



WIRTSCHAFTLICHES UND ENERGETISCHES POTENZIAL VON PYROLYSEANLAGEN ZUR VERWERTUNG VON GRÜNABFÄLLEN

Eine Untersuchung zu CO₂-Bindung,
Ressourceneffizienz und regionaler
Kreislaufwirtschaft

Potentialanalyse

Untersuchung der Pyrolyse als Schlüsseltechnologie für den Lahn-Dill-Kreis zur nachhaltigen Verwertung von Grünschnitt, mit Schwerpunkt auf CO₂-Bindung, Ressourceneffizienz und regionaler Kreislaufwirtschaft.



Nana Holthaus-Vehse
holthaus-vehse@upstream.eco

Wirtschaftliches und energetisches Potenzial von Pyrolyseanlagen zur Verwertung von Grünabfällen

Autorin: Nana Holthaus-Vehse

Unter Mitarbeit von: Claudia Allonas, Dr. Sylvie Drahorad

Diese Studie wurde durchgeführt von:

Up-Preneurs
Brühlsbachstr. 48a
35578 Wetzlar
Tel: +49 (0) 6441 78 68 114
Mail: info@up-preneurs.de
Inhaberin: Claudia Allonas

November, 2024

Inhalt

Abbildung	4
Tabellen	4
Abkürzungen.....	4
1. Einleitung	5
1.1. Hintergrund und Bedeutung der Pyrolyse im Lahn-Dill-Kreis	5
1.2. Ziel der Studie und Vorgehen.....	6
2. Pyrolyse: Schlüsseltechnologie für Klimaschutz und Kreislaufwirtschaft	6
2.1. Die Pyrolyse.....	6
2.2. Wärmenutzung	7
2.3. Nebenprodukte: Pyrolyseöl, -gas	8
2.4. Zusammenfassung der Ergebnisse.....	8
3. Analyse der Biomassequellen im LDK	8
3.1. Identifizierte Biomassequellen im Lahn-Dill-Kreis	8
3.2. Zusammenfassung der Ergebnisse.....	9
4. Technologien	9
4.1. Übersicht marktreifer Pyrolyseverfahren.....	10
4.2. Technologieübersicht von Pyrolyseanlagen	10
4.3. Analyse der Anlagenhersteller	10
4.4. Zusammenfassung der Ergebnisse.....	12
5. Verwertungsoptionen	12
5.1. Pflanzenkohle in der Landwirtschaft.....	13
5.2. Pflanzenkohle in der Bau- und Metallbranche.....	13
5.3. Pyrolyseöl als Industrie-Rohstoff und Energieträger.....	13
5.4. Pyrolysegas zur Energiegewinnung.....	14
5.5. Zusammenfassung der Ergebnisse.....	14
6. Regulatorische Anforderungen	14
6.1. Anforderungen für die Errichtung von Pyrolyseanlagen.....	14
6.2. Regulatorische Vorgaben für die Nutzung von Pflanzenkohle	15
6.3. Zusammenfassung der Ergebnisse.....	15
7. Qualitätsstandards und Zertifizierungen von Pyrolyseprodukten	16
7.1. Allgemeine technischen Anforderungen an Pflanzenkohle	16
7.2. Anpassung an Marktanforderungen	16
7.3. Zertifizierungen von Pflanzenkohle.....	17

7.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	17
8.	Zertifikate, Handel und Investitionshilfen	17
8.1.	CO ₂ -Zertifikate im Zertifikate Handel.....	17
8.2.	Regionale Förderprogramme und Investitionshilfen	18
8.3.	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	18
9.	Wirtschaftlichkeitsanalyse und Handlungsempfehlungen	18
9.1.	Grundlagen der Marktintegration und Wirtschaftlichkeit	19
9.2.	Verwertungspfade und Szenarien zur Wirtschaftlichkeit der Pflanzenkohleproduktion	20
9.3.	Förderung und regionale Synergien.....	21
9.4.	Kooperationen und gesellschaftliche Faktoren.....	22
9.5.	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	22
10.	Fazit und Ausblick: Chancen und Perspektiven der	22
	Pyrolyse im Lahn-Dill-Kreis.....	22
10.1.	Perspektiven für weiterführende Untersuchungen und Projekte	22
10.2.	Schlussfolgerung.....	23
	Literaturverzeichnis	25

Abbildung

Abb.1: Materialfluss und Nutzungspfade für die Verwertung von Grünschnitt (eigene Darstellung)	19
--	----

Tabellen

Tab. 1: Abfallwirtschaft Lahn-Dill (2023): Anlieferungen Grünschnitt 2023	9
Tab. 2: Anlagentechnik und Verfahrensarten (eigene Darstellung)	12
Tab. 3: Allgemeine technische Parameter der Pflanzenkohle	16

Abkürzungen

AWN	Abfallwirtschaft im Neckar-Odenwald-Kreis
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
C _{org}	organischer Kohlenstoff
DüMV	deutsche Düngemittelverordnung
EBC	European Biochar Certificate
H	Wasserstoff
H/C _{org}	Verhältnis von Wasserstoff zu organischem Kohlenstoff
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change / Weltklimarat
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kWh	Kilowattstunde
LCA	Life Cycle Assessment
LDK	Lahn-Dill-Kreis
pyCCS	pyrogenic Carbon Capture and Storage
UNEP	Umweltprogramm der Vereinten Nationen
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung

1. Einleitung

Die Reduktion von CO₂-Emissionen und darüber hinaus die aktive Einbindung von atmosphärischem Kohlestoff sind dringliche Maßnahmen, um die gesetzlich verankerten deutschen Klimaziele zu erreichen. Neben bereits etablierten Reduktionsmaßnahmen wie die Dekarbonisierung von Industrie, Verkehr und Raumwärme, fordert der Emission Gap Report 2024 des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) allerdings noch weitere Ambitionen und innovative Lösungen, und nennt hier unter anderem eine konsequente Kreislaufwirtschaft und damit verbunden, die nachhaltige Verwertung biogener Abfälle. Die Ansätze der Kreislaufwirtschaft leisten einen entscheidenden Beitrag dazu, Kohlenstoffkreisläufe zu schließen und den Einsatz fossiler Ressourcen deutlich zu reduzieren. Um die Erderwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen, genügt es nicht, allein die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Zusätzlich muss der bereits in der Atmosphäre vorhandene Kohlenstoff entfernt werden, um langfristig stabile Klimabedingungen zu schaffen (IPCC, 2018). Kohlenstoffspeicherungstechnologien wie pyCCS (pyrogenic Carbon Capture and Storage) und BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) sind dabei entscheidende Werkzeuge, um negative Emissionen zu erzeugen, überschüssiges CO₂ der Atmosphäre zu entziehen und dauerhaft zu speichern – sei es in Form von Pflanzenkohle im Boden oder durch geologische Speicherung.

Auf Landesebene bilden hier im Besonderen die Klimaschutzstrategie Hessen und die Klimaziele des Landes, mit einer 65%-igen Reduktion der Treibhausgase bis 2030 und Klimaneutralität bis 2045, die Basis für alle Maßnahmen. Dr. Christian Hey vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz betonte 2023 vor diesem Hintergrund die Rolle der Kreislaufwirtschaft und die Nutzung biogener Abfallstoffe wie Gras- und Strauchschnitt. Damit setzt Hessen auf die stoffliche Verwertung biogener Abfälle, um Kohlenstoffkreisläufe zu schließen und fossile Emissionen zu vermeiden (BioBall-Podcast 2023). Pyrolyse und die damit einhergehende Herstellung von Pflanzenkohle könnte in diesem Fall einen wichtigen Beitrag leisten.

1.1. Hintergrund und Bedeutung der Pyrolyse im Lahn-Dill-Kreis

Der Lahn-Dill-Kreis (LDK) steht vor der Herausforderung, jährlich etwa 6.500 Tonnen Grünschnitt nachhaltiger zu verwerten, die derzeit überwiegend thermisch genutzt oder kompostiert werden. Bei der thermischen Verwertung wird jedoch der gebundene Kohlenstoff als CO₂ freigesetzt, während bei der Kompostierung zusätzliche Treibhausgase wie Methan und Lachgas entstehen, die ein deutlich höheres Treibhauspotenzial als CO₂ aufweisen (Bernal et al., 2009).

Die Pyrolyse bietet hier mit der daraus entstehenden Pflanzenkohle eine nachhaltige Alternative und könnte die Kreislaufwirtschaft im LDK fördern, Abfall reduzieren, Abfallkosten senken und eine dezentrale Rohstoffversorgung etablieren. Das Verfahren könnte wirtschaftliche und ökologische Ziele verbinden, die Region bei der Dekarbonisierung unterstützen und als nachhaltige Kohlenstoffsенke dienen, wodurch es Klimaschutzmaßnahmen und die regionale Ressourceneffizienz gleichermaßen stärkt.

Nach Angaben des GiLand-Reports stünden zusätzlich im Lahn-Dill-Kreis jährlich rund 113.000 Schüttraummeter Energieholz aus Landschaftspflegemaßnahmen zur Verfügung, was etwa 28.000 bis 35.000 Tonnen entspricht (je nach Holzart und Feuchtigkeitsgehalt). Frühere Untersuchungen im Rahmen dieses Heckenmanagement-Projekts der LEADER-Regionen bestätigen zudem das energetische Potenzial von Energieholz. Des Weiteren liefert die Untersuchung zusätzliche wertvolle Erkenntnisse für eine Entwicklung regionaler Wertschöpfungsketten, welche insbesondere für größere industrielle Pyrolyseanlagen in Betracht kämen (LEADER-Region GießenerLand e.V., 2018).

Die Potenzialanalyse dieser Studie konzentriert sich ausschließlich auf die Verwertung von Grünschnitt. Energieholz ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

1.2. Ziel der Studie und Vorgehen

Die Studie analysiert umfassend das Potenzial der Verwertung von Grünschnitt im LDK durch Pyrolyse, mit einem Schwerpunkt auf der Produktion und Nutzung von Pflanzenkohle. Im Fokus steht dabei ihre Fähigkeit zur langfristigen CO₂-Bindung und ihre energetische Verwertbarkeit. Neben der technischen Bewertung der Pyrolyseverfahren und ihrer Umweltwirkungen wird auch die Umsetzbarkeit beleuchtet.

Für die Datenerhebung wurden Gespräche mit einer Vielzahl von Akteuren geführt, darunter Pyrolyseanlagenanbieter, Vertreter der Abfallwirtschaft, Wissenschaftler und Experten aus Landwirtschaft und Bauwirtschaft. Diese breite Expertise bildet die Grundlage für eine fundierte Bewertung der Potenziale, Herausforderungen und Anwendungen der Pyrolysetechnologie auf regionaler und überregionaler Ebene

2. Pyrolyse: Schlüsseltechnologie für Klimaschutz und Kreislaufwirtschaft

Dieses Kapitel beleuchtet die Pyrolyse als wegweisende Technologie für die nachhaltige Verwertung biogener Abfälle und die Reduktion von Treibhausgasen. Es zeigt auf, wie der thermo-chemische Umwandlungsprozess Pflanzenkohle, Pyrolyseöl und Pyrolysegas erzeugt und welche Potenziale sich daraus für die langfristige Kohlenstoffbindung, erneuerbare Energien und industrielle Anwendungen ergeben. Ziel ist es, die Pyrolyse als effektives Instrument zur Erreichung von Klimazielen, zur Ressourcenschonung und zur Förderung der regionalen Kreislaufwirtschaft vorzustellen, die durch effiziente Nutzung lokaler Ressourcen, geschlossene Stoffkreisläufe und die Minimierung von Abfällen geprägt ist.

2.1. Die Pyrolyse

Die Pyrolyse, ein thermo-chemischer Umwandlungsprozess, bietet eine nachhaltige und vielseitige Alternative zur thermischen Verwertung oder Kompostierung biogener Abfälle. In diesem Prozess wird organisches Material unter Sauerstoffausschluss und hohen Temperaturen in Pflanzenkohle, Pyrolyseöl und Pyrolysegas umgewandelt. Dies

ermöglicht nicht nur eine signifikante Reduktion des Abfallvolumens, sondern auch die langfristige Speicherung von Kohlenstoff, der sonst als CO₂ freigesetzt würde. Insbesondere die entstehende Pflanzenkohle trägt durch ihre chemische Stabilität maßgeblich zur Vermeidung von Treibhausgasen bei (Lehmann et al., 2011; Schmidt et al., 2019).

Die Kohlenstoffbindungskapazität der Pyrolyse übertrifft die anderer Verwertungsmethoden wie der Kompostierung deutlich. Während bei der Kompostierung ein Großteil des Kohlenstoffs in Form von CO₂, Methan und Lachgas freigesetzt wird, verbleibt bei der Pyrolyse ein Großteil des Kohlenstoffs in der Pflanzenkohle. Zudem minimiert die Pyrolyse die Bildung von Methan und Lachgas erheblich, da die Prozessbedingungen diese Treibhausgase entweder abbauen oder gar nicht erst entstehen lassen. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber der Kompostierung, bei der Methan und Lachgas in signifikanten Mengen freigesetzt werden können (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2008).

Untersuchungen zeigen, dass Pflanzenkohle zwischen 50 % und 85 % Kohlenstoff enthalten und diesen über Zeiträume von 100 bis 1.000 Jahren stabil im Boden speichern kann (Bernal et al., 2009; Budai et al., 2012). Ein zentraler Indikator für die langfristige Stabilität ist das Verhältnis von Wasserstoff (H) zu organischem Kohlenstoff (C_{org}), der H/C_{org}-Wert, der unter 0,4 liegen muss, um mikrobiellen Abbauprozessen standzuhalten (Schmidt et al., 2019).

Gleichzeitig gewährleisten strenge Qualitätsanforderungen, dass die Pflanzenkohle für verschiedene Anwendungen – von der Bodenverbesserung bis hin zum Einsatz in der Bauindustrie – geeignet ist.

2.2. Wärmenutzung

Die bei der Pyrolyse entstehende Wärme ist ein zentraler Aspekt, der sowohl zur Effizienz als auch zur Wirtschaftlichkeit des Prozesses beiträgt. Während der Pyrolyse werden organische Stoffe in festen Kohlenstoff (Pflanzenkohle), flüssige Produkte (Pyrolyseöle) und Gase (Synthesegas) zerlegt. Diese chemische Umwandlung ist teilweise exotherm, wobei ein Teil der Energie der Biomasse in Form von Wärme freigesetzt wird. Besonders das Synthesegas, das leicht brennbare Komponenten wie Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Methan enthält, kann durch Verbrennung als nutzbare Energiequelle dienen.

Die effiziente Nutzung der entstehenden Wärme bietet zahlreiche Vorteile, erfordert jedoch ein durchdachtes Wärmemanagement. Eine Herausforderung besteht in der Integration der Wärme in bestehende Infrastrukturen, insbesondere in abgelegenen Gebieten, die nicht an Fernwärmenetze angeschlossen sind. In solchen Regionen kann es schwieriger sein, die Wärme wirtschaftlich zu nutzen.

Trotz dieser Herausforderungen ist die Nutzung der entstehenden Wärme ein wesentlicher Faktor für die energetische und wirtschaftliche Optimierung der Pyrolyse. Anlagen, die Wärme und die Produktion von Pflanzenkohle kombinieren, gelten als hocheffiziente Systeme für die Kreislaufwirtschaft. Sie können dazu beitragen, fossile

Energieträger zu ersetzen und gleichzeitig Kohlenstoff dauerhaft in Form von Pflanzenkohle zu binden.

2.3. Nebenprodukte: Pyrolyseöl, -gas

Neben der Pflanzenkohle entstehen in der Pyrolyse Nebenprodukte wie Pyrolyseöl und Pyrolysegas, die als erneuerbare Energiequellen oder Rohstoffe für industrielle Anwendungen genutzt werden können (Bridgwater, 2012). Pyrolyseöl ist ein energiereicher Brennstoff, während Pyrolysegas direkt zur Energiegewinnung oder zur Herstellung von Biokraftstoffen eingesetzt werden kann. Die Flexibilität, mit der sich die Produkte der Pyrolyse auf verschiedene Anwendungen abstimmen lassen, macht die Technologie besonders wertvoll für eine zukunftsorientierte Kreislaufwirtschaft.

2.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt bietet die Pyrolyse eine interessante Möglichkeit, ökologische und wirtschaftliche Ziele zu verbinden. Sie reduziert Treibhausgasemissionen, schafft neue Wertschöpfungsketten, senkt Entsorgungskosten, generiert Einnahmen durch Abwärmenutzung, stärkt die regionale Wirtschaft und unterstützt die regionale Kreislaufwirtschaft.

3. Analyse der Biomassequellen im LDK

Dieses Kapitel untersucht die Verfügbarkeit und Eignung von Biomasse im Lahn-Dill-Kreis, insbesondere Grünschnitt, für die Pyrolyse. Ziel ist es, Optimierungspotenziale zu identifizieren und Grundlagen für eine nachhaltige und wirtschaftliche Nutzung regionaler Ressourcen zu schaffen.

3.1. Identifizierte Biomassequellen im Lahn-Dill-Kreis

Im Lahn-Dill-Kreis bildet Grünschnitt eine signifikante Biomassequelle, die für die Pyrolyse genutzt werden könnte. Die jährliche Sammelmenge beträgt nach Angaben der Abfallwirtschaft Lahn-Dill derzeit etwa 6.500 Tonnen und umfasst Strauchschnitt, Rasenschnitt, Laub und Siebrückstände. Saisonale Schwankungen, besonders im Frühjahr und Herbst, beeinflussen den Feuchtigkeitsgehalt und die Struktur der Biomasse, was für die Eignung zur Pyrolyse von Bedeutung ist. Studien zeigen jedoch, dass ein hoher Feuchtigkeitsgehalt die Energieeffizienz und die Qualität der Pflanzenkohle mindern kann (Sohi et al., 2010; Schmidt et al., 2019).

Tab. 1: Anlieferungen Grünschnitt 2023, Quelle: Abfallwirtschaft Lahn-Dill (2023):

Monat	Menge (in Tonnen)	Monat	Menge (in Tonnen)
Januar	169,12	Juli	462
Februar	382,93	August	645,16
März	380,64	September	808,69
April	424,83	Oktober	835,8
Mai	862,6	November	656,35
Juni	566,16	Dezember	380,76
Summe		6575,04	

Die dezentrale Sammlung des Grünschnitts an 21 Wertstoffhöfen stellt eine logistische Herausforderung dar. Zudem steigen mit Entfernungen von bis zu 45 Kilometern zum zentralen Abfallwirtschaftszentrum Aßlar, die Transportkosten.

3.2. Zusammenfassung der Ergebnisse

Im LDK stellt Grünschnitt mit einer jährlichen Sammelmenge von etwa 6.500 Tonnen eine bedeutende Biomassequelle für die Pyrolyse dar. Besonders die holzige Fraktion ist gut geeignet, während feuchte Materialien wie Rasenschnitt oder Laub zusätzliche Trocknung und damit verbunden höhere Produktionskosten erfordern. Eine mögliche Lösung könnte in der Einrichtung zentralisierter Vorverarbeitungsstationen oder dem Einsatz mobiler Pyrolyseanlagen liegen. Wettergeschützte Lagerung und eine rasche Verarbeitung der Biomasse innerhalb von 24 Stunden sind essenziell, um Vergärung und Qualitätsverluste zu vermeiden. Neben diesen Maßnahmen ist eine Optimierung der Logistik durch die Analyse der Transportwege und den Aufbau eines Netzwerks aus regionalen Sammel- und Verarbeitungspunkten entscheidend und schaffen eine Grundlage für die nachhaltige Nutzung der Biomassequellen im Kreis.

4. Technologien

Dieses Kapitel bietet einen Überblick über marktreife Pyrolyseverfahren und deren Potenziale für die Verwertung von Grünschnitt im LDK. Ziel ist es, geeignete Technologien zu identifizieren, die sich an die regionalen Biomassebedingungen anpassen lassen. Dabei werden Stärken, Schwächen und spezifische Anforderungen der Verfahren analysiert, um Handlungsempfehlungen für eine wirtschaftliche und nachhaltige Nutzung zu entwickeln.

4.1. Übersicht marktreifer Pyrolyseverfahren

Im Rahmen der Untersuchung und Evaluierung verschiedener Pyrolysetechnologien wurden Gespräche mit Anbietern und Betreibern geführt, um die jeweiligen Anforderungen und Herausforderungen zu identifizieren. Die Energieeffizienz, Kapazität und Produktqualität dieser marktreifen Technologien variieren je nach Anlagentyp erheblich, weshalb eine detaillierte Abwägung für den Einsatz im LDK notwendig ist.

Die Unterschiede zwischen Niedertemperatur- und Hochtemperaturverfahren oder Drehrohröfen und Batchverfahren können ebenfalls eine Grundlage bieten für die gezielte Auswahl geeigneter Anlagentypen, die sich an die verschiedenen Qualitäten des Grünschnitts anpassen lassen. Niedrigtemperaturverfahren eignen sich beispielsweise besonders für Materialien mit hohem Wasseranteil, während Hochtemperaturverfahren eine höhere Pflanzenkohlenproduktion und Energieeffizienz ermöglichen. (Grafmüller et al., 2021). Auch die Produktion von genannten Nebenprodukten kann durch gezielte Anpassung der Pyrolysebedingungen optimiert werden.

4.2. Technologieübersicht von Pyrolyseanlagen

Der folgende Abschnitt gibt eine Übersicht über die Anforderungen, Prozesse und Marktbedingungen von Pyrolyseanlagen basierend auf den Gesprächen mit den Herstellern. Die Bewertung berücksichtigt die spezifischen Anforderungen für die Verwertung von Grünschnitt im LDK und zeigt, welche Technologien potenziell geeignet sind.

4.3. Analyse der Anlagenhersteller

1. Carbon Technik Schuster

Materialanforderungen und Qualität: Die Anlagen sind speziell für holzige Biomasse mit geringem Feinanteil ausgelegt, was eine hohe Pyrolyse-Effizienz und Stabilität gewährleistet. Feinmaterialien eignen sich besser für Kompostierung, wodurch die Anlage für den inhomogenen Grünschnitt im LDK nur eingeschränkt geeignet ist.

Kooperationspräferenzen: Bevorzugt Kooperationen mit Landwirten, die konsistente Materialqualitäten liefern können. Dies stellt aufgrund der saisonalen und qualitativen Schwankungen bei kommunalem Grünschnitt eine Herausforderung dar.

2. BIOMACON

Prozesstechnische Anforderungen: Anlagen sind auf ligninhaltiges Material mit 10–15 % Feuchtigkeit spezialisiert. Ein hoher Anteil an Feinmaterial und Störstoffen mindert die Effizienz, wodurch die Anlage für heterogene kommunale Grünschnittfraktionen weniger geeignet ist.

Wirtschaftlichkeit und Marktbedingungen: Die Wirtschaftlichkeit hängt stark vom Absatz der Pflanzenkohle, der Wärmeenergienutzung und CO₂-Zertifikatserlösen ab. Die hohen Anforderungen an Eingangsmaterial und Qualitätsstandards schränken den Einsatz im LDK ein.

3. Carbonauten

Flexibilität und Materialtoleranz: Dezentrale Anlagen mit hoher Toleranz gegenüber Störstoffen wie Metallen und Nägeln. Diese Flexibilität reduziert die Kosten für Materialvorbehandlung und macht die Anlage für heterogene Grünschnittfraktionen geeignet.

Kapazitätsanforderungen: Benötigt 20.000 Tonnen Material pro Jahr aus einem Umkreis von 70 km. Die hohe Flexibilität und Verarbeitungsleistung macht sie zu einer vielversprechenden Option, sofern zusätzliche Materialquellen erschlossen werden.

4. Carbon Twister

Batchverfahren und Materialanforderungen: Flexible Verarbeitung von Grünschnitt mit Restfeuchte <20 % und Partikelgröße G20 bis G50. Mineralische Störstoffe wie Sand und Steine werden toleriert, was die Anlage für kommunale Abfälle geeignet macht.

Energieausbeute und Abwärmenutzung: Nutzt Abwärme zur Vortrocknung des Materials. Zusätzliche Wärmeabnehmer könnten die Wirtschaftlichkeit steigern und die Attraktivität für den LDK erhöhen.

5. Pyreg-Anlage im Neckar-Odenwald-Kreis

Materialanforderungen und Prozessbedingungen: Entwickelt für holzhaltige Materialien mit spezifischer Partikelgröße. Feinmaterialien aus Grünschnitt sind eine Herausforderung, da die Anlage homogenes Material benötigt.

Integrierte Nutzung und Kompostierung: Kombination von Pyrolyse und Kompostierung zur Herstellung von Terra Preta. Diese Synergie könnte auch im LDK als Lösung dienen.

6. Circular Carbon

Derzeitige und geplante Kapazitäten: Verarbeitet derzeit 4.000 Tonnen Kakaoschalen und plant Kapazitätserweiterungen in Süddeutschland. Interimistische Pflanzenkohlelieferungen könnten durch Lieferverträge gesichert werden.

Kooperation mit Kompostierern und Marktpotenzial: Kooperationen mit lokalen Kompostierern zur Terra Preta Produktion könnten die Kreislaufwirtschaft stärken. Steigende Nachfrage nach CO₂-Zertifikaten eröffnet neue Marktchancen im LDK.

Tab. 2: Anlagentechnik und Verfahrensarten (eigene Darstellung)

Anlage von	Input Material	Geschäftsmodell	Geeignet für den LDK
Carbon Technik Schuster	Holzige Biomasse mit geringem Feinanteil	Zusammenarbeit direkt mit Landwirten bevorzugt	
BIOMACON	Holzige Biomasse geringem Feinanteil (v.a. ligninhaltig)	Absatz von Biokohle und Nebenprodukten muss selbst übernommen werden	
Carbonauten	Material ist variabel sowie hohe Toleranz ggü. Störstoffen (Metalle,...) Minimum Kapazität: 20.000 t / Umkreis maximal 70 km	Flexibel: Übernehmen die Investition, den Betrieb und den Absatz zu 100% oder anteilig.	
Carbon Twister	Grünschnitt Restfeuchte max. 20% und Toleranz für bestimmte Störstoffe (Steine und Sand)	Keine Angabe	
Pyreg	Holzige Biomasse mit geringem Feinanteil	Absatz von Biokohle und Nebenprodukten muss selbst übernommen werden	
Circular Carbon	Aktuell Kakaoschalen Grünschnitt theoretisch möglich	Absatz von Biokohle wird übergangsweise übernommen. Produktion von Terra Preta möglich.	

4.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die untersuchten Pyrolyseverfahren weisen unterschiedliche Stärken und Schwächen auf, insbesondere in Bezug auf die vorgegebenen Materialanforderungen, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit. Während einige Anlagen wie Carbonauten und Carbon Twister durch ihre hohe Toleranz gegenüber heterogenem Grünschnitt und Störstoffen für die Bedingungen im LDK besonders geeignet sind, stellen andere Anlagen (z. B. BIOMACON und Pyreg) höhere Anforderungen an die Homogenität und Qualität des Eingangsmaterials. Solche Materialien sind im LDK möglicherweise nicht in ausreichender Menge verfügbar, was ihre Nutzung einschränken könnte.

Die Evaluierung zeigt, dass die Verwertbarkeit des heterogenen Grünschnittmaterials im LDK stark von der Materialtoleranz und Flexibilität der Verfahren abhängt. Anlagen mit einer höheren Verarbeitungstoleranz, wie Carbonauten und Carbon Twister, bieten das größte Potenzial, um die wirtschaftliche Verwertung zu sichern und eine effiziente Integration in die regionale Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen.

Darüber hinaus könnten Kombinationen von Pyrolyse und Kompostierung, wie sie bei der Pyreg-Anlage im Neckar-Odenwald-Kreis angewendet werden, eine praktikable Lösung für die Nutzung von Grünschnitt darstellen. Solche Synergien könnten nicht nur die Verwertungskapazitäten erhöhen, sondern auch zusätzliche Marktpotenziale erschließen. Eine gesicherte Materialversorgung und die Erschließung weiterer Biomassequellen sind dabei wesentliche Faktoren, um die Rentabilität und langfristige Umsetzung solcher Technologien im LDK sicherzustellen.

5. Verwertungsoptionen

Die nachfolgenden Abschnitte beleuchten die unterschiedlichen Nutzungspotenziale von Pyrolyseprodukten, sowie deren Qualitätsanforderungen und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, basierend auf Experteninterviews, wissenschaftlichen Studien und

praxisnahen Analysen. Ziel ist es, die Einsatzmöglichkeiten von Pflanzenkohle, Pyrolyseöl und Pyrolysegas im Kontext der regionalen Bedingungen des LDK darzustellen.

5.1. Pflanzenkohle in der Landwirtschaft

Potenziale und Verwertungsoptionen

Pflanzenkohle bietet erhebliche Vorteile für eine Vielzahl an landwirtschaftlichen Böden, darunter:

- **Verbesserte Wasser- und Nährstoffretention:**
- **Langfristige Kohlenstoffspeicherung:**
- **Bioaktivierung der Pflanzenkohle für spezifische Böden:**

Die Bioaktivierung wurde als besonders sinnvoll beschrieben, da sie sowohl die Bodenfruchtbarkeit als auch die Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen verbessert. Gleichzeitig bietet sie wirtschaftliche Vorteile, da gezielt Nährstoffverluste minimiert werden und die Pflanzenkohle effektiver eingesetzt werden kann.

5.2. Pflanzenkohle in der Bau- und Metallbranche

Integration in Beton und Metallherstellung

Pflanzenkohle bietet innovative Einsatzmöglichkeiten in der Bau- und Metallindustrie, die sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Vorteile mit sich bringen:

- **In der Bauindustrie**
 - **In der Metallverarbeitung**
-

5.3. Pyrolyseöl als Industrie-Rohstoff und Energieträger

Vielseitige Anwendungsmöglichkeiten

Pyrolyseöl ist ein vielseitiger und nachhaltiger Ersatz für fossile Brennstoffe, mit Einsatzmöglichkeiten in verschiedenen Industriebereichen:

- **Als Biokraftstoff**
 - **Rohstoff für die Chemieindustrie**
 - **Einsatz in regionalen Heizkraftwerken**
-

5.4. Pyrolysegas zur Energiegewinnung

Nutzungspotenziale

Pyrolysegas, ein wertvolles Nebenprodukt der Pyrolyse, ist vielseitig einsetzbar und bietet erhebliche Vorteile für die Energiegewinnung:

- **Effiziente Energiequelle:**
- **Flexibilität:**

Integration in Wärmenetze

Die Integration von Pyrolysegas in lokale Energie- und Wärmenetze bietet ein großes Potenzial, fossile Energieträger zu ersetzen und gleichzeitig die Dekarbonisierung zu fördern.

5.5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Pyrolyseprodukte wie Pflanzkohle, Pyrolyseöl und Pyrolysegas bieten vielseitige Anwendungsmöglichkeiten und Potenziale für Dekarbonisierung und Ressourcennutzung. Pflanzkohle verbessert die Bodenfruchtbarkeit, speichert CO₂ und eignet sich für Landwirtschaft, Bauindustrie und Metallverarbeitung. Pyrolyseöl kann fossile Rohstoffe in der Energiewirtschaft und Chemie ersetzen, während Pyrolysegas zur Energiegewinnung und Prozessoptimierung beiträgt.

Die wirtschaftliche Nutzung erfordert stabile Absatzmärkte, Förderprogramme (s. Kapitel 8.2.) und eine stärkere Integration in regionale Wertschöpfungsketten. Diese Ansätze fördern die Transformation hin zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft.

6. Regulatorische Anforderungen

Dieser Abschnitt beleuchtet die regulatorischen Rahmenbedingungen, die für die Errichtung von Pyrolyseanlagen und die Nutzung von Pflanzkohle gelten. Die Informationen basieren auf branchenspezifischen Normen, wissenschaftlichen Studien sowie praxisnahen Erkenntnissen aus Fachgesprächen und Dialogen mit Experten.

6.1. Anforderungen für die Errichtung von Pyrolyseanlagen

Die Errichtung von Pyrolyseanlagen unterliegt strengen regulatorischen Vorgaben, die die Emissionskontrolle, Sicherheitsstandards und Umweltverträglichkeit betreffen.

Für die Errichtung von Pyrolyseanlagen sollten die Emissionskontrollen und Sicherheitsstandards der Standortgemeinde berücksichtigt werden. Die Standortwahl (Bau- und BImSchG Genehmigung) und Umweltverträglichkeitsprüfung sind

entscheidend, um den Betrieb nachhaltig zu gestalten und Genehmigungsprozesse zu erleichtern. In der Regel ist aber mit langen Genehmigungsverfahren zu rechnen.

Die Standortwahl ist von zentraler Bedeutung und erfordert Bau- sowie immissionsschutzrechtliche Genehmigungen (BImSchG). Zusätzlich ist in vielen Fällen eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) erforderlich. Diese Prozesse können langwierig sein, beeinflussen jedoch maßgeblich die Nachhaltigkeit des Anlagenbetriebs.

Strenge Standards für Emissionsgrenzwerte und Sicherheitsvorkehrungen gewährleisten, dass die Anlagen umweltverträglich arbeiten und die Anforderungen der Standortgemeinde erfüllen.

6.2. Regulatorische Vorgaben für die Nutzung von Pflanzenkohle

Um eine nachhaltige Nutzung von Pflanzenkohle sicherzustellen, ist es entscheidend, ihre Anwendung so zu gestalten, dass weder ökologische Kreisläufe gestört, noch negative Umweltauswirkungen verursacht werden. Dies umfasst insbesondere die Schadstoffbindung und den Bodenschutz. Die EU-Düngeprodukteverordnung und die deutsche Düngemittelverordnung (DüMV) setzen verbindliche Standards für die Herstellung und Nutzung von Pflanzenkohle. Diese umfassen strenge Anforderungen an die Qualitätssicherung, Konformitätsbewertungen und die Einhaltung von Schadstoffgrenzwerten, um sowohl die Umwelt- als auch die Produktsicherheit zu gewährleisten.

Nach den Vorgaben der EU-Düngeprodukteverordnung (2019) darf Pflanzenkohle ausschließlich aus bestimmten Ausgangsstoffen wie land- und forstwirtschaftlicher Biomasse hergestellt werden. Materialien wie Klärschlämme, Industrieschlämme oder tierische Nebenprodukte sind ausdrücklich ausgeschlossen, um Schadstoffbelastungen zu vermeiden und die Umwelt zu schützen. Für die landwirtschaftliche Nutzung gelten zusätzliche Anforderungen: Pflanzenkohle muss einen Kohlenstoffanteil von mindestens 50 % aufweisen, was durch den European Biochar Certificate (EBC) -Standard überprüft wird. Dieser Standard dient als Maßstab für Qualität und Schadstofffreiheit und ergänzt die Regelungen der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV), sowie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG).

6.3. Zusammenfassung der Ergebnisse

Regulatorische Vorgaben und Qualitätsstandards sichern die Umweltverträglichkeit und Akzeptanz von Pyrolyseanlagen und Pflanzenkohle. Strenge Emissions- und Sicherheitsvorgaben sowie Genehmigungsverfahren wie Umweltverträglichkeitsprüfungen gewährleisten einen nachhaltigen Betrieb. Für die Nutzung von Pflanzenkohle setzen EU- und nationale Regelungen klare Grenzwerte und Anforderungen an Schadstofffreiheit und Materialqualität. Zertifizierungen, wie der EBC-Standard, fördern die Marktakzeptanz und gewährleisten die sichere Anwendung, insbesondere in der Landwirtschaft.

7. Qualitätsstandards und Zertifizierungen von Pyrolyseprodukten

Die Qualität der Pyrolyseprodukte, insbesondere der Pflanzenkohle, ist entscheidend für ihre Marktfähigkeit. Faktoren wie Kohlenstoffgehalt, Partikelgröße, Schadstofffreiheit und Feuchtigkeitsgehalt beeinflussen sowohl die Anwendbarkeit als auch den Preis.

7.1. Allgemeine technischen Anforderungen an Pflanzenkohle

Die wichtigsten technischen Anforderungen an Pflanzenkohle umfassen:

Tab.3 Allgemeine technische Parameter der Pflanzenkohle

Anforderung	Beschreibung
Kohlenstoffgehalt	Hoher Kohlenstoffanteil (> 80 %) für langfristige CO ₂ -Sequestrierung und Stabilität.
Aschegehalt	Niedriger Aschegehalt für Anwendungen in der Landwirtschaft, um mineralische Rückstände zu minimieren.
Schadstofffreiheit	Strenge Kontrolle auf Schwermetalle und organische Schadstoffe, um Umwelt- und Gesundheitsrisiken zu vermeiden.
pH-Wert und Porosität	Anpassung an spezifische Bodeneigenschaften und Verbesserung der Wasserhaltefähigkeit.
Partikelgröße	Variiert je nach Anwendung, z. B. fein für Filter oder grob für Bodenverbesserung.

Eine weitere Anzahl vielfältiger Anforderungen an die Pflanzenkohle zeigen die Komplexität auf und definieren zugleich ihre Eignung für verschiedene Anwendungen, um eine optimale Nutzung zu gewährleisten. Dabei spielen physikalische, chemische und logistische Kriterien eine zentrale Rolle.

7.2. Anpassung an Marktanforderungen

Die Anpassung von Pflanzenkohle an spezifische Marktanforderungen ist essenziell, um ihr Potenzial in der Landwirtschaft, Bauindustrie und für Energieanwendungen auszuschöpfen. Hochwertige Pflanzenkohle mit Kohlenstoffgehalten von über 80 % eignet sich besonders für landwirtschaftliche und industrielle Anwendungen, während minderwertigere Pflanzenkohle effizient in der Energiegewinnung eingesetzt werden kann.

Die Bedeutung eines angepassten Qualitätsmanagements sowie die wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile von Pyrolyseprodukten werden in Kapitel 9 detailliert beschrieben.

Dort werden auch innovative Geschäftsmodelle und Fördermöglichkeiten diskutiert, die zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit beitragen können.

7.3. Zertifizierungen von Pflanzenkohle

Um den Marktzugang zu sichern und regulatorische Anforderungen zu erfüllen, ist die Zertifizierung von Pflanzenkohle für spezifische Anwendungen essenziell. Besonders in der Landwirtschaft und der Betonindustrie sind Zertifizierungen wichtig, da sie die Einhaltung gesetzlicher Standards und Qualitätsanforderungen sicherstellen. Diese regulatorischen Vorgaben, wie die in Kapitel 6 beschriebenen Anforderungen der EU-Düngeprodukteverordnung und der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV), bilden die Grundlage für alle Zertifizierungsprozesse.

Die Marktteilnehmer sollten die notwendigen Zertifizierungen für jede Anwendung prüfen, um Pflanzenkohle in verschiedenen Märkten breit vermarkten zu können. Im Rahmen von Gesprächen mit Branchenexperten wurde deutlich, dass die Zertifizierungsanforderungen hoch sind und insbesondere für neue Hersteller eine Herausforderung darstellen können. Wie in Kapitel 6.2 hervorgehoben, ist die Einhaltung von Schadstoffgrenzwerten ein zentraler Bestandteil dieser Anforderungen. Eine klare Zertifizierungsstrategie kann jedoch das Marktwachstum fördern und die Akzeptanz von Pflanzenkohle als Baustoff und Bodenverbesserer stärken.

7.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Regulatorische Anforderungen und Qualitätsstandards bilden die Grundlage für die nachhaltige Nutzung von Pflanzenkohle und den Betrieb von Pyrolyseanlagen. Die Einhaltung dieser Vorgaben gewährleistet Umweltverträglichkeit, Produktsicherheit und Marktakzeptanz, während gezielte Förderung und klare Zertifizierungsstrategien helfen, wirtschaftliche Barrieren zu überwinden und die Potenziale von Pflanzenkohle voll auszuschöpfen. Dabei wird die Kostenstruktur von Pflanzenkohle maßgeblich durch die Qualität des Ausgangsmaterials sowie die Einhaltung strenger Qualitätsstandards und Zertifizierungsprozesse geprägt: Hochwertige Pflanzenkohle aus holziger Biomasse erzielt höhere Preise, während Mischmaterialien eine günstigere, jedoch auf spezifische Anwendungen beschränkte Alternative darstellen.

8. Zertifikate, Handel und Investitionshilfen

Dieses Kapitel untersucht die ökonomischen Möglichkeiten der CO₂-Bindung durch Pflanzenkohle und Pyrolyseprodukte sowie deren Potenziale in verschiedenen Märkten. Neben der langfristigen Kohlenstoffbindung im Boden wird gezeigt, wie Zertifikate, innovative Anwendungen und Marktentwicklungen die Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz der Technologie fördern können.

8.1. CO₂-Zertifikate im Zertifikate Handel

CO₂-Zertifikate sind handelbare Einheiten, die für die Einsparung oder Bindung von CO₂ ausgestellt werden. Regulierungsbehörden legen im Rahmen des Cap-and-Trade-Systems

eine Obergrenze (Cap) für Emissionen fest, während Unternehmen überschüssige Zertifikate handeln (Trade). Dieses System bietet Unternehmen Flexibilität, ihre Emissionen zu reduzieren oder Zertifikate zu erwerben (Ellerman et al., 2010; Tietenberg, 2006).

Im Zusammenhang mit Pflanzkohle funktioniert der Zertifikate Handel indem er auf der Bindung von CO₂ anstatt der Vermeidung von Emissionen beruht. Pflanzkohle speichert Kohlenstoff dauerhaft, und diese Bindung wird als CO₂-Einsparung zertifiziert. Unternehmen oder Projekte, die Pflanzkohle herstellen und einsetzen, können Zertifikate für die gebundene CO₂-Menge erhalten. Diese Zertifikate können auf dem Markt verkauft werden, wodurch wirtschaftliche Anreize für die Produktion und Nutzung von Pflanzkohle entstehen. Käufer, meist Unternehmen mit hohen Emissionen, nutzen die Zertifikate, um ihre CO₂-Bilanz auszugleichen und gesetzliche Vorgaben zu erfüllen.

8.2. Regionale Förderprogramme und Investitionshilfen

Die erfolgreiche Implementierung und Marktentwicklung von Pyrolyseprojekten im LDK hängt nicht nur von technologischen Fortschritten und Marktmechanismen wie CO₂-Zertifikaten ab, sondern auch von passenden Förderprogrammen, die Investitionen erleichtern und Innovationen fördern. Förderprogramme auf regionaler und nationaler Ebene bieten finanzielle Unterstützung für Projekte in der Kreislaufwirtschaft und können dabei helfen, Technologien wie die Pyrolyse erfolgreich umzusetzen.

8.3. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Integration von CO₂-Zertifikaten und die Nutzung regionaler Förderprogramme sind essenziell, um die Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz von Pflanzkohleprojekten zu erhöhen. Zertifizierungsmechanismen gewährleisten, dass die Vorteile der Technologie – von der langfristigen Kohlenstoffbindung bis zur Ressourceneffizienz – transparent und glaubwürdig dargestellt werden können. Dies stärkt die Wettbewerbsfähigkeit nachhaltiger Technologien wie der Pyrolyse sowohl auf regulierten als auch auf freien Märkten.

9. Wirtschaftlichkeitsanalyse und Handlungsempfehlungen

Dieses Kapitel untersucht die Wirtschaftlichkeit einer Pyrolyseanlage im LDK und gibt Empfehlungen zur Förderung von Marktintegration, regionaler Verwertung und nachhaltiger Nutzung von Pflanzkohle. Es umfasst die Analyse von Verwertungspfaden, Szenarien und Fördermöglichkeiten, sowie gesellschaftliche und politische Rahmenbedingungen.

9.1. Grundlagen der Marktintegration und Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse untersucht vier Nutzungspfade für die Verwertung von Pflanzenkohle und anderer Pyrolyseprodukte unter Berücksichtigung regionaler Rahmenbedingungen. Die Verwertungspfade beschreiben dabei die verschiedenen strategischen Nutzungswege der Produkte, wie etwa ihre Anwendung als Bodenverbesserer, ihre thermische Verwertung zur Energiegewinnung oder ihre Nutzung als zertifiziertes CO₂-Senkenprodukt. Die Pfade zeigen die grundlegenden Möglichkeiten auf, wie Pflanzenkohle und Pyrolyseprodukte am Markt eingesetzt werden können.

Darüber hinaus können unterschiedliche Szenarien aufgrund des Materialflusses analysiert werden, welche die Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren für die Umsetzung dieser Verwertungspfade abbilden. Szenarien sollten beispielsweise heterogene Inputmaterialien, regionale Nachfrage, gesetzliche Vorgaben, Marktpreise für CO₂-Zertifikate oder die Qualität und Verfügbarkeit des Ausgangsmaterials berücksichtigen. Sie sollen dazu dienen, die Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit der Verwertungspfade unter verschiedenen Bedingungen zu bewerten. Wir weisen explizit darauf hin, dass die Eingetragenen Werte der Materialflussanalyse nur Annahmen sind, die sich möglicherweise aufgrund der verfügbaren 6500 Tonnen Grünschnitt ergeben könnten.

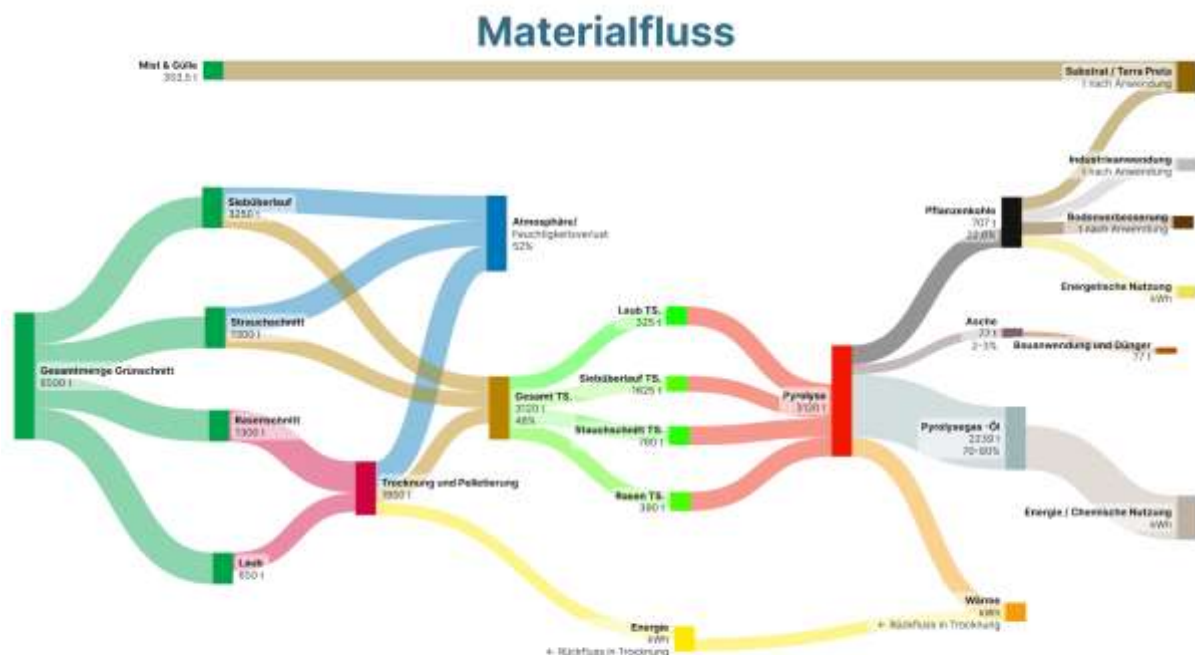


Abb.1: Materialfluss und Nutzungspfade bei der Verwertung von Grünschnitt (eigene Darstellung)

9.2. Verwertungspfade und Szenarien zur Wirtschaftlichkeit der Pflanzenkohleproduktion

Diese Potenzialanalyse identifiziert vier Haupthandlungspfade im Rahmen des Materialflusses für die Verwertung von Pflanzenkohle aus Grünschnitt, die sich an den unterschiedlichen regionalen Anforderungen und Marktbedingungen orientieren sowie die Nutzung der bei der Pyrolyse entstehenden Abwärme berücksichtigen.

Pfad 1: Produktion hochwertiger Pflanzenkohle für die Kunststoff- und Bauindustrie. In diesem Szenario wird hochwertige Pflanzenkohle für den Einsatz in der Kunststoff- und Bauindustrie produziert, die eine hohe Zahlungsbereitschaft für kohlenstoffbindende Materialien zeigt. Hohe Materialqualität und CO₂-Zertifikate steigern die Rentabilität, da die langfristige Kohlenstoffbindung der Pflanzenkohle für diese Industrien besonders attraktiv ist. Dieser Pfad eignet sich jedoch nur bedingt für kommunale Abfälle, da er reines, homogenes Ausgangsmaterial erfordert.

Die bei der Pyrolyse entstehende Abwärme könnte in diesem Szenario zur Trocknung des Ausgangsmaterials genutzt werden, um die Effizienz des Prozesses zu steigern und die Produktionskosten zu senken. Die Integration von Abwärme in industrielle Anwendungen, beispielsweise für die Beheizung von Produktionsstätten oder als Prozesswärme in nahegelegenen Betrieben, könnte die Wirtschaftlichkeit des Pfads weiter erhöhen. Diese Kopplung minimiert Energieverluste und verbessert die CO₂-Bilanz des gesamten Prozesses.

Pfad 2: Biokohle zur Bodenverbesserung.

Der Einsatz von Biokohle zur Bodenverbesserung bietet eine gute Balance zwischen Materialqualität und Wirtschaftlichkeit. Besonders geeignet ist eine schwermetallfreie Mischung aus holzigen und feinen Grünschnittanteilen. Die Landwirtschaft profitiert von der Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und CO₂-Zertifikate unterstützen die Rentabilität zusätzlich. Dieser Pfad eignet sich besonders für die Herstellung von Terra Preta.

Die Abwärme aus der Pyrolyse kann für die Bewässerungssysteme oder die Beheizung von Gewächshäusern in landwirtschaftlichen Betrieben genutzt werden. Alternativ ist die Versorgung von Nahwärmenetzen in der Region eine Option. Der Verkauf der Pflanzenkohle an landwirtschaftliche Betriebe in Kombination mit der Bereitstellung von Abwärme erhöht die Attraktivität für Landwirte und verbessert die Wirtschaftlichkeit des Pfads, da zusätzliche Einnahmen durch die Energienutzung generiert werden können.

Pfad 3: Kombination von Pyrolyse und Kompostierung zur Terra Preta-Produktion. Die Kombination von Pyrolyse und Kompostierung ermöglicht die Herstellung von Terra Preta und eignet sich für lokal verfügbares, feinkörniges Material, das in anderen Verwertungspfaden oft weniger gut einsetzbar ist. Die Absatzmärkte für Terra Preta liegen primär bei ökologisch orientierten Landwirtschafts- und Gartenbaubetrieben, wodurch regionale Märkte erschlossen und Transportkosten minimiert werden. Die Rentabilität dieses Pfads ist jedoch stark von regionalen Abnehmern und den Marktpreisen für Terra Preta-Produkte abhängig. Die Kombination von Pyrolyse und Kompostierung schafft

Synergieeffekte, die die Nährstoffbindung und Wasserhaltekapazität in Kompostprodukten verbessern. Diese Integration stärkt lokale Kreislaufwirtschaftsstrategien, da die Pflanzenkohle so auch in der Tierhaltung oder als Bodenverbesserer genutzt werden kann (GiLand, 2023; Ithaka Institute, 2022). Die Möglichkeit, Pflanzenkohle sowohl in der Landwirtschaft als auch in ökologischen Gartenbauprojekten anzuwenden, eröffnet zusätzliche Absatzmärkte und unterstützt die Kreislaufwirtschaft durch den Ersatz fossiler Ressourcen.

Die Abwärme könnte zur Beschleunigung des Kompostierungsprozesses genutzt werden, indem sie die Temperatur der Kompostmieten erhöht. Dies verbessert die Effizienz und Qualität des Komposts, der als Basis für Terra Preta dient. Die lokale Nutzung der Abwärme innerhalb der Kompostierungsprozesse minimiert Transport- und Energiekosten und fördert die regionale Kreislaufwirtschaft. Die Kombination von Pflanzenkohleproduktion und Kompostierung maximiert die Nutzung des Materials und reduziert Abfälle, was die Wirtschaftlichkeit des Pfads stärkt.

Pfad 4: Energetische Nutzung minderwertiger Materialien zur Wärmeengewinnung. Für Material niedriger Qualität und mit Störstoffen ist die energetische Nutzung die wirtschaftlich beste Option. Durch die Nutzung der Abwärme kann ein Mehrwert geschaffen werden, insbesondere in der Industrie und in Nahwärmenetzen. Die Möglichkeiten zur CO₂-Zertifizierung sind in diesem Pfad jedoch eingeschränkt, wodurch die Wirtschaftlichkeit hauptsächlich von der lokalen Nachfrage nach Energie abhängt.

Dieser Pfad fokussiert direkt auf die Nutzung minderwertiger Biomasse zur Energiegewinnung. Die entstehende Wärme könnte in regionale Nahwärmenetze eingespeist oder für industrielle Prozesse in der Nähe genutzt werden. Die energetische Nutzung bietet eine kostengünstige und umweltfreundliche Alternative zur Deponierung oder thermischen Verwertung in größeren Anlagen. Die Integration in bestehende Nahwärmestrukturen oder industrielle Wärmebedarfe reduziert die Betriebskosten und stärkt die Akzeptanz in der Region. Auch wenn die Möglichkeiten zur CO₂-Zertifizierung begrenzt sind, kann die Abwärmenutzung wirtschaftliche Vorteile schaffen.

Die Analyse der Verwertungspfade zeigt, dass ihre Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit entscheidend von der Qualität und Verfügbarkeit des Grünschnitts als Inputmaterial sowie den spezifischen regionalen Marktanforderungen abhängt. Eine wirtschaftlich rentable Verwertung der im LDK produzierten Pflanzenkohle setzt daher eine gezielte Materialsortierung und Verarbeitung voraus, um die Anforderungen der verschiedenen Verwertungspfade optimal zu erfüllen.

9.3. Förderung und regionale Synergien

Die Analyse der Rentabilität und der beeinflussenden Faktoren legt den Grundstein, um über weitere entscheidende Aspekte nachzudenken, wie die Förderung regionaler Absatzmärkte, die Nutzung von Synergien und die Entwicklung flexibler Verwertungslösungen, die für den langfristigen Erfolg von Pflanzenkohleprojekten im LDK notwendig sind.

9.4. Kooperationen und gesellschaftliche Faktoren

Für die erfolgreiche Implementierung eines Pyrolyseprojekts im LDK ist eine enge Zusammenarbeit mit verschiedenen regionalen Akteuren erforderlich. Dies ist besonders wichtig, da bei der Realisierung der Pyrolyseanlage mit technischen Herausforderungen und langwierigen Genehmigungsverfahren zu rechnen ist.

9.5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse und Handlungsempfehlungen zeigen die Potenziale einer Pyrolyseanlage im LDK auf und liefern konkrete Ansätze zur Marktintegration von Pflanzenkohle. Vier Verwertungspfade – von hochwertigen Industrieanwendungen über Bodenverbesserung und Terra Preta-Produktion bis zur energetischen Nutzung minderwertiger Materialien – verdeutlichen die vielfältigen Möglichkeiten der Nutzung. Entscheidend sind hohe Qualitätsstandards, effiziente Abwärmenutzung und die Einbindung von CO₂-Zertifikaten, um wirtschaftliche und ökologische Vorteile zu maximieren. Durch gezielte Förderung, regionale Kooperationen und flexible Verwertungskonzepte können gesellschaftliche und regulatorische Hürden überwunden werden. Dies schafft die Grundlage für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft und eine langfristige wirtschaftliche Tragfähigkeit.

10. Fazit und Ausblick: Chancen und Perspektiven der Pyrolyse im Lahn-Dill-Kreis

Die Pyrolysetechnologie stellt für den LDK eine innovative Möglichkeit dar, ökologische und wirtschaftliche Vorteile zu vereinen und eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu fördern. Diese Analyse richtet sich an kommunale Entscheidungsträger, regionale Wirtschaftspartner, Förderinstitutionen und die lokale Gemeinschaft, die jeweils eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung spielen können. Während kommunale Entscheidungsträger und Wirtschaftspartner die strategischen und wirtschaftlichen Grundlagen legen, sind Förderinstitutionen für finanzielle Unterstützung entscheidend. Gleichzeitig ist die Akzeptanz durch die lokale Gemeinschaft ein wichtiger Erfolgsfaktor. Die Potenzialanalyse zeigt, dass eine optimierte Verwertung von Grünschnitt und anderen Biomassen entlang der identifizierten Verwertungspfade dazu beitragen kann, CO₂-Emissionen erheblich zu reduzieren und regionale Märkte zu stärken. Herausforderungen wie Preissensibilität, Materialqualität und Produktverfügbarkeit müssen dabei gezielt adressiert werden, um Investitionen zu sichern und die Wirtschaftlichkeit langfristig und weiter zu steigern.

10.1. Perspektiven für weiterführende Untersuchungen und Projekte

Die erfolgreiche Umsetzung der Pyrolysetechnologie im LDK erfordert eine gezielte Unterstützung durch strategische Maßnahmen regionaler Akteure, wissenschaftlicher Einrichtungen und Marktexperten. Ein zentraler Ansatzpunkt ist die Modellierung der genannten Nutzungspfade, bei der gezielte Szenarien zur Biomassenutzung entwickelt

werden. Diese Szenarien berücksichtigen Materialqualitäten, Marktbedingungen und Fördermöglichkeiten, um eine präzise Einschätzung der ökologischen und wirtschaftlichen Potenziale der Technologie zu ermöglichen. Der wirtschaftliche Nutzen liegt dabei in der regionalen Wertschöpfung durch neue Arbeitsplätze, der Kostenreduktion bei der Abfallentsorgung, der Steigerung landwirtschaftlicher Erträge, sowie der Bereitstellung nachhaltiger Rohstoffe für die Bau- und Energieindustrie.

Um diese Potenziale jedoch voll ausschöpfen zu können, ist eine umfassende Messung der Umweltwirkungen unerlässlich. Dazu zählen insbesondere ein Life Cycle Assessment (LCA) und der Carbon Footprint, welche fundierte Einblicke in die ökologischen Vorteile und potenziellen Herausforderungen der Pyrolysetechnologie liefern. Die LCA ermöglicht eine ganzheitliche Analyse der ökologischen Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg, während der Carbon Footprint die Klimawirkung durch Treibhausgasemissionen quantifiziert. Nur durch diese präzisen Messungen können die Vorteile der CO₂-Speicherung, Ressourcenschonung und Reduktion fossiler Energieträger wissenschaftlich fundiert nachgewiesen werden. Sie bilden die Basis, um die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit der Projekte zu bewerten, Fördermittel zu sichern und Akzeptanz bei der Öffentlichkeit zu schaffen.

Pilotprojekte und Langzeitstudien, finanziert durch Fördermittel von Bund, Land und EU, sowie auch private Investitionen, sind essenziell, um die technische Umsetzbarkeit und Marktchancen von Pflanzkohle zu demonstrieren. Pilotanlagen und landwirtschaftliche Testparzellen können weitere wertvolle Erkenntnisse über die Auswirkungen auf Bodenqualität, landwirtschaftliche Erträge und Klimabilanzen liefern, die für expansive fundierte Entscheidungen notwendig sind.

Ein weiterer Schritt ist eine umfassende Marktanalyse, die von Marktexperten und Wirtschaftsverbänden durchgeführt werden sollte. Sie legt den Grundstein für die Identifikation von Absatzmärkten in der Landwirtschaft, Bauindustrie und Energieversorgung. Dadurch können gezielte Vermarktungsstrategien entwickelt werden, um die Technologie erfolgreich in der Region zu implementieren und langfristig zu verankern. Der gesellschaftliche Nutzen zeigt sich in der verbesserten Bodenqualität, der CO₂-Sequestrierung und einer regionalen Energieversorgung. Politisch trägt die Technologie zur Erreichung von Klimazielen und zur Stärkung der ländlichen Infrastruktur bei.

Eine nachhaltige Umsetzung könnte in einem zeitlichen Rahmen von 1-2 Jahren mit weiteren Machbarkeitsstudien und Pilotprojekten beginnen, über 3-5 Jahre den Ausbau der Infrastruktur vorantreiben und langfristig die vollständige Integration in die regionale Kreislaufwirtschaft sichern.

10.2. Schlussfolgerung

Die Pyrolyse bietet dem LDK die Chance, ökologische und wirtschaftliche Ziele zu vereinen und eine zukunftsorientierte Kreislaufwirtschaft zu etablieren. Sie wandelt biogene Abfälle in Pflanzkohle um, die als langfristige Kohlenstoffsänke dient, und reduziert durch die Vermeidung von Methan- und Lachgasemissionen sowie die Nutzung von Nebenprodukten, wie Pyrolyseöl und -gas, effektiv Treibhausgase.

Um diese Vorteile nachhaltig zu nutzen, sind Pilotprojekte, wissenschaftliche Modellierungen und politische Unterstützung essenziell. Gleichzeitig bedarf die Technologie einer sorgfältigen Prozesssteuerung, gezielter Materialsortierung und Qualitätskontrolle, um Emissionen zu minimieren und Schadstoffbelastungen zu vermeiden. Die Ergebnisse dieser Studie bieten eine solide Grundlage, um unter Berücksichtigung aller Faktoren die Pyrolyse als Schlüsseltechnologie für Klimaschutz und Ressourceneffizienz zu etablieren.

Literaturverzeichnis

Bücher und wissenschaftliche Artikel

- Bernal, M.P., Albuquerque, J.A. & Moral, R. (2009) 'Composting of organic wastes: A microbial perspective', *Bioresource Technology*, 100(22), pp. 5005–5013. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.018> (Zugriff am: [05.12.2024]).
- Budai, A., Rasse, D.P., Lagomarsino, A., Lerch, T.Z. und Kuikman, P.J. (2012) *Biochar Carbon Stability Test Method: An Assessment of Methods to Determine Biochar Carbon Stability*. Joint Research Centre of the European Commission. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.2788/61044> (Zugriff am: [05.12.2024]).
- Ellerman, A.D., Joskow, P.L. & Harrison, D. Jr. (2010). *Markets for Clean Air: The U.S. Acid Rain Program*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018) *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Genf: IPCC. Verfügbar unter: <https://www.ipcc.ch/sr15/> (Zugriff am: [04.12.2024]).
- Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C. und Crowley, D. (2011) 'Biochar effects on soil biota – A review', *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), S. 1812–1836. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022> (Zugriff am: [05.12.2024]).
- Schmidt, H.P., Pandit, B.H., Martinsen, V., Cornelissen, G. & Conte, P. (2019). Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy*, 11(1), 142–149.
- Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E. und Bol, R. (2010) 'A review of biochar and its use and function in soil', *Advances in Agronomy*, 105, pp. 47–82. Verfügbar unter: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9) (Zugriff am: [05.12.2024]).
- Tietenberg, T.H. (2006) *Emissions Trading: Principles and Practice*. 2nd edn. Washington, DC: Resources for the Future Press.
- United Nations Environment Programme (2024) *Emissions Gap Report 2024: No more hot air please*. Nairobi: UNEP. Verfügbar unter: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report> (Zugriff am: [05.12.2024]).

Projektberichte und Präsentationen

- LEADER-Region GießenerLand e.V. (2018) 'Mittelhessisches Schnittgutmanagement', Poster, verfügbar unter: <https://giessenerland.de/wp-content/uploads/2021/08/GiLand-Poster-Heckenprojekt.pdf> (Zugriff am: [Datum des Zugriffs]).
- Grafmüller, T. (2021). Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft: Pflanzenkohle als CO₂-Senke. *Agrarforschung*.
- Ithaka Institute. (2022). *Carbon-Sink Certification and Long-Term Carbon Binding*.

- Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH (2008) *Biomasse-Forum 2008*. November. © Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH.

Technische Richtlinien

- European Biochar Certificate (EBC). (2022). *Guidelines for a sustainable production of biochar*. Verfügbar unter: <https://european-biochar.org>.

Ressourcenmanagement

- Bridgwater, A.V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94.
- Schmidt, H.P., Kammann, C., Niggli, C., Bucheli, T., Leifeld, J. & Abiven, S. (2019). Biochar in agriculture – Perspectives for Germany and Europe. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 23-33.

Podcasts

- BioBall-Podcast. (2023, 4. Juli). Die Rolle der Kreislaufwirtschaft und die Nutzung biogener Abfallstoffe: Interview mit Dr. Christian Hey [Audio-Podcast]. Podigee. Verfügbar unter: <https://bioball.podigee.io>.
- Anzim. (International). Podcast.
- Stefanie Hauer. (National). Podcast.

Weitere anonyme persönliche Kommunikation

Kommunikation mit Personen folgender Institutionen

Industrie - Pyrolyseanbieter
 Industrie - Pyrolyseanbieter
 Industrie - Pyrolyseanbieter
 Industrie - Pyrolyseanbieter
 Industrie - Pyrolyseanbieter
 Industrie - Metallverarbeitung
 Industrie - Kalk/Zement
 Industrie Zement
 Industrie - Haushaltsprodukte
 Industrie - Beton
 Industrie Beton Additiv
 Industrie - Zement
 Abfallgesellschaft
 Abfallwirtschaft
 Wissenschaft
 Wissenschaft

Regionalität

National
 National
 International
 International
 National
 Regional
 International
 Regional
 Regional
 National
 National
 Regional
 Regional
 Regional
 National
 International

Wissenschaft	Regional
Verbände	Hessen
LEADER Region	Regional
Energieversorger	National
Weinbau	Regional
Landwirtschaft	Hessen
Landwirtschaft	Regional
Landwirtschaft	Regional
Podcast	National
Poscast	National

Diese Vergleichsstudie enthält ausschließlich generelle Informationen. Über die Richtigkeit oder Vollständigkeit der Informationen dieser Studie werden keine Aussagen, Garantien oder Zusicherungen gemacht. Die Autoren noch Up-Preneurs haften oder sind verantwortlich für Verluste oder Schäden jeglicher Art, die direkt oder indirekt im Zusammenhang mit Personen entstehen, die sich auf diese Veröffentlichung verlassen. Deswegen ist diese nicht geeignet, um geschäftliche oder finanzielle Entscheidungen zu treffen oder Handlungen vorzunehmen. Hierzu sollten noch weitere Informationen hinzugezogen werden oder ein Berater konsultiert werden.

Stand: November, 2024