ Drucksache 19/19087 vom 11.05.2020

³⁴ Verordnung (EU) 2019/515 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. März 2019 über die gegenseitige Anerkennung von Waren, die in einem anderen Mitgliedstaat rechtmäßig in Verkehr gebracht worden sind und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 764/2008

³⁵ Verordnung (EU) Nr. 68/2013 Der Kommission vom 16. Januar 2013 zum Katalog der Einzelfuttermittel

³⁶ Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Mai 2002 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung

³⁷ Verordnung (EG) Nr. 396/2005 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Februar 2005 über Höchstgehalte an Pestizidrückständen in oder auf Lebens- und Futtermitteln pflanzlichen und tierischen Ursprungs und zur Änderung der Richtlinie 91/414/EWG des Rates

eingehalten werden. Futtermittelhersteller sind für die Futtermittelsicherheit verantwortlich. Pflanzenkohle, die als Futtermittel vertrieben wird, muss diese Grenzwerte einhalten.

5.3 Pflanzenkohle im Ökolandbau

Anfang 2020 wurde Pflanzenkohle mit den Durchführungsvorschriften³⁸ zur EU-Öko-Verordnung im Ökolandbau zur Bodenverbesserung zugelassen. Als Ausgangssubstrat sind nur pflanzliche Stoffe erlaubt, die nur unbehandelt oder mit definierten im Ökolandbau zugelassenen Stoffen verwendet werden dürfen. Eingehalten werden musste ein Höchstwert von 4 mg PAK pro kg Trockenmasse. Seit dem 16. Juli 2022 gelten laut aktualisierter Durchführungsverordnung³⁹ die einschlägigen Beschränkungen des Gehalts an Kontaminanten gemäß der oben erwähnten EU-Verordnung für Düngemittel. Die Anwendung als Tierfutter ist nicht gestattet.

Der Demeter-Verband lässt Pflanzenkohle seit Januar 2022 als organischen Dünger und Mulchmaterial zu. Zusätzlich zu den EU-Vorgaben müssen die strengeren Schwermetallgrenzwerte nach dem Standard EBC-AgroBio eingehalten werden.

In der Betriebsmittelliste des FiBL für den ökologischen Landbau⁴⁰ sind 14 Pflanzenkohleprodukte aufgelistet, die für den ökologischen Landbau zugelassen sind. Dabei handelt es sich vor allem um Düngezusätze, Gülle- und Mistzusätze, Zusätze zur Biogasfermentation, Substratkomponenten, Organische Substratzuschlagstoffe und Einstreumaterial für Ställe.

5.4 Beispiele anderer europäischer Länder

5.4.1 Schweiz

Die Schweiz war das erste europäische Land, welches die Zulassung von Pflanzenkohle für den Einsatz in der Landwirtschaft klar geregelt hat (Schmidt et al. 2021a). Es gelten Vorgaben hinsichtlich Qualität der Pflanzenkohle, Schadstoffgrenzwerten sowie Herstellung und Anwendung (ebd.). Im Jahr 2011 vorläufig zugelassen, wurde Pflanzenkohle als Bodenverbesserungsmittel gemäß Schweizer Düngerverordnung im Jahr 2016 ordentlich zugelassen. Voraussetzung ist eine Bewilligung durch das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW). Laut dem Formular „Voraussetzungen und Vorschriften für die Bewilligung von Biokohle“ ist nur holzige Biomasse als Ausgangsmaterial für die Pyrolyse erlaubt und es gelten Auflagen zu Herstellung, Qualität, Abgabe und Ausbringung. So dürfen die Schwermetallgehalte die Schweizer Grenzwerte für Recyclingdünger und die Schadstoffgehalte an PAK, Dioxinen und Furanen die Richtwerte für Kompost und Gärgut nicht überschreiten. Die Pflanzenkohle muss gemäß den Richtlinien des EBC (European Biochar Certificate) zertifiziert sein und der Qualität Klasse EBC-AgroBio entsprechen.

³⁸ Durchführungsverordnung (EU) 2019/2164 der Kommission vom 17. Dezember 2019 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 889/2008 mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle.

³⁹ Durchführungsverordnung (EU) 2021/1165 der Kommission vom 15. Juli 2021 über die Zulassung bestimmter Erzeugnisse und Stoffe zur Verwendung in der ökologischen/biologischen Produktion und zur Erstellung entsprechender Verzeichnisse, ABl. Nr. L 253/13 vom 19.07.2021

⁴⁰ <https://www.betriebsmittelliste.de/bml-startseite.html>

Für Pflanzkohle als Einzelfuttermittel gelten in der Schweiz die Anforderungen gemäß der Schweizer Futtermittel-Verordnung (FMV) und der Futtermittelbuch-Verordnung (FMBV). Unter anderem sind Höchstgehalte für unerwünschte Stoffe wie Schwermetalle oder Dioxine festgelegt. Wer Pflanzkohle als Futtermittel in Verkehr bringt, muss sich bei der amtlichen Futtermittelkontrolle zur Registrierung anmelden und die Qualität des Futtermittels in Eigenverantwortung sicherstellen. In der Betriebsmittelliste 2022 für den biologischen Landbau⁴¹ ist „Futterkohle“ verschiedener Hersteller gelistet.

5.4.2 Österreich

Österreich hat am 18.10.2018 mit einem Erlass den Einsatz von Pflanzkohle als Bodenhilfsstoff und Pflanzenhilfsmittel im Biolandbau zugelassen⁴². Dies geschah in der Voraussicht, dass dies auch auf EU-Ebene absehbar geregelt würde. Demnach durfte Pflanzkohle nur als Zusatz zu Wirtschaftsdünger und Kompost ausgebracht werden. Für betriebsfremde Pflanzkohle war eine Zertifizierung nach EBC-Premium (jetzt EBC-AgroBio) und eine Zulassung nach dem Düngemittelrecht notwendig. Für Pflanzkohle aus eigener Produktion gab es konkrete Bedingungen (u.a. nur pflanzliches Material aus der betriebseigenen Produktion inklusive Holz als Ausgangsmaterial). Die ÖNORM S 2211 (Pflanzkohle – Ausgangsmaterialien, Qualitätsanforderungen und Untersuchungsmethoden) von 2016 spezifizierte Vorgaben u.a. für maximale Schadstoffgehalte.

⁴¹ <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1032-hilfsstoffliste.pdf>

⁴² Runderlass vom 18. Oktober 2018 des Bundesministeriums für Arbeit, Soziales, Gesundheit und Konsumentenschutz

6 Zertifizierung im Bereich Pflanzenkohle

6.1 International Biochar Initiative (IBI)

Auf internationaler Ebene möchte die im Jahr 2006 gegründete *International Biochar Initiative (IBI)*⁴³, in dessen Vorstand und wissenschaftlichem Ausschuss auch Forschende aus Deutschland beteiligt sind, die Zusammenarbeit von Akteuren im Bereich Pflanzenkohle fördern und Pflanzenkohlesysteme entwickeln, die guter Praxis sowie ökologischen und ethischen Standards entsprechen, und sicher und wirtschaftlich tragfähig sind. Ziel ist, dass in 50 Jahren auf globaler Ebene eine Milliarde Tonnen Pflanzenkohle pro Jahr hergestellt werden.

Im Jahr 2013 wurde das *IBI Biochar Certification Program* eingeführt. Pflanzenkohle, die nach den *IBI Biochar Standards* zertifiziert ist, kann das entsprechende Label erhalten. Hersteller von Pflanzenkohle sollen damit darlegen können, dass ihr Produkt bestimmten Qualitätsstandards entspricht. Diese Standards betreffen chemisch-physikalische Eigenschaften einschließlich des Schadstoffgehalts für Pflanzenkohle, die in den Boden eingebracht wird. Die aktuelle Version 2.1 der *IBI Biochar Standards* wurde im November 2015 publiziert. Aktuell können ausschließlich Hersteller aus den USA und Kanada teilnehmen; eine schrittweise Ausdehnung auch auf andere Länder ist vorgesehen.

6.2 Das Europäische Pflanzenkohle Zertifikat (EBC)

Auf Europäischer Ebene wurde im Jahr 2012 das Europäische Pflanzenkohle-Zertifikat (EBC, *European Biochar Certification*)⁴⁴ entwickelt. EBC ist ein freiwilliger Industriestandard. Ziel ist, durch Mindeststandards für die chemische Zusammensetzung und Produktion eine gleichbleibende Qualität von Pflanzenkohle zu gewährleisten. Relevante nationale und internationale Verordnungen werden dabei berücksichtigt. Für Anwendende von Pflanzenkohle und Produkten auf Basis von Pflanzenkohle soll eine transparente und nachvollziehbare Kontrolle und Qualitätsgarantie ermöglicht werden. Die EBC-Richtlinien sind Grundlage für die Zertifizierung von Pflanzenkohle in Europa und weltweit. Sie werden regelmäßig an neue wissenschaftliche Erkenntnisse, technische Entwicklungen und Einsatzbereiche von Pflanzenkohle angepasst. Am 8. Dezember 2022 wurde die aktuellste Version 10.2 veröffentlicht (European Biochar Certification (EBC) 2022).

Der EBC-Standard wurde vom Ithaka Institut entwickelt. Seit dem 25. Oktober 2021 hat die vom Ithaka Institut, der *EASY-CERT group*⁴⁵ und dem *European Biochar Industrie Consortium (EBI)* (siehe auch Kapitel 7.1) gegründete *Carbon Standards International AG*⁴⁶ das operative Geschäft rund um das European Biochar Certificate übernommen.

Die EBC-Richtlinien unterscheiden sechs Zertifizierungsklassen, die Aussagen über die Zulässigkeit von Pflanzenkohle für einen bestimmten Zweck in Bezug auf geltende Gesetze, Vorschriften und relevante Industrienormen treffen:

⁴³ <https://biochar-international.org/>

⁴⁴ <https://www.european-biochar.org/de/>

⁴⁵ Inspektions- und Zertifizierungsdienstleistungen für Landwirtschaftsbetriebe und Betriebe in Aquakultur und Fischerei sowie Unternehmen im Bereich Verarbeitung und Handel (<https://www.easy-cert-group.com/de/>)

⁴⁶ <https://www.carbon-standards.com/de/home>

- **EBC-Rohstoff** definiert, was gemäß EBC als Pflanzkohle angesehen werden kann. Dies beinhaltet physikalische und chemische Mindeststandards einschließlich der Einhaltung der EU-REACH-Verordnung⁴⁷. Alle anderen Zertifizierungsklassen müssen mindestens die Standards für EBC-Rohstoff erfüllen.
- **EBC-Gebrauchsmaterial** ist für Pflanzkohle bestimmt, die in Produkten verwendet wird, die in direkten Hautkontakt mit Verbrauchern oder mit Lebensmitteln kommen können. Beispiele wären Kaffeebecher, Computergehäuse, Teppiche, Textilien, Blumentöpfe oder Wasserrohre. Medizin- und Gesundheitsprodukte oder Lebensmittel sind ausgeschlossen. Die Pflanzkohle muss so in den Verbraucherprodukten enthalten sein, dass bei der Verwendung des Produkts kein Kohlestaub freigesetzt wird.
- **EBC-Urban** bezeichnet Pflanzkohle, die – außerhalb der Landwirtschaft – z. B. bei der Baumbepflanzung, der Parkpflege und der Regenwasserableitung und -filterung eingesetzt wird. Die Standards für diese Zertifizierungsklasse berücksichtigen die Hauptrisiken für diese Einsatzfelder, nämlich Verunreinigung des Grund- und Oberflächenwassers und die Arbeitssicherheit. EBC-Urban kann auch für die Sanierung von kontaminierten Böden, Sedimenten oder Grundwasser, für die Produktion von Zierpflanzen und für Baumschulen verwendet werden.
- Mit **EBC-Agro** und **EBC-AgroBio** zertifizierte Pflanzkohle erfüllt alle Anforderungen der neuen EU-Düngemittelverordnung (siehe Kapitel 5.1). Das EBC-AgroBio Zertifikat erfüllt zusätzlich alle Anforderungen der Verordnung der EU-Kommission über den ökologischen Landbau und verlangt strengere Grenzwerte. EBC-Agro und EBC-AgroBio deckt ebenfalls die Anforderungen von EBC-Urban ab.
- **EBC-Futter** richtet sich nach Anforderungen des EU Futtermittelrechts. **EBC-FutterPlus** enthält zusätzlich Grenzwerte für PAK-16. Zusätzlich zur EBC-Zertifizierung muss ein Hersteller von Pflanzkohle als Futtermittelhersteller gemäß den jeweiligen nationalen Anforderungen zugelassen sein.

Erlaubte Ausgangsstoffe sind auf der EBC-Positivliste (verkürzte Darstellung siehe Tabelle 2) verzeichnet und dürfen einzeln oder gemischt zur Herstellung von EBC-Pflanzkohle verwendet werden. Für jede Zertifizierungsklasse gelten allerdings bestimmte Einschränkungen.

Im Zuge der Pyrolyse müssen Abwärme oder die flüssigen und gasförmigen Pyrolyseprodukte genutzt werden. National festgelegte Emissionsgrenzwerte müssen eingehalten und Arbeitsschutzstandards gewährleistet sein.

Zentrale Parameter für die Zertifizierung betreffen die Deklaration von Hauptinhaltsstoffen wie Gesamt-C, organischer Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff (O), Schwefel und Asche sowie weiterer Nährstoffe (Phosphor, Kalium, Magnesium, Calcium, Eisen). Das H/C_{org}-Verhältnis muss kleiner als 0,7 (für Futterkohle kleiner 0,4) und das O/C_{org}-Verhältnis kleiner als 0,4 sein. Angegeben werden müssen physikalische Parameter wie Wassergehalt, Wasserhaltevermögen, Trockensubstanz, Schüttdichte, pH-Wert, Salzgehalt und elektrische Leitfähigkeit des Feststoffes. Es gelten Grenzwerte für bestimmte Schwermetalle und organische Schadstoffe (Dioxine (PCDD/F), PCB, PAK) die sich je nach Zertifizierungsklasse unterscheiden können. Um dem Vorsorgeprinzip gerecht zu werden, werden für

⁴⁷ Verordnung (EG) Nr. 1907/2006; REACH steht für *Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals* (Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien)

EBC-Urban und EBC-Gebrauchsmaterial die gleichen Grenzwerte verlangt wie für EBC-Agro⁴⁸. Die Grenzwerte sind teilweise strenger als durch das europäische Dünge- oder Futtermittelrecht vorgegeben. So gelten z. B. zusätzliche Grenzwerte für als krebserregend eingestufte PAK; für die Messung ist eine Extraktion mit Toluol vorgegeben.

Für Details wird auf die aktuelle EBC-Richtlinie verwiesen (European Biochar Certification (EBC) 2022).

6.3 Zertifizierung von Kohlenstoffsenken

6.3.1 EBC-Zertifizierung

Seit 2020 können sich nach EBC zertifizierte Produzenten von Pflanzenkohle, die in landwirtschaftliche Substrate wie Futter, Kompost, Gülle und Dünger oder in dauerhafte Materialien wie Beton, Harze oder Kunststoffe eingemischt wird, das Senkenpotential der hergestellten Pflanzenkohle zertifizieren lassen. Details beschreibt die aktuelle Version der „Richtlinien zur Zertifizierung des C-Senken Potentials von Pflanzenkohle“ (European Biochar Certification (EBC) 2020).

Demnach wird nach dem Einbringen von Pflanzenkohle in landwirtschaftlich genutzte Böden mit jährlichen Kohlenstoffverlusten von durchschnittlich 0,3 % pro Jahr kalkuliert, was äußerst konservativ geschätzt ist (vergleiche auch Ausführungen unter Kapitel 3.4.1). Wird Pflanzenkohle in Baumaterialien oder als Additiv in Asphalt und Kunststoffen eingesetzt, wird davon ausgegangen, dass die Senke so lange erhalten bleibt, wie das Material an sich Bestand hat.

Für eine Verpackungseinheit an Pflanzenkohle wird das Senken-Potenzial berechnet, also der in der Pflanzenkohle enthaltene Kohlenstoff abzüglich direkter oder indirekter THG-Emissionen, die im Zuge von Produktion und Verwendung entstehen. So werden THG-Emissionen aus Anbau und Ernte der Biomasse, Transport, Zerkleinerung, Lagerung, Pyrolyse, Pyrogasverbrennung, Nachbehandlung und Boden- oder Materialeinbringung bei der Bilanzierung berücksichtigt. Teilweise wird dabei mit Sicherheitsmargen kalkuliert, um den Erhebungsaufwand handhabbar zu halten. Je nach Biomassekategorie, die als Ausgangsstoff verwendet wird, wird bei der Berechnung von THG-Emissionen bei der Gewinnung unterschiedlich vorgegangen (siehe Box).

Einstufung der Ausgangsbiomasse für die C-Senken-Zertifizierung des EBC:

Je nach Ursprung und Art der Biomasse werden sechs Biomassekategorien unterschieden (European Biochar Certification (EBC) 2020):

1. Landwirtschaftliche Biomassen
2. Organische Reststoffe aus der Lebensmittelverarbeitung
3. Holz aus Landschaftspflege, Kurzumtriebsplantagen, Ackerforstwirtschaft, Waldgärten, Feldrainen und urbanen Flächen
4. Biomasse aus der Waldbewirtschaftung
5. Holzabfälle
6. Sonstige biogene Reststoffe

⁴⁸ Ausnahme: bei den PAK werden für EBC-Urban und EBC-Gebrauchsmaterial nur für die krebserregenden PAK Grenzwerte definiert. PAK-16 müssen aber zwecks Qualitätskontrolle für alle Zertifizierungsklassen an *Carbon Standards International* gemeldet werden.

Für diese Kategorien gelten unterschiedliche Annahmen bezüglich der CO₂e-Abzüge für deren Produktion. So werden bei landwirtschaftlicher Biomasse der Aufwand für die Bereitstellung der Biomasse berücksichtigt (z. B. Düngung, Treibstoff). Bei organischen Reststoffen aus der Lebensmittelverarbeitung fallen nur die Emissionen des Transports vom Ort der Lebensmittelverarbeitung zur Pyrolyseanlage an.

Im Fall von Holzentnahme aus Wäldern soll die jährlich entnommene Menge nicht größer sein als der jährliche Zuwachs⁴⁹. Empfohlen werden hierfür Flächeneinheiten von 100 ha. Allerdings wird der regionale Nachwuchs an Wald bisher i. d. R. für deutlich größere Flächen über Durchschnittswerte errechnet. EBC orientiert sich an der LULUCF-Verordnung der EU, die alles Holz aus Wäldern, deren Nachwuchs den Entzug nachweislich übertrifft, als „klimaneutral“ ansieht, und lässt solches Holz als „C-neutralen“ Input für die EBC Zertifizierung des Senken Potentials zu⁵⁰. EBC kritisiert allerdings, dass so z. B. ein sich auf natürliche Weise verdichtender Bergwald einen Kahlschlag im besser zugänglichen Tal kompensieren darf. Grundsätzlich hält EBC es zudem für effizienter, Waldholz primär vor allem in langlebigen Baustoffen zu nutzen, anstatt durch Pyrolyse. Der EBC-Standard soll in Bezug zur Nutzung von Waldholz in den kommenden Jahren angepasst werden und die technischen Möglichkeiten und politischen Entwicklungen berücksichtigen. Holzabfälle wiederum werden als „C-neutral“ definiert, auch wenn streng genommen auch diese aus nachhaltiger Forstwirtschaft stammen sollten; allerdings ist eine Rückverfolgbarkeit meist nicht möglich.

Falls im Zuge der Pyrolyse überschüssige thermische oder elektrische Energie oder Pyrolyseöle entstehen, so wird dies nicht zertifiziert oder einberechnet, aber im Zertifikat als Zusatzinformation mit angegeben.

Eine sichere Kohlenstoffsенке ist erst gegeben, wenn *„Pflanzenkohle über die Einmischung in das Futter von Nutztieren, als Stalleinstreu, als Kompostzusatz oder als Teil ähnlicher Substrate schließlich in den Boden gelangt oder wenn sie zum Bestandteil von Beton oder ähnlichen, nicht brennbaren Verbundmaterialien wird“* (European Biochar Certification (EBC) 2020). Denn bis zu diesem Schritt kann es zu weiteren THG-Emissionen kommen (z. B. durch den Transport der Kohle) oder die Pflanzenkohle könnte – absichtlich (z. B. als Briketts) oder unabsichtlich – verbrennen. Akkreditierte C-Senken Händler müssen ein Tracking-System vorweisen, mit dem der Weg der Pflanzenkohle bis zum Einsatz in der Landwirtschaft oder der Verwendung in (Bau-)Materialien verfolgt wird und sämtliche weitere Kohlenstoffverluste berücksichtigt. Erst auf diese Weise kann ein vollwertiges C-Senken Zertifikat erzeugt werden, das dann auch interessierte Endkunden kaufen können, um freiwillig THG-Emissionen zu kompensieren. Ein Verkauf von C-Senken-Zertifikaten erzeugt damit Einnahmen zusätzlich zum Gebrauchswert der Pflanzenkohle und im Rahmen der Pyrolyse eventuell erzeugtem Pyrolyseöls oder bereitgestellter Wärmeenergie.

Bisher wurde die *carbonfuture GmbH*⁵¹ als EBC C-Senken-Händler akkreditiert. Bei weiteren Unternehmen wurden bereits Voraudits zur Zertifizierung durchgeführt. Gegründet 2019 in Deutschland ist *carbonfuture* weltweit tätig und bezeichnet sich als *„Marktplatz und Plattform für hochwertige und wirkungsvolle Kohlenstoffsенken-Credits“*. Diese *„Credits“* werden z. B. Unternehmen angeboten, die auf diese Weise freiwillig in Kohlenstoffsенken investieren und damit werben können⁵². Bisher beschränken sich die angebotenen Senkenzertifikate auf Pflanzenkohle. Der Großteil

⁴⁹ Ausnahme: *„Werden bei der Neuanlage von Wäldern zunächst dichtere Bestände gepflanzt und diese im Maße des Aufwuchses nach und nach ausgelichtet, so gilt das so entnommene Holz als C-neutraler Input, da durch diese Maßnahme der Aufwuchs der verbleibenden Bäume beschleunigt wird und die Gesamtakkumulation an Kohlenstoff zunimmt.“*

⁵⁰ *Kann dies nicht durch die LULUCF-Berichterstattung oder regionale Gesetzgebung sichergestellt werden, wird alternativ auch eine Zertifizierung nach SFC (Forest Stewardship Council) oder PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes, Programm für die Anerkennung von Waldzertifizierungssystemen) akzeptiert.*

⁵¹ <https://www.carbonfuture.earth/de/start>

⁵² Zu Unternehmen, die bisher *„Carbonfutures“* erworben haben, gehören z. B. die Swiss Re und Microsoft.

der Einnahmen geht an Pflanzenkohlehersteller und Anwendende. Die zurzeit bei *carbonfuture* gehandelten *Credits* sind sozusagen „stillgelegt“ und auf der *carbonfuture* Plattform nicht weiter handelbar.

Bisher beschränkt sich der Handel mit Pflanzenkohle-basierten C-Senken-Zertifikaten auf kleine Mengen. Potenziell wäre global ein großer Markt vorhanden, wenn man annimmt, dass ein Teil der notwendigen Negativemissionen von Pflanzenkohle abgedeckt würde.

6.3.2 Weitere globale Standards zur Zertifizierung von Kohlenstoffsinken

Puro.earth wurde 2019 in Finnland gegründet und war der erste Anbieter von Zertifikaten für eine CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre über Pflanzenkohle.

Im August 2022 veröffentlichte VERRA, die den **Voluntary Carbon Standard** (VCS) verwalten, ein Verfahren zur Quantifizierung der Kohlenstoffsinke aus Produktion und Anwendung von Pflanzenkohle unter dem VCS (*VM0044 Methodology for Biochar Utilization in Soil and Non-Soil Applications, v1.0*⁵³). Aktuell beschränkt sich die unter diesem Standard verwendbare Biomasse auf Abfälle und neue Produktionsanlagen für Pflanzenkohle. Es sollen keine Biomasseströme verwendet werden, die bereits energetisch genutzt werden. Einschränkungen bestehen auch für die Transportentfernung für die verwendete Biomasse. Die Pflanzenkohle muss IBI-Kriterien oder den EBC-Standard einhalten. Bezüglich der Pyrolyse werden *high-tech* und *low-tech*-Ansätze unterschieden.

Carbon Standards International gab im Oktober 2022 mit **Global Artisan C-Sink** eine erste Version eines C-Senken-Standards für Pflanzenkohle, die „handwerklich“ (i.d.R. über Kon-Tikis) in kleinem Maßstab hergestellt wird, heraus (*Carbon Standards International 2022*). Der geografische Geltungsbereich des *Global Artisan C-Sink* ist auf Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen beschränkt und soll Produzierende von Pflanzenkohle erreichen, die bisher zu solchen Maßnahmen keinen Zugang hatten, und für diese Anreize schaffen bzw. zu einem höheren Einkommen führen. Die Leitlinien regeln die Kontrollverfahren für Rohstoffbeschaffung, Fachkunde der Personen, den Pyrolysevorgang und die Ausbringung. Überwachung und Registrierung erfolgt Smartphone-basiert. Erlaubte Substrate sind Rohstoffe aus dem eigenen landwirtschaftlichen Betrieb oder aus der Biomasseverarbeitung. Sie können auch aus dem Katastrophenschutz oder der Pflege von Brachflächen stammen. Die Nutzung von Waldholz ist nicht erlaubt, außer es handelt sich um Reststoffe aus einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung. Damit soll eine Übernutzung von Biomasse unterbunden werden.

6.3.3 Vorschläge zur Zertifizierung der Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre auf EU-Ebene

Am 30. November 2022 veröffentlichte die EU-Kommission einen Vorschlag für eine Verordnung, die einen EU-weiten Rahmen für die Zertifizierung von CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre⁵⁴ vorgeben soll.

Pflanzenkohle wird in diesem Papier nicht ausdrücklich genannt. Aus den begleitenden Dokumenten zur Folgeabschätzung geht jedoch hervor, dass Pflanzenkohle je nach Anwendung in die Kategorie „*carbon farming*“ fallen kann, oder auch im Rahmen einer Kohlenstoffspeicherung in Produkten oder der dauerhaften Speicherung in geologischen Formationen zertifiziert werden könnte.

⁵³ <https://verra.org/wp-content/uploads/2022/10/VM0044-Methodology-for-Biochar-v1.00.pdf>

⁵⁴ Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a Union certification framework for carbon removals (COM (2022) 672 final).

Hintergrund des Entwurfs ist, ein Geschäftsmodell zu ermöglichen, das Landbewirtschaftende für die Kohlenstoffbindung belohnt, und einen EU-Binnenmarkt für Abscheidung, Nutzung und Speicherung von Kohlenstoff durch innovative Technologien zu schaffen. Bis zum Jahr 2028 soll ein entsprechendes System entstehen. Zertifizierte Aktivitäten müssen die Netto-Wirkung ausweisen, das bedeutet, dass etwaige THG-Emissionen, die im Zuge der Senkenbereitstellung anfallen, berücksichtigt werden müssen. Die Aktivitäten sollen zusätzlich sein, d.h. über rechtliche Vorgaben hinausgehen und durch den Anreizeffekt der Zertifizierung entstehen, und sie sollen zumindest neutrale, wenn nicht positive Wirkungen auch auf andere Ziele wie z.B. den Schutz von Wasser und Biodiversität, Anpassung an den Klimawandel haben.

7 Produktionsmengen an Pflanzenkohle

7.1 Produktion von Pflanzenkohle in Europa

Das *European Biochar Industry Consortium* (EBI) wurde 2019 als Verein gegründet mit dem Ziel, die Europäische Pflanzenkohleindustrie weiter zu entwickeln und einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz zu leisten⁵⁵. Dies beinhaltet auch Steigerung des Bekanntheitsgrades von Pflanzenkohle und ein Hinarbeiten auf die Anpassung von gesetzlichen Regelungen zur Produktion und Nutzung von Pflanzenkohle.

Im *European Biochar Market Report 2021/2022* (Stand 2022) (European Biochar Industry (EBI) 2022) werden Informationen zur Anzahl an Anlagen zur Produktion von Pflanzenkohle und zu produzierten Mengen in Europa veröffentlicht. Einbezogen werden Anlagen, die EBC-Kohle produzieren bzw. die technisch in der Lage sind, Kohle in der Qualität, wie sie von EBC gefordert ist, herzustellen. Der Bericht berücksichtigt alle Anlagen mit einer jährlichen Produktionsmenge ab 200 t Pflanzenkohle. Kleinere Anlagen sind ab einer Produktionsmenge ab 100 t überwiegend eingeschlossen. Mikroanlagen mit Produktionsmengen unter 100 t sind nicht systematisch in den Bericht aufgenommen. Demnach unterliegt die Produktion von Pflanzenkohle einer hohen Dynamik mit deutlich steigenden Anlagenzahlen und Produktionskapazitäten:

- Es gibt mittlerweile mindestens sieben Unternehmen, die seit mehreren Jahren kommerzielle Anlagen betreiben. Zu beobachten ist ein Trend zu größeren Anlagen. Neben den etablierten Geräteherstellern kommen auch verstärkt neue Industrieunternehmen auf den Markt.
- Im Jahr 2021 waren dem Bericht zufolge europaweit über 100 Anlagen, die den oben genannten Kriterien entsprechen, in Betrieb; 80 % davon mit einer Produktionskapazität von > 200 t pro Jahr. Alleine im Jahr 2021 wurden 25 Anlagen neu in Betrieb genommen. Es wurde prognostiziert, dass im Jahr 2022 weitere 44 Anlagen in Betrieb gehen. Eine Vielzahl weiterer Projekte befinden sich in einem fortgeschrittenen Planungs- oder Genehmigungsprozess.
- Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate für die Produktion von Pflanzenkohle mit den berücksichtigten Anlagen lag von 2018 bis 2021 bei rund 50 %, im Schnitt der Jahre 2019 bis 2022 wurden 67 % erwartet⁵⁶. Die installierten Produktionskapazitäten lagen EU-weit im Jahr 2021 bei 35.000 Tonnen im Jahr 2021. Mehr als 60 % der Produktionskapazität in 2021 befand sich in Anlagen, die mehr als 500 Tonnen Pflanzenkohle pro Jahr produzierten. Im Jahr 2021 wurden rund 20.000 Tonnen Pflanzenkohle hergestellt. Für das Jahr 2022 wurde mit rund 40.000 Tonnen gerechnet; das entspricht rund 100.000 Tonnen CO₂e.

Die bis Ende 2022 erwarteten Produktionskapazitäten (65.000 Tonnen pro Jahr) in Europa verteilen sich wie folgt:

- Deutschland: 35 %
- Österreich und Schweiz: 18 %
- Skandinavien: 23 % (mit Schweden als dominantem Land)
- Andere: 24 %

⁵⁵ <https://www.biochar-industry.com/>

⁵⁶ Alleine für das Jahr 2022 wurde eine Wachstumsrate von 85 % angenommen.

Im Jahr 2018 war rund 50 % der gesamten Produktionskapazität EBC-zertifiziert. Für Ende 2022 wurde erwartet, dass fast 70 % entweder EBC-zertifiziert sind, der Zertifizierungsprozess läuft oder dieser geplant ist. Ein großer Anreiz für eine EBC-Zertifizierung scheint die im Jahr 2020 eingeführte zusätzliche C-Senken-Zertifizierung zu sein.

Der Bericht zieht folgende Schlussfolgerungen:

- Die-Produktionstechnologie ist weitgehend ausgereift. Es gibt mindestens zehn ernstzunehmende EU-Technologieanbieter, von denen mindestens fünf den Technologie-Reifegrad TRL8+⁵⁷ (Skala von 1 bis 9) erreichen.
- Mit dem EBC-Senkenzertifikat steht eine bewährte Methode zur CO₂-Bilanzierung und -Zertifizierung zur Verfügung
- Unter den industriellen Ansätzen für Negativemissionen ließe sich damit PyCCS kurzfristig am einfachsten auf signifikante Volumina skalieren.

7.2 Produktion von Pflanzenkohle in Deutschland

Deutschland ist das Land in Europa mit der größten Produktionsmenge von Pflanzenkohle (s.o.). Ende 2022 werden schätzungsweise rund 50 Anlagen in Betrieb sein⁵⁸ mit einer Produktionskapazität von knapp 23.000 Tonnen Pflanzenkohle.

Aktuell wird vor allem Landschaftspflegematerial (in Norddeutschland z. B. Holz aus der Pflege der Knicks) und Waldrestholz eingesetzt. Weitere Reststoffe werden bisher nur vereinzelt verwendet.

Das Interesse für das Potenzial von Pflanzenkohle als Bodenverbesserungsmittel und die Nachfrage nach kleinen Pyrolyseanlagen für landwirtschaftliche Betriebe, die auch eine Abwärmenutzung im Betrieb ermöglichen, steigt vor allem in Regionen, die aufgrund zunehmend geringer Niederschläge und teilweise Böden mit geringer Wasserhaltefähigkeit durch Wassermangel gefährdet sind. Landwirte und Landwirtinnen erwarten durch den Einsatz der Pflanzenkohle eine Erhöhung der Resilienz insbesondere in trockenen Jahren.

Laut EBC-Webseite gibt es in Deutschland aktuell 15 EBC-zertifizierte Unternehmen⁵⁹. Ganz überwiegend sind diese Produzenten (und nicht ausschließlich Vermarkter) von Pflanzenkohle; beispielhaft sollen hier Folgende genannt werden:

- Zu den großen Produzenten, die Pflanzenkohle für eine breite Anwendungspalette herstellen, gehört z. B. die Novocarbo GmbH⁶⁰.
- Die Circular Carbon GmbH⁶¹ spezialisiert sich beim Ausgangsmaterial auf Abfallstoffe. Sie begann im Jahr 2022 im Hamburger Hafen die Produktion von Pflanzenkohle in industriellem Maßstab auf der Basis von Kakaoschalen und plant weitere Anlagen sowohl in Anbaugebieten als auch in Verbraucherländern.

⁵⁷ *Technology Readiness Level*, Technik mit TRL8 bedeutet, dass ein qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich vorliegt.

⁵⁸ <https://database.negative-emissions.org/>

⁵⁹ www.european-biochar.org/de/companies; Abruf: 7.12. 2022

⁶⁰ <https://www.novocarbo.com/de/>

⁶¹ <https://circular-carbon.com/>

- Im Rahmen der kommunalen Abfallwirtschaft gibt es ebenfalls Pflanzkohlehersteller, z. B. AWN Abfallwirtschaftsgesellschaft des Neckar-Odenwald-Kreises mbH, Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg, Stadtwerke Groß-Gerau. Diese verwerten überwiegend städtischen Grünschnitt. Die Stadtwerke Darmstadt nahmen im Jahr 2022 eine große Pyrolyseanlage in Betrieb, die jährlich 4.000 Tonnen Holzigen Grünschnitt und aufgearbeiteten Bioabfall zu 1.000 Tonnen Pflanzkohle verarbeiten soll⁶².
- Einzelne EBC-zertifizierte Unternehmen konzentrieren sich auf Verarbeitung und Handel. So bezieht die Carbuna AG⁶³ Pflanzkohle aus unterschiedlichen Anlagentypen und Ausgangsmaterialien und arbeitet sie auf zu Produkten für den Einsatz in Tierhaltung, Ackerbau und Sonderkulturen. Produkte zur Verwendung bei der Stadtbegrünung und zunehmend für industrielle Zwecke kommen hinzu.

Für Pyrolyseanlagen selber sind, neben Kosten für den Bau und Betrieb der Anlage, der Substratpreis und der Verkaufspreis für die Pflanzkohle wichtige Stellschrauben für die Wirtschaftlichkeit. Hinzu kommt die Vermarktung überschüssiger Energie als Strom oder Wärme.

Ein Wärmenutzungskonzept sollte Bestandteil jeder Pyrolyseanlage sein. Die EBC-Zertifizierung verlangt die energetische Nutzung von mindestens 70 % der Abwärme. Alternativ können Pyrolyseöl und Pyrolysegase auch gespeichert und einer anderweitigen energetischen oder stofflichen Nutzung zugeführt werden (European Biochar Certification (EBC) 2022). Generell sollte mitbedacht werden, wie sich Pyrolyseanlagen sinnvoll in ein zukünftiges Energiesystem einbinden lassen. So kann durch Pyrolyse auch Prozesswärme von 100 oder mehr Grad bereitgestellt werden, die z. B. über Wärmepumpen nicht erzeugt werden kann. Je nachdem wie flexibel Anlagen geführt werden können, können diese auch wichtige Funktionen (Flexibilität, Speicherung, Regelleistungen) im Energiesystem zur Verfügung stellen. Gerade bei kommunalen Anlagen gäbe es interessante Entwicklungspotenziale bezüglich der energetischen Nutzung, indem z. B. bei geringerem Energiebedarf im Sommer aus dem Pyrolysegas Pyrolyseöl abgeschieden wird, während im Winter das Pyrolysegas energetisch genutzt wird.

Auf die Chancen für die Landwirtschaft durch Biomassebereitstellung und ggf. auch Betreiben von Pyrolyseanlagen zur Herstellung von Pflanzkohle und deren Vermarktung gehen Schmidt et al. (2021a) ein.

⁶² <https://www.fr.de/rhein-main/darmstadt/pilotprojekt-in-darms-tadt-pflanzkohle-aus-g-ruensch-nitt-91709420.html>

⁶³ www.carbuna.com

8 Pflanzenkohle in der öffentlichen Wahrnehmung in Deutschland: Beispiele für aktuelle Forschung und Stellungnahmen

Pflanzenkohle als Konzept für Negativemissionen ist in der Öffentlichkeit noch wenig bekannt, und auch das Wissen in Verwaltungen und Verbänden zum Thema Pflanzenkohle ist noch sehr begrenzt. Im Koalitionsvertrag der Bundesregierung wird Pflanzenkohle nicht erwähnt⁶⁴. Weder in der nationalen Bioökonomiestrategie noch im Eckpunktepapier zur Biomassestrategie wird Pflanzenkohle als Stichwort benannt. In Szenarien, die sich mit Negativemissionen befassen, wurde Pflanzenkohle häufig bisher nicht berücksichtigt. Allerdings lassen die Wachstumszahlen zum Bau von Anlagen zur Produktion von Pflanzenkohle der letzten Jahre (siehe Kapitel 7) erwarten, dass das Thema zukünftig auch stärker auf die politische Agenda kommen wird.

8.1 Beispiele für Pflanzenkohle in der Forschung

Wie die wachsende Zahl an wissenschaftlichen Publikationen (siehe Kapitel 1.2.1) zeigt, ist das steigende Forschungsinteresse ungebrochen. In Deutschland gibt es eine Reihe an Forschungsvorhaben und Veröffentlichungen zu Pflanzenkohle unter Beteiligung diverser Universitäten, Hochschulen und Forschungsanstalten (Beispiele für laufende Projekte zur Anwendung von Pflanzenkohle in Böden siehe Box).

Laufende Pilotprojekte zur Anwendung von Pflanzenkohle in Böden

- **Nutzungspotenziale von Pflanzenkohle und Terra Preta in der Bayerischen Landwirtschaft – Beitrag zu Klimaschutz und Klimaanpassung (Kurztitel: TerraBayt)⁶⁵**, koordiniert von der Technischen Universität München (TUM), Laufzeit: 01/2022 - 12/2024. Mittels Feldversuchen auf Acker- und Grünland sowie im Obstbau sollen die Potenziale von Pflanzenkohle zur Kohlenstoffbindung und THG-Minderung, zur Bodenverbesserung und Ertragssteigerung sowie als Anpassungsstrategie an den Klimawandel ermittelt und Anwendungsempfehlungen für den effizienten Einsatz von Pflanzenkohle in der bayerischen Landwirtschaft sowie Empfehlungen für die Politik und die Verwaltung erarbeitet werden.
- **Interkommunale Anwendung der Pyrolysetechnologie mit Biomasseabfällen als Ausgangsstoff zur CO₂-negativen Energiegewinnung und Bodenverbesserung (Interpyro)⁶⁶**: In einem Konsortium u.a. aus der RWK Sachsen-Anhalt, der Hochschule Anhalt, zwei Fraunhofer-Instituten und Gemeinden sollen in einer interkommunale Zusammenarbeit auf Pyrolyse basierende Wertschöpfungsketten und Akteure erschlossen werden. Konkretes Ziel dieses Projekts ist eine Prozesskettenanalyse von der benötigten Biomasse bis zur Anwendung der Pflanzenkohle sowie eine Konzepterstellung für eine oder mehrere potenzielle Pyrolyseanlagen in der Region. Speziell die bodenverbessernden Effekte der Pflanzenkohle werden auf landwirtschaftlichen und städtischen Flächen erprobt. Dazu werden rechtliche Fragestellungen, die Akzeptanz in der Bevölkerung und die Wirtschaftlichkeit beleuchtet.
- **Das Forschungsvorhaben „thebiocharstory⁶⁷“** (Neue regionale Konzepte zur standardisierten Beladung, Logistik, Herstellung und Verbreitung von Pflanzenkohle für den wirksamen Einsatz zur Bodenverbesserung und C-Sequestrierung) (10/2022 - 01/2025) der Technischen Universität Dresden im Rahmen des BMBF-Förderprogramms "Neue Produkte für die Bioökonomie" untersucht technische und biochemische Aspekte für die Herstellung und anwendungsorientierte Beladung von Pflanzenkohle mit Brennesseljauche in Labor- und Feldversuchen. Forschungsaspekte sind u.a. Ertragssteigerung, Pflanzengesundheit und Bodenverbesserung.

⁶⁴ Im Koalitionsvertrag der Landesregierung von Baden-Württemberg von 2021 taucht das Stichwort „Pflanzenkohle“ auf („...landeseigene Flächen werden mit Humusaufbau und der Anwendung von Pflanzenkohle als Kohlenstoffspeicher genutzt“).

⁶⁵ <https://www.oekolandbau.wzw.tum.de/forschung/projekte/terrabayt/>

⁶⁶ <https://lw50.hs-offenburg.de/> und <https://interpyro.de/>

⁶⁷ <https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/iak/forschung/forschungsprojekte/thebiocharstory>

- **Das Projekt Landwirtschaft 5.0**, koordiniert von der Fachhochschule Offenburg, erprobt unter anderem die Herstellung und Anwendung von Pflanzkohle zur Ertragssteigerung, Humusbildung und Kohlenstoff-Einlagerung auf landwirtschaftlichen Betrieben ⁶⁸.
- **Das Projekt CarbonStoreAge**⁶⁹ startete im Frühjahr 2022 an der FU Berlin und soll das Potential für die Anwendung von Pflanzkohle zur Speicherung von Kohlenstoff in Stadtböden prüfen, u.a. als Zuschlagstoff in Baums substrat für Straßenbaumpflanzungen oder auf ehemaligen Rieselfeldern. Untersucht werden auch die Nutzungsmöglichkeiten von Rest- und Energieholz für die Produktion von Pflanzkohle und Wärme.
- **AgroBaLa (Agroforstliche Kreislaufwirtschaft als Basis für eine strukturreiche und klimaresiliente Landwirtschaft mit hohem Wertschöpfungspotenzial)**⁷⁰ (01/2021 - 12/2023) ist ein Projekt der Initiative Land-Innovation-Lausitz. Erprobt werden soll die Agroforstwirtschaft als innovatives und klimaangepasste Anbausystem sowie damit verbundene Wertschöpfungspotenziale. Dies beinhaltet die energetische Verwertung von Agroforstholz mittels kleiner Pyrolyseanlagen und die Herstellung und Anwendung von Pflanzkohle.
- Im Projekt „**Pflanzkohle im Dynamischen Agroforst**“⁷¹ des *Naturefunds* wird seit 2018 auch mit verschiedenen Aufbringungsvarianten von Pflanzkohle, hergestellt aus lokalem Streuobstschnitt, auf einem Versuchsacker bei Wiesbaden gearbeitet.
- Im vom BMUV geförderte 10-jährigen Pilotprojekt „**Klimafarm – Ökonomisch und ökologisch tragfähige, moorbodenerhaltende Grünlandbewirtschaftung**“ sollten unter anderem Wertschöpfungsketten entwickelt werden, bei denen Pellets aus getrocknetem Mahdgut u.a. Rohstoff für Pflanzkohle sein sollen⁷².
- Das Projekt **PyMICCS (Pyrogenic carbon and carbonating minerals for enhanced plant growth and carbon capture and storage)**⁷³ (10/2022 - 10/2025; Projektleitung Universität Hamburg) widmet sich Synergien zwischen Pflanzkohle und beschleunigter Verwitterung. Im Labor, im Gewächshaus, auf dem Feld und letztlich in Ökosystemmodellen soll untersucht werden, wie man Pflanzkohle und die Aufbringung von Gesteinsmehl optimal miteinander kombinieren kann. Ziel ist es, die CO₂-Bindung sowie die Qualität landwirtschaftlicher Böden zu verbessern.

Am Thünen-Institut läuft seit Ende 2021 in der Stabstelle Klimaschutz ein 2-jähriges Projekt „Potenziale von Pflanzkohle als negative Emissionstechnologie“, in dem die genannten Potentiale, entsprechende Zertifizierungsmodelle, Ertragspotenziale von Agrargehölzen und Best-Practice-Beispiele für die Sequestrierung von Kohlenstoff und die Bodenverbesserung durch Pflanzkohle eruiert werden sollen.

Das Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, das bei der Bundesanstalt für Landwirtschaft (BLE) angesiedelt ist, stellt auf seiner Internetseite Pflanzkohle als Technologie vor, die dem Klima und dem Boden nützen und helfen kann, „die Landwirtschaft zukunftsfähiger zu machen“ (<https://www.praxis-agrar.de/pflanze/ackerbau/pflanzkohle>). Im März 2022 veröffentlichte die BLE eine Bekanntmachung über die Förderung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zur "Anwendung von Pflanzkohle für eine Landwirtschaft im Klimawandel". Geförderte Vorhaben sollen Potenziale und Auswirkungen des landwirtschaftlichen Pflanzkohleinsatzes bewerten, Konzepte für eine zielgerichtete Anwendung entwickeln und Handlungsempfehlungen für die Praxis erarbeiten. 21 Projektskizzen mit einem Fördervolumen von 30,4 Millionen Euro gingen auf diesen Aufruf hin ein.

⁶⁸ <https://fyi-landwirtschaft5.org/>

⁶⁹ <https://www.geo.fu-berlin.de/v/carbonstoreage>

⁷⁰ <https://agroforst-info.de/agrobala/>

⁷¹ https://www.naturefund.de/artikel/news/pflanzkohle_im_dynamischen_agroforst_ergebnisse_2020

⁷² <https://www.stiftungsland.de/was-wir-tun/klimaschutz/klimafarm/>

⁷³ <https://cdrterra.de/consortia/pymiccs>

8.2 Positionen zu Pflanzenkohle: Verbände und beispielhafte Stellungnahmen und eine einordnende Bewertung

Der Fachverband Pflanzenkohle (FVPK)⁷⁴ wurde in Deutschland im Jahr 2017 mit dem Ziel gegründet, die nachhaltige Produktion und Verwendung von Pflanzenkohle zu unterstützen und damit zum Klimaschutz beizutragen. Der Verband versteht sich als Partner für Wissenschaft, Praxis, technische Anlagenentwickler und Politik. Er engagiert sich für politische Rahmenbedingungen (z. B. Anpassung von Dünge- und Futtermittelrecht; Fördermaßnahmen), die Vermittlung zwischen Wissenschaft und Anwendung (u. a. durch jährliche Fachtagungen), Öffentlichkeitsarbeit und Qualitätsstandards für die Produktion von Pflanzenkohle.

Bei den landwirtschaftlichen Verbänden scheint Pflanzenkohle bisher kaum eine Rolle zu spielen. Es gibt vereinzelte Berichte in Zeitschriften zur Verwendung von Pflanzenkohle. Pflanzenkohle scheint jedoch noch ein Nischenthema.

Insbesondere bei Umweltverbänden gibt es teilweise Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft, während der Einsatz von *Terra Preta* im Hobbybereich eher positiv gesehen wird. Stellungnahmen zu Pflanzenkohle beziehen sich i. d. R. ausschließlich auf eine Bewertung der Verwendung in landwirtschaftlich genutzten Böden. Der Einsatz in Materialien oder im städtischen Bereich wird nicht thematisiert. Hauptkritikpunkte sind demnach das Beanspruchen von Biomasse (Flächenbedarf für die Produktion von Biomasse, Konkurrenz zu anderen stofflichen oder energetischen Verwendungsmöglichkeiten oder zum Humusaufbau), eine mögliche negative Beeinflussung des Bodenlebens und das Einbringen von Schadstoffen wie insbesondere PAK. Der Wissenschaftliche Beirat des Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V. (BUND) lehnt „aus Sicht einer nachhaltigen Stoffpolitik die Einbringung von unvermeidlich mit PAK kontaminierter Pyrolyse-Pflanzenkohle ab“ (Spangenberg et al. 2020). In einer aktuelleren Stellungnahme des BUND zur Anhörung des Eckpunktepapiers zur Novelle des Bodenschutzrechts ist zu Pflanzenkohle – nicht mehr ganz so pauschal ablehnend – zu lesen: „Zur Gewährleistung des Bodenschutzes sollten die Gehalte dieser Stoffgruppen [gemeint sind PAK, PCB und PCDD/F] in den Produkten engmaschig überwacht werden. Hierfür bedarf es einer Gesetzgebung für Inverkehrbringer, die durch strenge Anforderungen den stofflichen Bodenschutz berücksichtigt.“

Beste (2021) kritisiert den Einsatz von Pflanzenkohle im Boden vehement. Unter anderem wird betont, dass „tote Pflanzenkohle“ kein geeigneter Ausgangsstoff für eine hohe biologische Aktivität sei, die auf Humusauf- und -abbau angewiesen ist. Die Nährstoffimmobilisierung bei unbeladener Kohle wird ebenfalls als negativ wahrgenommen. Ausreichend empirische Belege zum Potenzial von Pflanzenkohle zur Eindämmung des Klimawandels seien nicht vorhanden. Die Bodenökologie würde von Techniken wie Fruchtfolgen mit vielfältiger tiefer Durchwurzelung, Permakultur, Agroforst, der Rückführung von organischer Substanz in Form von Festmist, Ernteresten, sowie Kompost deutlich besser gefördert. Schadstoffrisiken werden in der Veröffentlichung hervorgehoben, positive Wirkungen von Pflanzenkohle gäbe es nur wenige.

Ökoinstitut und ecologic kommen zu der Einschätzung, Pflanzenkohle nicht als „naturbasierte Negativemissionen“ einzustufen (Umweltbundesamt (UBA) 2022b). Als problematisch führen sie insbesondere mögliche negative Auswirkungen des Biomassebedarfs an, Veränderungen der Bodenmikrobiologie aufgrund eines geänderten pH-Wertes und dass die Pyrolyse externen

⁷⁴ <https://fachverbandpflanzenkohle.org/>

Energieinput verlange. Letzteres Argument erstaunt etwas, da bei der Pyrolyse die Energiebilanz positiv ist und Energie in Form von Wärme und Pyrolysegas frei wird.

Den oben zitierten Kritiken ist i.d.R. gemein, dass sie neueste Publikationen und Entwicklungen zu Wirkungen von Pflanzkohle nicht oder kaum einbeziehen. Der Trend, mit Düngemitteln „aufgeladene“ Pflanzkohle oder Pflanzkohle-basierte Düngemittel in geringeren Mengen und gezielt z. B. in der Wurzelzone aufzubringen, scheint nicht bekannt.

Dass für jegliches Material, das auf landwirtschaftlichen Flächen aufgebracht wird, strenge Grenzwerte bezüglich der Schadstoffbelastung gelten sollten, ist sicherlich unbestritten und muss sowohl für Mineraldünger, Kompost, Wirtschaftsdünger als auch Pflanzkohle gelten. Dass das europäische Düngemittelrecht mittlerweile Pyrolyseprodukte zulässt und hierfür Grenzwerte für Schadstoffe (inklusive PAK) setzt und dass eine EBC-Zertifizierung eine Kontrolle der Pflanzkohlequalität und insbesondere der Schadstoffe (mit strengeren Grenzwerten als das Europäische Dünge- und Futtermittelrecht) vorsieht, wird in den oben zitierten Publikationen allerdings nicht thematisiert.

Der Kritik, dass Pflanzkohle kein „lebender“ Humus ist, kann man insofern begegnen, dass Pflanzkohle nur eine zusätzliche Komponente beim Management landwirtschaftlicher Böden bietet und eine vielfältige humusmehrende Fruchtfolge, möglichst weitgehende Bodenbedeckung und das Einbringen von organischer Substanz durch ober- und unterirdische Pflanzenreste und organischem Dünger keinesfalls ersetzen soll und kann. Diese Optionen schließen sich nicht aus, sondern sollten sich möglichst ergänzen. So wird mittlerweile empfohlen, Pflanzkohle vermischt mit organischen Düngemitteln auszubringen (siehe Kapitel 4.2). Zudem hat Pflanzkohle das Potenzial, das Wurzelwachstum (eine entscheidende Komponente für den Humusaufbau) und auch die organische Substanz im Boden über die mit der Kohle eingebrachte Menge an Kohlenstoff zu erhöhen („negatives Priming“). Die mikrobielle Aktivität wird i.d.R. durch Pflanzkohle aktiviert (siehe Kapitel 0). Auch die Anreicherung der Agrarlandschaft mit holziger Biomasse (Agroforst, Hecken) lässt sich mit Pflanzkohle ideal kombinieren, indem Gehölzschnitt pyrolysiert wird.

Pflanzkohle ist zudem nicht per se ein fremder Stoff in Böden. Pyrogener, d.h. unter Einfluss von Feuer entstandener Kohlenstoff ist auch ohne die bewusste Aufbringung von Pflanzkohle in allen Böden vorhanden. Laut einem Review von Reisser et al. (2016) stellt pyrogener Kohlenstoff 13,7 % und damit einen nicht unwesentlichen Anteil des gesamten Bodenkohlenstoffs auf globaler Ebene (mit großen regionalen Unterschieden). Wie das in Pyrolyseanlagen hergestellte Produkt ist auch diese natürlich entstandene Pflanzkohle gekennzeichnet durch einen hohen Kohlenstoffgehalt mit einem hohen Anteil an aromatischen Stoffen und hoher Stabilität (ebd.).

Der Biomassebedarf ist eine kritisch zu betrachtende Komponente und ist im Rahmen einer umfassenden Biomassestrategie zu bewerten. Ungeregt wäre eine Skalierung der Pflanzkohleproduktion problematisch. Dies gilt allerdings auch für alle anderen Nutzungen von Biomasse. In allen Fällen muss eine Biomassenutzung so erfolgen, dass sowohl der Schutz der Biodiversität als auch der Erhalt natürlicher Senken gewährleistet ist und die unterschiedlichen Verwendungsmöglichkeiten gegeneinander abgewogen werden. Das Thema Biomasseherkunft und Biomassekonkurrenzen soll daher im folgenden Kapitel 9 vertieft werden.

9 Biomasseverfügbarkeit, Konkurrenzen und Biomasseherkunft für die Pflanzenkohleproduktion

Ein zentrales Thema in der Diskussion um eine Ausweitung der Pflanzenkohleproduktion ist die Verfügbarkeit von Biomasse und ihre Herkunft. Zwar ist Biomasse ein nachwachsender Rohstoff, es besteht jedoch eine zunehmende Konkurrenz um die Nutzung von Land und der darauf erzeugten Biomasse für unterschiedliche Verwendungszwecke.

Nach Einschätzung des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022) kann der Anspruch an Biomasse für die Herstellung von Pflanzenkohle, ebenso wie dies bei der Bioenergie der Fall ist, bei schlechter Implementierung zu Konflikten um Land, Wasser und Biomasse führen und damit negative Folgen u.a. für Biodiversität und Nahrungsmittelsicherheit nach sich ziehen. Nicht nachhaltige Biomasseentnahme kann außerdem Kohlenstoffvorräte beeinträchtigen. Die Autoren bezeichnen die Verfügbarkeit von nachhaltig erzeugter Biomasse als die größte Unsicherheit im Zusammenhang mit Pflanzenkohle als Technologie zur CO₂-Entnahme.

In den folgenden Unterkapiteln werden zuerst quantitative Hinweise zu Biomasseströmen und Entnahmemengen in Deutschland gegeben und am Beispiel Wald der Konflikt zwischen Biomasseentnahme und Erhalt von Kohlenstoffsenken angesprochen. Kapitel 9.2 benennt die Problematik der absehbar hohen Konkurrenz um Biomasse und leitet daraus die Notwendigkeit her, Biomasseströme besser zu lenken. In diesem Zusammenhang wird auch das Bemühen um eine Nationale Biomassestrategie erwähnt. Abschließend werden Informationen über für eine Pyrolyse geeigneten Reststoffen zusammengefasst. Im Rahmen dieses Vorhabens kann die Auseinandersetzung mit dem Thema Biomasseherkunft jedoch nur ansatzweise geschehen.

9.1 Exkurs: Biomasseentnahme und die Klimaziele für den LULUCF-Sektor in Deutschland

9.1.1 Biomasseströme in Deutschland

Im Rahmen des Monitorings der deutschen Bioökonomie zeigen Iost et al. (2020) Biomasseströme in Deutschland auf (siehe Abbildung 3). Demnach wurden im Jahr 2015 knapp 185 Mio. Tonnen Biomasse (Trockenmasse, TM) in Land- und Forstwirtschaft, Fischerei und Aquakultur erzeugt. Die landwirtschaftliche Produktion stellte mit rund 137 Mio. Tonnen die größte Menge. Zudem ergab sich ein Nettoimport von knapp 7 Mio. Tonnen. Es zeigt sich, dass in der Endverwendung die Futtermittel den weitaus größten Anteil einnehmen. Die Menge der hierfür verwendeten agrarischen Biomasse war mit rund 89 Mio. Tonnen mehr als vier Mal so hoch wie jene für die direkte Produktion von Nahrungsmitteln (knapp 22 Mio. Tonnen). Rund 48 Mio. Tonnen Biomasse (jeweils rund zur Hälfte aus forstlicher und landwirtschaftlicher Produktion) wurden energetisch verwertet. Die stoffliche Verwertung lag bei gut 38 Mio. Tonnen und stammte ganz überwiegend aus forstlicher Biomasse (in die Abfälle wie Altpapier und Reststoffe wie Altholz bereits integriert sind). Pflanzenkohle spielt in der Darstellung noch keine Rolle.

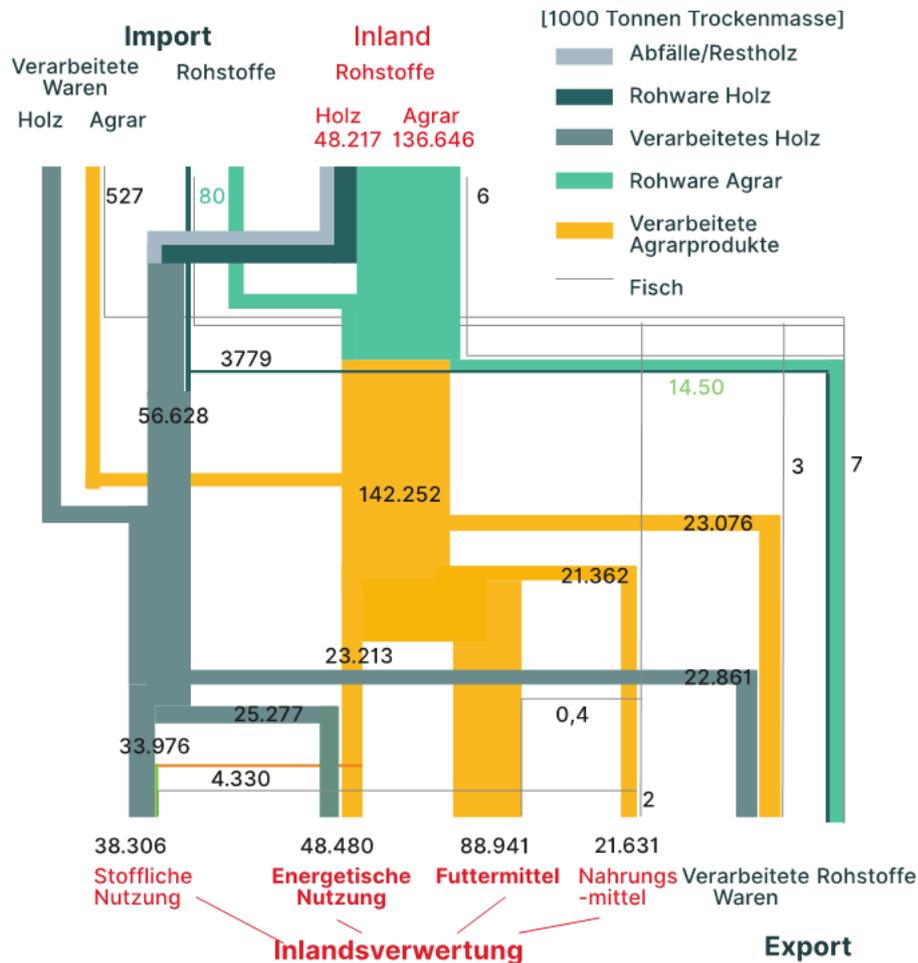


Abbildung 3: Aggregierter Stoffstrom der Bioökonomie in Deutschland 2015

Quelle: Darstellung von KIB.e.V. (<https://klimaschutz-im-bundestag.de/>), verändert nach Iost et al. (2020)

Die Produktion von nachwachsenden Rohstoffen auf landwirtschaftlichen Flächen bewegt sich aktuell auf ähnlichem Niveau wie im Jahr 2015 (laut der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe FNR wurden im Jahr 2021 hierfür gut 2,6 Mio. Hektar genutzt, 89 % davon für Energiepflanzen⁷⁵).

Der Holzeinschlag hingegen ist in den letzten Jahren gestiegen und erreichte im Jahr 2021 ein Rekordniveau von 83 Mio. m³. Der Schadholzeinschlag aufgrund von Insektenschäden, Trockenheit oder Sturmschäden hat insbesondere seit 2018 sehr stark zugenommen und stellte im Jahr 2021 mit 41 Mio. m³ etwa die Hälfte des Gesamtholzeinschlages⁷⁶. Laut der Waldgesamtrechnung entsprach die Entnahme bereits im Jahr 2020 95 % des gesamten Nettozuwachses. Zusätzliche unwiederbringliche Verluste z. B. durch Pflegemaßnahmen oder Brände führten dazu, dass der stehende Holzvorrat (mit Rinde) nicht mehr wie in den Vorjahren stetig größer wurde, sondern im Jahr 2020 abnahm (von 3.801 Mio. m³ auf 3.788 Mio. m³) (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2022, Tabelle 3: Physische Holzvorratsbilanz). Damit hat sich auch die Speicherung von Kohlenstoff im Wald (Biomasse und Boden) im Jahr 2020 um rund 1 Mio. Tonnen Kohlenstoff verringert. Im Jahr 2019 lag die Speicherleistung des Waldes, also der Zuwachs des Kohlenstoffvorrats, noch bei 12 Mio. Tonnen (ebd., Tabelle 9: Kohlenstoffbilanz des Waldökosystems).

⁷⁵ <https://basisdaten.fnr.de/land-und-forstwirtschaft/landwirtschaft>

⁷⁶ https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/04/PD22_170_41.html

9.1.2 Bedeutung der Kohlenstoffsенke Wald

Eine zusätzliche Holzentnahme aufgrund von erhöhter Nachfrage oder auch durch die erwähnten Kalamitäten beeinträchtigt damit die Kohlenstoffvorräte in der Waldbiomasse, die die größte Kohlenstoffsенke des Sektors LULUCF in Deutschland darstellt.

Insgesamt unterliegen Angaben zu den Emissionsmengen im LULUCF-Bereich großen Schwankungen; bestimmend sind dabei die Nettoemissionen aus dem Wald. So war der LULUCF-Sektor in den Jahren 2002 bis 2005 sowie 2007 insgesamt eine THG-Quelle insbesondere aufgrund hoher Holzentnahmen infolge von Kalamitäten. In den Folgejahren ergab sich rechnerisch wieder eine Senke, die aber seit dem Jahr 2012 wieder abnimmt (vgl. Nationaler Inventarbericht 2022 von Umweltbundesamt (UBA) 2022a). Im Jahr 2020 lagen die Nettoemissionen aus dem LULUCF-Sektor für Deutschland nach Berechnungen des Thünen-Instituts bei -11,3 Mio. Tonnen CO₂e⁷⁷. Emissionen insbesondere aus landwirtschaftlich genutzten organischen Böden wurden von den Kategorien Wald und Holzprodukte mehr als kompensiert⁷⁸. Der LULUCF-Sektor wirkte damit als Nettosenke für THG. Die Dürreschäden der letzten Jahre sind im aktuellen Inventarbericht, der Daten bis zum Jahr 2020 verarbeitet, noch nicht umfänglich berücksichtigt, und es ist daher zu erwarten, dass die Senkenleistung des Waldes zukünftig weiter abnimmt.

Dem KSG zufolge soll der Sektor LULUCF seine Senkenfunktion allerdings bis zum Jahr 2030 auf 25 Mio. Tonnen CO₂e steigern (siehe Kapitel 2.1). Dieser Wert wurde bisher nur im Zeitraum 1994 bis 1999 erreicht (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2022a), und es ist zu befürchten, dass die Emissionsziele für den Sektor LULUCF im KSG deutlich verfehlt werden.

Der Projektionsbericht 2021 der Bundesregierung⁷⁹, der die Entwicklung der THG-Emissionen für Deutschland prognostiziert, macht deutlich, dass sich der LULUCF-Sektor bereits im Jahr 2025 von einer THG-Senke zu einer THG-Quelle entwickelt haben könnte, mit Emissionen im Jahr 2030 von über 20 Mio. Tonnen CO₂e. Es wird im Bericht zwar darauf hingewiesen, dass die Angaben zu Emissionen im LULUCF-Bereich großen Unsicherheiten unterliegen und an einer besseren Datengrundlage gearbeitet wird. Die oben geschilderten Entwicklungen bezüglich der Abnahme des stehenden Baumbestandes, die zu erwartende weiter steigende Nachfrage nach Biomasse und die Klimarisiken, die den Wald ebenfalls bedrohen, stützen diese Befürchtungen allerdings.

Im Entwurf für ein Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) 2022) wird auf diese Entwicklung Bezug genommen: *„Auf Grund der durch die Klimakrise zunehmenden Trockenheit sowie der häufig einseitig auf Holzproduktion ausgerichteten Bewirtschaftung der Wälder ist diese Senkenleistung jedoch bedroht. Deshalb sollen Waldbestände hin zu mehr Artenreichtum und Resilienz umgebaut werden. Darüber hinaus sollen von 2023 bis 2030 jährlich 10.000 Hektar Wald neu entstehen.“*

Laut Wolf et al. (2020) sind in Deutschland allerdings nur sehr begrenzt Flächen für eine Ausweitung der forstlichen Nutzung verfügbar (Kurzumtriebsplantagen oder Agroforst auf weiterhin landwirtschaftlich genutzten Flächen sind hier nicht mit einbezogen). Ein sehr geringes Potenzial läge in der Kategorie „Unland und vegetationslose Flächen“ (z. B. Abbauland, ehemaliges Militärgelände

⁷⁷ <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/klima-und-luft/emissionsinventare-buchhaltung-fue-r-den-klimaschutz/standard-titel>

⁷⁸ Die oberirdische Waldbiomasse entsprach einer Senke von -29,3 Mio. t CO₂e., die mineralischen Waldböden -16,0 Mio. t CO₂e; mit -8,7. t CO₂e trugen Holzprodukte als Kohlenstoffspeicher bei.

⁷⁹ https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/projektionsbericht_2021_bf.pdf

und Abraumhalden). Eine Umnutzung zu forstwirtschaftlichen Flächen wäre allerdings mit sehr hohem Aufwand verbunden, und Tagebauflächen stehen erst nach ihrer Rekultivierung zur Verfügung.

CO₂-Speichersaldo bei der Waldholznutzung

Die Klimaneutralität der Verbrennung von Biomasse, insbesondere von Waldholz, wird seit einiger Zeit verstärkt hinterfragt (z. B. Fehrenbach et al. 2022; Hennenberg et al. 2021; Luick et al. 2021). Anders als bei fossilen Rohstoffen kann Biomasse in überschaubaren Zeiträumen zwar wieder nachwachsen. Zum Zeitpunkt der Verbrennung wird aber CO₂, welches in den vorherigen Jahrzehnten in Bäumen gebunden wurde, in die Atmosphäre entlassen und erhöht damit die THG-Konzentration. Erst in Jahrzehnten wird dieser CO₂-Ausstoß durch nachwachsenden Wald wieder ausgeglichen, und auch das nur unter der Voraussetzung, dass sich der Aufwuchs etabliert und nicht etwa Dürre oder einem Brand zum Opfer fällt. Ohne Holzernte würde der Kohlenstoff vorerst im Wald gebunden verbleiben. Andererseits können durch eine stoffliche oder auch energetische Verwendung fossile Stoffe ersetzt werden; bei einer stofflichen Verwendung oder der Produktion von Pflanzenkohle kommt auch eine längerfristige Speicherung von Kohlenstoff in den Produkten hinzu.

Fehrenbach et al. (2022) versuchen, anhand von Szenarien, diesen „CO₂-Speichersaldo“, der angibt, wie stark die mögliche CO₂-Speicherleistung des Waldes durch die Entnahme von einem Kubikmeter Holz verringert wird, zu quantifizieren (vgl. auch <https://co2-speichersaldo.de/de/index.html>). Bezieht man diesen Speichersaldo ein, können langlebige Holzprodukte wie Bauholz und Spanplatten weiterhin zu erheblichen THG-Minderungen führen, indem sie Kohlenstoff speichern und Produkte aus anderen Materialien substituieren. Eine primäre energetische Verwertung von Waldholz führt im Gegensatz dazu zu geringerer THG-Minderung und kann bei einem hohen CO₂-Speichersaldo auch erhöhte THG-Konzentrationen in der Atmosphäre ergeben (ebd.).

Ebenso argumentieren Luick et al. (2021): „Wenn die Veränderung der Senkenleistung auf der Waldfläche, die durch die Holzentnahme bedingt ist, in Ökobilanzen einbezogen wird, kann die Nutzung von Holzenergie gegenüber fossilen Brennstoffen zu einer THG-Minderung um 20 % beitragen, aber auch zusätzlich THG-Emissionen von 80 % und mehr verursachen“. Auch Bolte et al. (2021) betonen die große Bedeutung der Waldsenke und weisen darauf hin, dass ein Vorratsabbau, wie zum Beispiel bei intensiver energetischer Nutzung von Holz, dem Klima schadet, da die mittel- und langfristige Minderung der CO₂-Senke im Wald durch die Substitutionseffekte nicht mehr kompensiert werden kann.

Bisher wird der CO₂-Speichersaldo bei Annahmen zu THG-Minderungen durch die Verwendung von Biomasse allerdings im Regelwerk der EU nicht berücksichtigt. So geht die Erneuerbaren-Energien-Richtlinie der EU (*Renewable Energy Directive*; RED II⁸⁰) bei der Erzeugung von Wärme und Strom aus Holzackschnitzeln aus Stammholz von Standardwerten für eine THG-Minderung von über 80 % gegenüber fossilen Energieträgern aus (soweit die Transportdistanz nicht über 2.500 km beträgt); die Veränderung der Senkenleistung der Waldfläche durch eine Holzernte wird dabei nicht einbezogen.

Die Zusammenhänge und Dynamiken von Kohlenstoffsinken und -quellen im System Wald sind allerdings sehr komplex. Die Speicherung von Kohlenstoff in Wäldern ist abhängig vom Waldtyp, der Art der Bewirtschaftung und dem Vorgehen bei der Holzernte und variiert auch je nach geografischer Region und Umweltparametern des Standorts. Klimatische Veränderungen und Störungen kommen hinzu. Weitere Szenariostudien und Daten sind notwendig, um hier zu verlässlicheren Aussagen zu kommen. Trotz dieser Unsicherheiten ist die Veränderung der Senkenleistung auf der Waldfläche relevant und sollte bei der THG-Bilanzierung der Holznutzung einbezogen werden. Die Produktion von Pflanzenkohle wurde in diesen Szenarien (Speichersaldo) bisher nicht berücksichtigt. Hier besteht Forschungsbedarf.

9.2 Biomassepotenziale und Biomassestrategie

9.2.1 Absehbar erhöhte Konkurrenz um Biomasse

Dass der Klimawandel ohne den Erhalt natürlicher landbasierter Kohlenstoffspeicher (insbesondere Wald und organische Böden) und zusätzlicher Negativemissionen, von denen Pflanzenkohle eine Option ist (siehe Kapitel 2.2), nicht aufzuhalten ist, ist unbestritten. Die Notwendigkeit, sowohl bei der

⁸⁰ Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen

Energieversorgung als auch in stoffliche Wertschöpfungsketten Alternativen zu fossilen Rohstoffen auszubauen, ist ebenfalls klar.

Nachwachsende Rohstoffe inklusive Waldholz können der nach RED II in den Mitgliedstaaten unter bestimmten Voraussetzungen zu Zielen für erneuerbare Energien angerechnet und die Verwendung subventioniert werden⁸¹. Und die Preise für fossile Energiequellen bleiben absehbar hoch. Damit steigt der Anreiz, Biomasse energetisch zu nutzen, weiter. Dies geht bis hin zu Ankündigungen, in thermischen Großkraftwerken anstatt Kohle Holz zu verfeuern, wie dies in Großbritannien und den Niederlanden bereits geschieht (Ballenthien und Richter 2022; Hennenberg et al. 2021; Luick et al. 2021). Gleichzeitig werden biobasierte Stoffe für die stoffliche Nutzung zukünftig auch in industriellem Maßstab eingesetzt werden. Eine Umsetzung der Ziele im LULUCF-Sektor setzt, wie in Kapitel 9.1.2 beschrieben, der Entnahme von Waldholz Grenzen. Dies kann zu einer Verschärfung der Konkurrenzsituation zwischen den verschiedenen Verwendungsoptionen von Biomasse sowie zu verstärkten Biomasseimporten führen (Hennenberg et al. 2021). Die Produktion von Pflanzenkohle bedeutet einen weiteren Verwertungsweg, der Biomasse benötigt und erhöht damit den Druck auf die verfügbare Biomasse weiter. Eine Zertifizierung von Pflanzenkohle über das EBC stellt zwar gewisse Standards in Bezug zu Biomasseherkunft (z. B. Holz nur aus zertifiziertem nachhaltigem Anbau). Aber ein Ausbau der Erzeugungskapazitäten für Pflanzenkohle erhöht insgesamt die Nachfrage nach Biomasse. Durch die Konkurrenz um Biomasse und Land kann dies z. B. das Risiko der Übernutzung von Wäldern erhöhen oder zu indirekten Landnutzungsänderungen andernorts führen. Im Zusammenhang mit biobasierten Treibstoffen werden diese Risiken seit Jahren diskutiert.

9.2.2 Biomassepotenziale von Reststoffen

Es besteht bereits weitgehend Konsens, dass aus Klimaschutzsicht bei der Verwendung von Biomasse eine Kaskadennutzung mit möglichst langfristiger stofflicher Nutzung zu bevorzugen ist und eine energetische Nutzung bevorzugt am Ende dieser Kaskade erfolgen sollte. Die Produktion von Pflanzenkohle kann ebenfalls am Ende einer Nutzungskaskade stehen bzw. bevorzugt aus Abfall- und Reststoffen hergestellt werden.

Aktuell wird – auch auf aufgrund der bisherigen Einschränkungen im Düngerecht – in Deutschland ganz überwiegend Holz für Pflanzenkohle verarbeitet. Teilweise bewerben die Hersteller von Pflanzenkohle die Qualität ihres Produkts mit der Verwendung von unbehandeltem Waldholz; inwieweit sich dies auf Restholz beschränkt ist i.d.R. nicht transparent. Kommunale Akteure pyrolysieren i.d.R. Rückstände aus der Landschaftspflege und holzige Bestandteile von kommunalem Grünzeug. Die Zulassung von Pflanzenkohle als Düngemittel nach EU-Recht (siehe Kapitel 5.1) lässt eine zunehmende Verwendung weiterer unbelasteter möglicher Substrate außer Holz zur Herstellung von Pflanzenkohle erwarten.

Es gibt zahlreiche Studien (insbesondere im Zusammenhang mit der energetischen Nutzung von Biomasse) zu zukünftigen Biomassepotenzialen, deren Ergebnisse sich je nach Annahmen und Rahmenbedingungen unterscheiden. Ergebnisse von Studien zu globalen Biomassepotenzialen weisen eine enorme Bandbreite auf und die Frage nach nationalen Potenzialen für eine nachhaltige

⁸¹ Bei Verwendung von Biomasse in Anlagen zur Produktion von Elektrizität, Wärme und Kälte oder Kraftstoffen müssen ab bestimmten Grenzen für die Gesamtfeuerleistungswärmeleistung (im Fall fester Biomasse-Brennstoffe ab 20 Megawatt, im Fall gasförmiger Biomasse-Brennstoffe ab 2 Megawatt) bestimmte Nachhaltigkeitsanforderungen erfüllt werden, um zu Zielen bezüglich der Nutzung erneuerbarer Energien angerechnet zu werden sowie, um Fördergelder zu erhalten. U.a. muss eine bestimmte THG-Minderung erreicht werden (bei der Energieerzeugung mit Biomasse-Brennstoffen 70 %); die CO₂-Emissionen bei der Nutzung von Biokraftstoffen oder Biomasse-Brennstoffen werden dabei mit Null angesetzt.

Produktion von Biomasse für einen bestimmten Verwendungszweck ist kaum zu beantworten, da auch Handelsbeziehungen berücksichtigt werden müssen (Fehrenbach 2021). Zudem müssen konkurrierende Landnutzungsoptionen sowie Verwendungsmöglichkeiten der Biomasse gegeneinander abgewogen werden, andererseits mögliche Synergien (wie Wiedervernässung organischer Böden bei gleichzeitigem Anbau nassetoleranter Biomasse) und Kaskadennutzungen berücksichtigt werden. Und dazu kommen jeweils spezifische regionale und lokale klimatische, agrarstrukturelle und soziologische Bedingungen, an die mögliche Wertschöpfungsketten angepasst sein sollten.

- Eine Studie des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (Ifeu) (UNRAVEL⁸²), in der u.a. die **EU-weite nachhaltige Verfügbarkeit von lignozellulosehaltigen Reststoffen** abgeschätzt wird (Keller und Rettenmeier 2022), kommt zu dem Ergebnis, dass für diese Kategorie das höchste noch nicht genutzte Biomassepotenzial bei Stroh besteht (Schätzungen aus ausgewerteten Studien reichen von fast 20 bis fast 100 Mio. Tonnen TM, wobei den Autoren etwa 30 Mio. Tonnen realistisch erscheinen). Dass aktuell stark umstritten ist, wie viel minderwertiges Stammholz und weiteres Waldrestholz aus Wäldern entnommen werden könnte, ohne die Bodenbiologie und die Funktion des Waldes als Kohlenstoffsenke zu gefährden, wird auch in dieser Studie betont. Während Stammholz bereits weitgehend genutzt würde, sei fraglich, inwieweit das angenommene Potenzial von übrigem Waldrestholz von bis zu 35 Mio. Tonnen TM nachhaltig zusätzlich genutzt werden könne oder ob die aktuelle Nutzung bereits eingeschränkt werde sollte. Hinzu kommen diverse kleinere mögliche Reststofffraktionen. Exemplarisch wurde das Potenzial für Straßenbegleitgrün bestimmt, das soweit als möglich sinnvoll verwertet werden sollte. Aktuell ist dieses Potenzial noch weitgehend ungehoben. EU-weit schätzen es Keller und Rettenmeier (2022) auf rund 3 Mio. Tonnen TM.
- Brosowski et al. (2019) untersuchten das **Biomassepotenzial aus Reststoffen für eine stoffliche oder energetische Verwertung in Deutschland** für das Jahr 2015. Von einem theoretischen Biomassepotenzial von 238 Mio. Tonnen (TM), blieben nach dieser Studie als technisches Potenzial⁸³ 113 Mio. Tonnen. Von diesem werden bereits 82 Mio. Tonnen genutzt. Noch mobilisierbar sind demnach knapp 31 Mio. Tonnen (knapp 19 davon sind landwirtschaftliche Nebenprodukte wie Stroh und Wirtschaftsdünger), 5 Mio. Tonnen sind Holz- und Forstwirtschaftliche Nebenprodukte, und knapp 7 Mio. Tonnen stammen aus der Kategorie Siedlungsabfälle und Klärschlamm. Aufgrund von Unsicherheiten besteht bei diesen Werten eine erhebliche Bandbreite; je nach Annahmen können Mindest- und Maximalmengen deutlich von den angegebenen Durchschnittswerten abweichen. In der Ressourcendatenbank des Deutschen Biomasseforschungszentrums DBFZ⁸⁴ sind diese Daten detailliert abrufbar. Das theoretische Biomassepotenzial von Getreidestroh beträgt demnach 30,7 Mio. Tonnen TM. Unter Berücksichtigung der Humusbilanz wären davon 11,1 Mio. Tonnen nutzbar. Da bereits 4,3 Mio. Tonnen Stroh genutzt werden (ganz überwiegend stofflich), schätzt das DBFZ das noch mobilisierbare technische Biomassepotenzial für Stroh auf 6,8 Mio. Tonnen ein.

Stroh ist demnach eine relevante theoretisch noch mobilisierbare Biomassequelle. Neuere Forschungen zeigen, dass Zwischenfrüchte für den Humusaufbau weitaus bedeutender sein könnten

⁸² <https://www.ifeu.de/projekt/unravel/>

⁸³ Das technische Potenzial berücksichtigt diverse limitierende Faktoren, u.a. Einhaltung natürlicher Kreisläufe und ökologischer Grenzen (einschließlich z. B. natürlicher C-Speicher), technische Einschränkungen.

⁸⁴ <https://webapp.dbfz.de/resources/?lang=de>

als auf der Ackerfläche belassenes Stroh; eine globale Meta-Analyse quantifizierte den Effekt der Abfuhr von Stroh mit einem vergleichsweise geringen Verlust von 0,1 Tonnen pro Hektar und Jahr (Bolinder et al. 2020). Vor diesem Hintergrund könnte bei entsprechendem Management auch eine größere Strohmenge für eine anderweitige Nutzung verfügbar sein, insbesondere, wenn ein Teil des Kohlenstoffs über Pflanzenkohle wieder auf die Fläche zurückkäme⁸⁵.

Darüber hinaus sind eine Vielzahl weiterer möglicher Reststoffe für die Pyrolyse geeignet (siehe auch Positivliste des EBC in diesem Bericht, Tabelle 2). Einzelne Hersteller experimentieren bereits auch mit einer Reihe von Reststoffen u.a. mit Nussschalen, Kakaoschalen, Kräutertrester, Körnermaisspindeln, Dinkelspelzen, Sonnenblumenschalen, Knochen und Aprikosenkernen.

Eine relevante Reststofffraktion für Pflanzenkohle könnte auch Pferdemist sein, der i.d.R. einen hohen Anteil ligninhaltiger Einstreu enthält. Dieser fällt in nicht unerheblichen Mengen an, und für Pferdehalter sind Lagerung und Verwendung eine Herausforderung. Die Europäische Düngemittelverordnung lässt solche tierischen Nebenprodukte als Pyrolyseausgangssubstrat allerdings bisher nicht zu, was angesichts dessen, dass Wirtschaftsdünger sowohl unbehandelt als auch als Biogassubstrat auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht werden darf, schwer nachvollziehbar ist.

Auch eine Pyrolyse von Klärschlamm und die Verwendung der entstehenden Pflanzenkohle als Bodenverbesserungsmittel wären grundsätzlich sinnvoll, da der im Klärschlamm enthaltene Phosphor bei der Pyrolyse weitgehend in der Pflanzenkohle verbleibt und so – anders als bei der reinen Verbrennung – wieder dem Boden zugeführt werden kann. Es bliebe so außerdem nicht nur ein großer Teil des Kohlenstoffs erhalten. Im Vergleich zur früher (oder in einigen Ländern weiterhin) üblichen Aufbringung von Klärschlamm werden bei der Pyrolyse bei ausreichend hoher Temperatur zudem organische Schadstoffe, Mikroplastik und eventuelle problematische Krankheitserreger im Klärschlamm zerstört. Klärschlamm ist allerdings als Ausgangsstoff für Pflanzenkohle zur Verwendung in der Landwirtschaft auf EU-Ebene nicht erlaubt. Angesichts der Biomassekonkurrenzen sollten auch solche Substrate stärker in den Blick genommen werden. So ist in Schweden, Dänemark und Tschechien die Ausbringung von Klärschlamm-Pyrolysaten in der Landwirtschaft zugelassen.

Auf globaler Ebene sind als landwirtschaftliche Reststoffe außerdem Abfälle aus dem Reis- oder Kaffeeanbau oder aus der Verarbeitung von Zuckerrohr relevant (Neogi et al. 2022). Bisher verrotten solche Stoffe häufig, ohne als Dünger genutzt zu werden, oder werden (oft ohne energetische Nutzung) verbrannt. In durch Waldbrand gefährdeten Gebieten der USA fallen bei der Durchforstung zur Brandvorsorge große Mengen an nicht oder kaum vermarktbarer holziger Biomasse an, die bisher ebenfalls meist verbrannt wird, häufig ohne eine zusätzliche stoffliche oder energetische Nutzung zu generieren (Elias et al. 2022).

Die sich zunehmend abzeichnenden Potenziale zur Verwendung von Pflanzenkohle außerhalb der Landwirtschaft (z. B. in Beton oder Baustoffen) eröffnen zudem die Möglichkeit, belastete Reststoffe, die sonst nur schwer wiederverwertbar sind, wie z. B. behandeltes Altholz, der Pyrolyse zuzuführen, auch hier vor allem auf Kosten der direkten Verbrennung. Dabei ist zu beachten, dass die Verwendung von Pflanzenkohle in genutzten Produkten aus Klimaschutzsicht dann besonders sinnvoll ist, wenn die

⁸⁵ vgl. Vortrag Don „Carbon farming with straw incorporation - A reality check“ am 16.11.2021 auf dem Agri benchmark and GRA webinar, der davon ausgeht, dass jährlich 19 Mio. Tonnen Stroh genutzt werden könnten; https://globalresearchalliance.org/wp-content/uploads/2021/12/Presentation_Axel_Don.pdf

Produkte möglichst lange genutzt und nicht nach kurzer Verwendung verbrannt werden. In diesem Fall ginge die erwünschte Kohlenstoffsенке unmittelbar verloren.

9.2.3 Lenkung von Biomasseströmen notwendig

Grundsätzliche Optionen für eine Umwidmung der Nutzung von Flächen bzw. Biomasseverwendungen

Vor dem Hintergrund beschränkter Biomassepotenziale können zusätzliche größere Mengen für eine stoffliche Nutzung oder für die Erzeugung von Pflanzenkohle – und damit eine potenziell langfristige Speicherung des Kohlenstoffs – nur dann verfügbar gemacht werden, wenn andere Primärnutzungen eingeschränkt und die Biomasseströme entsprechend umgelenkt werden:

- So würde eine Reduktion des Verbrauchs tierischer Lebensmittel ein enormes Potenzial freisetzen, Flächen, die bisher für die Erzeugung von Futtermitteln verwendet werden, für die Erzeugung von Biomasse (für verschiedene Verwendungen) zu nutzen.
- Wenn die Produktion von Pflanzenkohle ausgeweitet werden soll, müssen Anreize, die eine rein energetische Verwendung von Biomasse begünstigen, zugunsten der Pyrolyse angepasst werden. Die perspektivisch notwendige weitgehende Elektrifizierung des Energiesystems (neben der auf jeden Fall notwendigen möglichst weitgehenden Einsparung von Energie) muss vorrangig durch Ausbau von Photovoltaik und Windenergie bedient werden. Im Vergleich zum Anbau von Energiepflanzen stellen diese Energien auf derselben Fläche ein Vielfaches an Energie bereit. Energie aus Energiepflanzen könnte langfristig heruntergefahren werden⁸⁶. Die THG-Minderung durch die Verbrennung von Primärholz ist ohnehin umstritten (siehe Box in Kapitel 9.1.2). Wo die Vorteile einer energetischen Nutzung von Biomasse, z. B. die Bereitstellung von Nutzwärme mit hohen Temperaturen, genutzt werden sollen, könnte dies auch im Zusammenhang mit der Produktion von Pflanzenkohle geschehen.

Generell können sich unterschiedliche Verwertungswege auch ergänzen. So eignet sich für die Pyrolyse insbesondere trockene, nährstoffarme und gut zerkleinerbare Biomasse, während feuchte und nährstoffreichere Substrate günstiger für Kompostierung oder Biogaserzeugung sind (Schmidt und Hagemann 2021). Gärreste selber können ebenfalls noch einer Pyrolyse unterzogen werden.

Bezüglich der langfristigen Speicherung von Kohlenstoff steht die Produktion von Pflanzenkohle auch in Konkurrenz mit BECCS um Biomasse und weist einen wesentlich kleineren energetischen Nutzen auf als die BECCS-Technologien (Kopernikus-Projekt Ariadne Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) 2021). Wie in Kapitel 2.2 erwähnt, hat Pyrolyse allerdings den Vorteil, im Vergleich zu BECCS, dezentral stattfinden zu können, da sie nicht an das Vorhandensein einer CO₂-Infrastruktur gebunden ist, und keine geologische Speicherung zu benötigen. Über Pflanzenkohle kann zudem über die Anwendung in oder außerhalb der Landwirtschaft ein vielfältiger Anwendungsnutzen realisiert werden. Da in (sub-)tropischen Gebieten auch deutliche Ertragszuwächse aufgrund der Anwendung von Pflanzenkohle erwartet werden können, kann dort – anders als bei der Nutzung von BECCS als Technologie für Negativemissionen – theoretisch die über diese Ertragszuwächse zusätzlich erzeugte Biomasse für die Produktion von Pflanzenkohle genutzt werden. Werner et al. (2022) schätzen, dass global alleine über solcherart „flächenneutral“ erzeugte Biomasse in den (Sub-)Tropen 0,44 bis 2,62 Gt

⁸⁶ vgl. z. B. Vortrag Isermeyer „Landnutzungsoptionen: Überblick und vergleichende Bewertung“ am 9.11.2022 auf dem Strategischen Forum der Deutschen Agrarforschungsallianz in Berlin; https://www.dafa.de/wp-content/uploads/DAFA_SF22_Isermeyer.pdf

CO₂ in Pflanzenkohle festgelegt werden könnten. Perspektivisch kann auch bei der Pyrolyse noch eine Abscheidung und Speicherung des frei werdenden CO₂ stattfinden.

Grundsätzlich wichtig wäre zudem, über eine verstärkte Etablierung holziger Biomasse in der Agrarlandschaft (z. B. in Form von Hecken und Feldgehölzen, Kurzumtriebsplantagen und als Agroforstsysteme) zusätzlich Biomasse zu erzeugen, was i.d.R. auch mit weiteren Synergien wie Erosionsschutz und Schutz der Biodiversität einhergeht. Eine Nutzung von 5 % der Ackerfläche für Agroforst und Hecken ergäbe schätzungsweise einen jährlichen Zuwachs von rund 3 Mio. Tonnen nutzbarer Biomasse⁸⁷. Pflanzenkohle in Pflanzenlöchern oder -streifen kann wiederum die Resilienz von Baumstecklingen verbessern.

Auf landwirtschaftlich genutzten organischen Böden ermöglicht eine Wiedervernässung, die mit einem Anbau von Paludikulturen (z. B. Schilf, Rohrglanzgras, Erlen) einhergeht, sowohl den Erhalt des natürlichen Kohlenstoffspeichers Torf als auch die Erzeugung von Biomasse, die auch für eine Produktion von Pflanzenkohle genutzt werden könnte (idealerweise nach stofflicher Verwendung).

Systemvergleiche von Biomasetechnologien müssen Pflanzenkohle einbeziehen

Es ist also notwendig, Biomassepotenziale abzuschätzen, die für eine Nutzung zur Verfügung stehen, ohne natürliche Kohlenstoffspeicher zu gefährden oder neue Konflikte (z. B. mit dem Schutz der Biodiversität) zu schaffen oder zu verschärfen, und die Nutzung der verfügbaren Biomasse auf möglichst große Klimawirkungen auszurichten.

Die Ende September 2022 veröffentlichten **Eckpunkte für eine Nationale Biomassestrategie** (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) 2022) haben dies zum Ziel. Biomasse ist *„innerhalb ihrer nachhaltigen Potenzialgrenzen einzusetzen, in den effizientesten Anwendungsbereichen entsprechend der Kaskaden- und Mehrfachnutzung mit dem Vorrang einer stofflichen vor der energetischen Nutzung zu priorisieren und die Effizienz des Einsatzes von Biomasse – dort wo möglich – deutlich zu erhöhen. [...] Bislang greifen privatwirtschaftliche Akteure aus allen Sektoren – vor allem preisgesteuert und oftmals nicht nachhaltig – auf Biomasse zu und werden hierzu teilweise durch Förderprogramme sowie durch weitere, die Biomassenutzung begünstigenden, Rahmenbedingungen angereizt. Eine optimierte, auf effiziente Mehrfach- und Kaskadennutzung ausgerichtete und schutzgutorientierte Nutzungshierarchie fehlt in der Praxis weitgehend. Abgestimmte und übergeordnete Anreizmechanismen zur nachhaltigen und effizienten Biomassenutzung sind bislang kaum etabliert.“*

Leitprinzipien des Eckpunktepapiers sind die Priorisierung der stofflichen Nutzung, der Vorrang der Mehrfachnutzung und der Nutzung des Biomasseanteils an biogenen Abfallstoffen. Wie dies erreicht werden soll, bleibt im Papier noch offen. Es werden dort insbesondere eine Reihe an zu beantwortenden Fragen gestellt, u.a.:

- Wie effizient und nachhaltig sind die einzelnen Biomasetechnologien im Vergleich zueinander (unter möglicher Einbindung in ein System technischer Negativemissionen mit Blick auf die geplante Langfriststrategie Negativemissionen)?

⁸⁷ vgl. Vortrag Don am 14.12.2022 auf dem DBU Online-Salon „Klimaschutz durch Pflanzenkohle!? – Chancen und Risiken einer negative emission strategy“; <https://www.youtube.com/watch?v=mhXvisy73f4&feature=youtu.be>

- Wie kann die Kreislaufführung von biogenen Stoffen, für die keine weitere stoffliche Nutzung möglich ist, gestärkt, die wertgebenden Inhaltsstoffe und Eigenschaften genutzt und so eine dauerhafte Bindung des in der Biomasse gebundenen Kohlenstoffs gefördert werden?

In bisherigen Untersuchungen ist die Analyse von Verwertungsketten von Biomasse und deren Umwelt- und Klimabilanzen i.d.R. auf die energetische Nutzung und die stoffliche Verwendung beschränkt. Der im Eckpunktepapier angesprochene notwendige Systemvergleich sollte Pyrolyse und die Produktion von Pflanzenkohle für verschiedene Verwendungsoptionen unbedingt mit einbeziehen.

10 Zusammenfassung und Resümee

10.1 Pflanzenkohle als Option für Negativemissionen

Szenarien zum Klimawandel zeigen: Um noch eine Chance zu haben, den Klimawandel einzugrenzen, sind massive THG-Emissionsminderungen in allen Sektoren notwendig. Parallel muss eine gezielte Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre und dessen möglichst langfristige Speicherung erfolgen (Negativemissionen oder *Carbon Removal*⁸⁸). Beides muss bereits in diesem Jahrzehnt konsequent vorangetrieben werden. Mit Hilfe von Modellierungen wird geschätzt, dass zum Zeitpunkt, an dem global netto Null CO₂-Emissionen erreicht werden (sollen), verbleibende 5-16 Gt CO₂ durch Negativemissionen ausgeglichen werden müssen.

Pflanzenkohle (englisch: *biochar*) entsteht durch Umwandlung einer potenziell breiten Palette von Biomasse über Pyrolyse unter weitgehendem Ausschluss von Sauerstoff bei Temperaturen meist zwischen 350 °C und 750°C. Die Eigenschaften der Pflanzenkohle variieren mit der verwendeten Biomasse, dem Pyrolyseprozess und der Nachbehandlung. Rund 50 % des mit der Biomasse eingebrachten Kohlenstoffs verbleiben in der Pflanzenkohle. Der weitaus größte Teil dieses Kohlenstoffs ist für lange Zeiträume – Einschätzung reichen von mehreren 100 bis zu mehreren 1.000 Jahren – vor biologischer oder chemischer Zersetzung geschützt. Damit kann Pflanzenkohle für CO₂, das im Zuge des Biomassewachstums aus der Atmosphäre aufgenommen wurde, als eine langfristige Kohlenstoffsенке dienen und dadurch die Zunahme der Konzentration an CO₂ in der Atmosphäre verlangsamen oder senken.

Die Produktion von Pflanzenkohle unterliegt einer hohen Dynamik mit deutlich steigenden Anlagenzahlen und Produktionskapazitäten. In Europa ist Deutschland das Land mit der größten Produktionsmenge von Pflanzenkohle; Ende 2022 werden schätzungsweise rund 50 Anlagen in Betrieb sein mit einer Produktionskapazität von knapp 23.000 Tonnen Pflanzenkohle. Aktuell werden vor allem Landschaftspflegematerial und Waldrestholz eingesetzt. Weitere Substrate werden bisher nur vereinzelt verwendet.

In der Landwirtschaft kann Pflanzenkohle direkt als Bodenhilfsstoff genutzt werden, als Trägersubstanz für Düngemittel und als Zusatz zu Tierfutter und Einstreu, zur Behandlung von Wirtschaftsdünger oder zu Komposten. Bei einem Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierhaltung und beim Düngemittelmanagement ergibt sich eine Kaskadennutzung, bei der Pflanzenkohle letztendlich in den Boden gelangt. Pflanzenkohle wird in Deutschland bisher ganz überwiegend in der Landwirtschaft verwendet. Sie trifft auf zunehmendes Interesse und kommt in ihrer doppelten Funktion (Anwendungsnutzen und Negativemissionen) dabei langsam aus ihrer bisherigen Nische. Anwendungsmöglichkeiten außerhalb der Landwirtschaft sind zukünftig vermutlich von steigender Bedeutung. Dazu gehören beispielsweise eine Einbindung in Baustoffe, die Aufbereitung zu Aktivkohle oder die Verwendung als Pflanzsubstrat für Stadtbäume.

Pflanzenkohle gehört zu den Optionen, die ein nennenswertes Potenzial haben zu Negativemissionen beizutragen. Hinzu kommt die energetische Nutzungsmöglichkeit von Abwärme, Pyrolysegas und Pyrolyseöl, um fossile Energien zu ersetzen. Pyrolyseöl kann auch stofflich verwendet werden. Ein Vorteil von Pyrolyse im Vergleich zu anderen Technologien zur Erzeugung von Negativemissionen wie

⁸⁸ Aktiver Entzug des Treibhausgases Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre

DACCS (*Direct Air Carbon Capture and Storage*) und BECCS (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage*) ist, dass – zusätzlich zur CO₂-Speicherung – ein Produkt mit vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten und Anwendungsnutzen erzeugt wird; eine geologische Speicherung ist nicht notwendig. Es ist eine dezentrale, an regional verfügbare Biomasse angepasste Produktion möglich. Anders als bei der Verbrennung von Biomasse gehen viele Nährstoffe nicht verloren, sondern können mit der Pflanzenkohle auf genutzte Flächen zurückgeführt werden. Der Einsatz von Pflanzenkohle kann insbesondere in tropischen Gegenden Erträge erhöhen und damit zu einer erhöhten Biomassebereitstellung (für unterschiedliche Verwendungszwecke) beitragen. Technik zur Herstellung von Pflanzenkohle befindet sich bereits auf einem vergleichsweise hohen Reifelevel. Optimiert werden könnte die Senkenfunktion durch die Sequestrierung auch des Kohlenstoffs in Pyrolyseöl oder perspektivisch auch die Abscheidung und Speicherung des mit dem Pyrolysegas freiwerdenden Kohlenstoffs. Pflanzenkohle bzw. PyCCS (*Pyrogenic carbon capture and storage*) könnte bereits in den kommenden 15-20 Jahren eine wichtige Rolle beim Bereitstellen von Negativemissionen spielen. DACCS ist erst langfristig eine Option, wenn überschüssige erneuerbare Energien zur Verfügung stehen, die den Energiebedarf decken.

PyCCS ist aufgrund der dezentralen Produktion und Anwendung und der Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten der Pflanzenkohle allerdings noch nicht in Modellierungen z. B. des IPCC berücksichtigt. Bei öffentlichen Diskussionen um Negativemissionstechnologien sind die großtechnischen Optionen BECCS und DACCS prominenter, auch wenn solche Anlagen bisher nur als einzelne Pilotanlagen existieren.

Es ist erforderlich, dass sich Politik und Öffentlichkeit mit dem Thema Pflanzenkohle verstärkt auseinandersetzen und die Chancen von Pflanzenkohle als risikoarme Senkentechnologie für die nächsten Jahrzehnte wahrnehmen und zur Umsetzung der Klimaziele nutzen. Es besteht dabei die Chance für vielfältige Synergien. Zusammen mit der Wissenschaft und Personen aus der Praxis sollte die Entwicklung von Pilotprojekten zu einer breiteren Nutzung von Pflanzenkohle vorangetrieben werden.

10.2 Vielfacher Anwendungsnutzen von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft

Eine Reihe aktueller Reviews und Meta-Analysen zeigen, dass Pflanzenkohle in der Landwirtschaft positive Effekte haben kann:

- Die Verwendung von Pflanzenkohle als Futterzusatz wird mit einer besseren Futtermittelverwertung, einer Absorption von Giftstoffen und generell einer verbesserten Tiergesundheit in Verbindung gebracht.
- Eine Zugabe von Pflanzenkohle zur Einstreu oder zum Güllelager kann Gerüche und Nährstoffverluste reduzieren. Erhöhte Trittsicherheit und verringerter Strohverbrauch kann von einer gezielten Aufbringung auf feuchten Flächen im Stall und auf Laufflächen erwartet werden.
- Der Einsatz von Pflanzenkohle bei der Kompostierung (Co-Kompostierung) kann die Kompostqualität verbessern, Pflanzenkohle mit Nährstoffen aufladen, und CH₄-Emissionen und N-Verluste beim Kompostierungsprozess verringern.
- Die Wirkungen von Pflanzenkohle im Boden variieren mit den Bodeneigenschaften, der Beschaffenheit der Pflanzenkohle und der Art ihrer Verwendung. Es besteht eine starke Evidenz,

dass die Verwendung von Pflanzkohle in der Landwirtschaft Vorteile für die Pflanzenproduktion mit sich bringen kann. Eine Vielzahl von Studien weist auf folgende Wirkungen hin:

- Abnahme der Lagerungsdichte von Böden und höhere Wasserspeicherkapazität.
- Erhöhte biologische Aktivität im Boden und Stimulierung des Wurzelwachstums.
- Zusätzlicher Aufbau von organischem Kohlenstoff über den mit der Pflanzkohle eingebrachten Kohlenstoff hinaus („negatives Priming“).
- Erhöhte Verfügbarkeit von Phosphor.
- Insbesondere auf nährstoffarmen, sauren Böden und auf Sandböden in von Trockenheit bedrohten Gebieten besteht das Potenzial für eine Erhöhung der Erträge. Auch auf fruchtbaren Böden unter gemäßigten Klimabedingungen kann das Einbringen niedriger Dosen von Pflanzkohle in der Wurzelzone und in Kombination mit Düngemitteln zu besseren Erträgen führen.
- Reduktion von N₂O-Emissionen aus Böden zumindest kurz- und mittelfristig.
- Minderung von CH₄-Emissionen aus wassergesättigten organischen Böden und Reisfeldern. Auf Böden mit ausreichender Sauerstoffzufuhr sind die Wirkungen in Bezug zu CH₄ nicht eindeutig.
- Immobilisierung von im Boden befindlichen Schadstoffen wie Schwermetalle, PAK oder pharmazeutische Produkte.

Mittlerweile werden Ausbringungsmengen von 0,5 bis 2 Tonnen Pflanzkohle pro Hektar favorisiert, i.d.R. „aufgeladen“ mit Nährstoffen oder im Zusammenhang mit einer Düngemittelgabe. Pflanzkohle wird so zu einem Substrat, das Nährstoffe speichert und langsam wieder abgibt und damit auch dazu beiträgt, Nährstoffe z. B. aus Wirtschaftsdünger effizient zu nutzen und Verluste in die Atmosphäre oder ins Grund- oder Oberflächenwasser zu verringern. Diese Vorgehensweise, insbesondere bei gezieltem Einbringen in die Wurzelzone, erscheint vielversprechend, um mit einer vergleichsweise geringen Menge an Pflanzkohle Ertragszuwächse zu erreichen oder die Aufbringung zusätzlicher Düngemittel zu reduzieren.

Pflanzkohle kann und soll den Humusaufbau und eine Steigerung der Bodenfruchtbarkeit durch „traditionelle“ Praktiken (Fruchtfolge, Zwischenfrüchte, organische Düngung etc.) nicht ersetzen, sondern ergänzen. Nachteilige Langzeitwirkungen auf die Bodenbiodiversität sind bei kontrollierter Qualität der Pflanzkohle bisher nicht nachgewiesen; vielmehr bietet Pflanzkohle zusätzliche Nischen im Boden für Bodenlebewesen.

Wie auch bei der Verwendung von Düngemitteln müssen für einen optimalen Einsatz von Pflanzkohle die spezifischen Bedingungen vor Ort und verschiedene Anwendungsmöglichkeiten berücksichtigt werden. Das Wissen zur Anwendung von Pflanzkohle muss hierfür verbreitet und weiterentwickelt werden. Dazu gehören Pilotprojekte, Information und Beratung inklusive Standort-spezifischer Empfehlungen⁸⁹ sowie der Austausch unter Anwendenden.

⁸⁹ In den USA gibt es laut Seman-Varner et al. (2022) mittlerweile zwei Online-Tools zur Entscheidungshilfe, die je nach Bodeneigenschaften Hinweise für die Anwendung von Pflanzkohle geben (<http://www.pnwbiochar.org/tools/>; <https://websoilsurvey.sc.egov.usda.gov/App/HomePage.htm>)

10.3 Sicherstellung der Pflanzenkohlequalität durch Zertifizierung

Zentral für eine Verwendung in der Landwirtschaft und zur Gewährleistung des Bodenschutzes ist die Qualität der Pflanzenkohle. Die Eigenschaften des Produkts und die Umweltbilanz der Herstellung hängen stark vom Ausgangssubstrat und der technischen Steuerung der Pyrolyse ab. So können bei der Pyrolyse organische Schadstoffe wie PAK entstehen, und in der ursprünglichen Biomasse enthaltene Schwermetalle finden sich weitgehend in der Pflanzenkohle wieder. Die Herstellung sauberer und unbelasteter Pflanzenkohle stellt technisch kein Problem mehr dar, aber es ist notwendig, die Qualität durch entsprechende Vorgaben sicherzustellen.

Für eine Ausbringung zugelassener Bodenhilfsstoffe und Düngemittel auf Böden gelten Grenzwerte im Düngerecht für Schwermetalle und bestimmte organische Schadstoffe. Die Regelungen im EU-Recht sind in Bezug auf Pflanzenkohle hier strenger als das deutsche Recht, das zwar nach der Düngemittelverordnung nur Holzkohle und keine Pflanzenkohle aus anderen Biomassen zulässt, aber weniger strenge Grenzwerte vorsieht.

Über das Europäische Pflanzenkohlezertifikat (EBC) besteht ein freiwilliger Industriestandard, der je nach Verwendungszweck der Pflanzenkohle Standards und Grenzwerte festlegt, die teilweise über das Dünge- oder Futtermittelrecht hinausgehen, und deren Überwachung gewährleistet. Die EBC-Zertifizierung erreicht bereits einen großen Teil der Produktionskapazität von Pflanzenkohle in Europa.

Insbesondere an Pflanzenkohle, die in Böden eingebracht und in der Tierfütterung verwendet wird, sind strenge Qualitätsanforderungen (u.a. an Schadstoffgehalte) zu stellen und diese wirksam zu überwachen. Eine Anpassung des deutschen Düngerechts an das europäische in Bezug auf Pflanzenkohle wäre daher äußerst wünschenswert. Unbedingt zu empfehlen ist die ausschließliche Verwendung zertifizierter Pflanzenkohle. Eine Zertifizierung sollte Voraussetzung zum Inverkehrbringen von Pflanzenkohle sein.

10.4 Eine Honorierung der Kohlenstoffsenke ist Voraussetzung für einen breiteren Einsatz von Pflanzenkohle

Hohe Preise für Pflanzenkohle sind bisher ein stark limitierender Faktor für den Einsatz in der Landwirtschaft. Es gibt Fälle, in denen der Nutzen von Pflanzenkohle aus Sicht der Anwendenden die Kosten rechtfertigt (z. B. Pflanzenkohle als Zuschlag zu Tierfutter, oder eine Verwendung in Sonderkulturen) oder sich die Produktion lohnt, weil es Synergien mit der Abfallverwertung gibt und gleichzeitig eine sinnvolle Anwendung vor Ort (z. B. Pyrolyse holziger bei der Pflege kommunaler Flächen anfallender Biomasse und Verwendung von Pflanzenkohle in Substrat für Stadtbäume).

Aber eine Zertifizierung von Kohlenstoffsenken und die Vergütung der Senkenleistung wäre eine wichtige Stellschraube für eine deutliche Ausweitung von Pflanzenkohle als Negativemissionstechnologie und würde den Einsatz für einen größeren Anwenderkreis wirtschaftlich tragfähig gestalten. So ist seit dem Jahr 2020 eine Zertifizierung des C-Senken Potentials über den EBC möglich. Über einen akkreditierten C-Senken-Händler können die Zertifikate auf dem privaten Markt gehandelt werden. Im November 2022 veröffentlichte die EU-Kommission einen Vorschlag für eine Verordnung, die einen EU-weiten Rahmen für die Zertifizierung von CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre vorgeben soll. Dieses System soll bis zum Jahr 2028 etabliert werden.

Ein „Verklappen“ von Pflanzenkohle auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, wie von manchen befürchtet, ist aufgrund des hohen Preises abwegig. Auch bei einem CO₂-Preis von beispielsweise 100 € pro Tonne CO₂ ist die Produktion und Verwendung von Pflanzenkohle nur attraktiv, wenn der langfristige Anwendungsnutzen berücksichtigt wird.

Für Pyrolyseanlagen selber sind, neben Kosten für den Bau und Betrieb der Anlage, der Substratpreis und der Verkaufspreis für die Pflanzenkohle wichtige Stellschrauben für die Wirtschaftlichkeit. Hinzu kommt die Vermarktung überschüssiger Energie. Es sollte immer mitbedacht werden, wie sich Pyrolyseanlagen sinnvoll in ein zukünftiges flexibles Energiesystem einbinden lassen und Standorte und Konzeptionen für Anlagen so zu wählen, dass insbesondere anfallende Abwärme vollständig genutzt werden kann.

Wenn die Verwendung von Pflanzenkohle ausgeweitet werden soll, muss die Senkenleistung zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre bilanziert und über finanzielle Anreize honoriert werden. Eine Zertifizierung von Kohlenstoffsinken ist hierfür ein Ansatz. Für sämtliche Zertifizierungsansätze ist es wichtig, dass das Verhältnis zwischen dem freiwilligen Handel und dem Pflichtmarkt (europäischer Emissionshandel) geklärt wird, um eventuelle Doppelzählungen, insbesondere im Rahmen der nationalen Berichterstattung zum Treibhausgasinventar, zu vermeiden. Negativemissionen dürfen nicht mit THG-Emissionen verrechnet werden, um keine Anreize zu setzen, die gleichzeitig notwendige Emissionsminderung zu vernachlässigen.

10.5 Biomasseherkunft als zentraler Aspekt der Nachhaltigkeit

Die Nachfrage nach Land- und Biomassenutzung ist bereits jetzt immens. Sie umfasst die Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln sowie Biomasse zur energetischen und vielfachen stofflichen Nutzung. Gleichzeitig bestehen Ziele, dass Flächen aufgrund des Schutzes der Biodiversität ungestört bleiben oder nur extensiv bewirtschaftet werden und bestehende Kohlenstoffspeicher erhalten bleiben. Eine Umsetzung der Klimaziele im LULUCF-Sektor setzt der Entnahme von Waldholz Grenzen. Und nicht zuletzt sind fruchtbare Böden auf ausreichend Zufuhr frischer organischer Substanz angewiesen. Werden finanzielle Anreize zur Produktion von Pflanzenkohle gesetzt, kommt eine zusätzliche Nachfrage nach Biomasse hinzu. Eine Zertifizierung, die Herkunft und Qualität von Ausgangsstoffen und Pflanzenkohle reguliert, ist unabdingbar, um Standards für die Biomasseherkunft zu setzen. Aber auch dann sind durch die Konkurrenz um Biomasse und Land indirekte Wirkungen möglich.

Aus Klimaschutzsicht sollte bei der Verwendung von Biomasse eine Kaskadennutzung mit möglichst langfristiger stofflicher Nutzung angestrebt werden und eine energetische Nutzung bevorzugt am Ende dieser Kaskade erfolgen. Vieles spricht dafür, auch Pflanzenkohle bevorzugt aus Reststoffen und/oder am Ende einer stofflichen Nutzungskaskade zu verwenden.

Das europäische Düngemittelrecht lässt mittlerweile eine breite Palette an Einsatzstoffen für die Produktion von Bodenverbesserungsmitteln aus Pyrolyseprodukten zu. Es bieten sich damit vielfältige Möglichkeiten, Abfall- und Reststoffe zu nutzen und Eingangsstoffe für Pyrolyseanlagen an regional verfügbaren Biomassepotenzialen auszurichten. So können kommunale Akteure insbesondere auf Grünschnitt und Landschaftspflegerückstände zurückgreifen. Auch Straßenbegleitgrün wird oft kostenpflichtig entsorgt. Im landwirtschaftlichen Bereich bestehen noch Potenziale insbesondere bei Stroh. Ein verstärkter Anbau holziger Biomasse in der Agrarlandschaft (Agroforst, Feldgehölze, Hecken)

kann sowohl den Gehalt an Kohlenstoff in Boden und Vegetation erhöhen als auch zusätzliche für Pyrolyse geeignete Biomasse bereitstellen. Auf wiedervernässten organischen bisher landwirtschaftlich genutzten Böden könnte mit Paludikulturen ebenfalls Biomasse für eine stoffliche Nutzung oder auch Pyrolyse produziert werden. Bei der Verarbeitung von Nahrungs- und Genussmitteln fallen ebenfalls viele nutzbare Reststoffe an. Tierische Nebenprodukte wie Pferdemist sowie Klärschlamm sind als Ausgangssubstrat für in der Landwirtschaft verwendbare Pflanzenkohle bisher nicht nach deutschem oder EU-Recht zugelassen. Belastete Reststoffe wie behandeltes Holz aber auch unbehandeltes Altholz können Ausgangssubstrate für in der Industrie oder in Baustoffen stofflich verwendete Pflanzenkohle sein.

Über das Thema Pflanzenkohle hinaus, bedarf die Nutzung von Biomasse dringend einer deutlich stärkeren ressortübergreifenden Steuerung von Biomasseströmen als bisher, mit dem Ziel, Potenzialgrenzen zu berücksichtigen und eine möglichst effiziente Biomassenutzung zu gewährleisten. Die Umsetzung einer solchen „Biomassestrategie“ umfasst diverse Aspekte der Land- und Forstwirtschaft und steht über die Nutzungskonkurrenz um Biomasse und Land im Zusammenhang mit weiteren Politikfeldern und Strategien wie der Klima- und Energiepolitik oder der Bioökonomie. Es besteht Bedarf, bei einer Diskussion zur Anwendung von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft dieses breite Bild mitzudenken.

Soll die Festlegung von Kohlenstoff über Pflanzenkohle zukünftig in größerem Ausmaß stattfinden, müssen nicht nur in der Verwendung von Biomasse andere Prioritäten gesetzt (z. B. Pyrolyse anstatt Biomasseverbrennung) und eine Verringerung des Ressourcenverbrauchs für Energie, Konsum und Ernährung angesprochen werden, sondern Biomasse auch zusätzlich gezielt erzeugt werden, beispielsweise über verstärkte Anpflanzung von Hecken oder Bäumen in der Agrarlandschaft. Auch für bisher nach deutschem und EU-Recht nicht zugelassene Substrate für Bodenverbesserungsmittel aus Pyrolyseprodukten wie Pferdemist und Klärschlamm sollte überlegt werden, für welche Einsatzzwecke sie zukünftig sinnvoll sind. Bei der Ausarbeitung der Nationalen Biomassestrategie muss die Produktion von Pflanzenkohle berücksichtigt und die Rolle von Pyrolyse insbesondere im Vergleich zu rein stofflicher bzw. rein energetischer Biomassenutzung geklärt werden.

10.6 Forschungsbedarf zu Pflanzenkohle im Bereich Landwirtschaft

Grundsätzlich ist ausreichend Wissen vorhanden, um bereits jetzt Pflanzenkohle sinnvoll und sicher anwenden zu können. Aufgrund des Variantenreichtums von Pflanzenkohlen in Abhängigkeit von den verwendeten Biomassen und der Herstellungstechniken sowie der zahlreichen Verwendungsmöglichkeiten gibt es jedoch noch vielfältige Fragestellungen für die **Forschung zum Einsatz in der Landwirtschaft**:

- Im Bereich Fütterung besteht weiterer Forschungsbedarf zur konkreten Wirkungsweise der Pflanzenkohle im tierischen Organismus und zu Wechselwirkungen mit dem Mikrobiom im Verdauungssystem, zur eventuellen Adsorption von Futterinhaltsstoffen oder von Medikamenten und zur qualitativen Beurteilung unterschiedlicher Pflanzenkohlen z. B. in Bezug auf ihre Eignung für bestimmte Tierarten sowie zu optimierten Darreichungsformen. Bevor Pflanzenkohle als regelmäßiger Futterzusatz breit und uneingeschränkt empfohlen wird, sollten solche Fragen geklärt sein. Das Risiko eines Einsatzes von Pflanzenkohle kontrollierter Qualität als Futter scheint allerdings sehr gering, nicht zuletzt im Vergleich zu anderen Futterzusatzstoffen und der Belastung von Futter mit Pestiziden oder Mykotoxinen. Zudem bietet sich ein weites Feld, Futtermittel für

spezielle Zwecke und Tierarten zu entwickeln, bei denen Pflanzenkohle als Trägermaterial für weitere Substanzen eingesetzt wird. Dies betrifft auch Auswirkungen von Pflanzenkohlegaben auf verdauungsbedingte THG-Emissionen.

- Weitere Versuche zur Co-Kompostierung unter Praxisbedingungen sollten unterschiedliche Kompostsubstrate und unterschiedliche Pflanzenkohlen und Verwendungsmengen berücksichtigen und sowohl Produktqualität als auch THG-Emissionen nach der Aufbringung in Böden einbeziehen.
- Es bestehen noch Wissenslücken zur langfristigen Interaktion zwischen Pflanzenkohlen, Boden, Mikroorganismen und Pflanzen, u.a. in Bezug auf die Reduktion von N₂O-Emissionen, dem Verhalten organischer Stoffe wie z. B. Pestiziden oder PAK, dem zusätzlichen Aufbau organischer Bodensubstanz („negatives Priming“) und der langfristigen Wirkungen einer wiederholten Aufbringung von Pflanzenkohle.
- Forschungsbedarf besteht weiterhin zu Eigenschaften von Pflanzenkohlen je nach Inputmaterialien, Pyrolysebedingungen und Nachbehandlung, um Designerkohlen aus unterschiedlichen Substraten für spezifische Anwendungsbedarfe herzustellen. Studien sollten sich gezielt mit optimaler Ausbringungsform und Mischung mit Düngemitteln befassen und analysieren, inwieweit sich durch einen Einsatz von Pflanzenkohle auch in Hohertragssystemen Ertragssteigerungen oder geringere Aufwandsmengen an Düngemitteln realisieren lassen.
- Das Thema Bodengesundheit wird vor dem Hintergrund des Klimawandels immer wichtiger. Pflanzenkohle sollte als ein „Werkzeug“ dafür – neben Zwischenfrüchten, der Diversifizierung von Fruchtfolgen, organischer Düngung, reduzierter Bodenbearbeitung und weiterer Praktiken – in entsprechende Forschungsfragen integriert werden.

Systemvergleiche verschiedener Verwertungswege von Biomasse inklusive Techniken zur Erzeugung von Negativemissionen müssen Pyrolyse und die Produktion von Pflanzenkohle für verschiedene Verwendungsoptionen mit einbeziehen und auch den Erhalt bestehender Kohlenstoffspeicher (z. B. Wald, organische Böden) berücksichtigen. Einbezogen werden sollte auch die Option zur stofflichen Nutzung von Pyrolysegas und -öl sowie perspektivisch auch eine Kombination von Pyrolyse und BECCS.

Literaturverzeichnis

- Ahmad, Mahtab; Rajapaksha, Anushka Upamali; Lim, Jung Eun; Zhang, Ming; Bolan, Nanthi; Mohan, Dinesh et al. (2014): Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. In: *Chemosphere* 99, S. 19–33. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071.
- Bai, Shahla Hosseini; Omidvar, Negar; Gallart, Marta; Kämper, Wiebke; Tahmasbian, Iman; Farrar, Michael B. et al. (2022): Combined effects of biochar and fertilizer applications on yield: A review and meta-analysis. In: *The Science of the total environment* 808, S. 152073. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152073.
- Ballenthien, Jana; Richter, Kenneth (2022): Holz – die neue Kohle? Warum Europa immer mehr Wälder aus aller Welt verfeuert. In: *Der kritische Agrarbericht*, S. 244–248.
- Beste, Andrea (2021): Greenwashing & viel Technik! Vermeintlich nachhaltige Lösungen für die Landwirtschaft. Hg. v. MdEP Martin Häusling. Online verfügbar unter https://www.martin-haeusling.eu/images/Greenwashing_und__viel_Technik_Web.pdf.
- Bolinder, Martin Anders; Crotty, Felicity; Elsen, Annemie; Frac, Magdalena; Kismányoky, Tamás; Lipiec, Jerzy et al. (2020): The effect of crop residues, cover crops, manures and nitrogen fertilization on soil organic carbon changes in agroecosystems: a synthesis of reviews. In: *Mitig Adapt Strat Glob Change* 25 (6), S. 929–952. DOI: 10.1007/s11027-020-09916-3.
- Bolte, Andreas; Ammer, Christian; Annighöfer, Peter; Bauhus, Jürgen; Eisenhauer, Dirk-Roger; Geissler, Corinna et al. (2021): Fakten zum Thema: Wälder und Klimaschutz. In: *AFZ DerWald* (11), S. 12–15. Online verfügbar unter file:///C:/Users/hnitsch/Downloads/2021_AFZ_76_11_12_Bolte_et_al_Fakten_Wlder_Klimaschutz.pdf.
- Borchard, Nils; Schirrmann, Michael; Cayuela, Maria Luz; Kammann, Claudia; Wrage-Mönnig, Nicole; Estavillo, Jose M. et al. (2019): Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis. In: *The Science of the total environment* 651 (Pt 2), S. 2354–2364. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.060.
- Brosowski, André; Krause, Tim; Mantau, Udo; Mahro, Bernd; Noke, Anja; Richter, Felix et al. (2019): How to measure the impact of biogenic residues, wastes and by-products: Development of a national resource monitoring based on the example of Germany. In: *Biomass and Bioenergy* 127, S. 105275. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105275.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (Hg.) (2022): Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz. Entwurf. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/aktionsprogramm_natue_rlicher_klimaschutz_entwurf_bf.pdf.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (Hg.) (2022): Eckpunkte für eine Nationale Biomassestrategie (NABIS). Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/nabis-eckpunktetpapier-nationale-biomassestrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16.
- Bundesrechnungshof (Hg.) (2022): Bericht nach § 99 BHO zur Steuerung des Klimaschutzes in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.bundesrechnungshof.de/de/veroeffentlichungen/produkte/sonde_rberichte/2022-sonde_rberichte/bun-d-muss-beim-klimaschutz-zielgerichtet-steuern/@@download/langfassung_pdf.
- Calvelo Pereira, R.; Muetzel, S.; Camps Arbostain, M.; Bishop, P.; Hina, K.; Hedley, M. (2014): Assessment of the influence of biochar on rumen and silage fermentation: A laboratory-scale experiment. In: *Animal Feed Science and Technology* 196, S. 22–31. DOI: 10.1016/j.anifeeds.2014.06.019.
- Carbon Standards International (Hg.) (2022): Global Artisan C-Sink Guidelines for Carbon Sink Certification for artisan biochar production. Developed by the Ithaka Institute for Carbon Strategies, 2022 - version 1.0 (6th October 2022). Frick. Online verfügbar unter https://www.carbon-standards.com/docs/transfer/36_400EN.pdf.
- Cayuela, Maria Luz; van Zwieten, L.; Singh, B. P.; Jeffery, S.; Roig, A.; Sánchez-Monedero, M. A. (2014): Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 191, S. 5–16. DOI: 10.1016/j.agee.2013.10.009.
- de Chen; Liu, Xiaoyu; Bian, Rongjun; Cheng, Kun; Zhang, Xuhui; Zheng, Jufeng et al. (2018): Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals - A meta-analysis. In: *Journal of Environmental Management* 222, S. 76–85. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.05.004.
- Consentec GmbH, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Technische Universität Berlin (Hg.) (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. Kurzbericht: 3 Hauptszenarien. Online verfügbar unter https://www.langfristszenarien.de/enertile-explore-wAssets/docs/LFS_Kurzbericht_final_v5.pdf.
- Conte, Pellegrino; Bertani, Roberta; Sgarbossa, Paolo; Bambina, Paola; Schmidt, Hans-Peter; Raga, Roberto et al. (2021): Recent Developments in Understanding Biochar's Physical-Chemistry. In: *Agronomy* 11 (4), S. 615. DOI: 10.3390/agronomy11040615.
- Dai, Yanhui; Zheng, Hao; Jiang, Zhixiang; Xing, Baoshan (2020): Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: A meta-analysis. In: *The Science of the total environment* 713, S. 136635. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136635.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.) (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Abschlussbericht. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf.

- Ding, Fan; van Zwieten, Lukas; Zhang, Weidong; Weng, Zhe; Shi, Shengwei; Wang, Jingkuan; Meng, Jun (2018): A meta-analysis and critical evaluation of influencing factors on soil carbon priming following biochar amendment. In: *J Soils Sediments* 18 (4), S. 1507–1517. DOI: 10.1007/s11368-017-1899-6.
- Edeh, Ifeoma G.; Mašek, Ondřej; Buss, Wolfram (2020): A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties - New insights and future research challenges. In: *The Science of the total environment* 714, S. 136857. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136857.
- Edenhofer, Ottmar; Eggers, J.; Fuss, S.; Kalkuhl, M.; Merfort, A.; Minx, J. C.; Strefler, J. (2021): Wissensstand zu CO₂-Entnahmen. BEDARF & POTENZIALE, TECHNOLOGIEN & POLITIKINSTRUMENTE, WELTWEIT & IN DEUTSCHLAND. Hg. v. Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH. Online verfügbar unter https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/C18_MCC_Publications/2021_MCC_Wissensstand_zu_CO2-Emissionen.pdf.
- Elias, Micah; Hunt, Josiah; Remucal, Jon; Saks, Phil; Sanchez, Daniel, L. (2022): Biochar Carbon Credit Market Analysis: Examining the potential for coupled biochar and carbon credit production from wildfire fuel reduction projects in the Western U.S. Blue Forest Conservation. Online verfügbar unter <https://pacificbiochar.com/wp-content/uploads/BiocharCarbonCreditAnalysis-BFReports20221.pdf>.
- Embrén, Bjorn (2016): Planting Urban Trees with Biochar. The Stockholm Project. In: *the Biochar Journal (tBJ). Arbaz, Switzerland. ISSN 2297-1114.*, S. 44–47.
- European Biochar Certification (EBC) (Hg.) (2020): Richtlinien zur Zertifizierung des C-Senken Potentials von Pflanzenkohle. Version 2.1D vom 25. Januar 2021. Ithaka Institute. Arbaz, Switzerland. Online verfügbar unter https://www.carbon-standards.com/docs/4cdf50f28b85022f6efa89349392cc_c-de_senken-potential_2-1.pdf.
- European Biochar Certification (EBC) (Hg.) (2022): European Biochar Certificate – Richtlinien für die Zertifizierung von Pflanzenkohle. Version 10.2G vom 8. Dezember 2022. Ithaka Institute. Arbaz, Switzerland. Online verfügbar unter https://www.carbon-standards.com/docs/transfer/36_002DE.pdf.
- European Biochar Industry Consortium e.V. (EBI) (Hg.) (2020): Mit Pflanzenkohle basierten Kohlenstoffsinken dem Klimawandel entgegenwirken. European Biochar Industry Consortium e.V. (EBI). Online verfügbar unter http://www.biochar-industry.com/wp-content/uploads/2020/09/Whitepaper_Pflanzenkohle2020.pdf.
- European Biochar Industry (EBI) (Hg.) (2022): European Biochar Market Report 2021/2022. March 2022.
- Fehrenbach, Horst (2021): Potentiale von Bioenergie für den Klimaschutz und die »Kontroverse« zur Welternährung und zum Artenschutz. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl & D. Kasang (Hrsg.). Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung. S. 374–379. Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO, Hamburg. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.52. Online verfügbar unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/pdf/Fehrenbach_Potentiale_von_Bioenergie.pdf.
- Fehrenbach, Horst; Bischoff, Mascha; Böttcher, Hannes; Reise, Judith; Hennenberg, Klaus Josef (2022): The Missing Limb: Including Impacts of Biomass Extraction on Forest Carbon Stocks in Greenhouse Gas Balances of Wood Use. In: *Forests* 13 (3), S. 365. DOI: 10.3390/f13030365.
- Fujita, Hiroyuki; Honda, Katsuhisa; Iwakiri, Ryoji; Guruge, Keerthi S.; Yamanaka, Noriko; Tanimura, Nobuhiko (2012): Suppressive effect of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans and dioxin-like polychlorinated biphenyls transfer from feed to eggs of laying hens by activated carbon as feed additive. In: *Chemosphere* 88 (7), S. 820–827. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.03.088.
- Fuss, Sabine; Gruner, Friedemann; Hilaire, Jerome; Kalkuhl, Matthias; Knapp, Jonas; Lamb, William et al. (2021): CO₂-Entnahmen: Notwendigkeit und Regulierungsoptionen. Studie im Auftrag der Wissenschaftsplattform Klimaschutz. Hg. v. Wissenschaftsplattform Klimaschutz (WPKS). Berlin. Online verfügbar unter https://www.wissenschaftsplattform-klimaschutz.de/files/WPKS_Gutachten_MCC_PIK.pdf.
- Fuss, Sabine; Lamb, William F.; Callaghan, Max W.; Hilaire, Jérôme; Creutzig, Felix; Amann, Thorben et al. (2018): Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. In: *Environ. Res. Lett.* 13 (6), S. 63002. DOI: 10.1088/1748-9326/aabf9f.
- Gao, Si; Deluca, Thomas H.; Cleveland, Cory C. (2019): Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis. In: *The Science of the total environment* 654, S. 463–472. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.124.
- Gao, Yurong; Fang, Zheng; van Zwieten, Lukas; Bolan, Nanthi; Da Dong, Quin, Bert F. et al. (2022): A critical review of biochar-based nitrogen fertilizers and their effects on crop production and the environment. In: *Biochar* 4 (1). DOI: 10.1007/s42773-022-00160-3.
- Gerlach, Achim; Gerlach, Henning; Schrödl, Wieland; Haufe, Svent; Schottdorf, Bernd; Shehata, Awad A.; Krüger, Monika (2014): Oral Application of Charcoal and Humic Acids Influence Selected Gastrointestinal Microbiota, Enzymes, Electrolytes, and Substrates in the Blood of Dairy Cows Challenged with Glyphosate in GMO Feeds. In: *J Environ Anal Toxicol* 05 (02). DOI: 10.4172/2161-0525.1000256.
- Glaser, B.; Haumaier, L.; Guggenberger, G.; Zech, W. (2001): The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. In: *Die Naturwissenschaften* 88 (1), S. 37–41. DOI: 10.1007/s001140000193.
- Glaser, Bruno; Lehmann, Johannes; Zech, Wolfgang (2002): Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. In: *Biology and Fertility of Soils* 35 (4), S. 219–230. DOI: 10.1007/s00374-002-0466-4.
- Glaser, Bruno; Lehr, Verena-Isabell (2019): Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. In: *Scientific reports* 9 (1), S. 9338. DOI: 10.1038/s41598-019-45693-z.
- Godlewska, Paulina; Schmidt, Hans Peter; Ok, Yong Sik; Oleszczuk, Patryk (2017): Biochar for composting improvement and contaminants reduction. A review. In: *Bioresour. Technol.* 246, S. 193–202. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.07.095.
- Grafmüller, Jannis; Schmidt, Hans-Peter; Kray, Daniel; Hagemann, Nikolas (2022): Root-Zone Amendments of Biochar-Based Fertilizers: Yield Increases of White Cabbage in Temperate Climate. In: *Horticulturae* 8 (4), S. 307. DOI: 10.3390/horticulturae8040307.

- Hennenberg, Klaus; Böttcher, Hannes; Braungardt, Sibylle; Köhler, Benjamin; Reise, Judith; Köppen, Susanne et al. (2021): Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie. Teilbericht zu den Projekten BioSINK und BioWISE. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_12-2022_aktuelle_nutzung_und_foerderung_der_holzenergie.pdf.
- Herath, Indika; Kumarathilaka, Prasanna; Al-Wabel, Mohammad I.; Abduljabbar, Adel; Ahmad, Mahtab; Usman, Adel R.A.; Vithanage, Meththika (2016): Mechanistic modeling of glyphosate interaction with rice husk derived engineered biochar. In: *Microporous and Mesoporous Materials* 225, S. 280–288. DOI: 10.1016/j.micromeso.2016.01.017.
- Hilber, Isabel; Bastos, Ana Catarina; Loureiro, Susana; Soja, Gerhard; Marsz, Aleksandra; Cornelissen, Gerard; Bucheli, Thomas D. (2017): The different faces of biochar: Contamination risk versus remediation tool. In: *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 25 (2), S. 86–104. DOI: 10.3846/16486897.2016.1254089.
- Hoffman, T. C.; Zitomer, D. H.; McNamara, P. J. (2016): Pyrolysis of wastewater biosolids significantly reduces estrogenicity. In: *Journal of hazardous materials* 317, S. 579–584. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.05.088.
- Hossain, Md Zahangir; Bahar, Md Mezbaul; Sarkar, Binoy; Donne, Scott Wilfred; Ok, Young Sik; Palansooriya, Kumuduni Niroshika et al. (2020): Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. In: *Biochar* 2 (4), S. 379–420. DOI: 10.1007/s42773-020-00065-z.
- Huygens, Dries; Saveyn, Hans; Tonini, Davide; Eder, Peter; Delgado Sancho, Luis (2019): Technical proposals for selected new fertilising materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009) - Process and quality criteria, and assessment of environmental and market impacts for precipitated phosphate salts & derivatives, thermal oxidation materials & pyrolysis & gasification materials. Hg. v. EUR 29841 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-09888-1. Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC117856>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hg.) (2019a): Method for Estimating the Change in Mineral Soil 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Appendix 4.4: Organic Carbon Stocks from Biochar Amendments: Basis for Future Methodological Development. Online verfügbar unter https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Ap4_Biochar.pdf.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hg.) (2019b): Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. Approved draft. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hg.) (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* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Full_Report.pdf.
- Iost, Susanne; Geng, Natalia; Schweinle, Jörg; Banse, Martin; Brüning, Simone; Jochem, Dominik et al. (2020): Setting up a bioeconomy monitoring: Resource base and sustainability. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI). Braunschweig (Thünen Working Paper, 149).
- Ippolito, James A.; Cui, Liqiang; Kammann, Claudia; Wrage-Mönnig, Nicole; Estavillo, Jose M.; Fuertes-Mendizábal, Teresa et al. (2020): Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. In: *Biochar* 2 (4), S. 421–438. DOI: 10.1007/s42773-020-00067-x.
- Jeffery, Simon; Abalos, Diego; Prodana, Marija; Bastos, Ana Catarina; van Groenigen, Jan Willem; Hungate, Bruce A.; Verheijen, Frank (2017): Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. In: *Environmental Research Letters* (12), zuletzt geprüft am 27.05.2020.
- Jeffery, Simon; Verheijen, Frank G.A.; Kammann, Claudia; Abalos, Diego (2016): Biochar effects on methane emissions from soils: A meta-analysis. In: *Soil Biology and Biochemistry* 101, S. 251–258. DOI: 10.1016/j.soilbio.2016.07.021.
- Jia, Xingyong; Wang, Meng; Yuan, Wenqiao; Ju, Xiaotang; Yang, Baozhu (2016): The Influence of Biochar Addition on Chicken Manure Composting and Associated Methane and Carbon Dioxide Emissions. In: *BioResources* 11 (2). DOI: 10.15376/biores.11.2.5255-5264.
- Joseph, Stephen; Cowie, Annette L.; van Zwieten, Lukas; Bolan, Nanthi; Budai, Alice; Buss, Wolfram et al. (2021): How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. In: *GCB Bioenergy* 13 (11), S. 1731–1764. DOI: 10.1111/gcbb.12885.
- Kammann, Claudia; Glaser, Bruno; Schmidt, Hans-Peter (2016): Combining Biochar and Organic Amendments. in: Shackley, S., Ruysschaert, G., Zwart, K., Glaser, B. (Eds.), *Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practice*. Routledge, London, S. 136–164. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/301295876_Combining_Biochar_and_Organic_Amendments.
- Kammann, Claudia; Ippolito, Jim; Hagemann, Nikolas; Borchard, Nils; Cayuela, Maria Luz; Estavillo, José M. et al. (2017): Biochar as a tool to reduce the agricultural greenhouse-gas burden – knowns, unknowns and future research needs. In: *Journal of Environmental Engineering and Landscape* (25:2), S. 114–139.
- Kammann, Claudia I.; Schmidt, Hans-Peter; Messerschmidt, Nicole; Linsel, Sebastian; Steffens, Diedrich; Müller, Christoph et al. (2015): Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. In: *Scientific reports* 5, S. 11080. DOI: 10.1038/srep11080.
- Kätterer, Thomas; Bolinder, Martin Anders; Andrén, Olof; Kirchmann, Holger; Menichetti, Lorenzo (2011): Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141 (1-2), S. 184–192. DOI: 10.1016/j.agee.2011.02.029.

- Keller, Heiko; Rettenmeier, Nils (2022): Social implications of and biomass availability for an innovative lignocellulose biorefinery concept based on the acetone organosolv process. D.6.6 in UNRAVEL project reports supported by the EU's Horizon 2020 programme under GA No. 792004. Hg. v. ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH. Online verfügbar unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/UNRAVEL_Social_Biomass_Assessment_D6.6PU_IFEU-2022.pdf.
- Kimbell, Lee K.; Kappell, Anthony D.; McNamara, Patrick J. (2018): Effect of pyrolysis on the removal of antibiotic resistance genes and class I integrons from municipal wastewater biosolids. In: *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 4 (11), S. 1807–1818. DOI: 10.1039/C8EW00141C.
- Kopernikus-Projekt Ariadne Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (Hg.) (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Online verfügbar unter <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitat-2045-szenarienreport/>.
- Kuzyakov, Yakov; Bogomolova, Irina; Glaser, Bruno (2014): Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis. In: *Soil Biology and Biochemistry* 70, S. 229–236. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.12.021.
- Lehmann, Johannes; Cowie, Annette; Masiello, Caroline A.; Kammann, Claudia; Woolf, Dominic; Amonette, James E. et al. (2021): Biochar in climate change mitigation. In: *Nat. Geosci.* 14 (12), S. 883–892. DOI: 10.1038/s41561-021-00852-8.
- Lehmann, Johannes; Gaunt, John; Rondon, Marco (2006): Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. In: *Mitig Adapt Strat Glob Change* 11 (2), S. 403–427. DOI: 10.1007/s11027-005-9006-5.
- Lehmann, Johannes; Joseph, Stephen (Hg.) (2015): Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. Taylor and Francis.
- Leng, Lijian; Huang, Huajun (2018): An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability. In: *Bioresource technology* 270, S. 627–642. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.09.030.
- Li, Yuanbo; He, Jianzhou; Qi, Haonan; Li, Hui; Boyd, Stephen A.; Zhang, Wei (2020): Impact of biochar amendment on the uptake, fate and bioavailability of pharmaceuticals in soil-radish systems. In: *Journal of hazardous materials* 398, S. 122852. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122852.
- Liu, Qi; Zhang, Yanhui; Liu, Benjuan; Amonette, James E.; Lin, Zhibin; Liu, Gang et al. (2018a): How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis. In: *Plant Soil* 426 (1-2), S. 211–225. DOI: 10.1007/s11104-018-3619-4.
- Liu, Yuxue; Lonappan, Linson; Brar, Satinder Kaur; Yang, Shengmao (2018b): Impact of biochar amendment in agricultural soils on the sorption, desorption, and degradation of pesticides: A review. In: *The Science of the total environment* 645, S. 60–70. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.099.
- Luick, Rainer; Hennenberg, Klaus; Leuschner, Christoph; Grossmann, Manfred; Jedicke, Eckhard; Schoof, Nicolas; Waldenspuhl, Thomas (2021): Urwälder, Natur- und Wirtschaftswälder im Kontext von Biodiversitäts- und Klimaschutz - Teil 2: Das Narrativ von der Klimaneutralität der Ressource Holz. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung (NuL)* 53 (1), S. 22–35. DOI: 10.1399/NuL.2022.01.02.
- Maurer, Hans (2021): Rechtlicher Umgang mit Pflanzkohle. Gutachten im Auftrag des BAFU. Hg. v. Advokaturbüro Maurer & Stäger. Online verfügbar unter <file:///C:/Users/hnitsch/Downloads/rechtlicher-umgang-mit-pflanzkohle.pdf>.
- Melo, Leônidas Carrijo Azevedo; Lehmann, Johannes; Da Carneiro, Jefferson Santana Silva; Camps-Arbestain, Marta (2022): Biochar-based fertilizer effects on crop productivity: a meta-analysis. In: *Plant Soil* 472 (1-2), S. 45–58. DOI: 10.1007/s11104-021-05276-2.
- Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH (Hg.) (2016): Vorsicht beim Wetten auf Negative Emissionen (MCC-Kurzdossier, 2 - November 2016). Online verfügbar unter https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/B2.3_Publications/Kurzdossiers/Negative_Emissionen/Policy_Brief_NET_DE.pdf.
- Neogi, Suvadip; Sharma, Vikas; Khan, Nawaz; Chaurasia, Deepshi; Ahmad, Anees; Chauhan, Shradha et al. (2022): Sustainable biochar: A facile strategy for soil and environmental restoration, energy generation, mitigation of global climate change and circular bioeconomy. In: *Chemosphere* 293, S. 133474. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133474.
- Ni, Bing-Jie; Zhu, Zhuo-Ran; Li, Wei-Hua; Yan, Xiaofang; Wei, Wei; Xu, Qiuxiang et al. (2020): Microplastics Mitigation in Sewage Sludge through Pyrolysis: The Role of Pyrolysis Temperature. In: *Environ. Sci. Technol. Lett.* 7 (12), S. 961–967. DOI: 10.1021/acs.estlett.0c00740.
- O'Connor, David; Peng, Tianyue; Zhang, Junli; Tsang, Daniel C. W.; Alessi, Daniel S.; Shen, Zhengtao et al. (2018): Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: A review of in situ field trials. In: *The Science of the total environment* 619-620, S. 815–826. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.132.
- Omondi, Morris Oduor; Xia, Xin; Nahayo, Alphonse; Liu, Xiaoyu; Korai, Punhoon Khan; Pan, Genxing (2016): Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. In: *Geoderma* 274, S. 28–34. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.03.029.
- Peng, Xin; Deng, Yinger; Peng, Yan; Yue, Kai (2018): Effects of biochar addition on toxic element concentrations in plants: A meta-analysis. In: *Science of The Total Environment* 616-617, S. 970–977. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.222.
- Poeplau, Christopher; Don, Axel; Schneider, Florian (2021): Roots are key to increasing the mean residence time of organic carbon entering temperate agricultural soils. In: *Glob Chang Biol* 27 (19), S. 4921–4934. DOI: 10.1111/gcb.15787.
- Pokharel, Prem; Ma, Zilong; Chang, Scott X. (2020): Biochar increases soil microbial biomass with changes in extra- and intracellular enzyme activities: a global meta-analysis. In: *Biochar* 2 (1), S. 65–79. DOI: 10.1007/s42773-020-00039-1.
- Quilliam, Richard S.; Rangecroft, Sally; Emmett, Bridget A.; Deluca, Thomas H.; Jones, Davey L. (2013): Is biochar a source or sink for polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) compounds in agricultural soils? In: *GCB Bioenergy* 5 (2), S. 96–103. DOI: 10.1111/gcbb.12007.

- Reisser, Moritz; Purves, Ross S.; Schmidt, Michael W. I.; Abiven, Samuel (2016): Pyrogenic Carbon in Soils: A Literature-Based Inventory and a Global Estimation of Its Content in Soil Organic Carbon and Stocks. In: *Front. Earth Sci.* 4. DOI: 10.3389/feart.2016.00080.
- Ren, Jiqin; Yu, Peixian; Xu, Xiaohong (2019): Straw Utilization in China—Status and Recommendations. In: *Sustainability* 11 (6), S. 1762. DOI: 10.3390/su11061762.
- Robb, Samuel; Joseph, Stephen; Abdul Aziz, Ammar; Dargusch, Paul; Tisdell, Clement (2020): Biochar's cost constraints are overcome in small-scale farming on tropical soils in lower-income countries. In: *Land Degrad Dev* 31 (13), S. 1713–1726. DOI: 10.1002/ldr.3541.
- Rödger, Jan-Markus; Ganagin, Waldemar; Krieg, Andreas; Roth, Christian; Loewen, Achim (2013): Steigerung des Biogasertrages durch die Zugabe von Pflanzkohle. In: *Müll und Abfall* (9), S. 476–481. Online verfügbar unter <https://pflanzenkohle.de/wp-content/uploads/2016/06/Artikel-Steigerung-des-Biogasertrages-durch-Pflanzkohle.pdf>, zuletzt geprüft am 06.04.2022.
- Roe, Stephanie; Streck, Charlotte; Beach, Robert; Busch, Jonah; Chapman, Melissa; Daioglou, Vassilis et al. (2021): Land-based measures to mitigate climate change: Potential and feasibility by country. In: *Glob Chang Biol* 27 (23), S. 6025–6058. DOI: 10.1111/gcb.15873.
- Rombel, Aleksandra; Krasucka, Patrycja; Oleszczuk, Patryk (2022): Sustainable biochar-based soil fertilizers and amendments as a new trend in biochar research. In: *The Science of the total environment* 816, S. 151588. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151588.
- Ross, J. J.; Zitomer, D. H.; Miller, T. R.; Weirich, C. A.; McNamara, P. J. (2016): Emerging investigators series: pyrolysis removes common microconstituents triclocarban, triclosan, and nonylphenol from biosolids. In: *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 2 (2), S. 282–289. DOI: 10.1039/C5EW00229J.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (Hg.) (2020): Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa. Umweltgutachten 2020. Berlin. Online verfügbar unter https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Entschlossene_Umweltpolitik.html.
- Sánchez-García, M.; Alburquerque, J. A.; Sánchez-Monedero, M. A.; Roig, A.; Cayuela, Maria Luz (2015): Biochar accelerates organic matter degradation and enhances N mineralisation during composting of poultry manure without a relevant impact on gas emissions. In: *Bioresource technology* 192, S. 272–279. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.05.003.
- Schmidt, Hans-Peter (2012): 55 Anwendungen von Pflanzkohle. In: *Ithaka Journal* (1), S. 99–102.
- Schmidt, Hans-Peter; Anca-Couce, Andrés; Hagemann, Nikolas; Werner, Constanze; Gerten, Dieter; Lucht, Wolfgang; Kammann, Claudia (2019a): Pyrogenic carbon capture and storage. In: *GCB Bioenergy* (11), S. 573–591. Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12553>, zuletzt geprüft am 27.05.2020.
- Schmidt, Hans-Peter; Hagemann, Nikolas (2021): 400.000 Pyrolyseanlagen zur Rettung des Klimas. Notwendigkeit und Grenzen des exponentiellen Wachstums von Klimatechnologien. In: *Ithaka-Journal*, S. 436–442. Online verfügbar unter <https://www.biochar-journal.org/itjo/media/doc/400000.pdf>, zuletzt geprüft am 06.04.2022.
- Schmidt, Hans-Peter; Hagemann, Nikolas; Abächerli, Fredy; Leifeld, Jens; Bucheli, Thomas (2021a): Pflanzkohle in der Landwirtschaft. Hintergründe zur Düngertilassung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken (Agroscope Science, 112).
- Schmidt, Hans-Peter; Hagemann, Nikolas; Draper, Kathleen; Kammann, Claudia (2019b): The use of biochar in animal feeding. In: *PeerJ* 7, e7373. DOI: 10.7717/peerj.7373.
- Schmidt, Hans-Peter; Kammann, Claudia (2018): Klimapositive Landwirtschaft. Klimabilanz eines Schweizer Pionierbetriebes. Hg. v. Ithaka Institute for Carbon Strategies (Ithaka Journal).
- Schmidt, Hans-Peter; Kammann, Claudia; Gerlach, Achim; Gerlach, Henning (2016): Der Einsatz von Pflanzkohle in der Tierfütterung. In: *Ithaka-Journal*, S. 364–394.
- Schmidt, Hans-Peter; Pandit, Bishnu Hari; Cornelissen, Gerard; Kammann, Claudia I. (2017): Biochar-Based Fertilization with Liquid Nutrient Enrichment: 21 Field Trials Covering 13 Crop Species in Nepal. In: *Land Degrad Dev* 28 (8), S. 2324–2342. DOI: 10.1002/ldr.2761.
- Schmidt, Hans-Peter; Kammann, Claudia; Hagemann, Nikolas; Leifeld, Jens; Bucheli, Thomas D.; Sánchez Monedero, Miguel Angel; Cayuela, Maria Luz (2021b): Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. In: *GCB Bioenergy* 13 (11), S. 1708–1730. DOI: 10.1111/gcbb.12889.
- Seman-Varner, Rachel; Hassebrook, Charles; Zilberman, David; Brown, Robert; Paul, Beverly; Winstel, Lauren et al. (2022): Scaling Sustainable Biochar Research & Commercialization for Agriculture & Conservation Benefits: A Summary from a Stakeholder Convening [White paper]. Washington, DC: AFT-FFAR-NCAT. Online verfügbar unter <https://farmlandinfo.org/publications/biochar-convening-summary/>.
- Sha, Zhipeng; Li, Qianqian; Lv, Tiantian; Misselbrook, Tom; Liu, Xuejun (2019): Response of ammonia volatilization to biochar addition: A meta-analysis. In: *The Science of the total environment* 655, S. 1387–1396. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.316.
- Smith, Pete; Adams, Justin; Beerling, David J.; Beringer, Tim; Calvin, Katherine V.; Fuss, Sabine et al. (2019): Land-Management Options for Greenhouse Gas Removal and Their Impacts on Ecosystem Services and the Sustainable Development Goals. In: *Annu. Rev. Environ. Resour.* 44 (1), S. 255–286. DOI: 10.1146/annurev-environ-101718-033129.
- Sokol, Noah W.; Kuebbing, Sara E.; Karlsen-Ayala, Elena; Bradford, Mark A. (2019): Evidence for the primacy of living root inputs, not root or shoot litter, in forming soil organic carbon. In: *The New phytologist* 221 (1), S. 233–246. DOI: 10.1111/nph.15361.
- Solaiman, Zakaria M.; Abbott, Lynette K.; Murphy, Daniel V. (2019): Biochar phosphorus concentration dictates mycorrhizal colonisation, plant growth and soil phosphorus cycling. In: *Scientific reports* 9 (1), S. 5062. DOI: 10.1038/s41598-019-41671-7.

- Spangenberg, Joachim; Neumann, Werner; Klöser, Heinz; Wittig, Stefan; Uhlenhaut, Tilmann; Mertens, Martha et al. (2020): Falsche Hoffnungen, vertane Chancen: Wie ökonomische Modelle die Vorschläge des IPCC im Special Report 15 „Global Warming of 1.5°C“ (2018) beeinträchtigen. Eine Analyse aus dem wissenschaftlichen Beirat des BUND. Hg. v. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND). Berlin.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Waldgesamtrechnung. Berichtszeitraum 2014 - 2020. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/landwirtschaft-wald/Publikationen/Downloads/waldgesamtrechnung-ta-bellenband-pdf-5852102.html>.
- Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende, Agora Verkehrswende (Hg.) (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf.
- Tenic, Elvir; Ghogare, Rishikesh; Dhinra, Amit (2020): Biochar—A Panacea for Agriculture or Just Carbon? In: *Horticulturae* 6 (3), S. 37. DOI: 10.3390/horticulturae6030037.
- Tian, Renqiang; Li, Chunxing; Xie, Shengyu; You, Futian; Cao, Zhihong; Xu, Zhihong et al. (2019): Preparation of biochar via pyrolysis at laboratory and pilot scales to remove antibiotics and immobilize heavy metals in livestock feces. In: *J Soils Sediments* 19 (7), S. 2891–2902. DOI: 10.1007/s11368-019-02350-2.
- Tiemeyer, Bärbel; Bechtold, Michel; Belting, Susanne; Freibauer, Annette; Förster, Christoph; Schubert, Elisabeth et al. (2017): Moorschutz in Deutschland Optimierung des Moormanagements in Hinblick auf den Schutz der Biodiversität und der Ökosystemleistungen. Bewertungsinstrumente und Erhebung von Indikatoren. Bundesamt für Naturschutz (BfN). Bonn - Bad Godesberg (BfN-Skripten).
- Tisserant, Alexandre; Cherubini, Francesco (2019): Potentials, Limitations, Co-Benefits, and Trade-Offs of Biochar Applications to Soils for Climate Change Mitigation. In: *Land* (8), 179. Online verfügbar unter <https://www.mdpi.com/2073-445X/8/12/179>, zuletzt geprüft am 27.05.2020.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2022a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2022. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2020 (Climate Change, 24). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikatione/n/2022-05-31_climate-change_24-2022_nir-2022_de.pdf.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2022b): Nature-based solutions and global climate protection. Assessment of their global mitigation potential and. Berlin (Climate Change, 1). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikatione/n/2022-01-03_climate-change_01-2022_potential_nbs_policy_paper_final.pdf.
- Wang, Jian; Odinga, Emmanuel Stephen; Zhang, Wei; Zhou, Xian; Yang, Bing; Waigi, Michael Gatheru; Gao, Yanzheng (2019): Polyaromatic hydrocarbons in biochars and human health risks of food crops grown in biochar-amended soils: A synthesis study. In: *Environment international* 130, S. 104899. DOI: 10.1016/j.envint.2019.06.009.
- Wang, Jinyang; Xiong, Zhengqin; Kuzyakov, Yakov (2016): Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. In: *GCB Bioenergy* 8 (3), S. 512–523. DOI: 10.1111/gcbb.12266.
- Wang, Pengcheng; Huang, Qiuyun; Xiao, Henglin; Zhang, Zhi; Qiao, Yan; Chen, Yunfeng; Hu, Cheng (2022): The effect of carbonate and biochar on carbon and nitrogen losses during composting. In: *J Mater Cycles Waste Manag* 24 (4), S. 1485–1493. DOI: 10.1007/s10163-022-01405-w.
- Weng, Zhe Han; van Zwieten, Lukas; Tavakkoli, Ehsan; Rose, Michael T.; Singh, Bhupinder Pal; Joseph, Stephen et al. (2022): Microspectroscopic visualization of how biochar lifts the soil organic carbon ceiling. In: *Nature communications* 13 (1), S. 5177. DOI: 10.1038/s41467-022-32819-7.
- Werner, C.; Lucht, W.; Gerten, D.; Kammann, C. (2022): Potential of Land-Neutral Negative Emissions Through Biochar Sequestration. In: *Earth's Future* 10 (7). DOI: 10.1029/2021EF002583.
- Wissenschaftsplattform Klimaschutz (WPKS) (Hg.) (2022): Auf dem Weg zur Klimaneutralität: Umsetzung des European Green Deal und Reform der Klimapolitik in Deutschland. Jahrgutachten 2021. Berlin. Online verfügbar unter https://www.wissenschaftsplattform-klimaschutz.de/files/WPKS_JGA_Volltext.pdf.
- Wißmann, Imke; Middendorf, Vera; Schulz, Matthias; Vesper, Susanne (2019): VertiKKA – Multifunktionale Fassadenbegrünungsmodule für die Städte der Zukunft. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 66 (12), S. 989–994. Online verfügbar unter https://ressourceneffiziente-stadtquartiere.de/wp-content/uploads/2020/01/2019_66_Nr12_Korrespondenz_Abwasser_Abfall__2019_VertiKKA.pdf.
- Wolf, Tobias; Untergutsch, Andrea; Wensing, Christoph; Mittelbach, Heidi; Lu-Pagenkopf, Feng; Kellenberger, Daniel; Kubowitz, Petra (2020): Potenziale von Bauen mit Holz. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (Texte, 192). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikatione/n/2020_10_29_texte_192_2020_potenziale_von_bauen_mit_holz_aktualisiert.pdf.
- Xiang, Yangzhou; Deng, Qi; Duan, Honglang; Guo, Ying (2017): Effects of biochar application on root traits: a meta-analysis. In: *GCB Bioenergy* 9 (10), S. 1563–1572. DOI: 10.1111/gcbb.12449.
- Ye, Lili; Camps-Arbestain, Marta; Shen, Qinhuia; Lehmann, Johannes; Singh, Balwant; Sabir, Muhammad (2020): Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. In: *Soil Use Manage* 36 (1), S. 2–18. DOI: 10.1111/sum.12546.
- Zhang, Qi; Xiao, Jing; Xue, Jianhui; Zhang, Lang (2020): Quantifying the Effects of Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Soils: A Global Meta-Analysis. In: *Sustainability* 12 (8), S. 3436. DOI: 10.3390/su12083436.

Zhao, Shuaixiang; Schmidt, Susanne; Qin, Wei; Li, Ji; Li, Guoxue; Zhang, Weifeng (2020): Towards the circular nitrogen economy - A global meta-analysis of composting technologies reveals much potential for mitigating nitrogen losses. In: *The Science of the total environment* 704, S. 135401. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135401.

Zimmermann, Benedikt; Wilke, Andreas; Turad, Stefan; Semke, Patricia; Hagemann, Nikolas (2021): Pflanzkohle zur Steigerung des Methanertrags in Biogasanlagen. Abschlussbericht. Online verfügbar unter https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-34932_01-Hauptbericht.pdf.

