EBI Whitepaper

Mit Pflanzenkohle basierten Kohlenstoffsenken dem Klimawandel entgegenwirken

September 2020

Herausgeber

European Biochar Industry Consortium e.V. (EBI)
Paul-Ehrlich-Straße 7
79106 Freiburg

Autoren

Harald Bier (EBI)

Helmut Gerber (EBI, PYREG GmbH)

Marcel Huber (EBI, SynCraft Engineering GmbH)

Dr. Hannes Junginger (carbonfuture GmbH)

Prof. Dr. Daniel Kray (Hochschule Offenburg)

Dr. Jörg Lange (CO_2-Abgabe e.V.)

Hansjörg Lerchenmüller[1] (EBI, Carbuna AG)

Pål Jahre Nilsen (EBI, VOW/ETIA)

[1] Korrespondierender Autor (hansjoerg@lerchenmueller-consulting.com)

Executive Summary

Die Brisanz des fortschreitenden Klimawandels nimmt zu und das ist eine wahrhaft schlechte Nachricht. Weil sich diese Erkenntnis immer mehr durchsetzt, steigt der Handlungsdruck auf Politik und Wirtschaft und so haben sich die Europäische Union aber auch viele Unternehmen zum Ziel gesetzt klimaneutral zu werden. Konzeptionell bedeutet Klimaneutralität, dass in gleichem Maße wie Emissionen verursacht werden, Kohlenstoffsenken (Negativemissionen) geschaffen werden.

Die Potenziale für Kohlenstoffsenken sind jedoch begrenzt und ihr Ausbau wird einige Jahre bzw. Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Da zudem der CO_2-Gehalt in der Atmosphäre bereits zu hoch ist, ist es zur Erreichung von Klimaneutralität zwingend erforderlich, Emissionen kompromisslos und schnell zu senken. Technologisch haben wir alle Lösungen in der Hand, um in industrialisierten Wirtschaftsräumen innerhalb von 15 – 20 Jahren die Emissionen um 90 – 95% zu reduzieren.

Doch zur Eindämmung der Klimakrise ist die Emissionsreduktion allein nicht mehr ausreichend. Parallel zur Emissionsreduktion muss jetzt damit begonnen werden, die vorhandenen Lösungsoptionen zur Schaffung von Kohlenstoffsenken auszubauen und weiter zu entwicklen. Die Größenordnungen sind gewaltig: Für die Klimaneutralität der Europäischen Union muss bis ins Jahr 2050 das jährlich zu schaffende Senkenvolumen auf mindestens 850 Mio. t CO_2 anwachsen.

Die drei Lösungen Aufforstung/Wiederaufforstung, Pflanzenkohle/Biomasse-Pyrolyse und Aufbau bodenorganischer Substanz lassen sich kurz- und mittelfristig umsetzen und es gibt keinen Grund mit einem zügigen Ausbau zu warten. Für sie gelten, dass sie kurzfristig ein relevantes Volumen ermöglichen, dass sie kosteneffizient sind, da sie außer Kosten auch noch einen Zusatz- bzw. Hauptnutzen haben, und dass sie bei guter Umsetzungspraxis nicht negative, sondern überwiegend klar positive Auswirkungen auf die Ökosysteme haben.

Pflanzenkohle/Biomasse-Pyrolyse ist somit eine Schlüsseltechnologie für die Rettung des Klimas. Pflanzenkohle wurde in den letzten Jahren intensiv beforscht. Eine Vielzahl von Anwendungserfahrungen und unzählige wissenschaftliche Publikationen belegen heute, dass Pflanzenkohle neben dem direkten Klimanutzen als Kohlenstoffsenke in der Landwirtschaft vielfältig gewinnbringend und nutzenstiftend Einsatz finden kann. Mit Pflanzenkohle ist es möglich, Ertragssteigerungen zu realisieren, Humusaufbau zu fördern, die Wasserspeicherfähigkeit von Böden und damit die Trockenresistenz zu erhöhen und Treibhausgasemissionen wie Methan und Lachgas sowie Nitratauswaschungen zu reduzieren.

Damit Kohlenstoffsenken im notwendigen Umfang geschaffen werden, braucht es eine Kohlenstoffsenken-Ökonomie mit entsprechenden finanziellen Anreizen. Entscheidend ist dabei, dass robuste Systeme entwickelt werden, die auditierbar sind, bei denen Doppelzählungen sicher vermieden werden und bei denen die Dauerhaftigkeit der Kohlenstoffsenken und damit die tatsächliche Klimawirkung mit wissenschaftlich fundierten Berechnungsmethoden abgebildet wird.

Die gute Nachricht lautet also: Mit beherztem und zielgerichtetem Handeln ist es möglich, durch Emissionsminderung und den Aufbau von Kohenstoffsenken eine fundamentale Klimakrise zu verhindern. Also, los geht's.

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary iii

Inhaltsverzeichnis iv

Schlüsselbegriffe v

Abkürzungsverzeichnis v

Vorwort vi

1 Die Notwendigkeit von Kohlenstoffsenken 9

2 Negativemissionen im Überblick 13

3 Pflanzenkohle als Negativemissionstechnologie 20

3.1 Persistenz (Beständigkeit) von Pflanzenkohle in verschiedenen Anwendungen 22

3.2 Potenzial der Senkenleistung von Pflanzenkohle/PyCCS 23

3.3 Anwendungsnutzen von Pflanzenkohle 26

4 Entstehung einer Kohlenstoffsenken-Ökonomie 30

4.1 Bilanzierungsgrundsätze für Kohlenstoffsenken: No sink is forever 31

4.2 Vergütung von Kohlenstoffsenken 34

5 Handlungsempfehlungen 37

6 Literaturverzeichnis 39

Schlüsselbegriffe

Kohlenstoffsenke: Reservoir, das zeitweilig oder dauerhaft Kohlenstoff aufnimmt und speichert.

Kohlenstoffsequestrierung: Abscheidung und dauerhafte Speicherung von atmosphärischem Kohlenstoff.

Pflanzenkohle (engl. Biochar): Poröses, kohlenstoffhaltiges Material, das durch pyrolytische Verkohlung pflanzlicher Ausgangsstoffe hergestellt wird.

Pyrolyse: Thermochemische Umwandlung von organischen Verbindungen, insbesondere Biomasse, in sauerstoff-limitierter Umgebung bei hohen Temperaturen.

Abkürzungsverzeichnis

CH_4	Methan
CO_2	Kohlendioxid
EBC	European Biochar Certificate
Gt	Gigatonnen, also eine Milliarde Tonnen
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
NDCs	Nationally Determined Contributions
NETs	Negativemissionstechnologien (engl. Negative Emission Technologies)
NO_3	Nitrat
N_2O	Lachgas
PyCCS	Pyrogenic Carbon Capture and Storage
SDGs	Sustainable Development Goals

Vorwort

Seit sich Anfang der 2010er Jahre zunehmendes wissenschaftliches und öffentliches Interesse an Pflanzenkohle entwickelte, ist viel passiert. Ihren ursprünglichen Schwerpunkt hatte die Pflanzenkohleforschung bei der Terra Preta und der Verbesserung von Böden. Heute ist jedoch klar, dass es zu kurz gegriffen ist, Pflanzenkohle darauf zu reduzieren. Inzwischen gibt es ein weit breiteres Anwendungsspektrum, das industrielle sowie bauwirtschaftliche Lösungen einschließt. Zudem ist heute bekannt, dass die Anwendung von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft weit komplexer ist, als dies zunächst angenommen wurde. Wir wissen nun, dass sehr viele Faktoren Einfluss auf das Ergebnis nehmen und um es vorweg zu nehmen: Pflanzenkohle ist kein allheilbringendes Wundermittel, das bei jeder landwirtschaftlichen Kultur, in jeder Art von Boden, in jeglicher Anwendungsform Ertragssteigerungen bringt. Gleichzeitig wissen wir heute aber auch, dass es in allen Klimazonen landwirtschaftliche Anwendungen gibt, in denen Pflanzenkohle großen ökologischen und ökonomischen Mehrwert bieten kann. Dabei geht es nicht nur um Ertragssteigerungen, sondern auch darum, dem Humusschwund der Böden entgegenzuwirken, Nitratauswaschung zu verhindern oder Wasserspeicherfähigkeit und damit Trockenresistenz zu verbessern. Der Einsatz von Pflanzenkohle bei Stadtbäumen hat sich als wirksames Mittel herausgestellt, zunehmenden klimabedingten Stresssituation entgegenzuwirken. Die Frage ist nicht mehr, ob Pflanzenkohle als Bodenverbesserer funktioniert, sondern wo und wie sie die größte Wirkung entfaltet und wo ihr Einsatz wirtschaftlich am sinnvollsten ist. Zudem zeichnen sich immer mehr Anwendungen von Pflanzenkohle auch außerhalb der Landwirtschaft ab.

Vor allem aber wird immer klarer, dass wir aus Gründen des Klimaschutzes auf die Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle nicht verzichten können. Aufgrund des bereits akkumulierten Gehalts von CO_2 in der Atmosphäre reicht es nicht mehr aus, einfach nur weniger CO_2 zu emittieren. Um die Klimaziele von Paris zu erreichen und den globalen Temperaturanstieg auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen, brauchen wir zwingend den massiven und raschen Aufbau von Kohlenstoffsenken, sogenannte Negativemissionen, also die Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre. Pflanzenkohle ist hier eine von wenigen realistischen Lösungsoptionen mit relevantem Potenzial, die bei sachgemäßer Anwendung vielfältigen Zusatznutzen jenseits der Kohlenstoffsequestrierung entfalten kann. Der Pflanzenkohleeinsatz wirkt sich klar positiv auf die Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen aus. Im vorliegenden Dokument wollen wir aufzeigen, dass Pflanzenkohle nicht nur einen bedeutenden Beitrag zur Abminderung des Klimawandels, sondern auch zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft leisten kann. Wer aber glaubt, dass Pflanzenkohle das Problem des Klimawandels als „silver bullet“ mit einem Schuss löst, den müssen wir enttäuschen: Pflanzenkohle allein wird die Welt nicht retten und schon gar nicht ohne massive Emissionsreduktion.

Es gibt aber noch einen weiteren Aspekt: Kohlenstoff beziehungsweise Kohlenstoffverbindungen sind heute nicht nur Energieträger, sondern stellen auch einen wichtigen Roh- und Ausgangsstoff für die Industrie dar. Mit dem erforderlichen Ausstieg aus der fossilen Energiewirtschaft werden zukünftig viele dieser benötigten Roh-, Hilfs- und Betriebssstoffe wegfallen oder nicht mehr zu heutigen Preisen zur Verfügung stehen, insbesondere dann nicht, wenn die mit ihnen verbundenen CO_2-Emissionen angemessen bepreist werden. Biogene Kohlenstoffe können hier ebenfalls neue Perspektiven schaffen.

In den letzten 10 Jahren gab es eine rasante Entwicklung einerseits von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten und andererseits von Praxisanwendungen zu Pflanzenkohle. So hat sich die Anwendungspraxis aufgrund der gemachten Erfahrungen stark weiterentwickelt. Wer im Blick auf Pflanzenkohle seinen Kenntnis- und Sachstand auf wissenschaftlichen Arbeiten von vor 5 Jahren und davor beruhen lässt, schließt bis zu 80% des heute verfügbaren Wissens aus.

Dieses vom European Biochar Industrie Consortium EBI initiierte Whitepaper legt den Fokus auf die Klimathematik, also die Notwendigkeit zur Schaffung von Kohlenstoffsenken und die Chancen, die in Bezug auf Klimaschutz in der Nutzung von Pflanzenkohle liegen. Ergänzend werden aber auch alle wesentlichen weiteren Themen zur Pflanzenkohle angesprochen, insbesondere wichtige Umweltaspekte jenseits der direkten Kohlenstoffspeicherung sowie die vielfältigen Anwendungsnutzen.

Das vorliegende Whitepaper basiert auf einer umfangreichen Recherche zu aktuellen wissenschaftlichen Arbeiten über Klimawandel, Negativemissionen und Pflanzenkohle. Es soll eine breite interessierte Leserschaft dazu anregen, Pflanzenkohle aus den verschiedensten Blickrichtungen zu betrachten und dabei Kohlenstoffkreisläufe neu zu denken. Insbesondere richtet sich das Papier an:

- **Entscheidungsträger*innen**[2] **in der Politik oder in Kommunen**, die nach Lösungen zu drängenden Fragen im Kontext des Klimawandels oder der Degradation von landwirtschaftlich genutzen Böden suchen.

- **Journalisten** und andere Multiplikatoren, **Mitarbeitende in Umweltorganisationen und -verbänden**, die auf das Thema Pflanzenkohle gestoßen sind und die sich ein aktuelles Bild verschaffen wollen.

- **Investoren**, die eine Investition in ein Unternehmen erwägen, das im stark wachsenden Pflanzenkohlemarkt aktiv ist, sowie **Menschen**, die überlegen ihre berufliche Karriere in einem solchen Unternehmen zu suchen.

[2] Im Folgenden verwenden wir nur die männliche Form. Dies ist nicht geschlechtsspezifisch gemeint, sondern geschieht ausschließlich aus Gründen der besseren Lesbarkeit.

- **Landwirte** und **Gärtner**, die Pflanzenkohle bereits einsetzen, die in der Praxis die Wirkung kennen- und schätzengelernt haben oder die deren Einsatz erwägen, sowie
- **Wissenschaftler**, die an einzelnen Aspekten der Pflanzenkohle oder dem Klimawandel oder über Negativemissionen forschen und die einen breiteren Kontext des Themas Pflanzenkohle kennenlernen möchten.
- **Alle Menschen**, denen Klima- und Umweltschutz am Herzen liegt.

All denjenigen, die in Diskussionen, mit Beiträgen, Meinungen und Standpunkten dazu beigetragen haben, die Gedanken in diesem Whitepaper zu schärfen und Schlussfolgerungen zu formen, gilt unser herzlichster Dank.

Hansjörg Lerchenmüller

Freiburg, September 2020

1 Die Notwendigkeit von Kohlenstoffsenken

Der Klimawandel ist die zentrale Bedrohung für das Leben auf der Erde, wie wir es heute kennen. Längst sind Klimaveränderungen für fast alle Menschen spürbare Realität und nicht mehr nur abstrakte Theorie von Klimawissenschaftlern. Die Bedeutung von Klimaschutz ist dadurch im Bewusstsein der europäischen Bevölkerung angekommen und hat letztlich dazu geführt, dass Klimaschutz zu einem wichtigen Thema der Politik in vielen Ländern der Erde wurde, insbesondere auch in der Politik der Europäischen Union. Ende 2018 hat die EU das politische Ziel ausgerufen, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen und im Jahr 2019 haben sowohl das Europäische Parlament als auch der Europäische Rat dieses Ziel gebilligt. Anfang 2020 wurde angekündigt, dieses politische Ziel auch rechtlich zu verankern und es wurde bereits ein Vorschlag für eine entsprechende Verordnung vorgelegt (EU, 2020). Das Ziel der EU, Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent der Welt zu machen, wird als das Herzstück des Green Deals bezeichnet.

Gleichzeitig ist Klimaschutz bei Unternehmen, Konzernen und nicht zuletzt in der Finanzwirtschaft angekommen. Um Zugang zu den Kapitalmärkten, gute Zuliefererqualifizierungen und letztlich die Mitarbeiter- und Kundengunst nicht zu gefährden, müssen Unternehmen heute eine glaubwürdige und ehrgeizige Nachhaltigkeitsstrategie vorlegen. Ob ein solcher Weg aus Verantwortungsbewusstsein gegenüber kommenden Generationen oder wegen der Sorge um den Verlust der Wettbewerbsfähigkeit eingeschlagen wird, ist dabei fast zweitrangig. Entscheidend ist, dass sich klimaverantwortliches Handeln etabliert, und die Emission von Treibhausgasen nicht mehr als selbstverständliches Recht verstanden wird, sondern dass es mehr und mehr Politikern, Unternehmenslenkern und Privatpersonen ein echtes Anliegen ist, das in ihrem Einflussbereich Liegende zu tun, um eine fundamentale und irreversible Klimakrise zu verhindern. So haben immer mehr Unternehmen heute nicht mehr nur eine Nachhaltigkeitsstrategie, sondern zusätzlich auch einen dezidierten Plan zur Erreichung von Klimaneutralität. In den letzten eineinhalb Jahren ist geradezu ein Wettbewerb in der Verkündung von Klimaneutralitätszielen entstanden. Wie das allerdings konkret gehen soll, ist vermutlich den wenigsten klar. Nicht selten werden heute Baumpflanz-Projekte öffentlichkeitswirksam in Szene gesetzt, denn jeder versteht, dass ein Baum Kohlenstoff bindet. Wird Kohlenstoff aus der Atmosphäre entzogen und über einen längeren Zeitraum gespeichert, entsteht das, was Geowissenschaftler eine Kohlenstoffsenke nennen. Die Komplexität, die damit einhergeht, wird dabei aber häufig unterschätzt oder sie wird mehr oder weniger bewusst durch wissenschaftlich nicht rechtfertigbare Vereinfachungen umschifft.

Um Klimaneutralität zu erreichen, bedarf es zweier grundsätzlich verschiedener Handlungsstränge: Einerseits die Emissionsreduktion, andererseits das Schaffen von Kohlenstoffsenken. Schauen wir uns zunächst die Emissionsreduktionsseite an. Ermutigend ist, dass wir als Menschheit alle Lösungen in der Hand haben, um schnell aus den fossilen Energieträgern Braun- und Steinkohle, Erdöl und -gas auszusteigen. Zahlreiche

Studien und Modellrechnungen zeigen, dass für industrialisierte Wirtschaftsräume eine weitestgehene Reduktion der energiebasierten Treibhausgas-Emissionen innerhalb von 20 – 30 Jahren möglich ist. So wurde beispielsweise für Deutschland gezeigt, dass bis 2050 eine Reduktion um 95% gegenüber 1990 aus technischer und systemischer Sicht machbar ist, selbst bis ins Jahr 2035 wäre eine Reduktion der energiebedingten Emissionen um 90 – 95% grundsätzlich möglich, wenn auch bei deutlich höheren Kosten und mit der Notwendigkeit wesentlich stärkerer Verhaltensänderungen, die zu geringerem Energieverbrauch führen (Fraunhofer ISE, 2020). Neben den energiebasierten Emissionen sind aber auch Prozess-Emissionen aus der Industrie zu betrachten, beispielsweise bei der Herstellung von Beton oder Stahl. Dazu kommen Emissionen aus der Landwirtschaft, insbesondere Methan-Emissionen aus der Tierhaltung und Lachgas-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden als Folge der Stickstoffdüngung. Auch diese Emissionen lassen sich durch entsprechende Prozessführung und Handlungsweisen reduzieren, wenn auch sicher nicht in dem Maße, wie dies für die energiebedingten Emissionen möglich ist. Durch Landbewirtschaftung können ebenfalls CO_2-Emissionen aus dem Abbau von organischer Bodensubstanz entstehen. Insbesondere eine weitere Umwandlung von Grünland in Ackerland und die Entwässerung von Mooren sollten daher soweit wie möglich vermieden werden. Folgende exemplarische Betrachtung zu den Emissionen der Europäischen Union verdeutlicht die Dimension der verbleibenden Restemissionen: Wenn die energiebedingten Emissionen bis ins Jahr 2050 auf 10% des 1990er Werts gesenkt werden und die bisherigen jährlichen Reduktionen der nicht-energiebedingten Emissionen durch vermehrte Anstrengungen verdoppelt werden, dann bedeutet dies, dass bezogen auf den 1990er Referenzwert, noch rund 15% der Emissionen verbleiben werden (eigene Überschlagsrechnung der Autoren, siehe Abbildung 1).

Um im Jahre 2050 in diesem Szenario mit starker Emissionsreduktion die von der EU proklamierte Klimaneutralität zu erreichen, braucht es also 2050 ein Senkenvolumen in der Größenordnung von 15% der 1990er Emissionen. Selbst unter dem ambitionierten Reduktionsziel ergeben sich also große Zahlen für die erforderliche Senkenleistung: Für die Europäische Union entsprechen diese 15% einem Volumen von rund 850 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalenten, das es durch Kohlenstoffsenken zu erreichen gilt, um im Jahre 2050 bilanzielle Klimaneutralität zu erreichen.

Ein weiterer Aspekt der CO_2-Bilanzierung sind Import- und Export-Emissionen aufgrund globaler Lieferketten, die für tatsächliche Klimaneutralität ebenfalls in Betracht gezogen werden müssen. Die Europäische Union importiert Netto derzeit über den Handel von Waren und Dienstleistungen rund 700 Millionen Tonnen CO_2, die außerhalb des EU-Gebiets ausgestoßen werden (EU, 2/2020). Insbesondere wenn CO_2-Preis-Ungleichgewichte zwischen verschiedenen Wirtschaftsräumen bestehen, ist es entscheidend, diesen Bilanzierungsaspekt konsequent mit einzubeziehen, um einheitliche Wettbewerbsbedingungen zu gewährleisten.

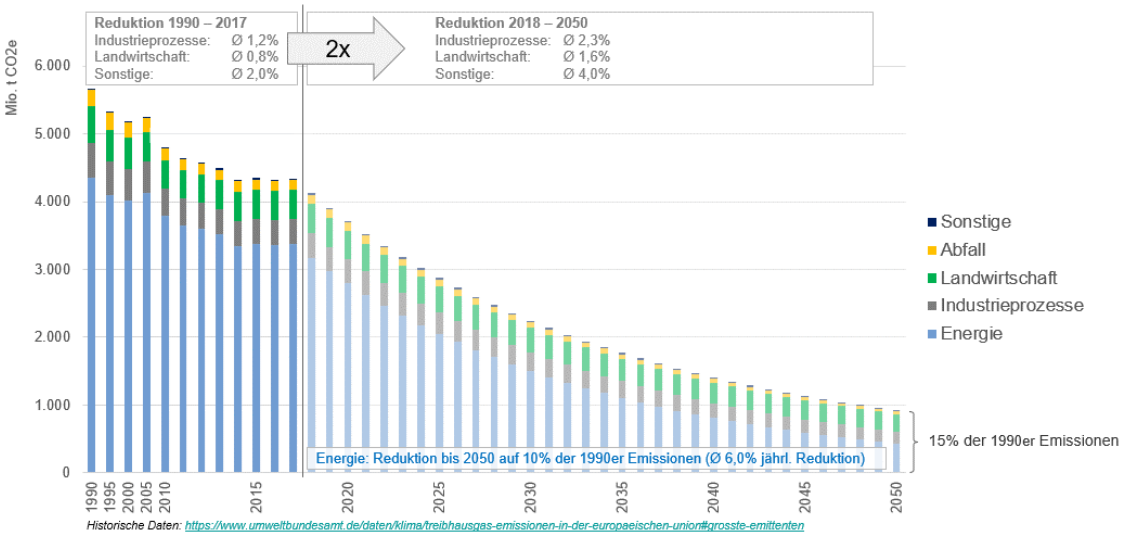

Abbildung 1: Historische Emissionen der Europäischen Union (EU28) mit Szenario zur Reduktion. Szenario-Annahmen: Die energiebedingten Emissionen werden ab 2018 um jährlich 6% reduziert, so dass sie bis 2050 auf 10% des 1990er Werts fallen. Bei den nicht-energiebedingten Emissionen werden die Reduktionsanstrengungen verdoppelt. Im Ergebnis verbleiben 15% der 1990er Emissionen. Klimaneutralität bedeutet also, Kohlenstoffsenken mindestens in diesem Umfang zu schaffen.

Wie ehrgeizig ein solches Ziel einer jährlichen 6%-igen Emissionsreduktion ist, wird deutlich, wenn man sie mit der nur knapp 1%-igen Reduktion vergleicht, die zwischen 1990 und 2017 in der EU erreicht wurde. Gerade weil Emissionsreduktionsziele ambitioniert sein müssen, wird von politischer Seite häufig versucht, in Kohlenstoffsenken einen Ausweg aus einer konsequenten Politik zur Emissionsreduktion zu suchen. Aber genau das funktioniert nicht, denn derzeit ist nicht absehbar, dass ausreichend Senkenpotenziale schnell genug erschlossen werden können (Nordhaus, 2019). Somit wird klar: Ohne kompromisslose Emissionsreduktion ist Klimaneutralität ein unrealistisches Konzept.

Auch wenn Klimaneutralität für einen einzelnen Zeitpunkt, wie hier jetzt für das Jahr 2050, ein entscheidender Meilenstein ist, so ist es doch nur ein Etappenziel. Der CO_2-Gehalt in der Atmosphäre liegt heute bereits bei über 410 ppm (parts per million) und er wird in etwa bis zu dem Zeitpunkt, zu dem sich Emissionen und geschaffene Kohlenstoffsenken die Waage halten, weiter ansteigen. Für die Jahre danach wird es aus Klimaschutzgründen erforderlich sein, weit über das Maß der verbleibenden Restemissionen hinaus Kohlenstoff aus der Atmosphäre zu entnehmen und sicher zu verwahren, um den CO_2-Gehalt in der Atmosphäre wieder zu reduzieren.

Das Zusammenwirken von Emissionsreduktion und der Schaffung von Kohlenstoffsenken sowie die Notwendigkeit das eine zu tun und das andere nicht zu lassen, wird anhand der grafischen Darstellung über die Zeit deutlich. Die animierten Grafiken des norwegischen Klimawissenschaftlers Glen Peters zeigen dies in besonders anschaulicher Weise (Peters, 2018).

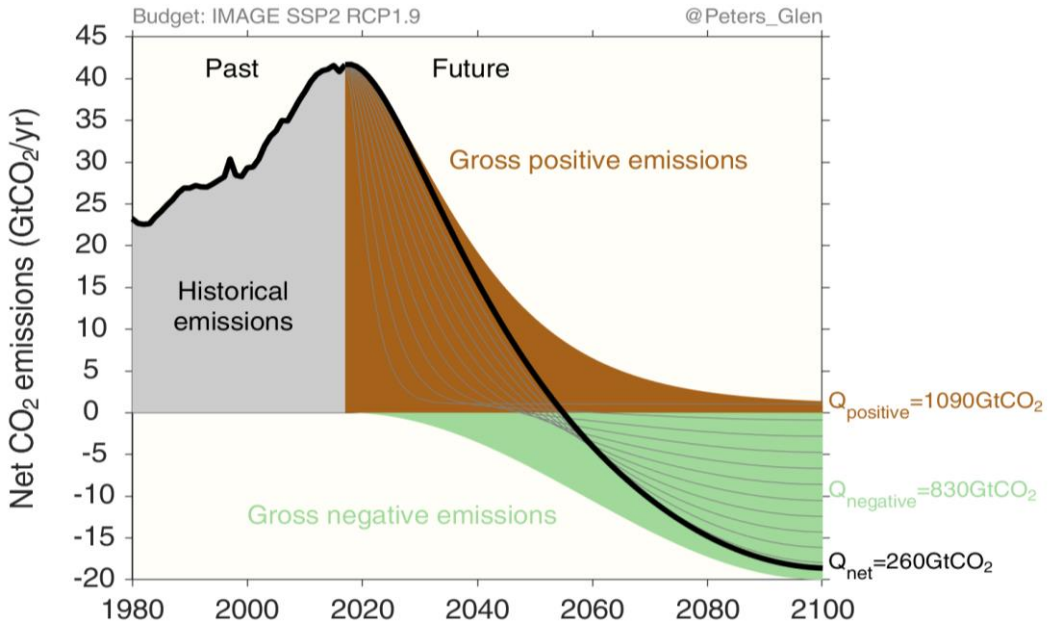

Abbildung 2: Historische und zukünftige CO_2-Emissionen in einem Szenario des IPCC (RCP1.9), in dem durch Kombination von rigoroser Emissionsreduktion und massivem Aufbau von Kohlenstoffsenken das Klimaziel von Paris erreicht werden kann. Die braune Kurve zeigt den Pfad der Emissionsreduktion, die grüne Kurve den Pfad des Senkenaufbaus. Die hellgrauen Linien entsprechen alternativen Pfaden, auf denen eine noch schnellere Emissionsreduktion dazu führen würde, dass der zur Erreichung des Klimaziels notwendige Aufbau von Kohlenstoffsenken geringer ausfallen würde. In diesem Szenario muss die Senkenleistung schon im Jahr 2050 auf rund 10 Gt CO_2 anwachsen.

Ohne Kohlenstoffsenken, die auch als Negativemissionen bezeichnet werden, sind Klimaneutralität und damit die Klimaziele von Paris nicht zu erreichen. Kohlenstoffsenken sind längst Teil der meisten IPCC Szenarien und sind in den Klimaschutzplänen der EU bereits grundsätzlich gesetzt. Selbst bei konsequenter Umsetzung aller möglichen Emissionsreduktionen würde der Temperatur-Anstieg ohne Negativemissionen die von der Weltgemeinschaft definierten Klimaziele überschreiten. Dies wiederum würde die Grundlage für eine friedliche Welt, für Wohlstand und für eine lebenswerte Zukunft für kommende Generationen zerstören. Kohlenstoffsenken sind zur Absicherung der Pariser Klimaschutzziele notwendig und dürfen nicht Ersatz für ehrgeizige Emissionsreduktion sein. Entsprechend sind Emissionen auf der einen Seite und CO_2-Senken auf der anderen Seite getrennt zu budgetieren und zu bilanzieren. Dies gilt ausdrücklich auch für entsprechende Emissionsmärkte, wie z.B. dem europäischen Emissionshandel und die nationalen Reduktionsziele, die sogenannten Nationally Determined Contributions (NDCs).

Es gibt somit schlicht keine Alternative dazu, neben der Emissionsreduktion die Schaffung von Kohlenstoffsenken anzugehen. Aus klimawissenschaftlicher Sicht ist das Ziel klar: Wir brauchen dringend eine Roadmap mit klaren Zielsetzungen, um EU-weit spätestens im Jahr 2050 ein Volumen in der Größenordnung von mindestens 15% der 1990er Emissionen in Form von verifizierbaren, stabilen und sicheren Kohlenstoffsenken zu schaffen. Nur so kann Klimaneutralität real werden, nur so kann eine tiefe Klimakrise verhindert werden.

2 Negativemissionen im Überblick

Zur Schaffung von Kohlenstoffsenken gibt es eine ganze Reihe möglicher Lösungen, die auch als Negativemissionstechnologien (engl. Negative Emission Technologies, kurz NET oder NETs) bezeichnet werden. Durch sie erfolgt ein aktiver Entzug von CO_2 aus der Atmosphäre. Entscheidend für die Klimawirksamkeit ist aber nicht nur der Entzug des Kohlenstoffs aus der Atmosphäre, sondern gleichermaßen auch die sichere Einlagerung über einen möglichst langen Zeitraum. Die Grundsätze einer Kohlenstoffsenkenbilanzierung sind vergleichbar mit der Energiebilanzierung in der Physik oder mit der Finanzbuchhaltung. In der Praxis ist die Bilanzierung von Kohlenstoffsenken unter Berücksichtigung der Systemgrenzen allerdings häufig schwierig und kann sehr aufwändig und komplex werden. Um dem zu begegnen, sind eine transparente Berechnung und deren Dokumentation sowie entsprechende Kontrollen entscheidend. Häufig fehlen jedoch bei aktuell praktizierten Kohlenstoffsenkenbilanzierungen klar definierte Standards, insbesondere in Bezug auf die Dauerhaftigkeit der Senke, und es werden zu stark vereinfachende Berechnungsansätze gewählt. Die berechnete Senkenleistung hält dann einer Prüfung unter wissenschaftlich fundierten Bewertungsmaßstäben nicht stand. Kohlenstoffsenken, die nicht halten was sie versprechen, sind gefährlich. Wenn sich Politik und Bevölkerung aufgrund scheinbarer Kohlenstoffsenken in Sicherheit wiegen, werden dringend nötige Initiativen zur Bewältigung der Klimaprobleme ausgebremst.

Das Konzept der Negativemissionen erlangte nach der Veröffentlichung des fünften Sachstandsberichts des IPCC (IPCC, 2014) große Aufmerksamkeit, und es kam zu einer deutlichen Intensivierung der Arbeiten zu diesem Thema. Manche der frühen Übersichten zu Negativemissionen enthalten noch Technologien, die sich bei näherer Betrachtung als wenig praktikabel oder als risikoreich herausgestellt haben oder die nur ein geringes Potenzial aufweisen. So findet sich beispielsweise die Ozeandüngung zwar häufig noch in den entsprechenden Übersichten, auch wenn es inzwischen einen weitgehenden Konsens in der Literatur gibt, dass dies keine sinnvoll zu verfolgende Lösungsoption ist (Fuss et al, 2018). Inzwischen liegen zahlreiche Veröffentlichungen und Studien vor, die Systemgrenzen, Schnittstellen und Wechselwirkungen angemessen klar definieren. So existiert nun eine solide Basis, die es ermöglicht, sich eine fundierte Übersicht über realistische Potenziale, sowie über Chancen und Risiken der einzelnen Lösungen zu verschaffen, welche auch die Grenzen dessen aufzeigen, was durch Negativemissionen erreicht werden kann (IPCC 1.5°#2, 2018; IPCC 1.5°#4, 2018; EACAC, 2018; Fuss et al., 2018; Smith et al, 2019).

Nach heutigem Stand von Technik und Wissenschaft gibt es sechs Negativemissionstechnologien (Abbildung 3), die einerseits unter den gegebenen oder absehbaren wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ein relevantes Sequestrierungspotenzial haben und die andererseits von ihren ökologischen Auswirkungen ein zumindestens beherrschbares Risikoprofil zeigen.

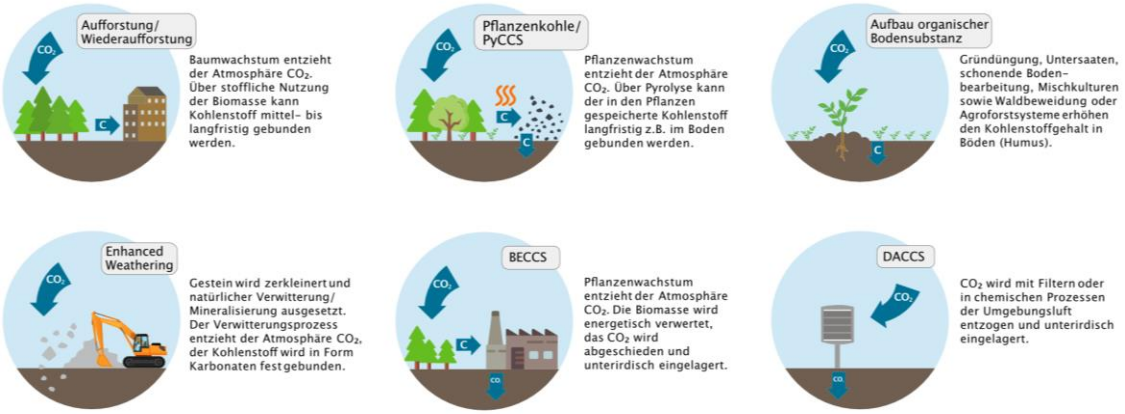

Abbildung 3: Überblick über die sechs Negativemissionstechnologien, die heute als die aussichtsreichsten Lösungsoptionen zur Schaffung von Kohlenstoffsenken angesehen werden können. EBI Grafik, inspiriert durch (SRU, 2020), wobei Ozeandüngung und fossile CCS Technologie entfernt wurden.

Die Entwicklung eines Masterplans zum Aufbau von Kohlenstoffsenken, in einem zur Mitigation (Abmilderung) des Klimawandels notwendigen Ausmaß, ist eine drängende Mammutaufgabe. Die Politik muss sie rasch und prioritär in Angriff nehmen, denn auch wenn sie technisch lösbar ist, so sind die zu berücksichtigenden sozioökonomischen und politischen Aspekte letztlich entscheidend für den Erfolg.

Jede einzelne der sechs genannten NETs ist schon für sich genommen komplex. Man kann sie aber nicht isoliert betrachten, denn einerseits gibt es in Bezug auf Ressourcennutzung eine Konkurrenzsituation zwischen den unterschiedlichen NETs, sowie gleichermaßen auch noch zwischen den NETs und Technologien zur Emissionsreduktion. Andererseits gibt es aber auch vielfältige Potenziale für Synergien, beispielsweise zwischen Aufforstung und dem Aufbau von organischer Bodensubstanz[3] oder der gemeinsamen Verwendung von Pflanzenkohle und vulkanischen, silikatischen Gesteinsmehlen für CO_2-Bindung durch beschleunigte Verwitterung (Enhanced Weathering), (Amann & Hartmann, 2019). Dies erhöht die Komplexität noch einmal deutlich, aber auch die Chancen, die sich aus Synergien ergeben können.

[3] Im deutschsprachigen Raum wird häufig, „Aufbau von organischer Bodensubstanz“ mit „Humusaufbau“ gleichgesetzt.

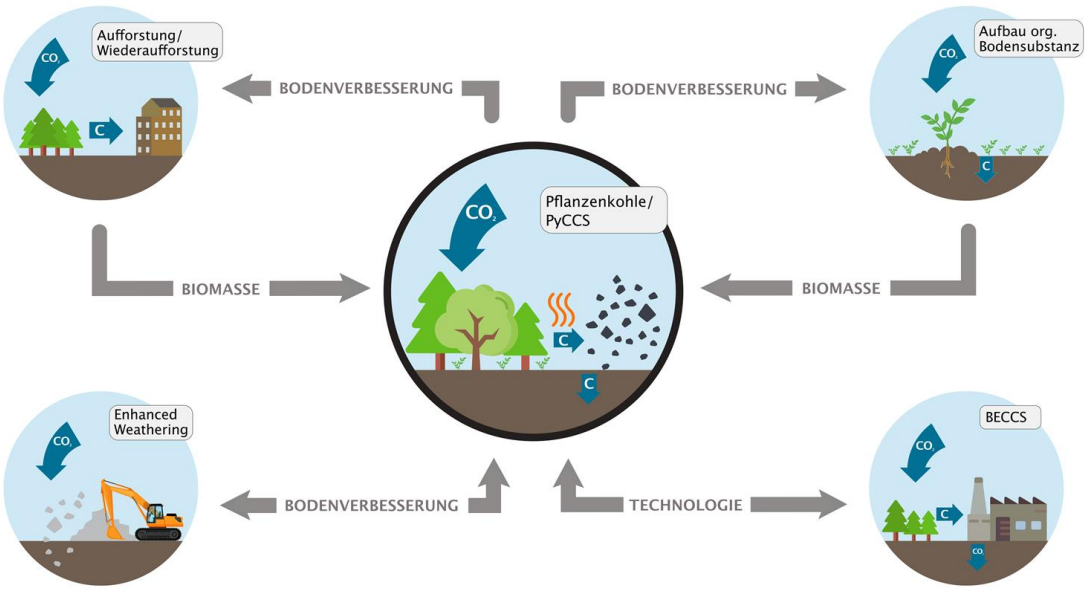

Abbildung 4: Synergien von Pflanzenkohle mit anderen NETs.

Nachfolgend einige grundlegende Überlegungen zur Vorgehensweise und Schwerpunktsetzung für den Aufbau von Kohlenstoffsenken:

- **Diversifizierung**: Aus Risikominimierungssicht ist es sinnvoll, nicht nur auf eine oder sehr wenige Negativemissionstechnologien zu setzen. Aufgrund der unbestreitbaren Notwendigkeit der Schaffung von Kohlenstoffsenken ist es aus heutiger Sicht notwendig, zumindest die in Abbildung 3 gezeigten Optionen gezielt zu fördern und weiter zu entwickeln. Zudem ist die Umsetzung und Volumenskalierung der einzelnen Lösungen mit jeweils unterschiedlichen Zeithorizonten verbunden. So wird beispielsweise die Entwicklung kostengünstiger Lösungen zur Direct Air Capture vermutlich Jahrzehnte dauern, während Aufforstungsprojekte oder die Schaffung pflanzenkohlebasierter Senken schnell umsetzbar sind. Dabei werden sich im Laufe der Zeit auch Rahmenbedingungen ändern und insofern ist eine starre Festlegung darauf, welches die beste Lösung ist, bzw. die besten Lösungen sind, nicht möglich. Wir brauchen die Möglichkeit, bei neuen Erkenntnissen umzusteuern, ohne ganz von vorne beginnen zu müssen.

- **Senkenpotenzial/Skalierbarkeit**: Entscheidend für die Klimarelevanz ist es, dass eine Lösung tatsächlich skalierbar ist und ein relevantes und realistisches Senkenvolumen erreichen kann. Alle in Abbildung 3 aufgezeigten Lösungsoptionen zeigen jede für sich ein Senkenpotenzial, das für das Jahr 2050 in der aktuellen Literatur meist auf 1 - 5 Gt CO_2 pro Jahr geschätzt wird (IPCC 1.5°#4, 2018). Schon einzeln, aber insbesondere in Kombination zeigen diese Lösungen also durchaus ein relevantes Potenzial.

- **Modularität:** Die Modularität der Lösung, also die Frage, ob eine Umsetzung nur großtechnisch oder auch kleinteilig realisierbar ist, muss berücksichtigt werden. Der Blick beispielsweise auf die Erfolgsgeschichte der Photovoltaik zeigt, dass es von großem Vorteil für eine schnelle Skalierbarkeit sein kann, wenn die Modularität der Lösung nicht nur die großtechnische Umsetzung erlaubt, sondern auch eine kleinteilige Realisierung zulässt.

- **Schnelle Umsetzbarkeit und Reife der Lösung:** Der Aufbau von relevantem Senkenvolumen erfordert Zeit. Wenn wir bis Mitte des Jahrhunderts in Europa Klimaneutralität erreichen wollen, dann müssen wir heute damit beginnen, zumindest die Lösungen voranzutreiben, für die es bereits bestehende Vorerfahrungen gibt und die anhand dieser Erfahrungen als risikoarm gelten können bzw. die überwiegend positive Nebenauswirkungen haben („no-regret"-Lösungen). Die Frage, wie schnell sich eine Lösung skalieren lässt und wie reif sie ist, insbesondere in Bezug auf die Einschätzung von Risiken, muss ein wichtiges Kriterium zur Festlegung der Schwerpunktsetzung sein.

- **Lokale Potenziale nutzen:** Klimaschutz und CO_2 sind globale Themen. Eine komplette oder überwiegende Auslagerung der Aufgabe, Senken zu schaffen, in andere Länder und Regionen kann trotzdem nicht zielführend sein. Dies gilt allein schon wegen lokal begrenzter Flächen und Ressourcen. Hinzu kommt, dass politische und sozioökonomische Auswirkungen von Import-Lösungen insbesondere auf Entwicklungs- und Schwellenländer nicht zuverlässig vorhergesagt werden können und lokale politische Veränderungen zur schnellen Zerstörung von zuvor geschaffenen Kohlenstoffsenken führen können. Das Risiko besteht insbesondere bei Aufforstungsprojekten, die ja keine inhärent stabilen Kohlenstoffsenken darstellen. Es muss also zumindest das Prinzip gelten, dass die im eigenen Land sinnvoll zu hebenden Potenziale genutzt werden und außerdem technisch-sozioökonomische Sicherheitsleitplanken von den Industrienationen entwickelt werden.

- **Kohlenstoff-effiziente Verwendung von Biomasse und Kaskadennutzung**: Wann immer Ressourcen begrenzt sind, spielt Effizienz eine entscheidende Rolle. Auf der Erde wachsende Biomasse kann entweder zur Energiegewinnung verbrannt oder zur Schaffung einer Kohlenstoffsenke umgewandelt werden. Die Kohlenstoffeffizienz muss bei der Senkenschaffung also stets berücksichtigt werden. Im Englischen gibt es das Sprichwort: „You can't have your cake and eat it.", was auf Biomasse übertragen heißt, dass sie entweder verbrannt oder dass sie zum Aufbau einer Senke verwendet werden kann. In Anknüpfung an das Sprichwort könnte man noch ergänzen: „You can't eat the cake twice", um auszudrücken, dass die Biomasse entweder über die stoffliche Nutzung, über Aufbau von organischer Bodensubstanz, über Pflanzenkohle[4] oder über ein BECCS-System in

[4] Pflanzenkohle hat dabei einen zweifachen Synergieeffekt: sie unterstützt den Aufbau von organischer Bodensubstanz (Humus) und ermöglicht zudem einen erhöhten Biomasseaufbau auf fruchbareren Böden.

eine Senke verwandelt werden kann. Der Königsweg der Senkenschaffung sind daher Synergie- und Kaskadenlösungen, die mit einer stofflichen Nutzung über Jahrzehnte beginnen und mit der Schaffung einer dauerhaften Senke enden. Ein Beispiel hierfür ist die Herstellung von Pflanzenkohle aus Waldrestholz, die Nutzung derselben zum Filtern von Abwasser in der Lebensmittelindustrie, wodurch sie mit Nährstoffen angereichert wird und das Wasser gereinigt wird, mit einer anschließenden Verwendung der aufgeladenen Pflanzenkohle als Düngemittel oder Düngemittel-Bestandteil, z.B. kombiniert mit Gesteinsmehlen, die ebenfalls CO_2 durch Verwitterung binden.

- Schutz der Ökosysteme: Der Einfluss von Negativemissionen auf die Ökosysteme kann bei unangemessenem Einsatz beträchtlich sein. Es wäre wohl kaum akzeptabel, wenn eine umfangreiche Senkenschaffung massiv zu Lasten der Biodiversität ginge oder ein überdimensionaler Wasserverbrauch damit verbunden wäre, der letztlich zu Lasten der Lebensmittelproduktion ginge. Vor diesem Hintergrund ist der Anbau von Biomasse in Monokulturen bei Aufforstungsprojekten als kritisch zu betrachten, insbesondere dann, wenn hierfür eine Bewässerung notwendig ist. Kohlenstoffsenken-Lösungsansätze (und ggf. deren Vergütung) sollten stets zu einer Aufwertung von Ökosystemen und ihrer Leistungen führen, nicht zu einer Abwertung. Dies ist über geeignete Governance-Ansätze sicherzustellen.

- Kosten und zusätzlicher Nutzen: Die Kosten für die Schaffung von Kohlenstoffsenken variieren stark zwischen den unterschiedlichen Lösungen. Bei Negativemissionstechnologien kann man grundsätzlich unterscheiden, ob eine Lösung ausschließlich oder überwiegend die Schaffung von Kohlenstoffsenken zum Ziel hat, oder ob sie einen Anwendungsnutzen hat. Negativemissionstechnologien mit relevantem Anwendungsnutzen sollten insbesondere kurz- und mittelfristig priorisiert werden, ganz besonders dann, wenn der Primärnutzen in relevantem Maße dazu führt, dass die Kosten nicht ausschließlich durch die Erzeugung der Kohlenstoffsenke getragen werden müssen.

Vor dem Hintergrund der vorgenannten Kriterien erscheint BECCS nach derzeitigem Kenntnisstand eher fragwürdig und es wird vermutlich allenfalls eine begrenzte Anzahl sinnvoller Standorte geben. DACCS gilt als sehr aussichtsreich und es finden umfangreiche Technologieentwicklungen statt, eine Skalierung auf ein relevantes Volumen wird realistisch betrachtet dennoch eher Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Enhanced Rock Weathering wird inzwischen intensiv beforscht und erscheint ebenfalls sehr aussichtsreich und hat großes Potenzial für eine schnelle Skalierung. Derzeit gibt es hierzu zahlreiche Initiativen zur Implementierung in größeren Feldversuchen und zur Quantifizierung des unter realistischen Praxisbedingungen implementierbaren Potenzials. Vor dem Hintergrund des notwendigen Volumens an Kohlenstoffsenken ist es entscheidend, die vorgenannten Optionen jetzt weiter zu entwickeln, offene Fragen durch Forschung zu klären und geeignete Konstellationen zu finden.

Die drei Lösungen Aufforstung/Wiederaufforstung, Pflanzenkohle/PyCCS und Aufbau bodenorganischer Substanz lassen sich kurz- und mittelfristig umsetzen und es gibt keinen Grund mit einem zügigen Ausbau zu warten. Für sie gelten, dass sie kurzfristig ein relevantes Volumen ermöglichen, dass sie kosteneffizient sind, da sie außer Kosten auch noch einen Zusatz- bzw. Hauptnutzen haben, und dass sie bei guter Umsetzungspraxis nicht negative, sondern überwiegend klar positive Auswirkungen auf die Ökosysteme haben.[5]

- **Aufforstung, Wiederaufforstung, Kohlenstoff-zentrierte Waldwirtschaft und stoffliche Nutzung von Holz und anderer Biomasse:** Aufforstung, Wiederaufforstung auch in Klein- und Kleinstwäldern und agroforstwirtschaftlichen Flächen sowie die Erhöhung des Kohlenstoffgehalts in Wäldern verbunden mit vermehrter stofflicher Nutzung von Holz bindet bereits beim Aufbau der Biomasse Kohlenstoff. Wald kann durch angepasste Bewirtschaftungsformen deutlich höhere Mengen an Kohlenstoff in Form von mehr Biomasse aufnehmen. Auch die stoffliche Nutzung von Biomasse von landwirtschaftlichen Flächen sowie Agroforstsysteme, aber auch Randstreifenbepflanzungen und Hecken können in weit größerem Umfang zur Schaffung von Kohlenstoffsenken eingesetzt werden als dies heute der Fall ist. Über die Schaffung entsprechender Anreize sollte eine stoffliche Nutzung von Biomasse über möglichst lange Zeiträume gefördert werden. Wichtig ist bei der stofflichen Nutzung der Fortbestand bestehender Kohlenstoffreservoirs, d.h. die stoffliche Nutzung muss so bemessen sein, dass z.B. der Humusgehalt des Bodens fortbesteht und eher steigt denn absinkt.

- **Pflanzenkohle & Pyrogenic Carbon Capture and Storage:** Durch die Verkohlung von Biomasse über Pyrolyse kann ein Großteil des darin enthaltenen Kohlenstoffs in äußert stabile Formen umgewandelt werden. Es entsteht Pflanzenkohle (engl. Biochar) sowie je nach Prozessführung zudem ein Pyrolyse-Öl sowie energiereiches Prozessgas (siehe Abbildung 5). Die Einsatzmöglichkeiten von Pflanzenkohle reichen von der Landwirtschaft, über Macadam-Stadtbaum-Gesteinssubstrate[6] bis hin zu Baumaterialien und vielen weiteren Anwendungen, siehe auch Kapitel 3.

- **Aufbau der organischen Bodensubstanz:** Durch die Anwendung alternativer Bewirtschaftungsmethoden wie beispielsweise Gründüngung, Untersaaten, schonende Bodenbearbeitung, Mischkulturen, Einsatz von Mikroorganismen sowie Waldbeweidung (Silvopasture) oder Agroforstsysteme lässt sich der organische Kohlenstoff-Gehalt von Böden erhöhen. Das Thünen-Institut geht in seinem Bericht zur Bodenzustandserhebung Deutschlands davon aus, dass der Humusgehalt in Ackerböden unter den derzeit praktizierten Bewirtschaftungsmethoden abnimmt.[7] Dies betont,

[5] Zusätzliche positive Auswirkungen bzw. Haupt- oder Zusatznutzen werden auch als Co-Benefits bezeichnet.

[6] Dieses noch wenig bekannte Konzept wurde in Stockholm von Bjorn Embrén entwickelt und wird seither sehr erfolgreich umgesetzt (https://www.biochar-journal.org/en/ct/77).

[7] „Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands – Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung“ (Flessa et al. 2018, Kapitel 6).

zusammen mit den heißen letzten Sommern und ihren Folgen für die Land- und Forstwirtschaft, die Bedeutung der künftigen Änderung von Anbausystemen hin zu regenerativen Formen der Landwirtschaft insbesondere mit einer ganzjährigen Bodenbedeckung.

Die nachfolgende Tabelle zeigt wesentliche Charakteristiken dieser drei naturnahen Negativemissionstechnologien. Da es einerseits mehr als eine Lösung braucht, um die notwendige Senkenleistung bereit zu stellen und andererseits auch vielfältige Synergien zwischen den drei Lösungen bestehen, geht es bei der Gegenüberstellung nicht um Wettbewerb, sondern darum, wie ein sinnvolles Miteinander gestaltet werden kann.

Tabelle 1: Charakteristiken der drei zumindest kurz- bis mittelfristig wichtigsten Negativemissionslösungen. Zusammenfassende Einschätzung der Autoren basierend auf den in diesem Dokument zitierten Quellen.

EBI European Biochar Industry	Aufforstung, C-zentrierte Waldwirtschaft, stoffliche Nutzung von Holz/Biomasse	Pflanzenkohle/ PyCCS	Aufbau organischer Bodensubstanz (Humus)
Kohlenstoffsenken-Potenzial	Sehr großes Potenzial, insbesondere außerhalb von Europa	Sehr großes Potenzial	Expertenmeinungen variierend von sehr großem bis zu eingeschränktem Potenzial
Kosten der Kohlenstoffsenken	Alle diese Lösungsansätze haben einen Primärnutzen und die Senkenleistung ist Zusatznutzen, daher leisten 50 - 100 EUR/t CO2 e einen signifikanten Beitrag zum Business Case und triggern starken Zuwachs bei der Bereitstellung von Senken		
Stabilität der Senken	Immanentes Verlustrisiko aufgrund von Bränden und Schäden durch den Klimawandel	Stabilität wissenschaftlich auf breiter Basis anerkannt	Stabilität abhängig von der Bewirtschaftungspraxis; Risiken durch den Klimawandel selbst
Quantifizierbarkeit	Aufgrund der Stabilitätsrisiken und Definition von Systemgrenzen schwierig	Wissenschaftlich fundierte Methode verfügbar	Schwierig und zurzeit noch teuer
Haupt- und Nebennutzen	Vielfältiger Nutzen, z.B. Mikroklima, Wasserrückhaltekapazität etc	Vielfältiger Nutzen, abhängig von der jeweiligen Anwendung	Vielfältiger Nutzen, z.B. Verbesserung der Bodengesundheit und Produktivität, Wasserrückhaltekapazität
Ökologische Risiken und negative Nebeneffekte	Von sehr gering (Mischwälder mit hoher Biodiversität) bis zu ungünstig (z.B. bei Monokulturen mit hohem Wasserverbrauch, Albedoeffekt)	Keine, bei angemessener Qualitätssicherung (z.B. EBC-Zertifizierung)	Keine, Humusaufbau ist ausschließlich positiv
Kohlenstoff-Effizienz	Langzeitnutzung von Biomasse hat 100% C-Effizienz (für die Dauer der Nutzung)	Aktuell üblicherweise 30%-60% (aufgrund energetischer Nutzung des Rests weniger kritisch); mit Nutzung von Bio-Öl bis zu 70%	Wenn große Mengen von Biomasse für Flächenkompostierung genutzt werden, niedrige C-Effizienz, sonst sehr hoch
Verfügbarkeit und Skalierbarkeit	Methoden verfügbar, allerdings brauchen größere Projekte viel Zeit	Rasch skalierbar, Technologie verfügbar	Praktische Erfahrung verfügbar, weitere Forschung für großflächige landwirtschaftliche Umsetzung nötig
Effekte auf andere Ressourcen	Flächen- und gegebenenfalls Wasserbedarf	Abhängig von der Nachhaltigkeit der verwendeten Biomasse	Kaum konkurrierende Anforderung an andere Ressourcen wie Energie, Land und Wasser

Wir wollen nachfolgend vertieft auf Pflanzenkohle als NET eingehen, da sie in den letzten Jahren zunehmende Beachtung fand. Es würde den Rahmen dieses Papiers sprengen, alle sechs NETs so detailliert zu behandeln.

3 Pflanzenkohle als Negativemissionstechnologie

Mittels Photosynthese entziehen Pflanzen der Atmosphäre CO_2. Der dabei gewonnene Kohlenstoff ist die Basis für pflanzliche Biomasse. Wird diese pflanzliche Biomasse verbrannt oder verrottet sie, gelangt der Kohlenstoff in Form klimaschädlicher Gase, hauptsächlich CO_2, schließlich wieder in die Atmosphäre zurück. Dies ist Teil des normalen Kohlenstoffkreislaufs, und wenn der Kohlenstoffgehalt in der Atmosphäre nicht bereits zu hoch wäre, so wäre diese Freisetzung von CO_2 kein Problem.

Wird hingegen die Biomasse pyrolysiert (in Sauerstoff-limitierter Umgebung „gebacken“), wird ungefähr die Hälfte der Kohlenstoffverbindungen der Biomasse in Pflanzenkohle umgewandelt. Dieses Material ist sehr dauerhaft und wird kaum biologisch oder chemisch zersetzt. Sofern Pflanzenkohle nicht verbrannt wird, sondern in stofflichen Anwendungen verbleibt, entsteht eine Kohlenstoffsenke, immer vorausgesetzt, dass durch die Bereitstellung der Biomasse bestehende terrestriche Kohlenstoff-Vorräte nicht geschmälert werden (EBC, 2020).

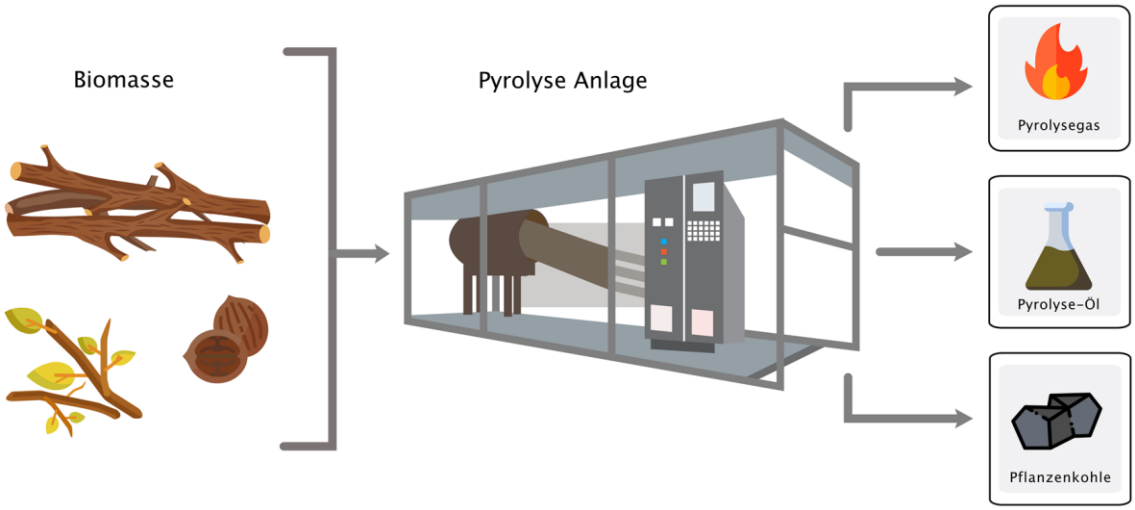

Abbildung 5: Stoffströme bei der Pyrolyse von Biomasse. Je nach Prozessführung kann die Aufteilung des in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs auf die drei möglichen Endprodukte – und damit der Anteil des Kohlenstoffs, der zur Senke wird – unterschiedlich ausfallen.

Für den Klimanutzen ist die Gesamtbilanz von Biomassegewinnung, Pyrolyse, Weiterverarbeitung und Anwendung entscheidend. Nur wenn diese insgesamt klimapositiv ausfällt, kann man von einer echten Kohlenstoffsenke sprechen. Das seit einigen Jahren bereits etablierte Europäische Pflanzenkohle Zertifikat (EBC) zur Qualitätskontrolle (EBC, 2012) wurde im Juni 2020 um einen neuen Standard zur Zertifizierung von Kohlenstoffsenken ergänzt (EBC, 2020). Damit wurde eine wissenschaftlich fundierte Basis für eine

Quantifizierung der Kohlenstoffsenkenleistung von Pflanzenkohleanwendungen geschaffen. Die wichtigsten Elemente dabei sind:

- Die Gewinnung der Biomasse muss klimaneutral sein, sie darf also bestehende Kohlenstoffsenken nicht schmälern. Dies kann zum Beispiel durch Verwendung von landwirtschaftlichen oder anderen Reststoffen, von schnell nachwachsenden Biomassen oder von Material aus Biodiversitäts- oder Landschafts- und Straßenpflege sichergestellt werden. Auch Holz aus nachhaltiger Waldbewirtschaftung kann die Kriterien erfüllen.

- Emissionen aus dem Pyrolyseprozess müssen in Abzug gebracht werden. Diese beinhalten insbesondere den Transport und die Aufbereitung der Biomasse sowie die Nachbehandlung der Pflanzenkohle als auch die benötigte Energie zum Starten des pyrolytischen Prozesses. In modernen Pyrolyseanlagen wird typischerweise sowohl das austretende Gas als auch die Abwärme energetisch genutzt und stellt so erneuerbare Energie bereit. Besonderes Augenmerk wird aufgrund der hohen Klimarelevanz auf mögliche Methanemissionen gelegt, die aber in modernen industriellen Anlagen fast vernachlässigbar sind.

- Emissionen aus dem Transport der Pflanzenkohle zum Ort der Anwendung und gegebenenfalls Emissionen aus der Weiterverarbeitung der Pflanzenkohle müssen ebenfalls subtrahiert werden.

- Die schlussendliche Anwendungsart der Pflanzenkohle bestimmt die Dauerhaftigkeit der Kohlenstoffsenke. So muss zum Beispiel bei Bodenanwendungen ein wissenschaftlich fundierter jährlicher Zerfall angenommen werden. Bei einer Verwendung der Pflanzenkohle als Sandersatz im Beton ist das nicht nötig, da die Pflanzenkohle unter Luftabschluss nicht oxidieren kann. Bei einer Anwendung als Filtermaterial entsteht hingegen nur dann eine dauerhafte Kohlenstoffsenke, wenn sichergestellt werden kann, dass das Filtermaterial langfristig deponiert wird. Wird die Pflanzenkohle als Ersatz für fossilen Kohlenstoff energetisch genutzt oder z.B. als Reduktionsmittel in der Metallherstellung, so kann das durchaus sinnvoll sein, da fossile Rohstoffe ersetzt werden; dabei entstehen jedoch keine Kohlenstoffsenken.

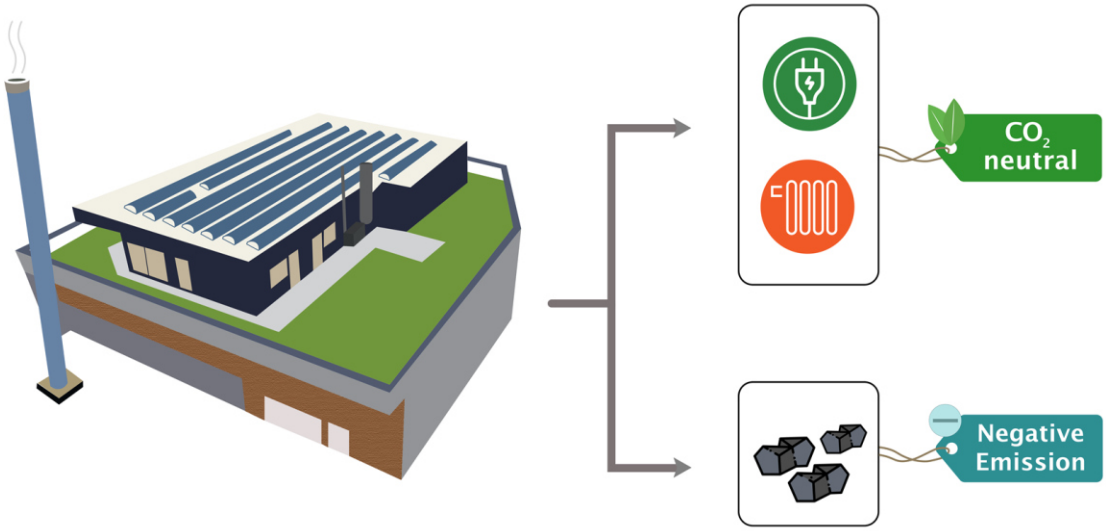

Abbildung 6: Umweltfreundliche Herstellung von Pflanzenkohle mit bis zu vierfacher Wertschöpfung: (i) Erzeugung von CO_2-neutralem Strom, (ii) CO_2-neutraler Wärme, (iii) Pflanzenkohle und (iv) Negativemissionen. Anlagentypen, die nicht auf Stromerzeugung ausgelegt sind, setzen im Gegenzug dafür einen höheren Anteil der Ausgangsbiomasse in Pflanzenkohle und damit in Kohlenstoffsenken um.

3.1 Persistenz (Beständigkeit) von Pflanzenkohle in verschiedenen Anwendungen

Entscheidend für die Klimawirksamkeit einer Kohlenstoffsenke ist deren Dauerhaftigkeit. Es gibt eine Vielzahl wirtschaftlich, technologisch und ökologisch sinnvoller Anwendungsmöglichkeiten von Pflanzenkohle, doch nicht alle stellen die dauerhafte Kohlenstoffbindung gleichermaßen sicher. Deswegen ist eine Unterscheidung nötig.

- Anwendungen im Boden: Wird Pflanzenkohle, zum Beispiel in Form von Substraten, als Kompost- oder Güllezusatz oder über die Anwendung als Futtermittelzusatz in landwirtschaftliche oder urbane Böden gebracht, so ist deren Kohlenstoff dort für mehrere Jahrhunderte stabil. Die Anwendung von Pflanzenkohle in landwirtschaftlichen Böden wird schon seit Beginn des Jahrtausends als Methode zur Sequestrierung (d.h. Bindung und Speicherung) von Kohlenstoff diskutiert (Glaser et al, 2002; Lehmann et al, 2006; Laird, 2008; Woolf et al, 2010). Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten haben sich seither mit der Persistenz des Kohlenstoffs im Boden beschäftigt und gezeigt, dass die mittlere Verweildauer des Pflanzenkohle-Kohlenstoffs im Boden höher als die aller anderen organischen Kohlenstoffverbindungen ist (IPCC, 2019; Lehmann et al, 2015; Wang, 2015). Damit ist die langfristige Sequestrierung grundsätzlich sichergestellt. Um die langfristige Persistenz von Pflanzenkohle im Boden zu quantifizieren, ist es allerdings nötig Ergebnisse von

Experimenten über wenige Jahre auf lange Zeiträume zu extrapolieren und die Resultate unterliegen einer gewissen statistischen Unsicherheit. Der Quotient H/C_{org} hat sich als gute erklärende Variable für die Dauerhaftigkeit erwiesen (Lehmann et al, 2015). Liegt er unter 0,4, so kann eine jährliche Abbaurate von 0,3% angenommen werden (Camps-Arbestain et al, 2015). Die Zusammenfassung globaler Daten zeigen, dass dies nach derzeitigem Kenntnisstand eine konservative Abschätzung ist. Basierend auf den vorgenannten wissenschaftlichen Veröffentlichungen hat das IPCC im Jahr 2019 eine Methode zur Quantifizierung des Abbaus von Pflanzenkohle im Boden veröffentlicht (IPCC, 2019).

- Irreversible Bindung in Materialien: Wird Pflanzenkohle in einer Weise in Baumaterialien eingearbeitet, die eine Verbrennung ausschließen, so muss keine Abbaurate angesetzt werden. Beispiele hierfür sind Anwendungen in Beton, Kalkputz, Gips oder Lehm (EBC, 2020). Diese Art von Anwendungen ist weltweit von verschiedenen industriellen Akteuren in Entwicklung.

- Reversible Bindung in Materialien: Pflanzenkohle kann in Asphalt, in industrielle Materialien wie Kunststoffe oder in andere recyclebare Materialien eingearbeitet werden. Hierzu gibt es zahlreiche Forschungs- und Pilotanwendungen. Auch in diesen Anwendungsfällen muss keine Abbaurate angesetzt werden, allerdings ist die Zeitdauer des Bestehens des Materials zu berücksichtigen. Sobald das Material zum Beispiel in einer Müllverbrennungsanlage thermisch verwertet wird, ist die betreffende Kohlenstoffsenke zerstört. Materialrecycling kann dazu führen, dass ein Teil des gebundenen Kohlenstoffs freigesetzt wird und ein Teil im recycleten Stoff weiter gebunden bleibt. Die Anerkennung solcher Anwendungen als Kohlenstoffsenken bedarf besonderer Sorgfalt und setzt belastbare und konservative statistische Abschätzungen der Lebensdauer oder ein effektives Monitoring voraus.

3.2 Potenzial der Senkenleistung von Pflanzenkohle/PyCCS

Zu welchem Ergebnis eine Potenzialanalyse für die Senkenleistung von Pflanzenkohle/PyCCS kommt, hängt stark von den Annahmen zur Verfügbarkeit von Biomasse, bzw. deren Allokation zur Herstellung von Pflanzenkohle ab. So ist es letztlich auch wenig verwunderlich, dass in der Literatur ein breites Spektrum an Potenzialen genannt wird. Während einige Veröffentlichungen weltweite Potenziale von mindestens 3 – 6 Gt CO_2e pro Jahr aufzeigen (Werner et al, 2018; Smith, 2016; Lee & Day, 2013; Woolf et al, 2010; Lenton, 2010), sehen andere Autoren die erreichbaren Potenziale eher in der Größenordnung von einer Gt CO_2 als realistisch an (Griscom et al, 2017). Bezieht man weitere Biomassequellen wie etwa Klärschlamm und maritime Biomasse mit ein, ergeben sich weit höhere Potenziale (Bates & Draper, 2019).

Neben der Frage, welche Biomassen über Pyrolyseprozesse umgesetzt werden sollen, findet für die Potenzialbetrachtung ein weiterer Aspekt mehr und mehr Beachtung: Über Pyrolyse lässt sich nicht nur Pflanzenkohle herstellen, sondern auch Pyrolyse-Öle und Prozessgas. Prozessgas kann in der chemischen Industrie oder energetisch sinnvoll genutzt werden. Dagegen können Pyrolyse-Öle entweder über eine stoffliche Verwendung oder über eine geologische Einlagerung perspektivisch auch vermehrt zur Kohlenstoffsequestrierung eingesetzt werden (Schmidt et al, 2018). Somit lässt sich die Kohlenstoffeffizienz von heute 30 – 60% durchaus auf bis zu 70% steigern, in Kombination mit CO_2-Abscheidungstechnologien wie sie bei BECCS oder der fossilen CCS-Technologie zum Einsatz kommen würden läge sie sogar noch höher.

Ein entscheidender Vorteil in Bezug auf eine schnelle Skalierung ist die Modularität der Technologie. Pflanzenkohle kann in modernen Pyrolyseanlagen in vielen Fällen bereits ab einer Jahresmenge von rund 1.000 t trockener Biomasse wirtschaftlich tragfähig hergestellt werden. Damit verbunden sind einerseits kurze Wege für die Versorgung der Anlage mit Biomasse und andererseits eine ortsnahe Verwendung der anfallenden Restwärme, was für die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs entscheidend ist. Sofern geeignete Biomassemengen ortsnah zur Verfügung stehen, sind auch Anlagengrößen bis zu 100.000 t Biomasse pro Jahr sinnvoll, um somit auch Kostenskalierungseffekte für die Herstellung von Pflanzenkohle zu erzielen. Je kostengünstiger die Herstellung der Pflanzenkohle ist, desto mehr Anwendungen lassen sich damit erschließen. Unter den derzeit gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wird Pflanzenkohle heute vor allem in Sonderkulturen in der Landwirtschaft, in der Tierfütterung und bei Stadtbäumen eingesetzt. Mit zunehmender Volumenskalierung der Herstellung und bei einer separaten und steigenden Vergütung der Klimadienstleistung des Kohlenstoffentzugs aus der Atmosphäre wird sich das Einsatzgebiet von Pflanzenkohle erweitern.

Relevanz von PyCCS in einer modellhaften Beispielrechnung

Eine einfache Modellrechnung zeigt, dass selbst in einem dicht besiedelten Land wie Deutschland ein durchaus relevantes Senkenvolumen durch Pflanzenkohle bzw. PyCCS erreicht werden kann: Die derzeit in Deutschland jährlich eingeschlagene Holzmenge aus der Forstwirtschaft beträgt rund 68 Mio. m³ (Destatis, 2020), entsprechend rund 37 Mio. t Holz. Wenn ein Anteil von 50% entweder auf direktem Wege oder über den Umweg der stofflichen Nutzung mit einer 70%-igen Kohlenstoffeffizienz in stabile Kohlenstoffverbindungen umgesetzt würde, so ergäbe sich eine Kohlenstoffmenge von entsprechend knapp 25 Mio. t CO_2-Äquivalente.[8] Analoge Abschätzungen zur Karbonisierung von Abfall- und Reststoffen aus Landschaftspflege und Lebensmittelindustrie, Klärschlamm, Ernteresten sowie gezielt aufgebauter Biomasse beispielsweise in Agroforstsystemen, Randbepflanzungen oder Kurzumtriebsplantagen ergeben ein weiteres Potenzial von 10 – 20 Mio. t CO_2. Verglichen mit den heutigen Emissionen Deutschlands in Höhe von rund 800 Mio. t CO_2 ist dies zwar bemerkenswert, scheint aber gleichzeitig als eher

[8] 50% Kohlenstoffgehalt von Holz, Darrgewicht 0,54 t/m² sowie 3,664 t CO2 je t Kohlenstoff

gering. Im Zusammenhang mit einer Emissionsreduktion um 95% bis 2050 zeigt sich aber, dass das so geschaffene Senkenvolumen dann die gleiche Größenordnung hat wie die gesamten verbleibenden energiebedingten Treibhausgasemissionen.

Bei der Frage, welche Biomasse zur Herstellung von Pyrolyseprodukten eingesetzt wird, greifen viele Ansätze zu kurz und setzen ausschließlich auf die Verwendung von Waldrestholz. Folgende Pfade der Verwendung von Biomasse können für Pflanzenkohle/PyCCS eingesetzt werden (EBC, 2020). Für all diese Pfade gibt es bereits erfolgreiche Beispiele und eine Skalierung sollte ernsthaft in Betracht gezogen und entsprechend rasch gefördert und umgesetzt werden.

- Landwirtschaftliche Biomassen umfassen sowohl Erntereste, die dadurch als Rohstoff betrachtet und aufgewertet werden, als auch den Anbau von schnell nachwachsender Biomasse, wie zum Beispiel Miscanthus, Hanf, Rutenhirse oder Durchwachsene Silphie.
- Organische Reststoffe aus der Lebensmittelverarbeitung oder Sekundärnutzung von Biomasse, wie zum Beispiel Trester, Nusschalen, Steinobst-Kerne oder Kaffeesatz.
- Holz aus Landschaftspflege, Kurzumtriebsplantagen, Ackerforstwirtschaft, Waldgärten, Feldrainen und urbanen Flächen.
- Biomasse aus der Waldbewirtschaftung. Dabei muss mindestens sichergestellt sein, dass der Nachwuchs des Waldes größer als die Entnahme von Biomasse ist.
- Holzabfälle, wie Waldrestholz und Sägereste, sowie rezykliertes Bau- und Nutzholz.
- Biomassen und Ernterückstände, die hygienisiert werden müssen, um Krankheitserreger abzutöten und Infektionsketten zu unterbrechen, wie beispielsweise Tabakmosaikviren bei der Tomaten- oder Paprikaproduktion im geschützten Anbau.
- Sonstige biogene Reststoffe, für die es nur wenige oder gar keine anderen sicheren Verwertungsoptionen gibt, zum Beispiel Klärschlamm und Tiergülle.

Zur Hebung des Potenzials der Schaffung von Kohlenstoffsenken aus Biomasse braucht es einen Paradigmenwechsel. Nur wenn der Wert des Kohlenstoffs als Senke angemessen berücksichtigt und jedwede Emission aus energetischer Verwertung auch von biogenem Kohlenstoff als langfristig vermeidbar angesehen wird, können wertvolle Biomasse-Reststoffe dazu eingesetzt werden, wozu sie eingesetzt werden sollte, nämlich zur Schaffung von Kohlenstoffsenken. Dies ist letztlich die Anwendung, bei der Biomasse einen entscheidenden Klimaschutz-Beitrag liefert, den die klassischen Erneuerbaren Energien wie Photovoltaik

oder Windenergie prinzipiell nicht leisten können. Die Bekämpfung des Klimawandels erfordert umgehend die entsprechende Weichenstellung zum nachhaltigen Umgang mit Biomasse-Kohlenstoff.

3.3 Anwendungsnutzen von Pflanzenkohle

Die Kohlenstoffsequestrierung durch Abscheidung und unterirdische Verpressung bzw. Mineralisierung von CO_2 (BECCS, siehe oben) ist eine Form der Kohlenstoffsequestrierung, die ausschließlich mit Kosten verbunden ist. Im Gegensatz dazu muss bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zu Pflanzenkohle stets der direkte Nutzen, der in der Anwendung der Pflanzenkohle selbst liegt, betrachtet werden. Alle heutigen relevanten Anwendungen von Pflanzenkohle sind durch einen jeweiligen Anwendungsnutzen getrieben. Es gibt bei Pflanzenkohle also stets einen Anwendungsnutzen und einen Klimanutzen. Was davon nun Hauptnutzen und Nebennutzen (Co-Benefit) ist, hängt immer von der Perspektive des Betrachters ab. So bezeichnet ein Klimawissenschaftler die bodenverbessernde Wirkung von Pflanzenkohle als Co-Benefit. Für den Landwirt, der Pflanzenkohle als Futtermittelzusatz deshalb einsetzt, weil er damit gute Praxiserfahrung in Bezug auf die Tiergesundheit und das wirtschaftliche Ergebnis der Tierhaltung gemacht hat, ist der Klimanutzen der Nebennutzen.

Kostenaufteilung zwischen Klimanutzen und landwirtschaftlichem Nutzen

Wenn ein Landwirt für beispielsweise 900 €/t hochwertige und qualitätsgesicherte Pflanzenkohle kauft und diese als Futtermittelzusatz an seine Kühe verfüttert, weil er damit im Stall bessere Ergebnisse erzielt, dann macht es natürlich keinen Sinn, die Anschaffungskosten der Pflanzenkohle komplett der Kohlenstoffsenkenleistung zuzuordnen. Eine Tonne Pflanzenkohle bindet unter Berücksichtigung aller Verluste rund zwei Tonnen CO_2. Wenn der Landwirt also für die Klimadienstleistung der Kohlenstoffsequestrierung heute beispielsweise 50 €/t CO_2 erhält, so bewirkt dies, dass er gut 10% der Pflanzenkohlekosten über die Klimaleistung finanziert bekommt. Steigt der Wert der Klimadienstleistung zukünftig auf beispielsweise 150 €/t CO_2 an, so deckt dies schon ein Drittel der Kosten. Durch weitere Technolgieentwicklung werden die Produktionskosten von Pflanzenkohle zukünftig sinken und dann vergünstigt sich die Bilanz für den Landwirt weiter.

Der Anwendungsnutzen von Pflanzenkohle ist so vielfältig wie das Anwendungsspektrum selbst. Dies gilt insbesondere, weil in vielen Anwendungsfällen die Pflanzenkohle in einer Kaskade verwendet wird: Eingesetzt zunächst im Stall, wandert die Pflanzenkohle dann über die Biogasanlage auf den Acker und bleibt dort über Jahrhunderte als bodenverbessernder Hilfsstoff erhalten.

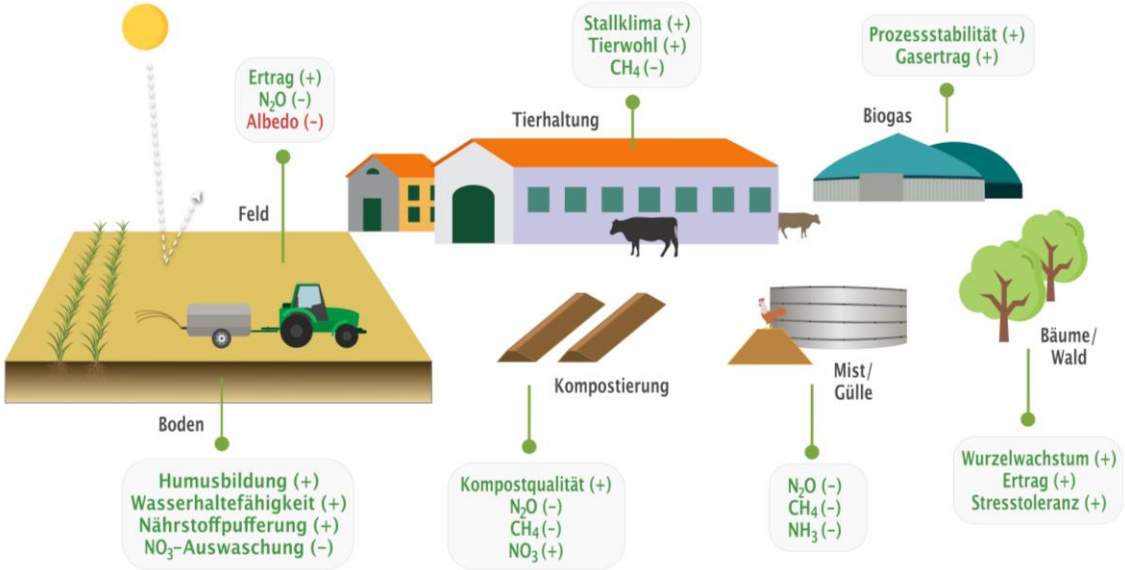

Abbildung 7: In einem landwirtschaftlichen Betrieb kann Pflanzenkohle in den Systemen Stall, Mist/Gülle, Biogasanlage, Kompostierung, Feld, Bäume/Wald sowie Boden eingesetzt werden. In den eingerahmten Textboxen wird aufgezeigt, welche Effekte Pflanzenkohle im jeweiligen System bewirkt. Die Zeichen in den Klammern (+)/(-) zeigen auf, wie Pflanzenkohle den jeweiligen Parameter beeinflusst: (-) Reduktion (+) Erhöhung. Die Farbe zeigt an, ob die Veränderung positiv (grün) oder negativ (rot) zu bewerten ist.

Es gibt lediglich einen Nebeneffekt des Einsatzes von Pflanzenkohle, der selbst bei einer sachgerechten Anwendung systematisch negative Auswirkung haben kann: Die Verringerung der Albedo (Maß für das Rückstrahlvermögen bei Einfall von Sonnenlicht). Durch Pflanzenkohle wird Boden leicht dunkler, was dazu führen kann, dass weniger Sonnenlicht zurück ins Weltall reflektiert wird und dies somit zur Erwärmung der Erde beiträgt (Meyer et al, 2012). Hierbei handelt es sich allerdings um ein Phänomen, das Naturwissenschaftler einen „Effekt zweiter Ordnung“ nennen, denn es geht allenfalls darum, dass ein Teil der positiven Klimawirkung durch die Einbringung von Pflanzenkohle durch den Albedo-Effekt aufgehoben werden kann. Da Pflanzenkohle grundsätzlich immer in den Boden eingearbeitet werden soll, führen heute übliche Anwendungsmengen nur zu Volumenanteilen im Boden in der Größenordnung von einem Prozent. Ackerböden sind zudem bei guter fachlicher Praxis einen Großteil des Jahres, besser fast das gesamte Jahr über mit Pflanzen oder Pflanzenresten bedeckt und so spielt dieser Effekt in der Realität eine untergeordnete Rolle. Dennoch sollte der Albedo-Effekt bei der Umsetzung großangelegter Pflanzenkohle-Ausbringung berücksichtigt und durch entsprechende Ausbringungs- und Bewirtschaftungsmethoden minimiert werden (Bozzi et al, 2015).

Zu allen anderen in den Text-Boxen der Abbildung 7 dargestellten Effekten gibt es inzwischen einen wissenschaftlichen Konsens, dass Pflanzenkohle bei sachgerechter Anwendung im statistischen Mittel zu positiv zu bewertenden Änderungen führt (Glaser, 2018). Dennoch, die Anwendung von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft ist weit komplexer als dies zunächst angenommen wurde und ist differenzierter zu

betrachten als dies lange Zeit und teilweise bis heute von Befürwortern als auch Kritikern des Ansatzes transportiert wird. Keinesfalls darf der Ausgang einer einzelnen Experimentreihe oder gar eines einzelnen Versuchs dazu genutzt werden, sich ein übergreifendes Urteil über Pflanzenkohle zu bilden. Pflanzenkohle kann aus den verschiedensten Ausgangsbiomassen, bei unterschiedlichen Temperaturen und unter breit variierenden Prozessbedingungen hergestellt werden und so ist es auch kaum verwunderlich, dass die Anwendung unterschiedlicher Arten von Pflanzenkohle zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Entscheidend ist zudem, in welcher Weise die Pflanzenkohle vor einer Anwendung im Boden vorbehandelt wurde. Pflanzenkohle muss praktisch in allen Fällen der Bodenanwendung vor der Ausbringung mit Nährstoffen aufgeladen werden und auch hier gibt es ein breites Spektrum an Möglichkeiten und Varianten für eine solche Vorbehandlung bzw. Veredelung. Nicht zuletzt aber spielt die Bodenbeschaffenheit und die Art der landwirtschaftlichen Kultur eine entscheidende Rolle für den Einfluss, den die Pflanzenkohle auf die Vielzahl der potenziell zu adressierenden Parameter ausübt. In Bezug auf die Wirkung von Pflanzenkohle wurde lange Zeit einseitig auf Ertragssteigerungen geschaut. Bei dem Mehrwert, den Pflanzenkohle in ihrer Anwendung im Boden bieten kann, geht es aber mindestens in optimierten Agrarsystemen nicht allein um Ertragssteigerungen, sondern darum, dem Humusschwund der Böden entgegenzuwirken, Nitratauswaschung zu verhindern oder die Wasserspeicherfähigkeit zu erhöhen, um damit Trockenresistenz und die Widerstandsfähigkeit der Pflanzen zu verbessern und somit auch die Resilienz gegenüber der Klimakrise zu steigern.

In den vergangenen 10 Jahren gab es eine rasante Entwicklung der Forschung und Entwicklung zur Pflanzenkohle mit einer exponentiell wachsenden Anzahl von wissenschaftlichen Versuchen und Veröffentlichungen. Der Umfang der Arbeiten hat dabei derart an Tiefe und Breite gewonnen, dass es selbst für ausgewiesene Pflanzenkohle-Spezialisten immer schwieriger wird, in allen Themenfeldern gleichermaßen auf dem neuesten Stand zu bleiben. Entsprechend bilden sich Spezialgebiete heraus, wie dies in allen wachsenden Wissenschafts- und Technologiefeldern der Fall ist. Aufgrund der großen Dynamik ist es auch nicht verwunderlich, dass teilweise Argumente gegen Pflanzenkohle ins Feld geführt werden, die nach heutigem Stand des Wissens schlicht falsch sind oder so veraltet, dass sie aktuell nicht mehr relevant sind.

Die nachfolgende Tabelle zeigt anhand von 12 Argumenten zusammenfassend auf, dass Pflanzenkohle gewinnbringend und nutzenstiftend eingesetzt werden kann. Risiken und negative Nebenwirkungen sind bei entsprechendem Umgang gering bzw. beherrschbar und werden in jedem Fall durch den Nutzen überkompensiert.[9]

[9] Ein Review zu wissenschaftlichen Arbeiten, die diese 12 Argumente für Pflanzenkohle stützen, ist derzeit in Zusammenarbeit mit führenden Pflanzenkohlespezialisten in Vorbereitung und wird in Kürze unter Angabe von weiteren Quellen veröffentlicht.

Tabelle 2: Zwölf gute Gründe für den Einsatz von Pflanzenkohle. Diese Argumente lassen sich anhand aktueller Literatur wissenschaftlich gut belegen.

#	Zwölf gute Gründe für den Einsatz von Pflanzenkohle	Ausgewählte Quellen
1	Biomasse-Pyrolyse ist eine Schlüsseltechnologie für die Rettung des Klimas	(Werner et al, 2018; Woolf et al, 2010; Woolf et al, 2016)
2	Die Anwendung zertifizierter Pflanzenkohle erfüllt nachweislich die höchsten Umweltstandards und ist bei sachgerechter Anwendung gefahrlos für Böden, Ökosysteme und Anwender	(EBC, 2012; Lehmann & Joseph, 2015)
3	Durch Pyrolyse lassen sich die organischen Stoffkreisläufe schließen, dies ist eine Voraussetzung für das Prinzip des Recyclings in der Bioökonomie	(Woolf et al, 2016)
4	Pflanzenkohle verbessert die Wasserhaltefähigkeit von Böden und führt in Verbindung mit Düngemitteln zu Erntezuwächsen und -stabilisierung	(Ye et al, 2020; Razzaghi et al, 2020)
5	Pflanzenkohle hilft beim Humusaufbau	(Blanco-Canqui et al, 2020; Weng et al. 2018)
6	Pflanzenkohle reduziert THG-Emissionen der Landwirtschaft	(Borchard et al, 2019; He et al, 2017, Liu et al, 2018)
7	Pflanzenkohle reduziert Nitratbelastungen von Grund- und Oberflächenwasser	(Borchard et al, 2019)
8	Pflanzenkohle zeigt vielfältigen Nutzen in der Tierhaltung und verbessert die Tiergesundheit	(Schmidt et al, 2019)
9	Pflanzenkohle fördert das Baumwachstum und steigert die Stressresistenz von Stadtbäumen	(Embrén et al, 2016; FLL, 2017)
10	Pflanzenkohle kann als Zusatz bei der Kompostierung die Kompostqualität erhöhen und Stickstoffverluste verringern	(Godlewska et al, 2017; Zhao et al, 2020)
11	Pflanzenkohle kann die Eigenschaften von Beton und Asphalt verbessern	(Gupta & Kua, 2017)
12	Pflanzenkohle ermöglicht die Sanierung belasteter Böden	(BMLFUW, 2017)

4 Entstehung einer Kohlenstoffsenken-Ökonomie

Zur Abwendung von gefährlichem Klimawandel ist es also unumgänglich, rasch und in erheblichem Umfang Kohlenstoffsenken zu schaffen. Und weil es nicht oft genug betont werden kann: Dies muss zusätzlich zur Emissionsreduktion geschehen und ist unabdingbar, um den unvermeidbaren Rest von Emissionen auszugleichen. Diejenigen, die diese überlebenswichtige Leistung erbringen, müssen dafür angemessen bezahlt werden. Die zur Erreichung von Klimaneutralität der Europäischen Union im Jahr 2050 notwendige Schaffung stabiler Kohlenstoffsenken von mindestens 850 Mio. Tonnen CO_2 Äquivalenten entspricht nach derzeitigen Schätzungen für angemessene Preise einem Leistungsumfang von mindestens 80 – 150 Milliarden EUR. Auf Spendenbasis wird das nicht gelingen. Da es sich um eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe handelt, erscheint es sinnvoll, die Erbringung und Vergütung dieser Leistung in staatlich reglementierten Systemen zu berücksichtigen. Nach derzeitigem Stand kommen dafür insbesondere Emissionssteuern und Emissionshandelssysteme infrage, ergänzt durch freiwillige und verpflichtende Offenlegungsstandards für Unternehmen.

Die Vergütung im Rahmen freiwilliger Engagements von Privatpersonen, Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen sind ein entscheidender erster Schritt. Dabei werden einerseits geeignete Standards erprobt und ihre Funktionsfähigkeit unter Beweis gestellt, und andererseits erlaubt die Vergütung im freiwilligen Markt, diese Schlüsseltechnologien bereits heute wirtschaftlich tragfähig voranzubringen. Mit diesen Vergütungsinstrumenten können Kohlenstoffsenken – und insbesondere die Produktion hochwertiger und sicherer Pflanzenkohle und ihre Anwendung – auf eine wirtschaftliche Weise so skaliert werden, wie es ökologisch sinnvoll, technisch machbar und damit gesamtgesellschaftlich wünschenswert ist. Aus Sicht derer, die Senken vergüten, ist dies eine Möglichkeit, zusätzlich zu eigenen Anstrengungen zur Emissionsreduktion, den Aufbau von Kohlenstoffsenken voranzubringen.

Die zugrundeliegenden Standards müssen sicherstellen, dass die Leistung tatsächlich wirkungsvoll erbracht und korrekt quantifiziert wird und dass andererseits nicht an anderer Stelle ökologischer oder sozialer Schaden entsteht. Dies gilt insbesondere in Bezug auf Biodiversität, den Schutz von Ökosystemen, Wasserressourcen oder die Ernährungssicherheit. Unter Berücksichtigung solcher Standards kann die Vergütung im freiwilligen Markt entscheidend zum Klimaschutz beitragen.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist die Kohlenstoffsenken-Ökonomie gewissermaßen eine Umkehr traditioneller Wertschöpfungsketten, in denen Produkte und Leistungen, die mit hohen Emissionen einhergehen, umgesetzt werden. Der Wert, der in der Kohlenstoffsenken-Ökonomie vergütet wird, wird nicht durch den Verbrauch von Energie geschaffen und damit durch Freisetzung von Kohlenstoff in die Atmosphäre, sondern umgekehrt, durch die dauerhafte Bindung atmosphärischen Kohlenstoffs. Damit wird auch deutlich,

dass Emissionsreduktion und die Schaffung von Senken zwar beide notwendig, aber ihrer Natur nach völlig unterschiedlich sind: Wir können erstere vergleichen mit Vermeidung von Müll und Unordnung, und letztere mit Reinigungs-, Aufräum- und Recyclingsdienstleistungen mit potenziell lang-anhaltenden nachhaltigen Vorteilen für die Bodengesundheit.

Da wir, um bei diesem Bild zu bleiben, bereits zu viel Müll produziert haben, ist der Aufräum- und Recyclingdienst eine gesamtgesellschaftlich und volkswirtschaftlich notwendige Aufgabe, die folglich unabhängig von weiteren Verschmutzungen ökonomisch anzuerkennen ist.

4.1 Bilanzierungsgrundsätze für Kohlenstoffsenken: No sink is forever

Wenn die Klimadienstleistung der Kohlenstoffspeicherung fair und nachvollziehbar vergütet werden soll, dann braucht es transparente und möglichst einheitliche Grundsätze für deren Bilanzierung. Dazu ist es notwendig, die Kohlenstoffkreisläufe und insbesondere deren Zeitkonstanten detailliert zu betrachten. Tut man dies, wird schnell klar, dass die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs nicht einfach durch Aufforstung ausgeglichen werden kann.

Es gibt eine Vielzahl von Reservoirs nicht-atmosphärischen Kohlenstoffs, sowohl terrestrische als auch marine, stabilere und weniger stabile, natürliche und von Menschen geschaffene. Letztlich sind alle diese Vorkommen den natürlichen Kohlenstoffkreisläufen ausgesetzt, in welchen sie sich verändern und aus nicht-atmosphärischem Kohlenstoff atmosphärischer Kohlenstoff wird und umgekehrt. Des Weiteren unterliegen diese Kreisläufe komplexen gegenseitigen Abhängigkeiten und die Umlaufgeschwindigkeiten dieser Kreisläufe unterscheidet sich erheblich. Schnellere Kreisläufe sind zum Beispiel der jährliche Austausch von Kohlenstoff zwischen der Atmosphäre und grünen Pflanzen, der sich sogar in einem jährlichen Auf und Ab der atmosphärischen CO_2-Konzentrationen manifestiert. Das Wachstum und Vergehen von holziger Biomasse, Wäldern und Mooren dagegen unterliegt eher Zyklen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten oder gar Jahrtausenden. Ebenso gibt es einen raschen Austausch von Kohlenstoff zwischen oberen Meeresschichten und der Atmosphäre und einen erheblich langsameren Austausch zwischen der Atmosphäre und tiefen Meeresschichten. Fossiler Kohlenstoff ist ein ganz besonders stabiles und somit aus Sicht des Klimaschutzes ganz besonders wertvolles Reservoir. Wird eine bestimmte Menge an CO_2 in die Atmosphäre entlassen, so wird zwar etwa die Hälfte innerhalb einiger Jahrzehnte wieder gebunden, der übrige Teil verbleibt jedoch deutlich länger in ihr und selbst nach 1.000 Jahren befinden sich immer noch 15 bis 40 % der emitierten Menge in der Atmosphäre (IPCC, 2/2014). Das zeigt, dass die Zerstörung eines fossilen Reservoirs auf keinen Fall einfach dadurch auszugleichen ist, dass eine temporäre Senke von ein paar Jahren, zum Beispiel

durch die Pflanzung von Bäumen, geschaffen wird, zumal diese Art von Reservoirs durch den Klimawandel selbst gefährdet sind (z.B. durch Brände wie in den letzten Jahren vermehrt in Sibirien, Australien, Kalifornien oder im Amazonasgebiet).

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist es notwendig, das Potenzial aller oben genannter Kohlenstoffsenken zu nutzen. Allerdings unterscheiden diese sich hinsichtlich ihrer Quantifizierbarkeit, ihrer Dauerhaftigkeit, ihrer Co-Benefits und auch ihrer Risiken erheblich. Daher wäre es ein Irrweg, die klassische und ohnehin zu kurz gegriffene Argumentationslinie für den Emissionshandel, der Einsparungen dort zu realisieren versucht, wo sie am billigsten zu haben sind, in naiver Weise auf die Kohlenstoffsenken-Ökonomie zu übertragen.

Um funktionierende Anreizsysteme zu schaffen, ist es notwendig, Kohlenstoffsenken rigoros zu bilanzieren. Insbesondere muss eine klare Beurteilung der Kohlenstoffsenke gegenüber Baseline-Szenarien erfolgen und alle mit der Schaffung der jeweiligen Senke zusammenhängenden Emissionen müssen berücksichtigt werden. Dies beinhaltet insbesondere die mögliche Zerstörung von bestehenden Kohlenstoff-Reservoirs für die Bereitstellung von Ausgangsmaterial und alle relevanten Produktions- und Transportprozesse. Außerdem sind sowohl die zugrundeliegenden Annahmen zu validieren als auch die tatsächlich erbrachten Leistungen zu verifizieren (ISO 14064-02, 2019).

Um die Vergleichbarkeit von Kohlenstoffsenken sicherzustellen, ist es zusätzlich notwendig, die Menge des gespeicherten Kohlenstoffs im Zeitverlauf zu berücksichtigen. So macht es für das vermiedene Erwärmungspotenzial einen erheblichen Unterschied, ob ich einen Baum pflanze, der über 30 Jahre 1 t Kohlenstoff aufbaut und speichert und dann gefällt wird, ob ich 1 t Kohlenstoff in Form von Pflanzenkohle sicher und dauerhaft in Baumaterial speichere, oder ob ich über 10 Jahre 1 t Kohlenstoff im Ackerboden in Form von Humus aufbaue, der dort je nach weiterer Bewirtschaftung mehr oder weniger lange verbleibt (siehe auch: Abbildung 8).

Im Fall von pflanzenkohle-basierten Kohlenstoffsenken kann generell als Baseline-Szenario die thermische Verwertung oder die Verrottung der Biomasse gelten. Zudem kann man derzeit ganz generell von wirtschaftlicher Zusätzlichkeit ausgehen, da Pflanzenkohleanwendungen bislang aufgrund der hohen Bereitstellungskosten lediglich in Nischenmärkten wirtschaftlich tragfähig sind. Nach Abzug aller Emissionen, die bei der Bereitstellung der Pflanzenkohle einschließlich der Gewinnung der Biomasse und der Schaffung der kohlenstofferhaltenden Anwendung anfallen, kann also der im Material über die Zeitdauer enthaltene Kohlenstoff als Senke angerechnet werden. Die so erhaltene zeitabhängige Sequestrierungskurve charakterisiert die Kohlenstoffsenke und ist die Grundlage für die Bilanzierung.

Grundsätzlich kann über eine solche Sequestrierungskurve auch der Kohlenstoffgehalt eines Waldkörpers oder der Humusgehalt im Boden angegeben werden. Betrachtet man Kohlenstoffzuwachs des Waldes auf

einer bestimmten nicht zu großen, klar definierten Fläche als Kohlenstoffsenke, so ergeben sich für die Bilanzierung und gegebenenfalls Vergütung allerdings einige Herausforderungen. Insbesondere gilt es zu definieren, wie mit einer eventuellen späteren Unterschreitung der Kohlenstoffmenge gegenüber dem Startzeitpunkt umzugehen ist. Wer für den Kohlenstoffzuwachs eines Waldes über einen gewissen Zeitraum vergütet wird, müsste konsequenterweise auch für den Kohlenstoffverlust unter die Ausgangsmenge finanziell einstehen. Ob das allerdings durchsetzbar ist, insbesondere da der Verlust des Waldes für den Waldbesitzer oder die Waldbesitzerin einen erheblichen wirtschaftlichen Schaden darstellt, ist fraglich. Zudem können äußere Umstände, wie insbesondere der Klimawandel, die dem Eigentümer der Senke nicht anzulasten sind, zu einem Verlust von Kohlenstoffsenken führen. Aus diesen Gründen eignen sich Waldkörper als Kohlenstoffsenken eher zur Berücksichtigung in einer umfassenderen, typischerweise staatlichen, Kohlenstoffbilanz.

Ähnliche Herausforderungen stellen sich bei der Bilanzierung von Humusaufbau, bei welchem zusätzlich noch die Quantifizierung der Kohlenstoffmenge im Boden besonders anspruchsvoll und methodisch herausfordernd ist, obwohl dort gerade in letzter Zeit viele Fortschritte im Hinblick auf Sensoren und Modellierung zu beobachten sind. Kohlenstoffsenken auf Basis von einzelnen, auch kleinteiligen Pflanzenkohleanwendungen hingegen erweisen sich als besonders geeignet für die Bilanzierung auf granularer Ebene, da die Ermittlung des Baseline-Szenarios vergleichsweise unkompliziert ist und die Quantifizierung und Nachverfolgung einzelner Pflanzenkohleanwendungen (z.B. gemäß dem EBC-Standard für C-Senken) gewährleistet werden kann.

Tabelle 3: Anforderungen an Kohlenstoffsenken-Credits gemäß dem Code of Best Practice der International Carbon Reduction and Offset Alliance (ICROA, 2020).

Anforderung	Beurteilung für kohlenstofferhaltende Anwendungen von Pflanzenkohle
Tatsächliche Senke	Gemäß dem EBC-Sink Standard werden Senken-Credits nur für bereits geschaffene Senken gewährt.
Messbar	Der EBC-Sink Standard stellt die Quantifizierung gemäß neuestem wissenschaftlichem Standard sicher. Wenn exakte Berechnungen nicht möglich sind, sind konservative Schätzungen zu verwenden.
Dauerhaft	Die Dauerhaftigkeit ist abhängig von der Art der Anwendung. Die Bilanzierung gemäße EBC-Sink verlangt, die Dauerhaftigkeit zu berücksichtigen.
Zusätzlich	Das angemessene Alternativszenario ist die thermische Verwertung der Biomasse. Die Vergütung der Senkenleistung ist ein wichtiges Element für den wirtschaftlichen Einsatz von Pflanzenkohle.
Unabhängig verifiziert	Die EBC-Sink Richtlinien bieten die Basis für die unabhängige Verifizierung. Die entsprechenden Auditprozesse werden derzeit eingeführt.
Keine Doppelzählung	Abhängig von entsprechenden Vereinbarungen und Verträgen mit Herstellern und Anwendern und entsprechender Dokumentation und Nachverfolgung, idealerweise auf Blockchain-Basis.

4.2 Vergütung von Kohlenstoffsenken

Voraussetzung für eine faire Vergütung der Schaffung von Kohlenstoffsenken ist die Quantifizierung der Leistung. Die im vorigen Kapitel dargelegten Bilanzierungsgrundsätze mit der quantitativen Charakterisierung von Senken mittels einer Sequestrierungskurve erscheint besonders gut geeignet, um die notwendige Vergleichbarkeit von Senken zu erreichen. Zudem muss in geeigneter Weise sichergestellt werden, dass dieselbe Senke nicht mehrmals vergütet wird. Ein entscheidender Punkt für die Vergütung ist die Trennung der erbrachten Senken-Leistung von der physischen Senke selbst. Durch den Abschluss entsprechender Verträge wird das Recht zur Nutzung der erbrachten Senken-Leistung abgetreten – aber natürlich nicht die physische Senke. Auf diese Weise kann ein Zertifikat geschaffen werden, das den Anspruch an der erbrachten Senkenleistung verbrieft und unabhängig von der physischen Senke von Besitzer zu Besitzer übertragen werden kann.

Die Erbringung der Senkenleistung kann demjenigen vergütet werden, der sie selbst erbracht hat, bzw. der die entsprechenden vertraglichen Beziehungen zu demjenigen hat. Im Fall von Senken, die auf Pflanzenkohleanwendungen basieren, ist dies typischerweise der Endanwender. Der Grund ist, dass die Art der Anwendung darüber entscheidet, ob überhaupt eine Senke entsteht oder nicht.

Die Vergütung von Senkenleistung im Austausch gegen Zertifikate verlangt Systeme, die rigorosen und voll dokumentierten Bilanzierungsgrundsätzen unterliegen, potenziellen Doppelzählungen effektiv entgegenwirken und die fälschungssicher und durchgängig auditierbar sind. Systeme, die diese Anforderungen erfüllen, sind auch dazu geeignet, mit Steuer- und Offenlegungssystemen verbunden zu werden. Zudem können auf dieser Basis Finanzierungs- und Handelssysteme geschaffen werden, die den Finanzierungsbedarf für die Schaffung der Senken decken können.

Die Verknüpfung mit nationalen und internationalen Emissionshandelssystemen erscheint grundsätzlich naheliegend, allerdings ist es nicht zielführend, Senken und Emissionen miteinander zu verrechnen. Einerseits ist zwar der Umfang und die Geschwindigkeit, mit welcher Senken geschaffen werden müssen, abhängig vom Erfolg der Emissionsreduktion, andererseits müssen aber in allen realistischen Szenarien Senken in erheblichem Umfang geschaffen werden. Zudem liegen die Preise, für welche derzeit hochwertige und rigoros bilanzierte dauerhafte Senken geschaffen werden können, weit über den aktuellen Preisen für Emissionszertifikate. Aus ökonomischer Sicht spricht dies einerseits dafür, die nationalen und internationalen Vorgaben für Emissionsreduktionen zu verschärfen und damit die Preise anzuheben und andererseits, die Bepreisung, Vergütung und gegebenenfalls den Handel mit Zertifikaten für Senkenleistungen separat zu führen. Der Blick auf die Emissions- und Senkenbudgets, die sich aus 1,5° Szenarien (wie z.B. in Abbildung 2) ergeben, zeigt, dass wir in wenigen Jahrzehnten in einem Maß Kohlenstoffsenken schaffen müssen, die die Emissionen weit übersteigen. Die Netto-Null ist ab 2050 nicht mehr gut genug, denn dann wird es

Aufgabe sein, durch aktiven Kohlenstoffentzug einen zu hohen CO_2-Gehalt wieder auf ein mit den Klimazielen vereinbares Maß zu reduzieren. Auch dann sind die jeweiligen verpflichtenden und freiwilligen Zielvorgaben und Märkte, unter Berücksichtigung der wechselseitigen Abhängigkeit, sinnvollerweise zu trennen.

Natürlich existieren bereits, insbesondere im freiwilligen Markt, CO_2-Zertifikate auf Basis der hier genannten Senkentechnologien. Die Richtlinien des EBC für Kohlenstoffsenken (EBC, 2020) sind jedoch der erste Standard, auf dessen Basis Zertifikate für Kohlenstoffsenken unter Berücksichtigung der hier dargelegten Bilanzierungsgrundsätze geschaffen werden. Entsprechend existieren aktuell noch kaum Märkte für Zertifikate für Kohlenstoffsenken in diesem Sinne. Diesen neuartigen und zunächst freiwilligen Märkten kommt eine Pionierrolle zu, einerseits weil sie Unternehmen, öffentlichen Einrichtungen und Privatpersonen ermöglichen, eine sachgerechte, wissenschaftsbasierte Klimastrategie umzusetzen, die den Aufbau von Kohlenstoffsenken mit einschließt, und andererseits weil sie aufzeigen können, welche Instrumente effektiv und effizient sind. Funktionierende Systeme auf zunächst freiwilliger Basis können schrittweise in staatlich regulierte Systeme überführt oder integriert werden.

Um eine Indikation für die Preise von Senkenzertifikaten zu erhalten, ist es nötig, die erbrachte Speicherleistung vergleichbar zu machen. Der Vergleich der Sequestrierungskurven in der folgenden Abbildung zeigt beispielhaft Senkenleistungen verschiedener Kohlenstoffsenken über einen Zeitraum von 100 Jahren. Die jeweiligen Endpunkte entsprechen den in typischen Projekten (vertraglich) festgelegten Ablaufzeitpunkten. Natürlich bedeutet der Ablauf dieses Zeitraums nicht notwendigerweise die Zerstörung der Senke (zum Beispiel durch Rodung). Allerdings sind die Vertragspartner danach frei, z.B. Bewirtschaftungspraktiken zu ändern, Holz zu ernten oder die Senkenleistung anderweitig geltend zu machen.

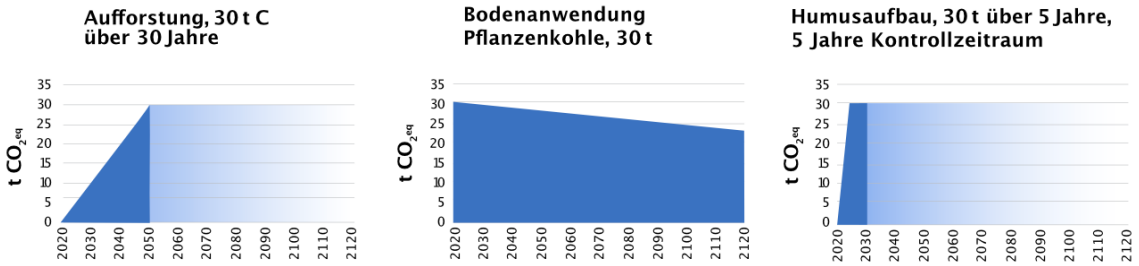

Abbildung 8: Vergleich der Sequestrierungskurven verschiedener Kohlenstoffsenken. In allen Fällen wurde angenommen, dass im Maximum 30 t CO_2 Äquivalente gebunden sind.

Quantifizierung des Klimanutzens verschiedener Kohlenstoffsenkentypen

Eine vereinfachende, aber im ersten Schritt geeignete Normierung für die erbrachte Leistung ist die Einheit Tonnen CO_2-Äquivalent multipliziert mit der Anzahl der Jahre (kurz „Tonnenjahre“). Dafür ist es notwendig, einen angemessenen Zeithorizont festzulegen – ansonsten wären dauerhafte Senken wie die Anwendung von Pflanzenkohle in Beton z.B. mit Waldprojekten gar nicht zu vergleichen. Angemessen erscheint ein Zeithorizont von 100 Jahren, denn dies ist lange genug, um unerwünschte Spekulationen zu vermeiden, es ist konsistent mit dem Horizont bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, der in Klimapolitik und Klimawissenschaften meistens betrachtet wird, und es ist leicht kommunizierbar.

Betrachten wir einmal ein vereinfachtes Beispiel eines Aufforstungsprojekts auf einer definierten Fläche, das über 30 Jahre läuft (Beispiel für übliche Praxis) und idealisiert jährlich genau eine Tonne CO_2 bindet, also beispielsweise im Jahr 10 der Laufzeit 10 Tonnen gebunden hat. Innerhalb der Projektlaufzeit erbringt das Projekt also: ½ x 30 Jahre x 30 Tonnen = 450 Tonnenjahre (Fläche des Dreiecks: einhalb x Grundseite x Höhe). Im Vergleich dazu erbringt die abgebildete Senke auf Basis von Pflanzenkohle unter Berücksichtigung einer Abbaurate von jährlich 0,3% über 100 Jahre eine Senkenleistung von ungefähr 2.600 Tonnenjahren (Fläche unter der Kurve).

Im freiwilligen Markt werden derzeit für hochwertige Aufforstungsprojekte ungefähr 35 € pro Tonne zugewachsenem CO_2 äquivalent vergütet. Somit kostet ein Tonnenjahr bei einem solchen Projekt durchschnittlich 2,33 €. Bekannte Vergütungsschemata für Humusaufbau haben tendenziell eine noch kürzere Vertragslaufzeit und sind somit pro vertraglich garantiertem Tonnenjahr eher teurer. Senkenzertifikate auf Basis von Pflanzenkohleanwendungen werden derzeit im freiwilligen Markt für 100 € pro Tonne CO_2-Äquivalent über 100 Jahre angeboten, also 1 € pro Tonnenjahr. Auch wenn der Preis von 100 € für die Zertifikate zunächst hoch erscheint, ist er in Anbetracht der erbrachten Leistung im Vergleich eher günstig. Diese Preise für Senken auf Basis von kohlenstofferhaltenden Anwendungen von Pflanzenkohle erlauben es, den Preis für Pflanzenkohleprodukte um 10 – 20% zu senken und sie somit für einen breiteren Anwendungskreis wirtschaftlich tragfähig zu machen.

Mit Blick auf die Bewertung der Klimafolgeschäden durch das deutsche Umweltbundesamt, das die Folgekosten von Emissionen auf mindestens 180 € pro Tonne CO_2 schätzt, erscheinen perspektivisch durchaus höhere Preise angemessen (Umweltbundesamt, 2/2019).

5 Handlungsempfehlungen

Klimawandel als Krise behandeln, Klimaneutralität jetzt in Angriff nehmen: Klimawandel stellt eine reale und ernsthafte Bedrohung dar und muss als fundamentale Krise behandelt werden. Das Problem lässt sich nicht einfach aussitzen und Wegschauen gilt nicht. Aufgabe von Politik, aber auch von jedem Einzelnen muss es sein, den CO_2-Ausstoß, sowie den Ausstoß von anderen Treibhausgasemissionen im jeweiligen Einflussbereich stetig und mit Nachdruck zu reduzieren. Mit dem inzwischen beeindruckenden Vormarsch der Erneuerbaren Energien kommt der Senkung der Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft (CO_2, Methan und Lachgas) eine wachsende Bedeutung zu und muss somit dringend stärker adressiert werden.

Notwendigkeit von Senken anerkennen und jetzt erste Schritte gehen: Wer in der Politik die Notwendigkeit des Aufbaus von Kohlenstoffssenken nicht ernst nimmt, der akzeptiert implizit eine menschengemachte Temperaturerhöhung um 3 – 4 °C und damit einen sozialen und ökologischen Umbruch kaum vorstellbaren Ausmaßes. Daher fordern wir die Politik auf:

- **Forschungsprogramme** zur Klärung offener Fragen und zur Technologieentwicklung von Lösungen zur Schaffung von Kohlenstoffsenken **aufzusetzen**. Wichtige Themen sind hierbei die Absicherung der Umweltverträglichkeit, die Verbesserung des Verständnisses von Wirkungszusammenhängen und die Kostensenkung.
- **Markteinführungsprogramme** für Kohlenstoffsenken zu **initiieren**. Die Lösungen, die bereits erprobt sind, keine relevanten Risiken beinhalten und die bereits jetzt schon skalierbar sind, müssen jetzt ausgerollt werden.
- Schnell anwachsende **Zielvolumina für die Schaffung von Kohlenstoffsenken festzulegen**, vergleichbar mit den Emissionsreduktionszielen.
- Die **Kohlenstoffbilanzierung für Emissionen** und **Kohlenstoffsenken** konsequent zu **trennen**. Wenn nämlich Ziele für die Emissionsreduktion und für den Senkenaufbau nicht separat gehalten werden, besteht die Gefahr, dass Senken dazu genutzt werden, Defizite bei der Emissionsreduktion auszugleichen. Zudem würden Senkenpotenziale wohl aufgrund der derzeit höheren Kosten im Vergleich zu Emissionsreduktionen nicht schnell genug aufgebaut werden.

Biomasse-Pyrolyse und Pflanzenkohle als Lösungsbaustein nutzen: In Bezug auf Pflanzenkohle als Kohlenstoffsenke fordern wir Politik und Administration vor dem Hintergrund der in diesem Papier dargelegten Sachargumente dazu auf:

- **Biomasse-Pyrolyse** als eine **Schlüsseltechnologie im Kampf gegen den Klimawandel** und zur Erhöhung der Resilienz **anzuerkennen**.
- Der Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle **jetzt auf breiter Basis zum Durchbruch zu verhelfen.**

- Wo immer sich Fragen auftun, den **Dialog auf** die **Basis aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse zu stellen**.
- Dabei zu helfen **Standards und Zertifizierungen anzuerkennen/anzuwenden** und diese **weiter zu entwickeln**. Dies gilt sowohl für Pflanzenkohle als auch für die Bilanzierung von Kohlenstoffsenken.
- Den **Umgang mit Biomasse zu überdenken**: Der stofflichen Nutzung von Holz/Biomasse muss die höchste Priorität eingeräumt werden. Jede Verbrennung von Biomasse ist eine vertane Chance zur Schaffung einer Kohlenstoffsenke. Pyrolyse muss, wo immer sie sinnvoll möglich ist, der Verbrennung vorgezogen werden.

Chancen für Arbeitsplätze und Technologieführerschaft nutzen: In Europa gibt es zahlreiche innovative Maschinenbau- und Technologieunternehmen, die sowohl Prozessemissionen bei der Herstellung von Pflanzenkohle auf ein völlig unbedenkliches Maß reduziert haben als auch schadstofffreie Pyrolyseprodukte sicherstellen und damit weltweit führend sind.

6 Literaturverzeichnis

Amann, T., & Hartmann, J. (2019). Ideas and perspectives: Synergies from co-deployment of negative. *Biogeosciences*.

Bates, A., & Draper, K. (2019). *BURN Using Fire to cool the Earth.* London: Chelsea Green.

Blanco-Canqui, H., Laird, D.A., Heaton, E.A., Rathke, S. and Acharya, B.S. (2020). Soil carbon increased by twice the amount of biochar carbon applied after 6 years: Field evidence of negative priming. GCB Bioenergy, 12(4): 240-251.

BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Österreich. (2016). Biokohle – Anwendungen in der Land- und Forstwirtschaft.

Borchard, N. et al. (2019). Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N2O emissions: A meta-analysis. Science of The Total Environment, 651: 2354-2364.

Bozzi, E., Genesio, L., Toscano, P., Pieri, M., & Miglietta, F. (2015). Mimicking biochar-albedo feedback in complex Mediterranean. *Environmental Research Letter*.

Camps-Arbestain, M., Amonette, J., Singh, B., Wang, T., & Schmidt, H.-P. (2015). A biochar classification system and associated test methods. In J. Lehmann, & S. Joseph (Hrsg.), *Biochar for environmental management* (S. 165–194). London: Routledge.

Destatis. (2020). *Statistisches Bundesamt*. Von Wald und Holz: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Wald-Holz/aktuell-holzeinschlag.html abgerufen

EACAC. (02 2018). Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets? *EASAC policy report 35; www.easac.eu*.

EBC. (2012). 'European Biochar Certificate -Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.' European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. (http:European-biochar.org). Version 9.1E of 25th Sept. 2020.

EBC. (2020). *Zertifizierung des C-Senken Potentials von Pflanzenkohle.* Arbaz, Switzerland: http://european-biochar.org.

Embrén, B. (2016). Planting Urban Trees with Biochar. The Biochar Journal (tBJ). Arbaz, Switzerland. ISSN 2297-1114. www.biochar-journal.org/en/ct/77, pp 44-47.

EU. (2020). Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/1999 (Europäisches Klimagesetz).

EU. (2/2020). Economic assessment of Carbon Leakage and Carbon Border Adjustment. *Briefing - Requested by the INTA committee*.

FLL - Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (2017). Versuche in der Landespflege. Versuchs-Nr. 06. https://www.fll.de/leistungsprofil/forschung/versuche-in-der-landespflege.html.

Fraunhofer ISE. (2020). *WEGE ZU EINEM KLIMANEUTRALEN ENERGIESYSTEM.* Freiburg.

Fuss, S., Lamb, W., Callaghan, M., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., & others. (2018). Environmental Research Letters. *Environ. Res. Lett. 13 063002*.

Glaser, B. (2018). Pflanzenkohle – Stand der Forschung. *Tagung Fachverband Pflanzenkohle*. Von https://www.youtube.com/watch?v=ex2sFye9t_0&t=248s abgerufen

Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - A review. *Biol. Fertil. Soils 35,*, S. 219–230.

Godlewska P., Schmidt H.-P., Ok YS, Oleszczuk P. (2017). Biochar for composting improvement and contaminants reduction. A review. Bioresour Technol. 2017 Dec; 246:193-202.

Griscom, B., Adams, J., Ellis, P., Houghton, R., Lomax, G., & others. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, S. 114 (44) 11645-11650.

Gupta, S. and Kua, H. W. (2017). Factors Determining the Potential of Biochar As a Carbon Capturing and Sequestering Construction Material: Critical Review. Journal of Materials in Civil Engineering/Volume 29 Issue 9.

He, Y. et al. (2017). Effects of biochar application on soil greenhouse gas fluxes: a meta-analysis. GCB Bioenergy, 9(4): 743-755.

ICROA. (2020). *Code of Best Practice for Carbon Management Services.* Von https://www.icroa.org/resources/Documents/ICROA_cobp_tech_specs_2020.pdf abgerufen

IPCC 1.5°#2. (2018). Global Warming of 1.5°C; Chapter 2: Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable. *IPCC 1.5° Report, Chapter 2*.

IPCC 1.5°#4. (2018). Global Warming of 1.5°C; Chapter 4: Strengthening and Implementing the Global Response. *IPCC 1.5° Report, Chapter 4*.

IPCC. (2/2014). Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Häufig gestellte Fragen und Antworten – Teil des Beitrags der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen.

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)].* Geneva: IPCC.

IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.*

Laird, D. A. (2008). The charcoal vision: a win win win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal*.

Lee, J., & Day, D. (2013). Biochar Fertilizer for Soil Amendment and Carbon Sequestration. *Characterization of Biochars Using Advanced Solid-State 13C Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (pp.57-68)*.

Lehmann et al. (2015). Persistence of biochar in soil. In *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (S. 233-280).

Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (June 2006). Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems - A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*.

Lehmann, J. and Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: An introduction. Biochar for environmental management. Science and technology. Earthscan Publishers Ltd.

Lenton, T. M. (2010). The potential for land-based biological CO2removal to lower future atmospheric CO2concentration. *Carbon Management*.

Liu, Q. et al. (2018). How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis. Plant and Soil, 426(1): 211-225.

Meyer, S., Bright, R., Fischer, D., Schulz, H., & Glaser, B. (2012). Albedo Impact on the Suitability of Biochar Systems To Mitigate Global Warming. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY 46 (22)*, S. S. 12726–12734.

Nordhaus, W. (2019). Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics. *American Economic Review*.

Peters, G. (2018). *CICERO*. Von https://www.cicero.oslo.no/no/posts/klima/stylised-pathways-to-well-below-2c abgerufen.

Razzaghi, F., Obour, P. B., Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. Geoderma, Volume 361.

Schmidt, H.-P., Anca-Couce, A., Hagemann, N., Werner, C., Gerten, D., Lucht, W., & Kammann, C. (2018). Pyrogenic carbon capture and storage. *GCB Bioenergy*, 1-19.

Schmidt, H.-P., Hagemann, N., Draper, K. and Kammann, C. (2019). The use of biochar in animal feeding. PeerJ, 7: e7373.

Smith, P. (2016). Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology*, S. 1315–1324.

Smith, P., Adams, J., Beerling, D., Beringer, T., Calvin, K. V., Fuss, S., . . . Keesstra, S. (2019). Impacts of Land-Based Greenhouse Gas Removal Options on Ecosystem Services. *Annual Review of Environment and Resources*.

SRU. (14. 05 2020). Pariser Klimaziele erreichen mit dem CO2-Budget. *Sachverständigenrat für Umweltfragen*.

Umweltbundesamt. (2/2019). Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten Kostensätze. Dessau.

Wang, J., Xiong, Z., & Kuzyakov, Y. (2016). Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *Global Change Biology - Bioenergy 8(3)*, S. 512-523. .

Weng, Z. et al. (2017). Biochar built soil carbon over a decade by stabilizing rhizodeposits. Nature Clim. Change, 7(5): 371-376.

Werner, C., Schmidt, H.-P., Gerten, D., Lucht, W., & Kammann, C. (2018). Biogeochemical potential of biomass pyrolysis systems for limiting global warming to 1.5°C. *Environmental Research Letters*.

Woolf, D., Amonette, J., Street-Perrott, F., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *NATURE COMMUNICATIONS*.

Woolf, D., Lehmann, J. and Lee, D.R. (2016). Optimal bioenergy power generation for climate change mitigation with or without carbon sequestration. Nature Communications, 7: 13160.

Zhao, S., Schmidt, S., Qin, W., Li, J., Li, G., Zhang, W. (2020) Towards the circular nitrogen economy – A global meta-analysis of composting technologies reveals much potential for mitigating nitrogen losses. Science of The Total Environment. Volume 704.

Ye, L. et al. (2020). Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. Soil Use and Management, 36(1): 2-18.