

Machbarkeitsstudie zum Bau und Betrieb einer Verkohlungsanlage im Landkreis Karlsruhe

Auftraggeber:

Umwelt – und Energieagentur Kreis Karlsruhe GmbH

75015 Bretten

Ansprechpartner: Jonas Wilke

Ersteller der Studie:

ProE Bioenergie GmbH

71549 Auenwald

Dipl.-Ing. Hans Sanzenbacher

B. Eng. Dominik Burger

Erstellungszeitraum: Dezember 2021 bis September 2022



Inhaltsverzeichnis

1.	Ziel der Studie.....	4
1.1	Ausgangssituation	5
1.2	Methodik und Vorgehensweise	6
1.3	CO ₂ -Senkenpotential – Pflanzenkohle als Chance für den Klimaschutz.....	7
2.	Biomasseanalyse	8
2.1	holzartige Biomasse	10
2.2	Klärschlamm	11
3.	Standortbetrachtung.....	12
3.1	Standortkriterium Grundstücksgröße	12
3.2	Rohstoffaufbereitung und -lagerung.....	12
3.3	Logistik und Interne Frachtwege.....	14
3.4	Standortkriterium Energienutzung	15
3.5	Standortkriterium Kosten und Wirtschaftlichkeit	15
4.	Technische Anlagenkonzepte.....	16
4.1	Herstellungsverfahren.....	16
4.1.1	Herstellerübersicht.....	17
4.1.2	Green-Carbon-Verfahren	18
4.1.3	PYREG-Verfahren.....	20
5.	Gesetzliche Regelungen beim Bau und Betrieb	20
6.	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendungen der PK.....	22
6.1	Best-Practice-Beispiele.....	27
6.2	Fehlerhafte Anwendungen.....	28
7.	Vertrieb und Qualitätssicherung	28
7.1	Vertriebsstrukturen.....	28
7.2	Preise für Pflanzenkohle, CO ₂ -Zertifikate	28
7.3	Qualitätssicherung.....	29

8.	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.....	29
9.	Ausblick – Entwicklung des Pflanzenkohle-Markts	31
10.	Ergebnisse der Studie, Empfehlungen an den Landkreis	32
10.1	Biomasseanalyse, Anlagengröße, Standortwahl	32
10.2	Anlagentechnik, technische Parameter	32
10.3	Kohlenstoffsenkenpotential im Landkreis.....	32
10.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für den gewählten Standort	33
Anhang	35
A1	Anforderungsprofil	35
A2	Entscheidungsbaum BlmSch Beispiele	37

1. Ziel der Studie

Die ProE Bioenergie GmbH hat im Auftrag der Umwelt- und Energieagentur Kreis Karlsruhe GmbH die vorliegende Studie über die Möglichkeit, biogene Abfälle aus dem Landkreis zu verkohlen, erstellt. Die dabei entstehende Pflanzenkohle kann bei entsprechender Verwendung als CO₂-Senke dienen und findet weitreichende Anwendungsmöglichkeiten, z. B. in der Landwirtschaft und in der Tierhaltung, im Bereich der Abwasser- und Abluftreinigung und in unterschiedlichsten Industriebereichen, wie der Bauindustrie, der Pharmaindustrie, u.v.m.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie sollten das verfügbare Biomassepotenzial und die daraus resultierende mögliche Anlagengröße ermittelt werden. Anschließend sollte geprüft werden, welche Standorte im Landkreis sich für den Bau und Betrieb einer entsprechenden Pyrolyseanlage eignen, auch unter Berücksichtigung der Wärmeauskopplung in das geplante, regionale Wärmenetz. Vom Landkreis wird das Ziel einer dauerhaften Kohlenstoff-Bindung bei gleichzeitiger Erzeugung von klimaneutraler Energie in Form von Wärme verfolgt.

In der Studie werden einige namhafte Hersteller von Pyrolyseanlagen genannt und deren Technologien vorgestellt sowie einander gegenübergestellt. Abgesehen vom eigentlichen Produktionsprozess und der Produktionskapazität wird hier auch das verfügbare Wärmepotenzial betrachtet.

Das Thema Genehmigung zum Bau und Betrieb einer entsprechenden Anlage wird in einem eigenen Abschnitt der Studie behandelt.

Die Studie behandelt ferner mögliche Anwendungen für die Pflanzenkohle und die damit zusammenhängenden Qualitätsanforderungen, und sie beleuchtet die derzeitigen Vertriebs- und Handelsstrukturen.

Nicht zuletzt wird die für den Landkreis Karlsruhe sinnvoll erscheinende Pyrolyseanlage einer ersten überschlägigen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen.

Projekttablauf



1.1 Ausgangssituation

Der Landkreis Karlsruhe hat ca. 445.000 Einwohner, verteilt auf 32 Kommunen, mit einem jährlichen Gesamtwärmebedarf von ca. 5.900 GWh. Der Landkreis ist bereits seit geraumer Zeit aktiv in Sachen Klimaschutz und hat im Jahr 2010 das integrierte Energie- und Klimaschutzkonzept unter dem Titel „zeozweifrei“ erstellt. Aktuell wird bei der Fortschreibung des Klimaschutzkonzepts eine Verkürzung der Frist bis zur Erreichung der CO₂-Neutralität von 2050 auf 2035 angestrebt. Bisher ist die Wärmeerzeugung im Landkreis für fast die Hälfte des CO₂-Ausstoßes verantwortlich.

Nach derzeitigem Wissensstand ist das angestrebte Ziel nur mithilfe einer regionalen Wärmeausbaustrategie unter Ausschöpfung aller zur Verfügung stehenden Potenziale sowie möglicher CO₂-Senken erreichbar. Hierzu zählt auch die Energieerzeugung aus fester Biomasse.

Das Potential der holzartigen Biomasse im Landkreis wird auf 785.276 MWh pro Jahr beziffert, was einer möglichen Deckung des Wärmebedarfs des Landkreises von 13 % entspricht.

1.2 Methodik und Vorgehensweise

Die jeweiligen Themenbereiche der Studie wurden auf Grundlage der folgenden Methodiken bearbeitet:

Kapitel	Thema	Methodik
2	Biomasseanalyse	Datenerfassung der Abfallwirtschaftsgesellschaft Begehung Grünschnitt-Sammelplätze Anforderungsprofil Rohstoffe zur Verkohlung (Herstellervorgaben) EBC-Richtlinie
3	Standortanalyse	VDI 3933 Emissionsminderung - Erzeugung von Biomassekarbonisaten Landnutzungs- bzw. Regionalpläne (Grünzäsuren, FFH-Schutzgebiete, etc.) Bebauungspläne Bundes-Immissionsschutzgesetz
4	Technisches Konzept Pyrolyse	Herstellerangaben Angewandte Verfahren in der Praxis (eigene Recherche)
5	Anwendungsgebiete Praxisbeispiele	Düngemittelverordnung Forschungsprojekte (Universitäten, Institute) Erfahrungsberichte und Studien
6	Vertrieb und Qualitätssicherung	Marktstudie der ProE Bioenergie Erfahrungsberichte und Studien EBC-Richtlinie
7	Wirtschaftlichkeitsanalyse	Berechnungstool der Polytechnik Deutschland GmbH

Tabelle 1: Grundlagen und Methodiken

1.3 CO₂-Senkenpotential – Pflanzenkohle als Chance für den Klimaschutz

Die Klimaziele des Pariser Klimaabkommens lassen sich nicht allein durch den Ausbau der traditionellen Erneuerbaren Energien (Sonne, Wind, Wasser) erreichen. Zusätzlich müssen CO₂-Senken (Negativemissionen) geschaffen werden, also Verfahren, mit denen sich CO₂ der Atmosphäre entziehen lässt.

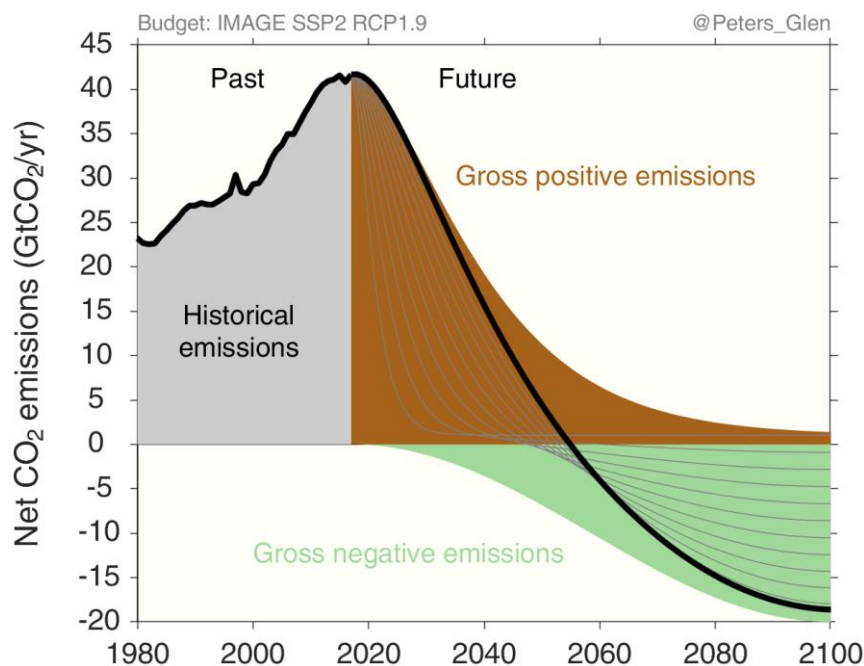


Abbildung 1: Kohlenstoffkreislauf der Pflanzenkohle (Quelle: EBI)

Das direkte Abscheiden von CO₂ aus der Atmosphäre (CCS-Verfahren) lässt sich noch nicht wirtschaftlich darstellen. Eine vielversprechende und bereits praktizierte Technik zur Speicherung von Kohlenstoffdioxid stellt die Herstellung und nachhaltige Verwendung von Pflanzenkohle (möglichst mit einer energetischen Nutzung der Überschusswärme) dar. Pflanzen entziehen der Atmosphäre während ihres Wachstums CO₂. Bei der Verbrennung wird dieses CO₂ wieder vollständig freigesetzt. Durch die Verkohlung werden hingegen die wasserstoff- und die kohlenstoffreichen Fraktionen getrennt. Das wasserstoffreiche Pyrolysegas kann weitgehend CO₂-frei zur Energieerzeugung genutzt werden, übrig bleibt das Carbonisat bzw. die Pflanzenkohle. Die Biomasse, die zur Herstellung von 1 Tonne Pflanzenkohle verwendet wird, hat während ihres Wachstums ungefähr die 3,5-fache Menge an CO₂ aufgenommen.

Folgende Abbildung stellt den Kohlenstoffkreislauf der Pflanzenkohle dar.

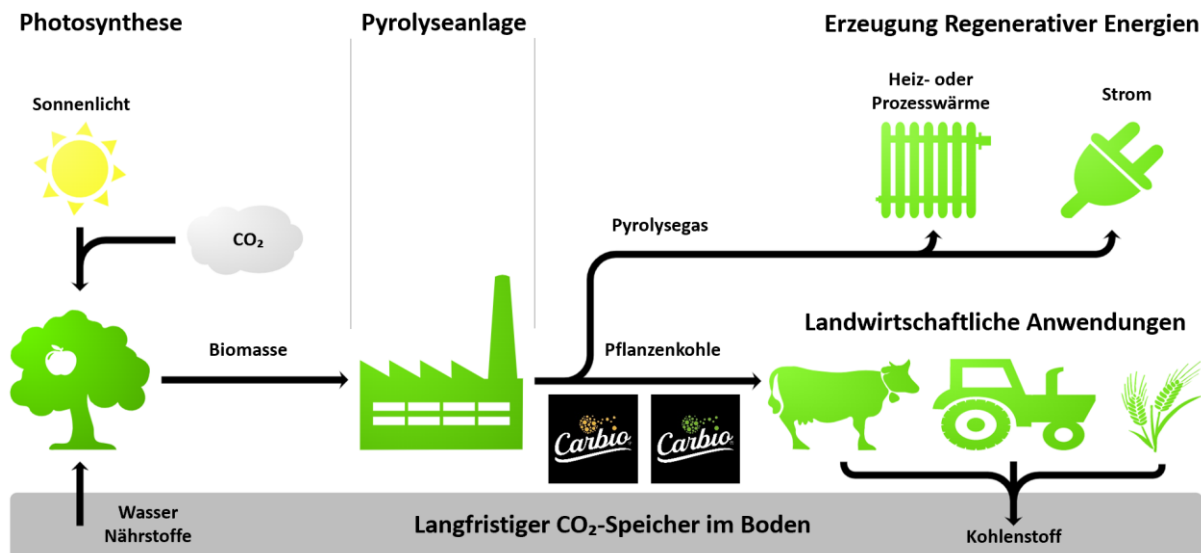


Abbildung 2: Kohlenstoffkreislauf der Pflanzenkohle (Quelle: ProE Bioenergie GmbH)

2. Biomasseanalyse

Im ersten Schritt der Machbarkeitsstudie wurde das Biomasseaufkommen des Landkreises erfasst und hinsichtlich der Verwendung zur Pflanzenkohleherstellung bewertet. Dazu dienten in erster Linie die Daten des Abfallwirtschaftsbetrieb und der Stadtwerke. Zur Unterteilung in verschiedene Kategorien zur Pflanzenkohleherstellung (EBC-Richtlinie) wurde ein Anforderungsprofil (Einsatzstoffe zur Verkohlung) erstellt, siehe Anhang 1. Dieses beinhaltet neben der jeweils anfallenden Menge auch Parameter wie Materialaufbereitungszustand und Wassergehalt. In der EBC-Richtlinie ist eine Positivliste zulässiger Biomassen zur Herstellung von Pflanzenkohlen enthalten.

Eine detaillierte Datenerfassung gestaltete sich als schwierig. Daher wurden die ausführlichen Daten der letzten Jahre des Abfallwirtschaftsbetriebes herangezogen. Folgende Tabelle zeigt die jeweiligen Mengen [Mg=t] pro Wertstoffhof im Jahr 2020.

Verwertung über den Landkreis			Verwertung nicht durch den Landkreis		
Landkreis	Grünabfall	Altholz	Landkreis	Grünabfall	Altholz
Bad Schönborn	1.046	123	Bretten	3.556	267
Bruchsal	2.745	467	Eggenstein-Leopoldshafen	906	202
Dettenheim	1.609	155	Ettlingen	8.189	121
Forst	1.200	120	Graben-Neudorf	1.174	181
Gondelsheim	537	85	Karlsdorf-Neuthard	1.379	208
Hambrücken	620	67	Kraichtal	2.843	112
Karlsbad	1.394	162	Kronau	718	68
Kürnbach	307	48	Linkenheim-Hochstetten	667	244
Malsch	2.394	150	Marxzell	1.070	22
Östringen	1.242	165	Oberderdingen	1.637	33
Rheinstetten	2.542	217	Oberhausen-Rheinhausen	1.281	82
Sulzfeld	824	91	Pfintztal	1.039	247
Ubstadt-Weiher	1.703	357	Philippsburg	1.042	36
Waldbronn	2.306	190	Stutensee	2.646	204
Walzbachtal	868	144	Waghäusel	2.728	11
Zaisenhausen	291	31	Weingarten	1.534	152
Gesamt	21.628	2.571		32.410	2.189
Verhältnis	40%			60%	

Tabelle 2: Mengenaufkommen der jeweiligen Wertstoffhöfe im Landkreises KA im Jahr 2020

Mehr als die Hälfte des Mengenaufkommens wird bisher nicht durch den Landkreis selbst verwertet, sondern über private Entsorgungsunternehmen, große Verbrennungsanlagen (Holzkraftwerk Mannheim), oder Kompostierungsunternehmen sowie Substrathersteller.

Nach Auswertung der weiteren Altholz- und Sperrmülldaten des Abfallwirtschaftsbetriebes ergibt sich folgendes Gesamtmengenaufkommen. Dabei wurde ein Durchschnitt seit 2009 gebildet:

Materialherkunft	Grünabfälle	Altholz WSH*	Altholz Sperrmüll	Gesamt
Menge	56.006	4.168	8.992	69.166

Tabelle 3: Gesamtmengenaufkommen des Landkreises Karlsruhe (Durchschnittswert seit 2009)

*Wertstoffhof

2.1 holzartige Biomasse

Die Grünabfälle werden in krautiges und hölzernes Material unterschieden, wovon ersteres für die Biogasanlagen bestimmt ist, das holzige Material für die Verkohlung. Ein nicht zu vernachlässigender Anteil liegt nur in gemischter Form vor. Dieser wird eher der Pyrolyse zugeordnet, da je nach Verkohlungsprozess und Verwendung der Kohle auch krautige Bestandteile verwendet werden können. Dadurch lässt sich eine aufwändige Trennung der Materialien vermeiden.

Knapp die Hälfte der oben genannten Mengen kann für die Pflanzenkohleproduktion verwendet werden. Der holzige Anteil beträgt ca. 16.300 Tonnen, der gemischte Anteil ca. 12.300 Tonnen. Hinzu kommt der bereits trockene Bestand des Altholzes von ca. 4.000 Tonnen.

Je nach Qualitätsanforderungen an die Kohle ist eine Vermischung der Biomasseströme unter Umständen zu vermeiden, bzw. wird es erforderlich sein, die einzelnen Fraktionen nochmals zu sortieren.

Generell ist davon auszugehen, dass durch die Aufbereitung der Biomasse ein nicht unwesentlicher Teil des Materials verloren geht bzw. ausgesondert wird. Um diesen Anteil besser abschätzen zu können, ist eine genauere Analyse der Biomasseströme hinsichtlich Fremdstoffen notwendig.

Nasse Materialien müssen zudem vorgetrocknet werden. Je nach Wassergehalt im Rohstoff und Hersteller-Anforderung an den Trockenanteil geht dadurch nochmals Masse verloren. Altholz ist in der Regel bereits trocken, wohingegen der Wassergehalt der Grünabfälle je nach Art und Lagerung zwischen 25% und 55% schwankt. Dies wurde bei diversen Vor-Ort-Begehungen in Bretten, Ettlingen, Malsch und Rheinstetten bestätigt.

Vorbehaltlich weiterer Untersuchungen ist davon auszugehen, dass von 1t nassem, nicht aufbereitetem Grünschnitt mit einem Wassergehalt von 40% ca. 600kg Biomasse zur Verkohlung übrigbleiben.

2.2 Klärschlamm

Auf Wunsch der Kommune sollte in dieser Studie auch das Thema Klärschlamm betrachtet werden. Klärschlamm lässt sich ebenfalls verkohlen, allerdings sind dabei weitere Anforderungen, wie die mechanische Trocknung, die im Exkurs in Kapitel 3.2 ausführlich beschrieben werden, zu beachten. Klärschlamm zählt zudem nicht zu Biomasse im Sinne der Biomasse-Verordnung und auch nicht zu den zugelassenen Ausgangsmaterialien nach den EBC-Richtlinien. Die Verwendungsmöglichkeiten für die entsprechende Klärschlammkohle sind daher eingeschränkt.

Das Mengenaufkommen des Klärschlammes im Landkreis geht aus folgendem Diagramm hervor:

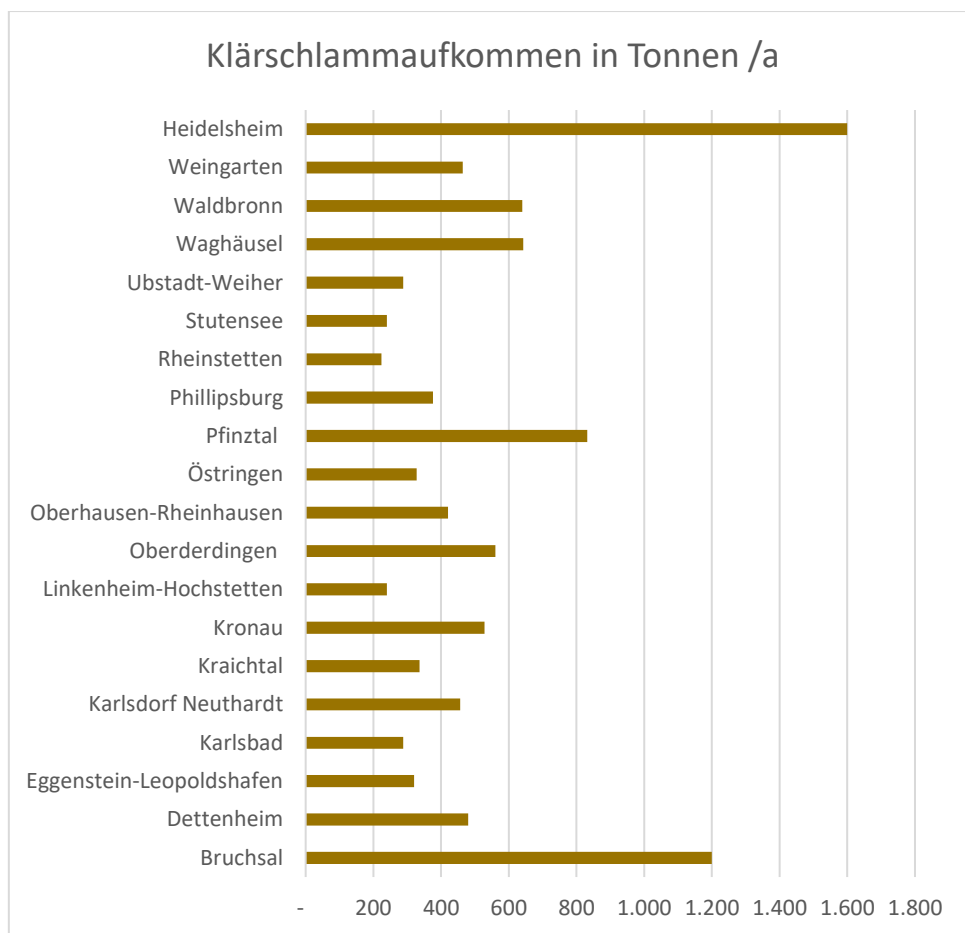


Abbildung 3: Klärschlammaufkommen im Landkreis Karlsruhe pro Jahr

3. Standortbetrachtung

Um einen geeigneten Standort zu finden, müssen zahlreiche Rahmenbedingungen beachtet werden. Hierzu zählen in erster Linie:

- die erforderliche Grundstücksgröße
- die Lage des Grundstücks im Hinblick auf die Lieferlogistik und auf den Anlagenbetrieb
- der Flächennutzungsplan
- der Bebauungsplan
- die Entfernung zu den Wärmesenken

Bei einer Pyrolyseanlage handelt es sich um einen verfahrenstechnischen Prozess, der möglichst ganzjährig durchgängig betrieben werden sollte. Daher sollte eine entsprechende Anlage bevorzugt in einem Gewerbe- oder Industriegebiet oder in einem Außenbereich betrieben werden.

Vom Landkreis selbst wurden zunächst die Standorte Ettlingen, Malsch, Bretten und Kraichtal ins Spiel gebracht. Bei einem Gespräch mit dem Regionalverband Mittlerer Oberrhein stellte sich heraus, dass unter Berücksichtigung der Landnutzungs- und Regionalpläne lediglich die Standorte Kraichtal und Bretten für den Bau und Betrieb einer Verkohlungsanlage in Betracht kommen. Diese Standorte sollen anhand der oben genannten und nachfolgend beschriebenen Kriterien bewertet werden.

3.1 Standortkriterium Grundstücksgröße

Bedingt durch die Logistik und die Komplexität der Anlagentechnik wird eine gewisse Grundstücksgröße benötigt; als groben Faustwert kann man davon ausgehen, dass je 1.000 Tonnen Pflanzenkohle-Produktionskapazität eine Grundfläche von ca. 1.500 m² benötigt wird. Je nachdem, ob das Rohmaterial auf demselben Grundstück aufbereitet, ob zudem vor Ort auch noch eine Kompostierung erfolgen und die Pflanzenkohle für unterschiedliche Anwendungen vor Ort weiterverarbeitet werden soll, ergibt sich unter Umständen ein 2-3-facher Flächenbedarf.

3.2 Rohstoffaufbereitung und -lagerung

Das Herstellverfahren und die spätere Verwendung der Kohle sind entscheidend, wenn es um die Anforderungen an den Rohstoff geht. Je nach Art und Beschaffenheit der Biomasse kommen unterschiedliche Aufbereitungstechniken zur Anwendung. In der Regel wird das Material zunächst sortiert, anschließend werden die Fraktionen zerkleinert oder geschreddert. Gleichzeitig wird das Material gesiebt, um mögliche Schadstoffe bzw. Fremdstoffe (Steine, Metalle, Kunststoffe, etc.) abzuscheiden.

Für das trockene Pyrolyseverfahren ist es weiterhin wichtig, dass die feste Biomasse einen Wassergehalt zwischen 5 und 10 % aufweist, manche Verfahren lassen bis zu 20% zu. Meist hat die angelieferte Biomasse einen höheren Wassergehalt und muss daher vor Ort getrocknet werden. Hierfür eignen sich einfache und kostengünstige Trocken-Container, oder hochwertige Bandtrockner.

Die Materialtrocknung erfolgt üblicherweise mit der Energie aus der Verbrennung der Pyrolysegase. Je höher der Wassergehalt im Rohstoff, umso mehr Energie wird für die Trocknung benötigt, umso weniger Energie steht folglich für die Wärmeauskopplung zur Verfügung.

Exkurs Klärschlamm und Pferdemit:

Klärschlamm weist in der Regel einen Wassergehalt von 80-90 % auf. Dieser muss zunächst mechanisch auf 40-50 % „trockengepresst“ werden. Die weitere Trocknung auf ≤ 10 Wassergehalt erfolgt in der Regel mittels eines hochwertigen Bandtrockners. Klärschlamm ist korrosiv, dies ist bei der Auslegung einer Anlage zu berücksichtigen. Für Pferdemit gilt dasselbe, hier ist zusätzlich die Art des Einstreus zu berücksichtigen. Pferdemit mit Holzpellets, Hackschnitzel, etc. vermischt sind leichter zu handhaben, als reiner Pferdemit oder Pferdemit mit Stroh. Das Ammoniak im Pferdemit ist zudem sehr aggressiv, auch hier sind Sondermaterialien bei zahlreichen Komponenten einzusetzen.

Pferdemist und Klärschlamm zählen nicht zu Biomasse im Sinne der Biomasseverordnung. Je nach Durchsatz unterliegen entsprechende Verkohlungsanlagen der 17. BImSchV. Die Investitionskosten und die Zeitdauer für das Genehmigungsverfahren sind in diesem Fall ungleich höher als bei Anlagen, in denen reiner Grünschnitt und Altholz der Kategorien AI und AII verkohlt wird.

Bedingt durch den hohen Wassergehalt dürfte der Prozess kaum einen Wärmeüberschuss generieren, sondern zumindest in einzelnen Prozessstufen eher eine externe Wärmezufuhr benötigen. Dies müsste in empirischen Untersuchungen ermittelt werden, da hierzu noch keine Erfahrungswerte vorliegen.

Nachstehende Abbildung zeigt beispielhaft den Energiebedarf zur Trocknung von 1 Tonne Waldrestholz auf M10 in Abhängigkeit des ursprünglichen Wassergehalts (Annahme: Wirkungsgrad Trockner = 0,75).

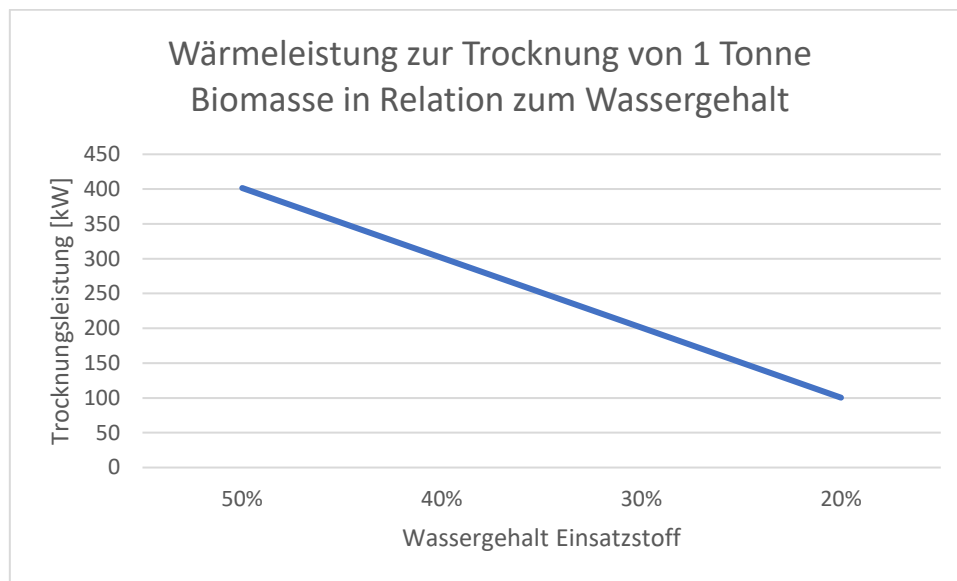


Abbildung 4: benötigte Wärmeleistung zur Trocknung bei unterschiedlichen Wassergehalten

3.3 Logistik und Interne Frachtwege

Der Transportweg der Biomasse sollte so kurz wie möglich sein, um etwaige CO₂-Emissionen zu minimieren. In einer alten Fassung des European Biochar Certificate (EBC) ist eine Maximalstrecke von 80 km festgelegt. Das EBC-Senkensertifikat sieht zukünftig vor, dass die gesamte Prozesskette der Pflanzenkohle, vom Anbau und der Ernte des Rohmaterials über die Transporte und den Herstellungsprozess bis hin zur Verwendung der Pflanzenkohle betrachtet und bewertet wird. Das tatsächliche Senkenpotenzial entscheidet dann darüber, wieviele CO₂-Zertifikate die Kohle bei der entsprechenden Anwendung zugeteilt bekommt. Lange Transportwege reduzieren folglich die Erträge aus den CO₂-Zertifikaten.

Rechnung zur Abschätzung des Verkehrsaufkommens

Bedingt durch die Lieferlogistik sollte das Grundstück gut erreichbar und befahrbar sein. Zur Herstellung von 6.000 Tonnen Pflanzenkohle werden ca. 30.000 Tonnen feuchtes Material benötigt. Daraus ergeben sich bei voller Beladung min. 5 LKW-Anlieferungen je Werktag, zuzüglich der Auslieferung der Kohle. Da davon auszugehen ist, dass die Anlieferung eher durch kleinere Fahrzeuge erfolgt, ist in der Praxis von einem höheren Verkehrsaufkommen auszugehen.

3.4 Standortkriterium Energienutzung

Bei der Verkohlung von fester Biomasse werden die wasserstoffreichen, kohlenstoffarmen Pyrolysegase ausgetrieben, zurück bleiben die kohlenstoffreichen Bestandteile der Pflanze. Die Pyrolysegase lassen sich verbrennen und somit in vielfältiger Weise zur Energieerzeugung nutzen. Ideal ist es, wenn die Überschusswärme direkt in ein bestehendes Nah- bzw. Fernwärmenetz eingespeist werden kann. Alternativ kommt auch ein größerer industrieller Wärmeabnehmer in Betracht, insbesondere weil durch die Verbrennung der Pyrolysegase auch Prozesswärme auf hohem Temperaturniveau bereitgestellt werden kann.

Ab einer gewissen Anlagengröße, und wenn das Wärmelastprofil hierfür geeignet ist, kommt auch eine Stromerzeugung in Betracht. Hierfür bietet sich vor allem der ORC-Prozess an, da ORC-Module in einem weiten Lastbereich regelbar sind, und somit einem schwankenden Wärmeangebot aus dem Pyrolyseprozess problemlos folgen können.

Bei zukünftigen Großanlagen ist auch die Aufbereitung des Pyrolysegases und die Einspeisung in ein naheliegendes Gasnetz denkbar.

3.5 Standortkriterium Kosten und Wirtschaftlichkeit

Bei der Auswahl des geeigneten Standorts spielen auch wirtschaftliche Aspekte eine Rolle. Zu erwähnen sind hierbei insbesondere:

- der Grundstückspreis und die Kosten für dessen Erschließung
- die Energiekosten am Standort, sofern der benötigte Eigenstrom nicht in der Anlage erzeugt wird
- die Brennstoffkosten
- die Genehmigungsauflagen

Auf diesen Punkt wird an späterer Stelle in dieser Studie nochmals ausführlicher eingegangen.

4. Technische Anlagenkonzepte

Grundsätzlich unterscheidet man bei der Karbonisierung von Biomasse „trockene“ und „nasse“ Verfahren. Die hydrothermale Karbonisierung (HTC-Verfahren) erfolgt durch Zugabe von Wasser, entweder in flüssigem oder dampfförmigem Zustand, und unter hohem Druck. Bei den „trockenen“ Verfahren wird die Biomasse unter Abschluss von Sauerstoffzufuhr verschwelt oder unter geringem Sauerstoffanteil bei Atmosphärendruck vergast.

Klärschlamm wird üblicherweise mit dem HTC-Verfahren verkohlt, hierbei entstehen die größten Mengen an Biomassekarbonisaten, allerdings ist der Kohlenstoffgehalt bei den pyrolytischen Prozessen deutlich höher.

Trockener Klärschlamm kann theoretisch mit einer Pyrolyseanlage verkohlt werden. Allerdings sind bislang keine Studien bekannt, aus denen die wichtigsten Kriterien zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines solchen Prozesses hervorgehen, wie z. B.:

- das Verhältnis von Rohstoff-Input und Klärschlammkohle-Output
- der zu erzielende Energieüberschuss oder der erforderliche zusätzliche Energiebedarf
- die Elementaranalyse einer entsprechenden Klärschlammkohle und daraus resultierend die möglichen Anwendungen und die erzielbaren Erlöse für die Kohle

Zusätzlich zur Biokohle entstehen bei der Pyrolyse Nebenprodukte, wie Bio-Öle und Gase, welche sich je nach Wahl der Prozessdauer und -temperatur anteilig unterscheiden.

Da sich das HTC-Verfahren in der Praxis bislang nicht bewährt hat, werden nachfolgend nur die trockenen Pyrolyseverfahren betrachtet.

4.1 Herstellungsverfahren

Sämtlichen gängigen Pyrolyseverfahren liegen dieselben physikalischen Prozesse zu Grunde. Das Rohmaterial wird bei Bedarf vorgetrocknet und anschließend auf ca. 600°C – 700°C erwärmt. Hierbei gasen die wasserstoffreichen, flüchtigen Fraktionen aus, übrig bleiben die kohlenstoffreichen Fraktionen. Durch die chemischen Umwandlungsprozesse während der Karbonisierung verändern sich die physikalischen Größen und die Zusammensetzung der übrig bleibenden Fraktion. Während das Gewicht und das Volumen bei der Verkohlung beispielsweise deutlich abnehmen, erhöht sich der Heizwert durch die thermo-chemischen Prozesse signifikant.

Die Zusammensetzung ist stark vom Rohmaterial abhängig, sie lässt sich je nach Herstellverfahren und Prozessparameter innerhalb gewisser Grenzen aber durchaus beeinflussen.

4.1.1 Herstellerübersicht

Zur Herstellung von Pflanzenkohle haben sich verschiedene Verfahren und Hersteller am Markt etabliert. Im Folgenden wird auf die Bedeutendsten unter ihnen eingegangen. Hierbei werden nur Verfahren berücksichtigt, deren Hauptzweck die Herstellung von Pflanzenkohle in hoher Qualität ist. Nicht berücksichtigt werden hingegen Holzvergaserprozesse, bei denen die Asche einen hohen organischen Anteil aufweist und als Pflanzenkohle vermarktet wird. Diese Asche weist in der Regel auch einen hohen Schadstoffanteil auf und muss in der Regel daher teuer entsorgt werden. Die Verwendung als Pflanzenkohle ist daher kritisch zu prüfen.

Anlagenhersteller	Produktionskapazität	Energieerzeugung	Betriebsweise
Biomacon	Ca. 450 t/a	Bis zu 500 kW bzw. 4.000 MWh/a	Durchlauf-Verfahren
Polytechnik	3.000 – 12.000 t/a	bis zu 15MW _{th} bzw. 90.000MWh _{th} / a, bis zu 2,5MW _{el} bzw. 15.000MWh _{el} / a	Batch-Verfahren (patentiert)
Pyreg	190 – 550 t/a	max. 4.500 MWh/a	Durchlauf-Verfahren
Carbo-FORCE	850 – 3.400 t/a	5.000 – 20.000 MWh/a	
Carbon Technik Schuster	Bis zu 1.600 t/a Individuell skalierbar	Bis zu 11.000 MWh/a 2.000 MWh elektrisch	Kombination aus Durchlauf- und Batch- Prozess

Tabelle 4: Übersicht Hersteller Verkohlungsanlagen

Nachfolgend werden wesentliche Vor- und Nachteile einzelner Verfahren dargelegt. Für eine vollständige Bewertung sind selbstverständlich deutlich mehr Faktoren zu beachten. Wenn das Projekt zum Bau und Betrieb einer Verkohlungsanlage im Landkreis Karlsruhe weiter verfolgt und letztendlich umgesetzt werden soll, sind bezüglich der Anlagentechnik weitere detaillierte Untersuchungen und eventuell auch Probe-Verkohlungen mit dem vorliegenden Rohmaterial notwendig.

Anlagenhersteller	Vorteile	Nachteile
Biomacon	kostengünstig	Häufiges Wartungsintervall, kann nur homogenes, kleinstückiges Material verarbeiten, wenig Referenzanlagen
Polytechnik	Autothermer Batch-Prozess Flexibel beim Rohstoff Chargennachverfolgbarkeit Sehr hohe Produktionskapazität Hohe Produktqualität	Hoher Platzbedarf, höhere Investitions- und Betriebskosten
Pyreg	Durchlaufverfahren Zahlreiche Referenzanlagen	Störungsanfällig, häufiges Wartungsintervall; kann nur homogenes, kleinstückiges Material verarbeiten

Tabelle 5: Vor- und Nachteile namhafter Hersteller

Nachfolgend werden beispielhaft zwei Verfahren näher erläutert, die sich in der Produktionskapazität und im Verfahren selbst deutlich unterscheiden.

4.1.2 Green-Carbon-Verfahren

Das Verfahren wurde von der Green Carbon GmbH und von der Polytechnik Luft- und Feuerungstechnik GmbH entwickelt. Die Pilotanlage läuft bereits seit drei Jahren weitgehend im 24/7-Dauerbetrieb. Dabei handelt es sich um einen diskontinuierlichen und automatisierten Batch-Prozess. Im Folgenden wird das Funktionsprinzip erläutert.

Das angelieferte Rohmaterial wird zum Trocknen in Heiz-Container gefüllt. Dort verweilt es, bis der geforderte Wassergehalt von ca. 10% erreicht ist. Dabei wird die überschüssige Wärmeenergie aus dem Pyrolyseprozess zur Trocknung verwendet. Sobald der Rohstoff den gewünschten Wassergehalt besitzt, wird dieser in Retorten abgefüllt. Die Anforderungen an das Rohmaterial sind gering. Geschreddertes Material mit Stücklängen bis zu 300mm kann problemlos eingesetzt werden.

Die befüllten Retorten werden verschlossen und mittels heißer Rauchgase aus der Brennkammer unter Luftabschluss erhitzt. Dieser Vorgang dauert zwischen zwei und vier Stunden mit einer Prozesstemperatur von 650 °C. Die dabei entstehenden Pyrolysegase werden abgesaugt und verbrannt.

Zuletzt müssen die Retorten in den sogenannten Stellplätzen abgekühlt werden. Dieser Vorgang geschieht unter Luftabschluss innerhalb von maximal 27 Stunden. Danach werden die Retorten geleert und die Biokohle kundenspezifisch abgesiebt bzw. fraktioniert.

Im Gegensatz zu den meisten anderen Verfahren wird die Kohle beim Green Carbon-Verfahren nicht mit Wasser abgelöscht. Mit dem Verfahren lässt sich ein Kohlenstoffgehalt im Endprodukt von >85% bei einem Wassergehalt von ca. 5% erzielen.



Abbildung 5: Abkühlen der gefüllten Retorten ohne zusätzliche Wassernutzung

Nachstehende Abbildung zeigt den Energiefluss des Green-Carbon-Verfahrens inklusive Stromerzeugung mit einem ORC-Prozess. Die Breite der Pfeile gibt Aufschluss über den vorhandenen Leistungsfluss in Kilowatt in Relation zueinander. Auch das Massenverhältnis von Brennstoff zu Rohstoff ist zu beachten.

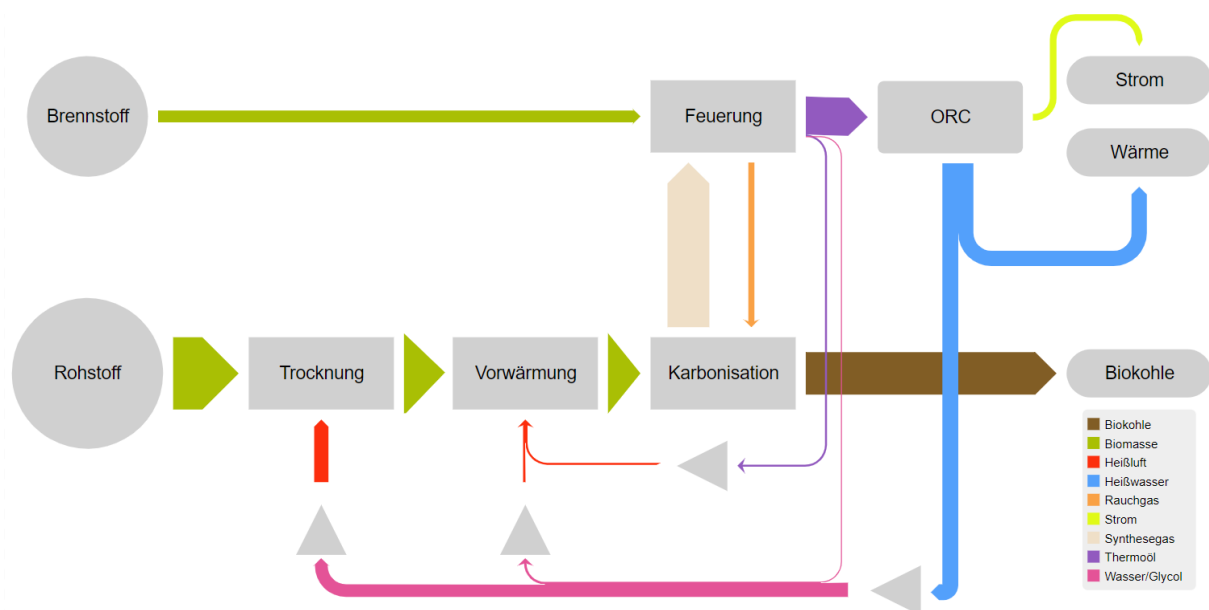


Abbildung 6: Energiefluss-Diagramm des Green-Carbon-Verfahrens

4.1.3 PYREG-Verfahren

Das Verfahren trägt die Bezeichnung des gleichnamigen Unternehmens. Die Herstellung der Pflanzenkohle erfolgt hierbei mittels eines Durchlaufverfahrens.

Die Biomasse sollte möglichst sauber, homogen und feinkörnig (Hackschnitzel) sein. Sie wird dem Reaktor mittels einer Zellenradschleuse zugeführt und wird bei Temperaturen zwischen 500 und 700 Grad verkohlt. Über ein Doppelschneckenradsystem wird die Biomasse durch den Reaktor befördert. Im Gegensatz zu dem Batch-Verfahren der Green Carbon handelt es sich beim Verfahren von PYREG um ein Durchlaufverfahren mit einem Drehrohrofen als Reaktor. Die Verweilzeit beträgt zwischen 15 und 30 Minuten. Die auftretenden Schwelgase und Bio-Öle werden durch einen FLOX-Brenner bei Temperaturen von 1250 Grad Celsius verbrannt, wodurch die nötige Prozesstemperatur erreicht wird.

Die Pflanzenkohle wird, sobald sie den Reaktor mit Hilfe einer weiteren Zellenradschleuse verlässt, durch eine Sprühwasserkühlung abgelöscht. Die erzeugte Pflanzenkohle hat bezogen auf die Trockensubstanz ebenfalls einen Kohlenstoffgehalt von bis zu 80%, allerdings hat das Endprodukt einen Wassergehalt von ca. 25%, tatsächlich liegt der Kohlenstoffgehalt im Endprodukt somit nur bei ca. 60%.

5. Gesetzliche Regelungen beim Bau und Betrieb

Pyrolyseanlagen unterliegen zahlreichen gesetzlichen Regelungen und Rahmenbedingungen. Hierzu zählen insbesondere:

- das Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG
- die VDI 3933 Vorschrift Emissionsminderung – Erzeugung von Biomassekarbonisaten
- das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung UVPG
- die FFH-Richtlinie (falls zutreffend)
- der Flächennutzungsplan
- der Bebauungsplan

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) regelt, welche Anlagen oder Anlagenteile genehmigungsbedürftig sind und welche nicht. Im Anhang 1 der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) ist eine abschließende Liste der genehmigungsbedürftigen Anlagen enthalten. Das bedeutet, wenn ein bestimmter Anlagentyp nicht beschrieben wird, liegt auch keine Genehmigungspflicht nach BImSchG vor.

Ist dies der Fall, gelten im Allgemeinen baurechtliche Anforderungen. Baurechtliche Anforderungen ergeben sich aus dem Baugesetzbuch (BauGB), der Baunutzungsverordnung (BauNVO) sowie verschiedenen Ländergesetzen.

Die Einstufung der Anlage in die jeweilige BImSch-Verordnung ist ein wesentlicher Faktor, wenn es um die Investitions- und Betriebskosten und um die Zeitdauer zur Umsetzung eines Projekts geht. Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von < 1000kW fallen in der Regel unter die 1. BImSchV, größere Anlagen unterliegen der 4. BImSchV. Die Zeitdauer für die Entwurfsplanung, Genehmigung und die Errichtung einer Anlage liegt hierbei je nach Anlagengröße zwischen 9 Monaten (1. BImSchV) und 2 Jahren (4. BImSchV).

Im Anhang zu dieser Studie findet sich ein Entscheidungsbaum zur Einstufung einer Pyrolyseanlage in die jeweilige Ziffer der 4. BImSchV, in Abhängigkeit des Rohstoffs, der Feuerungswärmeleistung und weiterer Parameter.

Kommen als Ausgangsprodukt Altholz der Kategorien A3 und A4, Klärschlämme oder sonstige organische Abfälle zum Einsatz, unterliegt die Anlage ab einem bestimmten Durchsatz der 17. BImSchV. Dies ist mit deutlich erhöhten Anforderungen an den Bau und Betrieb und mit einem Verfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung verbunden. In diesem Fall ist mit einer Umsetzungsdauer von deutlich > 2 Jahren zu rechnen.

Eine Anlage baut je nach Größe bis zu 20m hoch, dementsprechend ist der **Bebauungsplan** am vorgesehenen Standort zu prüfen. Das gleiche gilt für etwaige Schallemissionen, welche vom Transport, den Aufbereitungsanlagen sowie dem Anlagenbetrieb ausgehen können. Dies wird allerdings bereits über die BImSchG abgedeckt.

Aus der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie, kurz **FFH-Richtlinie** oder Habitatrichtlinie, ergeben sich besondere Anforderungen. Diese Naturschutz-Richtlinie der Europäischen Union dient der Erhaltung von natürlichen Lebensräumen sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen. Entsprechende Schutzgebiete sind unter folgendem Link gekennzeichnet: <https://geodienste.bfn.de/schutzgebiete?lang=de>

Die Lage in einem Wasserschutzgebiet oder einem FFH-Gebiet sollte möglichst vermieden werden, da dies in der Regel deutlich höhere genehmigungsrechtliche Anforderungen, teure Gutachten und deutlich höhere Investitionskosten bewirkt.

6. Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendungen der PK

Spezifische Eigenschaften der Biokohle sind beispielsweise der Energiegehalt sowie die Aufteilung in fixen Kohlenstoff und flüchtige Bestandteile. Der fixe Kohlenstoff, welcher selbst bei Temperaturen von 900 °C als Feststoff verbleibt und nicht gasförmig wird, muss 90-95% betragen, damit er die Eigenschaften fossiler Kohlenstoffträger erreicht und als Substitut verwendet werden kann. Für andere Branchen ist die Struktur und Oberfläche der Karbonisate von entscheidender Bedeutung. Hierzu zählen explizit die veränderbare Porenstruktur und die daraus resultierende Wasserspeicherkapazität sowie die Möglichkeit zur Aktivierung der Kohle mit Nährstoffen. Auch der pH-Wert kann, vor allem in der Landwirtschaft, eine tragende Rolle spielen.

Ausgangsstoff	Holzartige Biomasse
C-Anteil	>= 85 % (Werte bis 98% möglich)
Heizwert	>30 MJ/kg
pH-Wert	8,5 – 9,5
Wassergehalt	5,5 %
Schüttdichte	291 kg/m ³
Körnungsgröße	1 – 10 mm (auch größere Fraktionen mögl.)
spez. Oberfläche	320 m ² /g
Wasserhaltekapazität	215,1 %
Verhältnis O / C org	< 0,1
Gesamt N (Stickstoff)	0,35 (abhängig von Originalsubstanz)
PAK-Gehalt	<4 mg/kg (16 Leitsubstanzen) laut Eurofins 10

Tabelle 6: ausgewählte eurofins Analysewerte aus dem Green-Carbon-Verfahren

Aus den Eigenschaften des Endprodukts erschließen sich unterschiedliche Anwendungsfelder. Hierbei wird in zwei Bereiche unterschieden. Zum einen in Anwendungsgebiete, die lediglich zur CO₂-Neutralstellung beitragen, hierzu zählt z. B. die Verwendung der Kohle als Grillkohle oder als Reduktionsmittel bei der Stahlherstellung. Hierbei wird das CO₂, das die Pflanze beim Wachstum der Atmosphäre entzogen hat, wieder freigesetzt. Zum anderen in Bereiche mit Sequestrierungspotential, hierzu gehören die Landwirtschaft und das Baugewerbe. Der Kohlenstoff wird hierbei langfristig im Boden oder den Baumaterialien gespeichert.

Reduzierungspotential	Branche/ Einsatzgebiet	Wirkung/ Nutzung
Kohlenstoffsenke; CO₂-Negativ	Landwirtschaft	Kaskadennutzung <ul style="list-style-type: none"> • Futterkohle • Einstreukohle • Güllekohle • Bodenaktivator → Steigerung der Ernteerträge und des Biogasertrags
	Kommunen	Baumpflanzungen Filterzusatz in Kläranlagen
	Baugewerbe	Als Substituierungsprodukt <ul style="list-style-type: none"> • Straßenbau • Beton • Hausbau (Dämmung)
	Adsorptionsmittel	Als Schadstofffilter <ul style="list-style-type: none"> • Wasserreinigung • Abgasreinigung • Bodenbehandlung
CO₂-Neutral	Energieerzeugung	Mitverbrennung in Kohlekraftwerken
	Grillkohle	Vermeidung von Importen aus Süd-Amerika und Afrika Herstellung der Kohle unter Beachtung der Menschenrechte und gewisser Mindeststandards
	Metallurgie	Mitverbrennung im Feuerungsprozess
	Zement- und Kalkwerke	

Tabelle 7: Anwendungsübersicht der Pflanzenkohle

Aktuelle Studien zeigen, dass hochwertige Pflanzenkohle mit einem Kohlenstoffgehalt von > 80%, hergestellt im trockenen Pyrolyseverfahren, in den Boden eingebracht nach 100 Jahren nur zu ca. 14% zerfällt. Ein Großteil des Kohlenstoffs bleibt folglich über mehrere 100 Jahre gespeichert.

Pflanzenkohle für Kommunen

Die Herstellung und Verwendung von Pflanzenkohle kann einen wesentlichen Beitrag zur lokalen Wertschöpfung von Kommunen leisten. In öffentlichen Grünanlagen und bei den Stadtbäumen hilft die Pflanzenkohle durch die hohe Wasserspeicherfähigkeit die immer längeren Dürreperioden sowie Wasserknappheit zu überstehen. In zahlreichen Kläranlagen werden Aktivkohlefilter eingesetzt, aktuell laufen Untersuchungen, diese Aktivkohle durch Pflanzenkohle zu ersetzen. Und für die Nachrüstung einer vierten Reinigungsstufe bieten sich Pflanzenfilter mit Pflanzenkohle als energie- und wassersparende Alternative zu Ozonanlagen an.

Mit der Herstellung und der Verwendung von Pflanzenkohle im kommunalen Bereich werden Biomassekreisläufe geschlossen und direkt vor Ort Kohlenstoffsenken geschaffen. Zudem wird das Kreislaufwirtschaftsgesetz eingehalten. In nachfolgender Abbildung sind die unterschiedlichen Stoff- und Energieströme bildlich dargestellt.

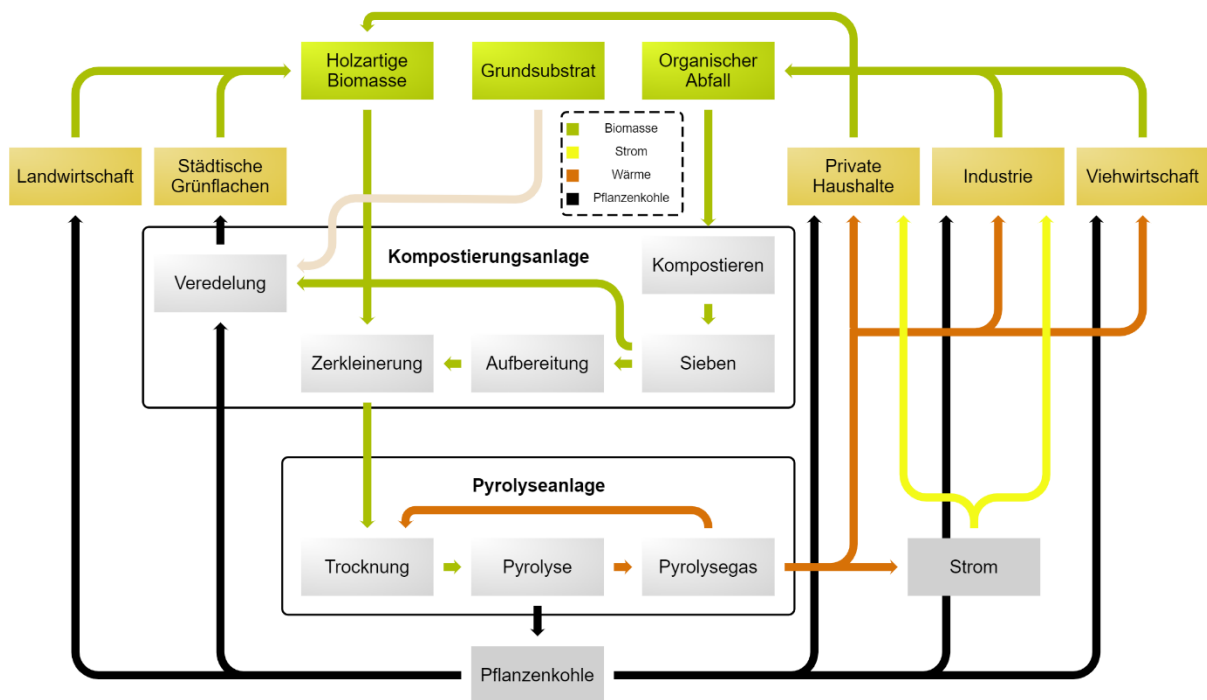


Abbildung 7: Verwendung von Pflanzenkohle im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes

Pflanzenkohle in der Industrie

In fast allen Bereichen der Metallurgie besteht der Wunsch, fossile Kohle bzw. Koks durch Pflanzenkohle oder durch sonstige nachhaltig gewonnenen Karbonisate zu substituieren. Die Anforderungen, die dabei an die Karbonisate gestellt werden, sind je nach Prozess sehr unterschiedlich und teilweise auch sehr anspruchsvoll. Um die benötigten Mengen für diese Branchen bereitzustellen, muss das Angebot an Pflanzenkohle noch um ein Vielfaches steigen.

Pflanzenkohle in der Bauindustrie

Die Zementherstellung verursacht ca. 13% der weltweiten CO₂-Emissionen. Zement- und Kalkwerke benötigen für die Bereitstellung der erforderlichen Prozesstemperaturen erhebliche Mengen an Energie. Aus wirtschaftlichen Gründen werden in den meisten Zementwerken bereits abfallstämmige Brennstoffe in großem Umfang eingesetzt. Allerdings sind diese oft nicht in einer Form verfügbar, die einen Einsatz über den Hauptbrenner ermöglicht. Um auch die fossilen Haupt-Brennstoffe (Kohle, Öl, Gas) ersetzen zu können, bieten sich Biomassekarbonisate an, da diese ähnliche Eigenschaften wie

Braunkohlenstaub (Korngröße, Heizwert) besitzen. Untersuchungen haben zudem ergeben, dass die Festigkeit von Beton zunimmt, wenn man Pflanzenkohle beimischt. Pflanzenkohle kann folglich nicht nur die Energieerzeugung im Zementwerk klimafreundlicher machen, sondern auch noch zu einer Reduktion der erzeugten Menge Zement führen. Im Beton bleibt der Kohlenstoff langfristig gebunden.

Neue Technologien

Ein weiteres industrielles Beispiel, bei dem der Kohlenstoff nicht wieder freigesetzt wird, ist die Verwendung der Pflanzenkohle als Trägermaterial für Katalysatoren und Batterien. Entsprechende Verfahren befinden sich derzeit im Forschungsstadium.

Pflanzenkohle in der Landwirtschaft und in der Tierhaltung

Dem Futter zugesetzt, bietet die Pflanzenkohle zahlreiche Vorteile hinsichtlich Verdauung, Hygiene und Immunsystem der Tiere. Das Wohlbefinden des Tiers steigt, Futtermittel sind ergiebiger und das Wachstum wird beschleunigt. Durch die verbesserte Verdauung sinkt zudem der Methanausstoß. Untersuchungen unabhängiger Institutionen belegen außerdem, dass der Bedarf an Medikamenten wie Antibiotika deutlich reduziert wird.

Wird die Kohle zusammen mit Dünger, Viehmist oder Kompost in den Boden eingebracht, dient sie als Bodenverbesserer. Die Kohlepartikel bieten Lebensraum für viele nützliche Mikro-Organismen, Pilze und Bakterien, von denen wiederum die angebauten Pflanzen profitieren. Durch ihre poröse Struktur und die große innere Oberfläche stellt die Pflanzenkohle einen hervorragenden Nährstoff- und Wasserspeicher dar. Gleichzeitig wird der Humusaufbau gefördert. In der Folge verringert sich die Nitratauswaschung, und die Qualität des Grundwassers steigt, denn Gifte und Schwermetalle werden von der Kohle absorbiert. Zudem steigt die Ertrags- und Widerstandsfähigkeit der Pflanzen, da die Nährstoffe länger im Boden verfügbar bleiben. Die Verwendung von chemischen Düngemitteln und der Einsatz von giftigen Pflanzenschutzmitteln sinken langfristig.

Kaskadennutzung

Die bereits genannten Anwendungsgebiete lassen sich in der sogenannten Kaskadennutzung hervorragend miteinander verbinden. Wenn die Pflanzenkohle der Silage oder dem Futtermittel beigemischt wird, dann kommt diese über die Ausscheidungen in die Einstreu oder in die Gülle, oder sie dient als Kompostzusatz. Die Pflanzenkohle wird bei diesen Prozessen aktiviert, d. h. mit Nährstoffen angereichert. Die vorhergehenden Schritte münden letztendlich in der Ausbringung auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen und schließen somit den nachhaltigen Kreislauf der Pflanzenkohle. Ein Landwirt profitiert durch die Kaskadennutzung mehrfach von der Pflanzenkohle, durch gesündere Tiere, einen

geringeren Medikamenteneinsatz, bessere Düngeeigenschaften der Gülle und des Komposts und durch die Reduzierung des Düngerbedarfs und des Verlusts an Nährstoffen. Dadurch wird der Einsatz von Pflanzenkohle wirtschaftlich und ökologisch interessant.



Abbildung 8: Gewährleistung eines Nährstoffkreislaufs durch Kaskadennutzung (Quelle: ProE Bioenergie GmbH)

Pflanzenkohle als Absorptionsmittel

Weltweit sind eine Vielzahl an Böden, Gewässern und Gasen mit organischen und anorganischen Schadstoffen belastet. Dies hat in der Regel anthropogene Ursachen und schreitet mit zunehmender Industrialisierung voran. Um die Auswirkungen dieser Verschmutzung auf Mensch und Umwelt möglichst gering zu halten, müssen Schadstoffe gezielt aufgenommen und entfernt werden, z. B. durch die Adsorption an einem geeigneten Medium.

Pflanzenkohle kann als Filterstufe eingesetzt werden, um Schadstoffe aus Böden, Gewässern und Gasen zu entfernen. Dies sind sowohl organische Schadstoffe wie PAK, Antibiotika und andere Arzneimittel (-rückstände), Bestandteile aus Pestiziden, Herbiziden und Fungiziden als auch anorganische Schadstoffe wie beispielsweise Schwermetalle oder weitere Rückstände aus Industrieprozessen.

Erste Versuche der Uni Bremen zeigen, dass sich Bodenfilter mit (nicht aktivierter) Pflanzenkohle ebenso eignen, Abwässer entsprechend aufzubereiten. Damit werden nicht nur fossile Ressourcen gezielt ersetzt oder ergänzt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren zur Abwasserreinigung und Wasseraufbereitung, beispielsweise mit Osmoseanlagen, haben die Bodenfilter mit Pflanzenkohle als Absorptionsmittel zudem einen deutlich niedrigeren Energiebedarf, einen deutlich niedrigeren Wasserverbrauch, und es werden keine Chemikalien benötigt. Abgesehen von dem bereits angesprochenen

möglichen Einsatz in Kläranlagen gibt es auch Überlegungen, Pflanzenkohlefilter entlang von vielbefahrenen Straßen einzurichten, um das stark verschmutzte Regenwasser zu reinigen. Das Thema Grundwassersicherung nimmt in vielen Bereichen immer mehr an Bedeutung zu.

Pflanzenkohle-Aktivkohle

Derzeit gibt es noch kein Verfahren zur Herstellung von Aktivkohle aus Pflanzenkohle, hier besteht durchaus ein erhebliches Potenzial zur weiteren Forschung und Entwicklung in Kooperation mit staatlichen Forschungseinrichtungen und der Industrie.

6.1 Best-Practice-Beispiele

Zahlreiche Beispiele belegen die positive Wirkung von Pflanzenkohle:

- Pioniere im Bereich der Landwirtschaft, die bereits seit einigen Jahren **Pflanzenkohle zur Bodenverbesserung** einsetzen, verweisen auf fruchtbarere Böden und höhere Ernteerträge. Auch im Weinbau wird bereits Pflanzenkohle als natürlicher Wasser- und Nährstoffspeicher eingesetzt, insbesondere in Süd-Europa; aber auch einzelne Städte in Deutschland setzen bereits Pflanzenkohle in Grünanlagen ein, z. B. Darmstadt und Wolmirstedt. Ebenso Stockholm und Zürich.
- Studien belegen, dass Putenherden gesünder und weniger anfällig für Keime sind, wenn dem Futter **Futterkohle** beigemischt wird; dadurch kann die Zahl der Impfungen mit Antibiotika deutlich reduziert werden; bei Kühen erhöht sich durch die Zufütterung der Kohle die Zellzahl in der Milch (Quelle: Der Hoftierarzt – Tiergesundheitsmagazin für Nutztierhalter; Bayrisches Landwirtschaftliches Wochenblatt)
- Landwirte bestätigen, dass das Stallklima von Tieren durch **Einstreukohle** verbessert und Keime reduziert wurden; in nahezu allen Fällen konnte die Klauenkrankheit dadurch deutlich reduziert werden, die Euter von Milchkühen werden nicht rissig, usw.
- Rührt man die sogenannte **Güllekohle** in Gülle ein, dann verschwindet innerhalb von wenigen Stunden der beißende oder unangenehme Geruch; bei einigen Biogasanlagen konnte der Methanertrag durch die Kohle gesteigert werden
- Aktuelle Versuche belegen, dass die Beimischung von Pflanzenkohle in den Asphalt oder in Beton die Zähigkeit und damit die Widerstandsfähigkeit des Materials erhöhen kann (Quelle: BBS Institut – Forschungs- und Materialprüfungsinstitut für angewandte Bauphysik und Werkstoffe des Bauwesens; Ithaka Institut)

6.2 Fehlerhafte Anwendungen

Trotz hervorragender Eigenschaften der Pflanzenkohle kann sie bei falscher Anwendung auch negative Auswirkungen haben. Beispielsweise sollte die Pflanzenkohle vor der landwirtschaftlichen Anwendung „aktiviert“ werden, sofern sie noch keine effektiven Mikroorganismen enthält, da sie sonst den Pflanzen zunächst die Nährstoffe entzieht, um sich aufzuladen. Aus demselben Grund sollte die Pflanzenkohle nicht direkt mit Wurzeln von Bäumen, Reben oder Zierpflanzen in Kontakt kommen, da diese ansonsten einer Stresssituation ausgesetzt sind und im schlimmsten Fall „verbrennen“.

Bei Weinreben wird die Pflanzenkohle in der Regel daher in den Streifen zwischen den Rebzeilen eingearbeitet.

Bei zahlreichen Anwendungen sind einschlägige Gesetze und Regelwerke zu beachten, beispielsweise darf Pflanzenkohle nur mit einer entsprechenden Zulassung als Futtermittel eingesetzt werden, Gülle darf nur bis zum 30.11 ausgebracht werden, beim Ausbringen von Pflanzenkohle ist zudem die Düngemittelverordnung zu beachten.

7. Vertrieb und Qualitätssicherung

7.1 Vertriebsstrukturen

Der Pflanzenkohle-Markt ist noch im Entstehen. Aktuell gibt es noch keine ausgeprägten Vertriebsstrukturen und nur wenige Richtlinien und Qualitätsstandards. Hersteller und Händler bieten direkt an Endkunden oder andere Händler an. Für die Herstellung werden unterschiedlichste Ausgangsmaterialien herangezogen, weshalb das EBC versucht hier eine klare Linie zu formulieren (siehe 7.3). Die Akzeptanz von Endabnehmern hängt nahezu ausschließlich vom Preis der Kohle und von den Ergebnissen nach Verwendung der Kohle ab.

Auf Grund der Tatsache, dass es zukünftig sehr viele Anwendungsfelder für die Pflanzenkohle geben wird, deren Anforderungen an das Produkt sich stark unterscheiden, gehen die Verfasser davon aus, dass sich eine Händlerstruktur ausbilden wird, bei der die Hersteller anwendungsspezifische Produkte über entsprechende Fachhändler vermarkten werden.

7.2 Preise für Pflanzenkohle, CO₂-Zertifikate

Die Herstellkosten für hochwertige Pflanzenkohle liegen bei den derzeitigen Herstellverfahren ohne Wärmenutzung und je nach Rohmaterial in der Größenordnung von ca. EUR 200,- bis EUR 500,- je Tonne. Wesentlicher Faktor sind hierbei die Kosten für die Rohstoffbeschaffung. Die Verkaufspreise

liegen demnach bei EUR 500,- bis > EUR 1000,- je Tonne. Für eine Markterschließung oder gar -durchdringung im Bereich der Landwirtschaft oder der Industrie ist dieser Preis noch deutlich zu hoch.

Eine Möglichkeit, die Herstellungskosten zu senken, sind effektivere Produktionsanlagen mit Auskoppelung und Verwertung der Überschusswärme. Eine weitere Möglichkeit ist der Handel mit CO₂-Zertifikaten. Bereits heute gibt es die Möglichkeit, CO₂-Zertifikate für Pflanzenkohle zu generieren, und diese am freien Markt zu handeln. In den letzten Monaten sind die Preise für diese Zertifikate deutlich gestiegen, bis zu EUR 200,- je Tonne. Die Einnahmen aus CO₂-Zertifikaten werden zukünftig ein ganz wesentlicher Faktor sein, damit die Pflanzenkohle vom Markt angenommen wird.

7.3 Qualitätssicherung

Die EBC-Richtlinien sind das erste Regelwerk, das einen Qualitätsstandard für Pflanzenkohle definiert. Die Richtlinien betrachten in erster Linie Anwendungen in der Landwirtschaft. Sie haben keine Gesetzeswirkung und sind somit zunächst unverbindlich, sie werden jedoch bei zahlreichen Anwendungen als verbindlicher Mindeststandard für die Qualität der Pflanzenkohle vorgeschrieben.

Auch für die Verwendung der Pflanzenkohle als Zusatzstoff für Tierfutter gibt es gewisse Mindeststandards, hier ist in erster Linie eine Zulassung nach dem Standard GMP+ erforderlich.

Die Düngemittelverordnung legt bei bestimmten Schadstoffen, z. B. Schwermetallen, Grenzwerte fest, die für eine Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen nicht überschritten werden dürfen.

Auch die Bauindustrie, die Pharmazie und die meisten anderen Branchen spezifizieren die Einsatzstoffe sehr genau, und fordern für die Zulassung entsprechende Qualitätsnachweise von unabhängigen Instituten.

Bei der Bewertung von Pflanzenkohlen ist sehr genau darauf zu achten, welches Analyseverfahren verwendet wird. Beispielsweise schreiben die EBC-Richtlinien vor, dass die Schadstoffe durch das Toluol-Extraktionsverfahren ermittelt werden müssen. Unterschiedliche Analyseverfahren ergeben teilweise stark voneinander abweichende Analyseergebnisse.

8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Nachfolgend werden die wesentlichsten Schlüsselparameter genannt, die die Wirtschaftlichkeit einer Pyrolyseanlage bestimmen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass eine ausgereifte Anlagentechnik zum Einsatz kommt, die optimal auf den vorgesehenen Anwendungsfall abgestimmt ist. Eine Anlagentechnik, die nicht zum Rohstoff passt, mit der die gewünschten Produktqualitäten nicht erzielt werden können, oder die störanfällig ist, lässt sich in der Regel nicht wirtschaftlich betreiben.

Wie bei jeder verfahrenstechnischen Anlage ist es zudem sehr wichtig, dass eine Pyrolyseanlage von geschultem und qualifiziertem Personal betrieben und instand gehalten wird.

Schlüsselparameter

Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit einer Pyrolyseanlage sind in der Reihenfolge ihrer Bedeutung:

- der Verkaufspreis der Pflanzkohle
- die Erlöse aus dem Wärme- und gegebenenfalls Stromverkauf
- die Kosten für die Beschaffung und Aufbereitung des Rohmaterials

sowie je nach Standort

- der Eigenstrombedarf der Anlage und die spezifischen Stromkosten am Standort
- die Personalkosten

Das Kapitel 10 enthält eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine Pyrolyseanlage mit einer jährlichen Produktionskapazität von 6000t, mit Strom- und Wärmeerzeugung. Bezogen auf dieses Projekt und die dort dargestellten Parameter zeigt die nachfolgende Sensitivitätsanalyse den Einfluss der oben genannten Schlüsselparameter bei einer Schwankung gegenüber den Soll-Werten von +10% bzw. -10%:

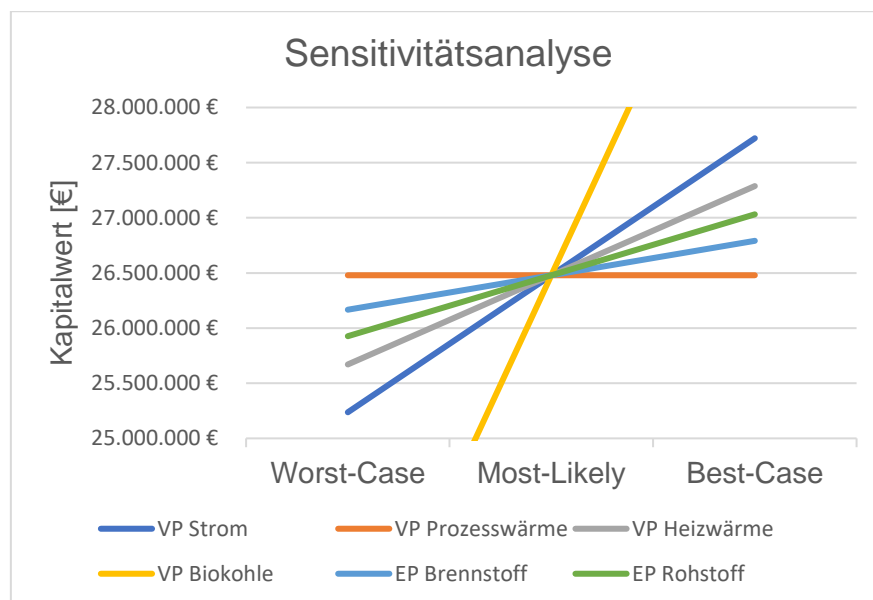


Abbildung 9: Sensitivität einflussreicher Parameter

Bei diesem Beispiel wurde zu Grunde gelegt, dass die Überschusswärme lediglich als Heizwärme genutzt wird, jedoch keine Prozesswärme bereitgestellt wird.

9. Ausblick – Entwicklung des Pflanzenkohle-Markts

Für qualitativ hochwertige Pflanzenkohle bieten sich bereits heute zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten und ein breit gefächertes Nutzerspektrum. Bei nachhaltiger Verwendung der Kohle bildet diese eine CO₂-Senke. Hemmnisse bei der Verwendung von Pflanzenkohle anstelle von fossiler Kohle sind insbesondere die hohen Herstellungskosten, die derzeit noch viel zu niedrigen Produktionskapazitäten, und speziell bei industriellen Anwendungen nicht zuletzt auch die jeweils individuellen, produktspezifischen Anforderungen.

Der Bau einer Pyrolyseanlage zur Pflanzenkohleherstellung mit Nutzung der Überschussenergie dient dazu, dem Produkt Pflanzenkohle eine Markteinführung auf breiter Basis zu ermöglichen, da Pflanzenkohle nur in der genannten Kombination wirtschaftlich hergestellt und zu entsprechend attraktiven und wettbewerbsfähigen Preisen angeboten werden kann.

Nach Einschätzung des Verfassers wird sich der Pflanzenkohlemarkt in den kommenden Jahren in Bezug auf die Herstellung, Vermarktung, Preisgestaltung und Anwendung sehr dynamisch entwickeln. Wesentlicher Faktor ist hierbei das CO₂-Sequestrierungspotenzial. Die Herstellung von Pflanzenkohle in großem Maßstab und die nachhaltige Verwendung der Kohle sind der Schlüssel dafür, der Atmosphäre aktiv CO₂ zu entziehen, um dadurch dem fortschreitenden Klimawandel so schnell wie möglich aktiv entgegenzuwirken.

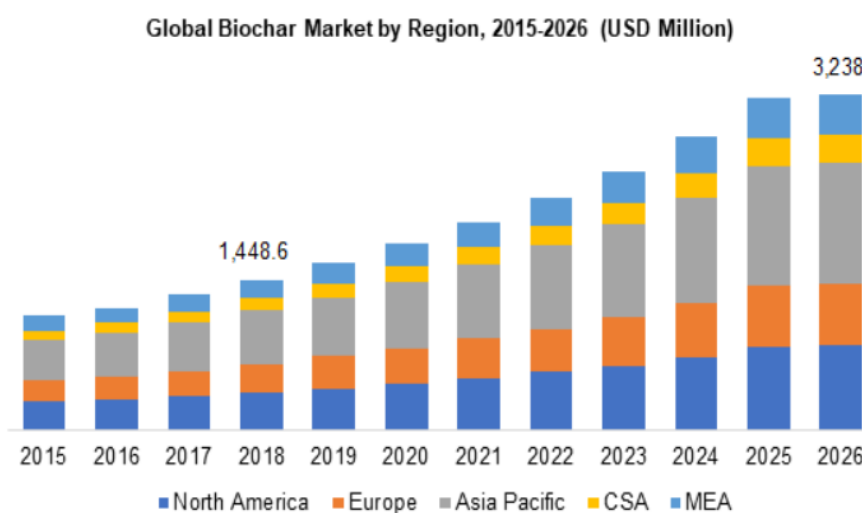


Abbildung 10 : weltweite Entwicklung des Biokohlemarktes 2015 – 2026

(Quelle: <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/biochar-market>)

Die Nachfrage nach hochwertigem Holz dürfte aus Gründen des Klimaschutzes in vielen Bereichen stark steigen:

- in der Bauindustrie als Ersatz für Beton- und Stahlkonstruktionen
- im Garten- und Landschaftsbau als Torfersatz
- für synthetische Kraftstoffe
- u.v.m.

Wichtig wird es daher sein, Verfahren einzusetzen, in denen sich Biomasse verkohlen lässt, die für andere Anwendungen nicht geeignet ist, wie z. B. Grünschnitt.

10. Ergebnisse der Studie, Empfehlungen an den Landkreis

10.1 Biomasseanalyse, Anlagengröße, Standortwahl

Die Analyse der verfügbaren Biomasse hat ein jährliches Potenzial von ca. 26.500 Tonnen holzigem Grünschnitt und 4.000 Tonnen Altholz im Landkreis ergeben. Damit lassen sich ca. 6.000 Tonnen Pflanzenkohle produzieren.

Für den Bau und Betrieb einer entsprechenden Anlage kommen nach Rücksprache mit den Behörden lediglich die Standorte Bretten und Kraichtal in Betracht.

10.2 Anlagentechnik, technische Parameter

Wie die Herstellerübersicht zeigt, kommen für die genannte Produktionskapazität nur Großanlagen von Polytechnik, Carbo Force und eventuell auch noch von Carbon Technik Schuster in Betracht. Bei Carbo Force und bei Carbon Technik Schuster würde die Anlage bereits aus mehreren Linien bestehen.

Beim Green Carbon-Prozess von Polytechnik können bei der Herstellung von 6.000 Tonnen Pflanzenkohle bis zu 5MW Abwärme zur Einspeisung in das regionale Wärmenetz gewonnen werden. Die Herstellerdaten der anderen Fabrikate lassen auf eine ähnliche Größenordnung schließen.

10.3 Kohlenstoffsinkenpotential im Landkreis

Das Senkenpotential lässt sich in zwei Kategorien unterteilen. Zum einen in den aktiven Entzug von Kohlenstoff aus der Atmosphäre durch die Herstellung von Pflanzenkohle und zum anderen durch die Substitution fossiler Energieträger durch die Nutzung der CO₂-neutralen Überschussenergie aus dem Prozess.

6.000 Tonnen hochwertige Pflanzenkohle binden bei nachhaltiger Verwendung, z. B. beim Einsatz zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft, bis zu 20.000 Tonnen CO₂ langfristig. Unter Berücksichtigung des Energieeinsatzes für die Ernte der Pflanze, für Transporte und für den Betrieb der Pyrolyseanlage ist das tatsächliche CO₂-Sequestrierungspotenzial niedriger. Das Ithaka-Institut geht überschlägig von ca. 2 Tonnen je Tonne Pflanzenkohle aus.

Die Jahresenergiemenge an erzeugter Wärme von 40 GWh führt verglichen zu einer Erzeugung aus Gas zu einer weiteren Einsparung von 8.000 Tonnen CO₂ jährlich.

10.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für den gewählten Standort

Mit Hilfe eines von der Polytechnik Deutschland GmbH entwickelten Berechnungstools wurde beispielhaft eine überschlägige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine Anlage zur jährlichen Herstellung von 6.000 Tonnen Pflanzenkohle durchgeführt. Folgende Prämissen wurden hierbei zu Grunde gelegt:

Durchschnittlicher Abholpreis für den Grünschnitt	EUR 5,-/t
Kosten für Transport und Aufbereitung	EUR 10,-/t

Weitere Parameter können dem nachfolgenden Projektdatenblatt entnommen werden. Bei der Berechnung wurden keine CO₂-Zertifikate berücksichtigt.

Projekt		Beispielprojekt			
Angebotsnummer:	21-0026		Biokohle	6.000	t/a
Kunde:	UEA Landkreis KA		thermische Leistung	3,66	MW
Standort	Landkreis KA		elektrische Leistung (Stromüberschuss)	600	kW
			Rohstoffbedarf gesamt	35.025	t/a
Investitionen		Technische Parameter			
Karbonisierungsanlage	7.500.000 €		Volllaststunden Strom	7.500	h/a
Grundstück, Gebäude	3.400.000 €		Volllaststunden Biokohle	6.500	h/a
Fernwärmeauskopplung	950.000 €		Volllaststunden PW	6.000	h/a
Genehmigungsverfahren	650.000 €		Volllaststunden HW	5.000	h/a
Gesamtinvestition	12.500.000 €		Brennstoff (Feuerung) w45	942	kg/h
			Rohstoff (Biokohle)	4.446	kg/h
Vergütungsmodell	Direktvermarktung		Wassergehalt Rohstoff	40	%
			Brennstoffbedarf (Feuerung)	7.067	t/a
			Rohstoffbedarf (Biokohle)	33.346	t/a
Eigenverbrauch					
bisheriger Strombedarf	-	kWh	Bruttostromerzeugung	1.000	kW
1. Wärmeträger	Heizöl leicht		Strombedarf Anlage	400	kW
bisheriger Wärmebedarf PW	-	MWh	Wärmeerzeugung Brutto	5.000	kW
2. Wärmeträger	Erdgas		Wirkungsgrad Trockner	75	%
bisheriger Wärmebedarf HW	-	MWh	Wärmebedarf Anlage (Trocknung)	1.339	kW
eigener Brennstoffvorrat	-	t/a	Herstellung Biokohle	923	kg/h
Wirtschaftliche Parameter		Statische Parameter			
Strompreis	0,25	€/kWh	Eigenkapital	3.116.250	€
Brennstoffkosten nass	40	€/t	Förderung	2.112.500	€
Rohstoffkosten nass	15	€/t	Fremdkapital	7.271.250	€
Verkaufspreis PW	40	€/MWh	FK-Zinsen	6,0%	
Verkaufspreis HW	40	€/MWh	Tilgungszeit	10	Jahre
Verkaufspreis Biokohle	600	€/t	Annuität	987.930	€
bisheriger Wärmepreis PW	55	€/MWh	EEG-Umlage	0,065	€/kWh
bisheriger Wärmepreis HW	70	€/MWh	EEX-Vergütung	0,040	€/kWh
Direktvermarktung Strom	0,25	€/kWh	EEG-inspeisevergütung	0,065	€/kWh
erzeugtes Potential					
Stromerzeugung netto	600	kW	Stromeinsparung	-	kWh
Wärmerzeugung netto	3.661	kW	Überschussstrom	4.500.000	kWh
Prozesswärme	-	kW	Wärmeeinsparung PW	-	MWh
Heizwärme	3.661	kW	Wärmeeinsparung HW	-	MWh
Abluft / noch verfügbare Wärme	-	0	Wärmeüberschuss PW	-	MWh
			Wärmeüberschuss HW	18.305	MWh
Betriebswirtschaftliche Kennzahlen					
Einzahlungsüberschüsse kumuliert	63.493.585	€	Kalkulationszinssatz	6,5%	
Kapitalwert tat. Investition	29.315.787	€	durchschnittl. Eigenkapitalrendite	19,7%	
Amortisationszeit	3,9	Jahre	interner Zinsfuß	51,9%	
Herstellungskosten Biokohle	165	€/t	kalkulatorische Lebensdauer	20	Jahre

Tabelle 8: Projektdatenblatt

Bei guter Betriebsführung kann eine Pyrolyseanlage folglich sehr wirtschaftlich betrieben werden. Ausschlaggebender Faktor für die Herstellungskosten der Kohle ist der Rohstoffpreis. Wesentlichster Faktor für den wirtschaftlichen Erfolg des Projekts ist der erzielbare Verkaufspreis für die Kohle.

Anhang

A1 Anforderungsprofil

Im ersten Schritt galt es, sämtliche relevanten Quellen von hölzernen Biomasseabfällen im Landkreis Karlsruhe hinsichtlich der anfallenden Mengen, der Qualität und der Verfügbarkeit zu erfassen. Folgende Kriterien müssen hierbei erfüllt sein:

Kategorie 1

- Ausschließlich pflanzliche Biomassen (Grünschnitt, Wurzelstöcke, Holzabfälle A I und A II)
- saubere Trennung von nichtorganischen Fremdstoffen wie Metallen, Bauschutt, Elektroschrott
- kein Altholz der Kategorien A III und A IV
- Verunreinigungen der Biomassen mit Plastik- und Gummiabfälle < 15 % (m/m)
- Mineralische Zusätze wie Gesteinsmehle, Aschen, Kalk, Ton < 10% (m/m)

Kategorie 2 - Explizit für Futter- und Einstreukohle

- Ausschließlich naturbelassenes Holz, wie Waldrestholz und Altholz der Kategorie A I, ohne Farbreste, Lösungsmittel oder anderen potentiell toxischen Verunreinigungen
- Verunreinigungen der Biomassen mit Plastik- und Gummiabfälle < 1 % (m/m)
- Keine mineralischen Zusätze

Biomasseabfälle, die keiner der genannten Kategorien entsprechen, **wie z. B. Altholz der Kategorien A III und A IV**, fallen unter die Kategorie 3.

Erfassungsbogen – Einsatzstoffe zur Verkohlung

Wertstoffhof, Kombihof: _____

Ansprechpartner/in: _____

E-Mail / Telefon: _____

Art der Biomasse	Kategorie ¹⁾	Geschätzte Menge in t/a	Handelsform ²⁾	Wasser-gehalt in Gew.-% ca. ³⁾	Verfügbarkeit (kontinuierlich, saisonal, etc.) ⁴⁾
Waldrest- und Durchforstungs-holz					
Baum-, Reben-Strauchschnitt					
Landschafts-pfle-gematerial					
Siebüberlauf, un-sortiert					
Davon holzartiges Restmaterial aus Siebüberlauf					
Altholz Kategorie A I					
Altholz Kategorie A II					
Altholz Kategorie A III	3				
Altholz Kategorie A IV	3				
Sonstige (z. B. Schwemmholz): *)					

1) entsprechend den auf Seite 1 beschriebenen Kategorien 1, 2 oder 3

2) geschreddert, gehackt, unbehandelt, etc.

3) falls nicht bekannt, dann bitte Angabe „nass“ oder „trocken“

4) falls saisonal, dann bitte angeben, in welchen Monaten das Material vorrangig anfällt

*) bitte beschreiben Sie, um welches Material es sich handelt, und aus welchen Quellen dieses stammt:

Datum, Unterschrift, Stempel: _____

A2 Entscheidungsbaum BlmSch Beispiele

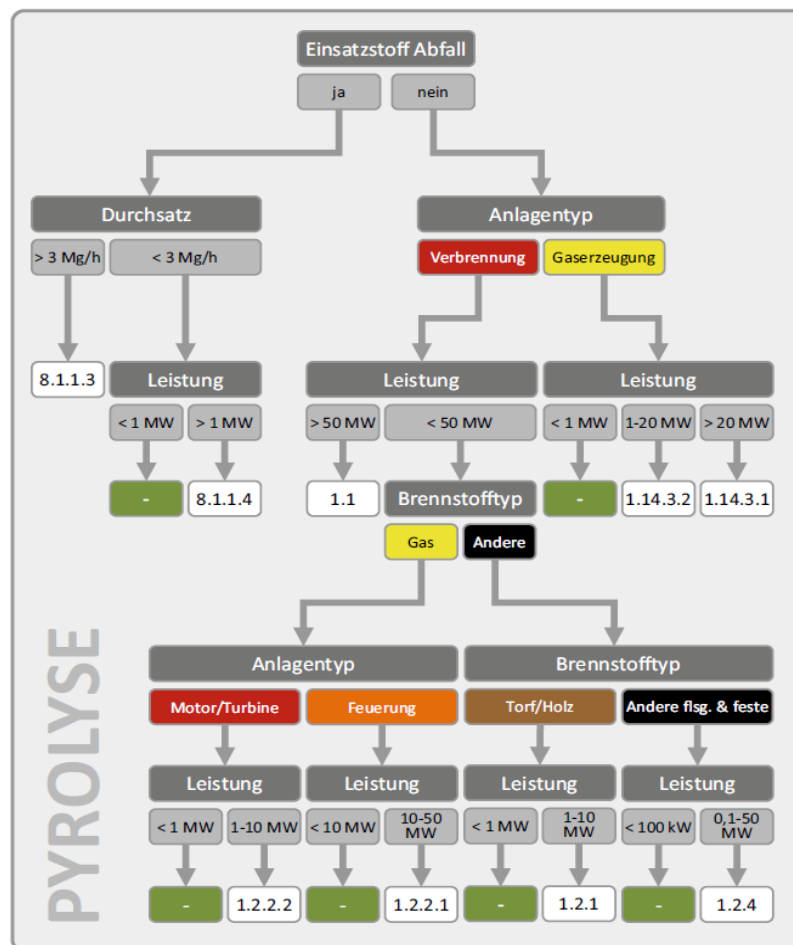


Abbildung 11: Entscheidungsbaum Genehmigung Pyrolyse/Vergasung – Stand 2016
 (Die Ziffern in den hellen Kästen beziehen sich auf Anhang 1 Der 4. BImSchV.)
 Quelle: Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) vom 2. Mai 2013

Beispiel Pyrolyse 1

Abfälle aus der Herstellung von alkoholischen und alkoholfreien Getränken (Abfallschlüssel AS 02 07 01) sollen mit einem Durchsatz von 1 Mg/h und einer Feuerungswärmeleistung von 3 MW pyrolysiert werden. Einsatzstoff Abfall: ja → Durchsatz < 3 Mg/h → Leistung > 1 MW → 4. BImSchV Ziffer: 8.1.1.4

Beispiel Pyrolyse 2

Naturbelassene Holzhackschnitzel sollen mit einer Leistung von 1,5 MW pyrolysiert und das entstehende Gas in einer Brennkammer verbrannt werden. Mit der Verbrennungswärme wird der Pyrolyseprozess beheizt, weitere Abwärme wird zur Erzeugung von Warmwasser genutzt. Einsatzstoff Abfall: nein → Verbrennung < 50 MW → Brennstofftyp Holz/Torf → Leistung: 1–10 MW → 4. BImSchV Ziffer: 1.2.1

Beispiel Pyrolyse 3

Naturbelassene Holzhackschnitzel sollen in einer Pyrolyseanlage mit einer Leistung von 3 MW behandelt werden. Das entstehende Gas wird in einem Gasmotor mit 1,5 MW Leistung genutzt. Wird die Pyrolyse betrachtet gilt: Einsatzstoff Abfall: nein → Gaserzeugung: 1-20 MW Energieäquivalent → 4. BImSchV Ziffer: 1.14.3.2 Wird der Motor betrachtet gilt: Einsatzstoff Abfall: nein → Verbrennung: < 50 MW → Brennstofftyp: Gas → Anlagentyp: Motor → Leistung: 1-10 MW → 4. BImSchV Ziffer: 1.2.2.2

Quellen

Quicker, P.; Weber, K. (Hrsg.): Biokohle – Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten. Wiesbaden: Springer-Fachmedien, 2016

VDI 3933 - Emissionsminderung Erzeugung von Biomassekarbonisaten, Entwurf 09/2017

EBC-Richtlinien, inklusive

Positivliste zulässiger Biomassen zur Herstellung von Pflanzenkohlen

Richtlinien zur Zertifizierung des C-Senken Potentials von Pflanzenkohle, 01/2021

Bundes-Immissionsschutzgesetz

Umweltbundesamt: Klärschlamm Entsorgung in der BRD, 10/2018

Uni Bremen: Entwicklung eines innovativen Pflanzenfilters zur Eliminierung von Arzneimittelrückständen im Ablauf kleiner Kläranlagen und dezentraler Kleinkläranlagen – Abschlussbericht

Fraunhofer ISE, Freiburg, in Zusammenarbeit mit der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg, Forschungsprojekt Rest2Value: Polytechnic Biochar - Material analysis and Application for Catalysts

Pyreg, Biomacon, Polytechnik, CarbonTechnikSchuster, CarboForce: Herstellerbeschreibungen

Dominik Burger: Modellerstellung zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Karbonisierungsanlagen zur Pflanzenkohleherstellung mit möglicher Nutzung der Überschussenergie – Bachelorthesis, 03/2021