

Quantifizierung des (Rest-)Biomassepotentials in Nordhessen und Ermittlung geeigneter Biomassen für die regionale Erzeugung hochwertiger Pflanzen- und Aktivkohlen als Einstreuzusatz in der Geflügelhaltung

Kurzstudie im Rahmen des Innovationsvorhabens "Residue Biomass to (Activated) Carbon: Prevent Foot Pad Lesions in Poultry Husbandry (CAREFUL; OG Pflanzenkohle als Geflügeleinstreu)" nach Teil II Abschnitt A Europäische Innovationspartnerschaft „Landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit – EIP-Agri“



Universität Kassel
Fachgebiet Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe (GNR),
Kompetenzzentrum für Klimaschutz und Klimaanpassung (CliMA)

Gefördert durch



UNI KASSEL
VERSITÄT
eip-agri
CAREFUL

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	iv
Einleitung	1
Material und Methoden	3
Untersuchungsregion Regierungsbezirk Kassel	3
Ergebnisse und Diskussion	4
Technisches Potenzial von (Rest)Biomassen Nordhessens	4
Produkte aus der Forstwirtschaft.....	4
Primäre Restbiomassen aus Wäldern.....	5
Primärproduktion von lignozellulosehaltigen Biomasse-Pflanzen	7
Landwirtschaftliche Restbiomassen	8
Straßenbegleitgrün	9
Sekundäre Reststoffe aus der Holzindustrie	10
Sekundäre Reststoffe der Industrie, die landwirtschaftliche Produkte verwenden	12
Kommunale biologisch abbaubare Abfälle	13
Alt- und Gebrauchtholz (Nachverbraucherholz)	14
Eignung der Biomassen für die Herstellung von Pflanzenkohle	15
Pflanzenkohle in der Tierhaltung	16
Literatur.....	21
Abbildungsquellen.....	25

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Karte des Regierungsbezirks Kassel als Untersuchungsregion mit Angaben zur Fläche und Bevölkerungsdichte in 2019 der Landkreise und Städte (HMUKLV, 2021).....	3
Abbildung 2 Landschaften im Nordwest-Hessischen Bergland (links), Nordost-Hessischen Bergland (Mitte) und Weserbergland (rechts).....	4
Abbildung 3 Primäre Restbiomassen aus der Forstwirtschaft und ihre Verwendung als Holzhackschnitzel (links), Pellet (Mitte) und Rindenmulch (rechts).....	6
Abbildung 4 Methode der Hackschnitzelernte integriert in die Holzrohstofferte, welche in Schweden und Finnland praktiziert wird. Quelle: Alakangas, VTT; modifiziert.....	6
Abbildung 5 Blühender (links) und abreifender Bestand (rechts) von <i>Miscanthus</i>	7
Abbildung 6 Getreidestroh (links), Rapsstroh (Mitte) und Maisstroh (rechts) welche als häufige Landwirtschaftliche Restbiomassen im Regierungsbezirk Kassel anfallen.....	8
Abbildung 7 Straßenbegleitgrün aus der Landschaftspflege als regionale Restbiomasse mit großem Potenzial für die Herstellung von Pflanzen(aktiv-)kohlen.....	9
Abbildung 8 Holzspäne (links) und Holzmehl (Mitte) als relevante sekundäre Reststoffe aus der Holzindustrie sowie Schwarzlauge (rechts) aus der Zellstoff- und Papierindustrie im Regierungsbezirk Kassel.	12
Abbildung 9 Pflanzenkohle aus Getreidespelzen als Einstreuzusatz in der Tierhaltung.....	17
Abbildung 10 Auswirkungen der topischen Anwendung von Pflanzenkohle (Biochar) und Aktivkohle (Activated carbon) auf THG-Emissionen aus Feuchtmist. Quelle: [45]	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Wald- und Wuchsgebiete Hessens, welche zum Teil gesamtflächig in der Untersuchungsregion Nordhessen liegen, mit Angaben zur Fläche, Bewaldung, dem Vorrat und Zuwachs sowie deren Zusammensetzung. Quelle: [6]	4
Tabelle 2 Geschätztes technisches Biomassepotential von Produkten aus der Forstwirtschaft Nordhessens im Jahr 2020 und 2030, Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).	4
Tabelle 3 Geschätztes technisches Restbiomassepotential von Produkten aus der Forstwirtschaft (Waldrestholz) Nordhessens im Jahr 2020 und 2030, Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).	5
Tabelle 4 Geschätztes technisches Restbiomassepotential von Baumstümpfen als forstwirtschaftliches Produkt (Waldrestholz) in Nordhessen im Jahr 2020 und 2030, Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).	5
Tabelle 5 Geschätztes technisches Biomassepotential von <i>Miscanthus x giganteus</i> in Nordhessen im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).	7
Tabelle 6 Geschätztes technisches Biomassepotential ausgewählter landwirtschaftlicher Restbiomassen im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).	8
Tabelle 7 Geschätztes technisches Restbiomassepotential von Straßenbegleitgrün im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).	10
Tabelle 8 Geschätztes technisches Potenzial von Restbiomassen aus Sägewerken im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).	11
Tabelle 9 Geschätztes technisches Potenzial von weiteren z.T. holzigen Restbiomassen aus der Holzverarbeitenden Industrie sowie aus der Zellstoff- und Papierindustrie im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).	11
Tabelle 10 Geschätztes technisches Potenzial von Getreidekleie im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).	13
Tabelle 11 Geschätztes technisches Potenzial von biologisch abbaubaren kommunalen Abfällen im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).	14
Tabelle 12 Geschätztes technisches Potenzial von Alt- und Gebrauchtholz im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).	15

Einleitung

Es wird erwartet, dass Restbiomassen, wie pflanzliche und forstwirtschaftliche Rückstände sowie kommunale und landwirtschaftliche Bioabfälle, eine wichtige Rolle bei der Bereitstellung von Rohstoffen für nachhaltige Bioökonomiepfade spielen werden. Restbiomassen können auch in Produktionsprozessen generiert werden. Beispielsweise sind Sonnenblumenkernschalen ein Rückstand aus der Speiseölindustrie mit Tausenden von Tonnen pro Jahr. Es ist derzeit eine gängige Praxis, die Restbiomassen aus Produktionsprozessen für die Energieerzeugung zu verbrennen, was jedoch mehrere Umweltprobleme verursacht. Aus diesem Grund gibt es ein wachsendes Interesse an der Verwendung dieser Restbiomassen als Ausgangsmaterial für die Gewinnung von Produkten mit hohem Mehrwert (value added products; VAP). Es gibt verschiedene Technologien, die in drei Kategorien eingeteilt werden können: thermochemisch, physikochemisch und biochemisch. Thermochemische Waste-to-Energy (WTE)-Technologien zeichnen sich dadurch aus, dass sie hohe bis sehr hohe Temperaturen verwenden, um Abfall in Energie oder einen VAP umzuwandeln [1]. Mehrere thermochemische Prozesse können für die Umwandlung von Biomasse als Ausgangsmaterial genutzt werden, wie die Pyrolyse zur Herstellung von Pflanzen- und Pflanzenaktivkohle.

Die Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle ist in den letzten 10 Jahren immer populärer geworden. Sie hat ähnliche Eigenschaften wie Holzkohle und Aktivkohle: Sie alle sind pyrogene kohlenstoffhaltige Stoffe, die aus organischen kohlenstoffreichen Materialien stammen und durch Pyrolyse hergestellt werden. Die Eigenschaften von Pflanzenkohle werden von mehreren technologischen Parametern beeinflusst, vor allem von der Pyrolysetemperatur und der Art des Ausgangsmaterials, deren Differenzierung zu Produkten mit einer großen Bandbreite an Werten von pH-Wert, spezifischer Oberfläche, Porenvolumen, Kationenaustauschkapazität (CEC), flüchtigen Stoffen, Asche und Kohlenstoffgehalt führen kann [2].

Der Nutzen einer spezifischen Pflanzenkohle für eine bestimmte Anwendung hängt somit von ihren inhärenten Eigenschaften ab. Zahlreiche Studien konnten zeigen, dass zum Beispiel Pflanzenkohle mit hoher spezifischer Oberfläche als Sorptionsmittel verwendet werden kann. Diejenigen, die reich an verfügbaren Nährstoffen und Mineralien sind und/oder eine hohe Wasserspeicherkapazität aufweisen, könnten besser als Bodenzusätze zur Verbesserung der Fruchtbarkeit verwendet werden [3]. Studien, die sich jedoch mit der Eignung von Pflanzenkohle als Einstreuzusatz in der Tierhaltung, wie beispielsweise in der Mastgeflügelhaltung beschäftigen, sind begrenzt. Deutschland ist mit einem Bestand von ca. 180 Millionen Tieren und rund 700 Millionen geschlachteter Tiere jährlich nach Frankreich der zweitgrößte Erzeuger von Geflügelfleisch in der EU. Innerhalb der Geflügelhaltung dominiert dabei zahlenmäßig das Haushuhn, welches mit einem Bestand von etwa 160 Millionen Tieren (rund 110 Millionen Masthühner) das häufigste Nutztier in Deutschland darstellt. Nach den Ergebnissen der Landwirtschaftszählung (LZ) 2020 hat sich die Mastgeflügelhaltung in Hessen fest etabliert. Während bei der LZ 2010 noch rund 544 500 Masthühner gezählt wurden, ermittelte man im Bericht vom 1. März 2020 einen Bestand von fast 1,1 Millionen Tieren fest [4].

Zur Beurteilung der Tiergesundheit und des Tierwohls in der Geflügelhaltung werden seit vielen Jahren Fußballenläsionen bei Geflügel untersucht. Fußballenläsionen werden sowohl bei konventionellen als auch bei ökologischen Masthähnchen bei der Schlachtung berichtet. Die Läsionen umfassen verschiedene Arten von Fußballendermatitis, bei denen sich kontaktinduzierte pathologische Veränderungen und Verdickung der Keratinschicht der Epidermis oder in schweren Fällen zu Geschwüren und Nekrosen entwickeln können [5, 6].

Die Gründe für Fußballenläsionen bei Geflügel sind komplex und multifaktoriell, jedoch gilt eine feuchte Einstreu mit einem Feuchtegehalt von über 35 % als ein wesentlicher Risikofaktor. Eine feuchte Einstreu kann zu einer erhöhten Emission von Ammoniak (NH₃) und zu einer erhöhten Belastung mit pathogenen Bakterien führen. Somit stellt die saisonale relative Luftfeuchtigkeit einer der wichtigsten Risikofaktoren für die Entwicklung von Fußballenläsionen dar, sowohl unter Innen- als auch unter Außenbedingungen [7]. Erhöhte Ammoniakgehalte in der Stallluft wiederum beeinflussen nachweislich das Tierwohl negativ. Die Entstehung und insbesondere Prävention dieser entzündlichen Erkrankung, die aufgrund der hervorgerufenen Schmerzen das Tierwohl und die Beweglichkeit der Tiere stark beeinträchtigt, ist Gegenstand des Innovationsvorhabens CAREFUL. Um die Tiergesundheit und das Tierwohl nachhaltig zu verbessern, steht bei der OG CAREFUL die Entwicklung und Erprobung von, aus regional anfallenden Restbiomassen produzierte, Pflanzen- und Pflanzenaktivkohle als zusätzliches Einstreusubstrat in der Geflügelhaltung im Fokus. Durch die Verwendung von lokal anfallenden Restbiomassen sollen nachhaltige regionale Wertschöpfungsketten aufgebaut und Stoffkreisläufe geschlossen werden.

Diese Kurzstudie wurde im Rahmen der Tätigkeiten des Arbeitspakets 2 des EIP-Agri-Projektes „CAREFUL – Pflanzenkohle als Geflügeleinstreu“ durchgeführt und soll eine Übersicht über verfügbare und geeignete (Rest-)Biomassen für die Herstellung von Pflanzen- und Aktivkohlen im Regierungsbezirk Kassel geben. Zugleich soll diese Studie einen Einblick über wesentliche Parameter von Biomassen geben, welche einen Einfluss auf die Eigenschaften der daraus produzierten Kohlen vermitteln, sowie bisherige Ergebnisse aus Studien zur Wirksamkeit von Pflanzenkohle in der Tierhaltung kurz zusammenstellen.

Restbiomassen und Ermittlung des Biomassepotenzials

Ein Biomassepotenzial ist definiert als eine Ressource, die in der Regel erschlossen wird und teilweise noch ungenutzt ist [11], [12]. Eine umfassende quantitative Abschätzung des Potenzials von Biomasse als Rohstoff und Energieträger liegt jedoch nicht vor. Für die Berechnung des Biomassepotenzials gibt es derzeit keine Qualitätsvorgaben oder Mindestanforderungen [11], [14], [15], [19], [20]. Zahlreiche Autoren [11], [13], [14], [15], [19], [21] haben vorgeschlagen, dass die Methoden harmonisiert werden sollten, aber diese Empfehlungen sind noch nicht konsequent umgesetzt worden. Zwei der wichtigsten Faktoren, die das Biomassepotenzial beeinflussen, sind die Flächenverfügbarkeit (z. B. potenzielle Energiepflanzen) und die Bevölkerungsverteilung (Reststoffe). Diese stehen in engem Zusammenhang mit produktions- und verfahrenstechnischen Zusammenhängen [22]. Zur Potenzialabschätzung müssen verschiedene Annahmen getroffen werden, die die Ergebnisse stark beeinflussen. Kaltschmitt et al. [12] unterscheiden zwischen theoretischem, technischem, wirtschaftlichem und realisierbarem Potenzial. Im Rahmen dieser Studie wurde das technische Potenzial benutzt, um die für die nordhessische Region verfügbaren Restbiomassen zu quantifizieren. Das technische Potenzial wird unter Berücksichtigung (1) der Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen, (2) der Erhaltung der natürlichen Kreisläufe, (3) kein Raubbau, z. B. am Humusgehalt, (4) der Einhaltung ökologischer Grenzen, (5) von technischen Einschränkungen und Verluste bei der Energieumwandlung oder Rohstoffumwandlung sowie (6) des zeitlichen und räumlichen Ungleichgewicht zwischen Energieangebot und Energiebedarf, bzw. Rohstoffangebot und -nachfrage ermittelt [8].

Material und Methoden

Untersuchungsregion Regierungsbezirk Kassel

Die Untersuchungsregion ist der Regierungsbezirk Kassel, welcher die kreisfreie Stadt Kassel und die sechs Landkreise Kassel, Werra-Meißner, Waldeck-Frankenberg, Schwalm-Eder, Hersfeld-Rotenburg und Fulda mit der Sonderstatusstadt Fulda umfasst (Abbildung 1).

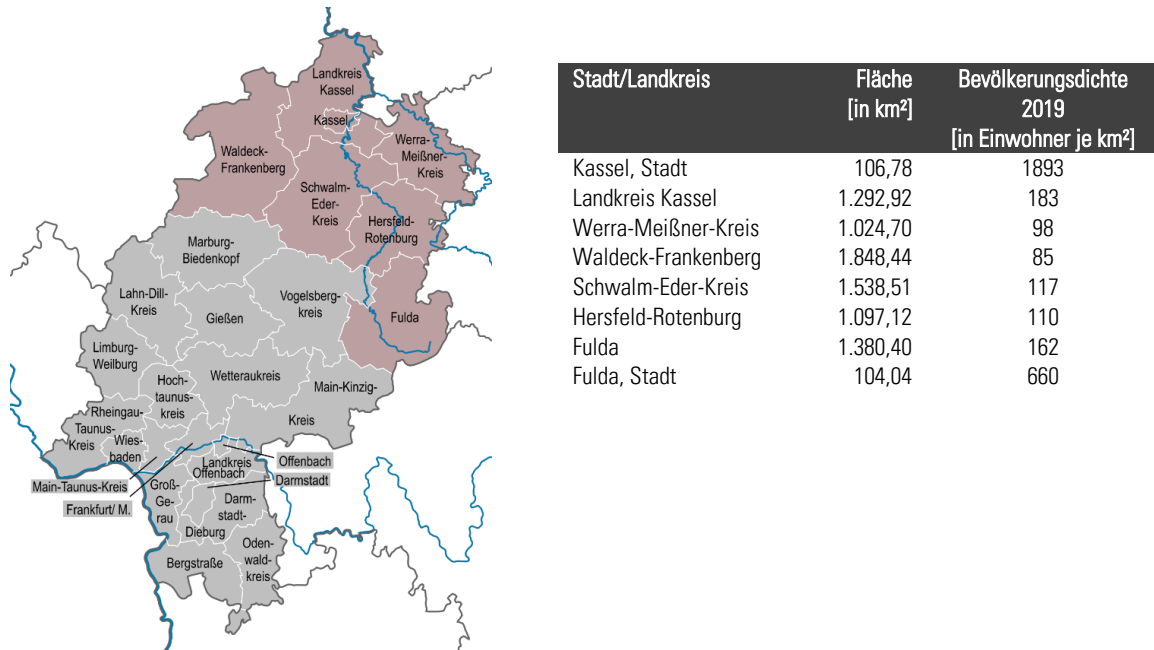


Abbildung 1 Karte des Regierungsbezirks Kassel als Untersuchungsregion mit Angaben zur Fläche und Bevölkerungsdichte in 2019 der Landkreise und Städte (HMUKLV, 2021).

Zur Einteilung der Restbiomassen wurden zehn Oberkategorien gebildet. Diese umfassen (1) Produkte aus Forstwirtschaft, (2) Primäre Reststoffe aus Wäldern, (3) Primärproduktion von lignozellulosehaltigen Biomasse-Pflanzen, (4) Landwirtschaftliche Reststoffe, (5) Grünland, (6) Sonstige Landnutzung, (7) Sekundäre Reststoffe aus der Holzindustrie, (8) Sekundäre Reststoffe der Industrie, die landwirtschaftliche Produkte verwenden, (9) Kommunale Abfälle sowie (10) Abfälle aus Holz. Diese Oberkategorien umfassen jeweils eine detaillierte Auflistung der unterschiedlich anfallenden Restbiomassen. Die Kategorisierung orientierte sich hierbei an der Datenerfassungsstruktur der S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu) [9].

Ergebnisse und Diskussion

Technisches Potenzial von (Rest)Biomassen Nordhessens

Produkte aus der Forstwirtschaft

Die Untersuchungsregion umfasst drei ausgeschriebene Wald- und Wuchsgebiete Hessens, welche zum Teil gesamtflächig in Nordhessen liegen (Abbildung 2). Diese sind zum Teil das Nordwest-Hessische Bergland und zu großen Teilen das Nordost-Hessische Bergland sowie das Weserbergland. Unterschiede in der Baumartenzusammensetzung beruhen vorrangig durch den unterschiedlichen prozentualen Anteil der Kiefer im Bestand (Tabelle 1).



Abbildung 2 Landschaften im Nordwest-Hessischen Bergland (links), Nordost-Hessischen Bergland (Mitte) und Weserbergland (rechts).

Tabelle 1 Wald- und Wuchsgebiete Hessens, welche zum Teil gesamtflächig in der Untersuchungsregion Nordhessen liegen, mit Angaben zur Fläche, Bewaldung, dem Vorrat und Zuwachs sowie deren Zusammensetzung. Quelle: [10]

Wuchsgebiet	Waldfläche [in ha]	Bewaldung [in %]	öffentlicher Wald [in %]	Vorrat [in Vfm/ha]	Zuwachs [in Vfm/ha]	Zusammensetzung [in %]			
						Eiche	Buche	Fichte	Kiefer
Nordwest-Hessisches Bergland	97.600	30	67	289	≥ 8,2	9	43	25	23
Nordost-Hessische Bergland	136.500	45	65	286	≥ 8,2	10	36	33	21
Weserbergland	21.400	54	94	270	≥ 8,1	17	40	37	6

Gewonnene Biomassen aus der Forstwirtschaft wurden unterteilt in Stammholz aus Endeinschlägen (a) und Durchforstungen (b) von Laubbäumen sowie Stammholz aus Endeinschlägen (c) und Durchforstungen (d) von Nadelbäumen.

Tabelle 2 Geschätztes technisches Biomassepotential von Produkten aus der Forstwirtschaft Nordhessens im Jahr 2020 und 2030, Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).

Stadt/Landkreis	Biomassen von Laubbäumen aus [in t _{TM} /km ²]				Biomassen von Nadelbäumen aus [in t _{TM} /km ²]			
	Endeinschlag		Durchforstung		Endeinschlag		Durchforstung	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Kassel, Stadt	7,1	5,9	1,1	1,0	3,7	4,2	1,1	1,1
Landkreis Kassel	95,0	75,1	17,8	16,8	42,8	46,5	12,6	13,6
Werra-Meißner-Kreis	91,0	74,8	267,3	255,4	36,4	38,4	175,2	198,4
Waldeck-Frankenberg	143,3	113,4	52,1	50,4	57,1	60	37,6	40
Schwalm-Eder-Kreis	86,9	69,6	30,4	28,5	37,4	40,3	20,5	21,4
Hersfeld-Rotenburg	63,5	50,7	47,6	43,9	26,8	28,7	28,8	29,7
Fulda	63,9	52,9	49,8	50,3	27,2	29,3	31,3	32,8

Das abgeschätzte technische Biomassepotential für Produkte aus der Forstwirtschaft aus Endeinschlag und Durchforstung wird sich vorrangig bei den Nadelbäumen ändern. Hierbei wird eine Erhöhung des Biomasseanteils in den kommenden zehn Jahren abgeschätzt. Jedoch ist anzunehmen, dass diese Daten nicht die erheblichen Schäden der Fichtenbestände seit 2018 durch Sturm, Trockenheit und Borkenkäferbefall in ihrer Schätzung berücksichtigen. Seit 2019 ist die Fichte im Vergleich der Baumarten die am stärksten geschädigte Baumart im hessischen Wald. Dies bezieht sich auf die Mittelwerte der Kronenverlichtung, der starken Schäden wie auch der Absterbe- und Ausfallraten [11]. Zudem lag der Anteil starker Schäden in 2020 mit knapp 9 % fast dreimal so hoch wie im Mittel der Jahre 1984-2020 [11]. Zusätzlich mussten knapp 5 % der Bestände nach Windwurf und Borkenkäferbefall außerplanmäßig genutzt werden. Die Ergebnisse der Waldzustandsaufnahme in 2020 belegten für den hessischen Wald den schlechtesten Vitalitätszustand seit Beginn der Erhebungen in 1984. Dabei, wie bereits erwähnt, wurden die Absterberate und die Ausfallrate stark von der Baumart Fichte bestimmt.

Primäre Restbiomassen aus Wäldern

Bei den hier abgeschätzten primären Restbiomassen aus Wäldern handelt es sich um Holzrückstände aus Endeinschlägen und Durchforstungen von Laub- und Nadelbäumen (Tabelle 3 und Tabelle 4). Waldrestholz besteht aus kleinen Bäumen, Ästen, Stümpfen, Wipfeln und nicht handelsfähigem Holz, das nach der Reinigung, Durchforstung oder dem endgültigen Einschlag von Waldbeständen im Wald zurückbleibt. Es lassen sich drei Hauptquellen für Waldrestholz unterscheiden: Schlagabraum aus endgültigen Fällungen (Endeinschlag), Schlagabraum und kleine Bäume aus Durchforstungen und Säuberungen sowie nicht handelsfähiges Holz.

Tabelle 3 Geschätztes technisches Restbiomassepotential von Produkten aus der Forstwirtschaft (Waldrestholz) Nordhessens im Jahr 2020 und 2030, Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).

Stadt/Landkreis	Restbiomassen von Laubbäumen aus [in t _{TM} /km ²]				Restbiomassen von Nadelbäumen aus [in t _{TM} /km ²]			
	Endeinschlag		Durchforstung		Endeinschlag		Durchforstung	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Kassel, Stadt	2.0	1.7	1.2	1.4	0.4	0.3	0.5	0.5
Landkreis Kassel	28.1	22.3	14.7	16.0	6.7	6.2	6.6	6.9
Werra-Meißner-Kreis	27.2	22.4	12.6	13.3	104.3	99.0	95.5	107.1
Waldeck-Frankenberg	42.3	33.6	19.5	20.4	19.1	18.1	18.9	19.7
Schwalm-Eder-Kreis	23.7	19.1	11.9	12.9	10.7	9.9	10.0	10.2
Hersfeld-Rotenburg	19.0	15.2	9.3	10.0	17.5	16.1	15.1	15.3
Fulda	19.1	15.9	9.5	10.2	17.9	17.5	14.8	15.1

Tabelle 4 Geschätztes technisches Restbiomassepotential von Baumstümpfen als forstwirtschaftliches Produkt (Waldrestholz) in Nordhessen im Jahr 2020 und 2030, Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).

Stadt/Landkreis	Stümpfe von Endeinschlag [in t _{TM} /km ²]			
	Laubbäume		Nadelbäume	
	2020	2030	2020	2030
Kassel, Stadt	2.0	1.7	0.4	0.4
Landkreis Kassel	27.7	21.9	7.0	6.5
Werra-Meißner-Kreis	26.7	22.0	99.4	93.6
Waldeck-Frankenberg	41.4	32.6	20.8	19.8
Schwalm-Eder-Kreis	23.3	18.8	12.1	11.2
Hersfeld-Rotenburg	18.7	14.9	20.2	18.5
Fulda	18.9	15.7	21.1	20.8

Da es sich um Koppelprodukte handelt, korreliert die geschätzten primären Restbiomassen aus Wäldern stark mit dem technischen Biomassenpotenzial aus den Endeinschlägen und Durchforstungen und damit mit der Nachfrage nach Schnittholz. Der Bedarf an Resthölzern für die Pelletproduktion und Hackschnitzel (Abbildung 3) zur Energieerzeugung nimmt seit einigen Jahren stark zu und erhöht damit die Nachfrage nach diesem Rohstoff. Rindenreste werden jedoch aufgrund ihres hohen Wasseranteils und Verschmutzungen nur selten stofflich nutzbar gemacht. Diese werden zu einem gewissen Anteil zur Herstellung von Rindenkompost verwendet, der als Mulchmaterial im Garten- und Landschaftsbau dient. In Skandinavien sind bereits maschinelle Bündelsysteme im Einsatz, die nach einem Holzeinschlag und Abfuhr der nutzbaren Stämme auch das übrige Astmaterial einsammeln. Das Material wird zu Paketen mit einem Energiegehalt von ca. ein Megawatt-Stunde (MWh) geschnürt, die für die in Skandinavien sehr weit verbreitete energetische Nutzung von Biomasse (Bioenergie) verwendet werden (Abbildung 4).



Abbildung 3 Primäre Restbiomassen aus der Forstwirtschaft und ihre Verwendung als Holzhackschnitzel (links), Pellet (Mitte) und Rindenmulch (rechts).

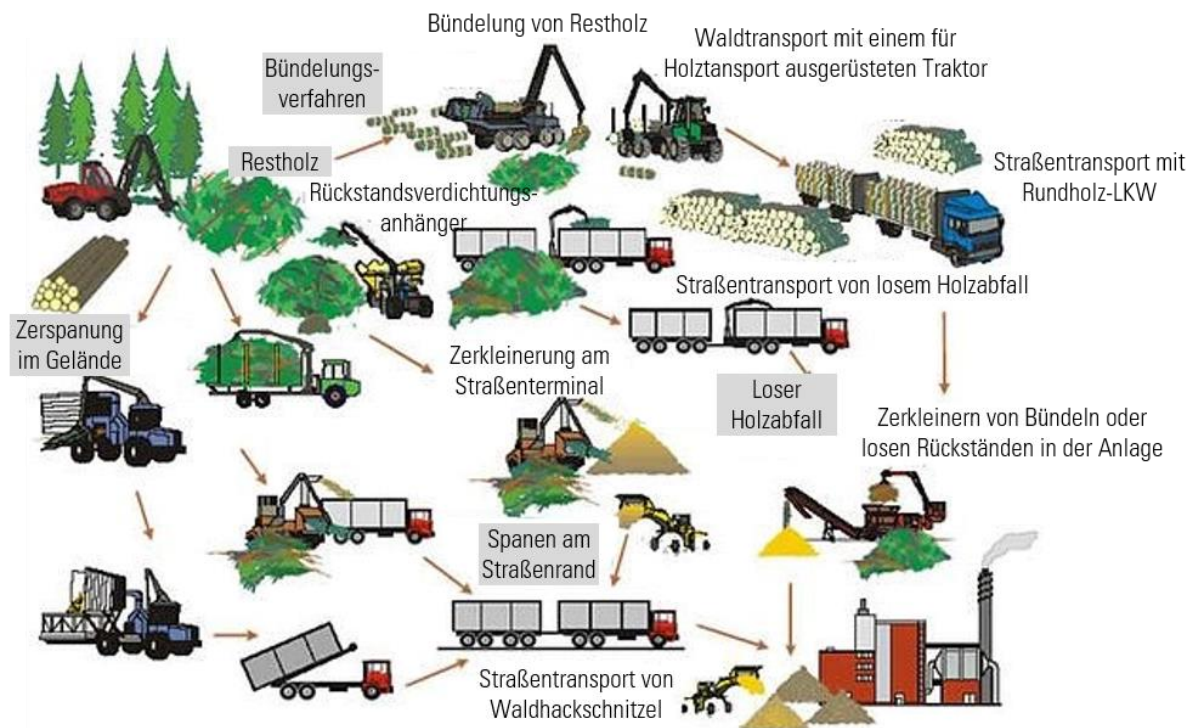


Abbildung 4 Methode der Hackschnitzelernte integriert in die Holzrohstofferte, welche in Schweden und Finnland praktiziert wird. Quelle: Alakangas, VTT; modifiziert.

Primärproduktion von lignozellulosehaltigen Biomasse-Pflanzen

Eine relevante lignozellulosehaltigen Biomasse-Pflanze, welche im nordhessischen Raum kultiviert wird, ist *Miscanthus* (*Miscanthus x giganteus*; Abbildung 5).



Abbildung 5 Blühender (links) und abreifender Bestand (rechts) von *Miscanthus*.

Miscanthus ist eine mehrjährige Pflanze mit einer geschätzten Lebensdauer von etwa 16 Jahren. Sie wird 3-4 m hoch und die Stängel und Blätter können jährlich geerntet werden. Sie nutzt den C4-Photosyntheseweg im Gegensatz zum C3-Weg, der von den Standard-Ackerkulturen in Nordeuropa (wie Weizen, Raps, Kartoffeln) genutzt wird. Als solche zeigt sie eine höhere Strahlungsumwandlungseffizienz als C3-Pflanzen und ist auch effizienter in der Nutzung von Stickstoff und Wasser. Die Kosten für die Anlage einer *Miscanthus*-Plantage sind in den letzten Jahren erheblich gesunken. *Miscanthus* wird als Monokultur einer Sorte von *Miscanthus x giganteus* angebaut. Als nachwachsender Rohstoff findet *Miscanthus* derzeit Verwendung als Festbrennstoff in Form von Häckselgut, Pellets oder Briketts (17,6 MJ/kg Heizwert, 13,6 MJ/ kg bei 80 % TM; FNR, 2021) sowie als Mulchmaterial, Tiereinstreu, besonders in der Pferdehaltung oder bei Kleintieren, Biologischer Baustoff (Zuschlagstoff für Leichtbeton, Putz und Estrich, als Dach- und Schüttdämmung, für Fenster- und Türrahmen, Spanplatten, als Reet-/Schilfersatz zur Dacheindeckung), sowie in der Zellstoffindustrie (u.a. Papierherstellung, Pflanztöpfe) aber auch in der Automobilindustrie (u.a. für Lenkräder, LKW-Leichtbau, Ölbinder).

Nach Schätzungen wurden im Jahr 2008 in Hessen auf mindestens 80 ha *Miscanthus* angebaut, im Jahr 2011 wurde der Anbau auf bereits ca. 180 ha geschätzt [12–14]. Weiterhin verwiesen Studien darauf dass in den kommenden Jahren die *Miscanthus*-anbaufläche in Hessen eheblich steigen wird und demnach sowohl die energetische als auch die stoffliche Nutzung zunehmen wird [12]. Auch für die in dieser Kurzstudie herangezogenen Landkreise des Regierungsbezirks Kassel wird prognostiziert, dass die Anbaufläche von *Miscanthus* in den nächsten Jahren erheblich vergrößert werden wird (Tabelle 5).

Tabelle 5 Geschätztes technisches Biomassepotenzial von *Miscanthus x giganteus* in Nordhessen im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).

Stadt/Landkreis	<i>Miscanthus x giganteus</i> [in t _{TM} /km ²]	
	2020	2030
Kassel, Stadt	0.4	0.7
Landkreis Kassel	4.9	8.8
Werra-Meißner-Kreis	4.0	7.0
Waldeck-Frankenberg	7.2	12.8
Schwalm-Eder-Kreis	6.0	10.7
Hersfeld-Rotenburg	4.2	7.5
Fulda	5.5	9.7

Landwirtschaftliche Restbiomassen

Relevante Restbiomassen aus der landwirtschaftlichen Produktion in der Region Nordhessen umfassen Getreidestroh, Rapsstroh und Maisstroh (Tabelle 6, Abbildung 6). Zu typischen Arten von Getreidestroh in Hessen gehören u.a. von Weizen, Roggen, Dinkel, Gerste, Hafer und Triticale. Die größte Nutzungskonkurrenz ist die Verwendung von Getreidestroh zum Erhalt der Humusbilanz. Abgesehen von der Humusbilanzierung, wird Getreidestroh oft als Tiereinstreu verwendet. Hier ist zu überlegen, ob es Alternativen gibt bzw. eine Kaskadennutzung sinnvoll wäre [15]. Rapsstroh werden die nach Ernte der Rapssamen auf dem Feld verbleibenden Pflanzenreste bezeichnet, die als organische Aufkommen in der Landwirtschaft als Nebenprodukte bzw. Erntereste als halmgutartige Biomasse anfallen. Dieses Stroh besteht hauptsächlich aus den getrockneten Stängel- und Schotenresten. Es wird in der Regel nach der Ernte in den Boden eingearbeitet und dient damit der Nährstoff- und Humusrückführung [16]. Auch hier ist die größte Nutzungskonkurrenz die Verwendung von Getreidestroh zum Erhalt der Humusbilanz. Maisstroh fällt bei der Ernte von Körnermais zur Produktion für Fütterungszwecke an [16]. Auch dieses Stroh verbleibt bisher beim Drusch gehäckselt verteilt auf dem Feld, wo es Humus bildet und Nährstoffe zurückführt.

Schätzungen gehen davon aus, dass sich das technische Biomassepotenzial von Getreide- und Rapsstroh in den nächsten zehn Jahren verringert, das des Maisstrohs bleibt dahingegen konstant oder erfährt womöglich in einzelnen Landkreisen eine Erhöhung (Tabelle 6).

Tabelle 6 Geschätztes technisches Biomassepotenzial ausgewählter landwirtschaftlicher Restbiomassen im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).

Stadt/Landkreis	Landwirtschaftliche Restbiomassen [in t _{TM} /km ²]					
	Getreidestroh		Rapsstroh		Maisstroh	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Kassel, Stadt	7.6	6.1	1.2	0.7	0.0	0.0
Landkreis Kassel	94.8	76.2	14.7	9.2	0.3	0.4
Werra-Meißner-Kreis	75.1	60.4	11.7	7.3	0.3	0.3
Waldeck-Frankenberg	135.0	108.4	20.9	13.2	0.5	0.6
Schwalm-Eder-Kreis	112.5	90.3	17.4	11.0	0.4	0.5
Hersfeld-Rotenburg	80.3	64.4	12.5	7.8	0.3	0.3
Fulda	101.0	81.1	15.7	9.8	0.4	0.4



Abbildung 6 Getreidestroh (links), Rapsstroh (Mitte) und Maisstroh (rechts) welche als häufige Landwirtschaftliche Restbiomassen im Regierungsbezirk Kassel anfallen.

Straßenbegleitgrün

Eine interessante Restbiomasse für die Verwendung als Ausgangssubstrat zur Herstellung von Pflanzen- und Pflanzenaktivkohle stellt das Straßenbegleitgrün dar. Straßenbegleitgrün fasst sämtliche Biomassenaufwüchse an Wegen, Straßen und Parkplätzen zusammen. Die Breite variiert stark und kann an zweispurigen Straßen zwei bis acht Meter und an Autobahnen vier bis zwanzig Meter betragen. Es übernimmt dabei vielerlei Funktionen wie bspw. als optische Führung, die durch den kontrollierten Aufwuchs den Verlauf von Straßen besser erkennbar macht; als Sicht- und Blendschutz, die Siedlungen oder entgegenkommenden Verkehr vor Blendungen schützt; bautechnische Stabilisierung, durch die das Wurzelwerk des Aufwuchses das Erdreich zusammenhält und die Umgebung vor Bodenerosionen schützt; aber auch Lebensraum für viele Tiere und Pflanzenarten.

Auf den Flächen des Straßenbegleitgrüns wachsen Bäume, Büsche, Gräser und Blütenstauden, welche zur Funktionserhaltung teils mehreren Schnitten unterzogen werden müssen. Der Schnittbereich wird dabei in den Intensiv- und den Extensivbereich unterschieden. Zum Intensivbereich gehören Bankette, Mulden, Gräben, Trenn- und Mittelstreifen, Sichtflächen und Rastplätze. Diese Flächen müssen zum Erhalt der Verkehrssicherheit, des Wasserabflusses oder des Erholungsbedarfs zwei bis dreimal im Jahr zurückgeschnitten werden. Zum Extensivbereich gehören Böschungen, Dämme, Flächen außerhalb des Straßenrandbereichs und der Innenflächen in Anschlussstellen. Aus wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten werden diese Bereiche nur einmal im Jahr geschnitten [17]. Der Extensivbereich umfasst demnach ein breites Spektrum an Vegetationstypen, was durch die Fülle verschiedener Standortverhältnissen begründet ist (Abbildung 7). Die Schnittfrequenz bestimmt die Anzahl an schwach und niedrigwüchsigen Pflanzen, die durch verholzende Pflanzengesellschaften verdrängt werden können und die Mähtechnik beeinflusst den Nährstoffeintrag und somit das Pflanzenwachstum.



Abbildung 7 Straßenbegleitgrün aus der Landschaftspflege als regionale Restbiomasse mit großem Potenzial für die Herstellung von Pflanzen(aktiv-)kohlen.

Mit der Pflege des Straßenbegleitgrünes sind derzeit hohe Kosten verbunden. Aktuell wird es in den meisten Landkreisen von Nordhessen gemulcht und auf den Flächen liegen gelassen, stellt also den Inbegriff einer Restbiomasse dar. Durch das Einsammeln des Straßenbegleitgrün und die Weiterverarbeitung könnte ein Gegenwert zu den Pflegekosten hergestellt werden. Dies wird derzeit nicht in Betracht gezogen, da durch hohe mineralische Konzentrationen, einem hohen Feuchtegehalt und hohen Beschaffungskosten es für viele Anwendungen unwirtschaftlich wäre [17].

Für den Regierungsbezirk Kassel wurde für das Jahr 2020 eine Trockenmasse von knapp 17,5 t pro km² abgeschätzt (Tabelle 7), mit Tendenz zu einer leichten Erhöhung der Trockenmasse in den kommenden 10 Jahren. Die benutzte Datenbank zur Evaluierung des Restbiomassepotenzials von Straßenbegleitgrün beinhaltet jedoch nur Annahmen unter einer einheitlichen Angabe von t_{TM}/km² und berücksichtigt nicht die tatsächliche durch die regionale Abfallentsorgung jährlich durchschnittlich gesammelten Abfälle aus der Landschaftspflege. Eine Studie von Robrecht (2019) [18] über ein alternatives Verwertungskonzept für Straßenbegleitgrün und Bioabfall im Landkreis Kassel konnte zeigen, dass, basierend auf Angaben von „Hessen Mobil“, ein aktuelles Frischmassepotenzial von rund 7.100 t im Landkreis Kassel pro Jahr vorhanden ist. Für diese Berechnungen wurde das vorhandene Straßennetz berücksichtigt, welches, abzüglich der Ortsdurchfahrten, eine Länge von rund 830 km im Landkreis Kassel aufweist [18]. Unter der Annahme von einer 25 %igen Frischmasse-Aufwuchsreduzierung, durch den Abtrag der Nährstoffe, ergab sich ein dauerhaftes Potenzial von rund 5.300 t. Bei der Annahme von circa 36 % Trockenmasse (TM) sind das rund 2.500 t Trockenmasse und ein dauerhaftes Potenzial von derzeit knapp 2.000 t TM jährlich für den Landkreis Kassel.

Tabelle 7 Geschätztes technisches Restbiomassepotenzial von Straßenbegleitgrün im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).

Stadt/Landkreis	Straßenbegleitgrün [in t _{TM} /km ²]	
	2020	2030
Kassel, Stadt	0.6	0.6
Landkreis Kassel	3.3	3.3
Werra-Meißner-Kreis	1.9	1.9
Waldeck-Frankenberg	2.9	2.9
Schwalm-Eder-Kreis	3.6	3.7
Hersfeld-Rotenburg	3.0	3.1
Fulda	2.3	2.3

Sekundäre Reststoffe aus der Holzindustrie

Was übrig bleibt, nachdem das Holz zur Verarbeitung in einem Werk angekommen ist, wird gemeinhin als primärer und sekundärer Holzverarbeitungsrückstand oder Abfall bezeichnet. Diese Rückstände werden für die Verwertung vorbereitet, da sie in der Regel sauber, gleichmäßig, vor Ort und mit einem niedrigen Feuchtigkeitsgehalt sind. Beispiele hierfür sind Reststoffe aus dem Sägewerk (u.a. Sägemehl, Holzspäne), Rückstände aus Industrien, die halbfertige Holzwerkstoffplatten herstellen, Rückstände aus der Weiterverarbeitung von Holz, sowie Sekundäre Rückstände aus der Zellstoff- und Papierindustrie wie Rindenrückstände und Schwarzlauge.

Laut der hier zu Grunde gelegten Daten der S2Biom Datenbank fielen im Jahr 2020 etwa 165 Tonnen pro km² in Form von Sägemehl und Sägespäne aus der Verarbeitung von Laub- und Nadelbäumen im Regierungsbezirk Kassel an (Tabelle 8). Auch diese geschätzten Daten sind unter dem Aspekt zu betrachten, dass der Anteil starker Schäden im Jahr 2020 mit knapp 9 % fast dreimal so hoch wie im Mittel der Jahre 1984-2020 lag [4] und zusätzlich knapp 5 % der Bestände nach Windwurf und Borkenkäferbefall außerplanmäßig genutzt werden mussten. Somit müssen diese Zahlen für das Jahr 2020 vermutlich höher eingeschätzt werden. Die Restbiomassen aus dem Sägewerk können direkt zur Erzeugung von Wärme und Strom oder indirekt zur Herstellung von biobasierten Produkten wie Holzkohle oder Pellets verwendet werden. Ein großer Prozentsatz (ca. 80 %) des verwertbaren Holzverarbeitungsrückstandes und ungefähr 40 Prozent der feinen Rückstände werden bei der Herstellung anderer Produkte wie Spanplatten, nicht-strukturelle Platten und Tiereinstreu verwendet.

Tabelle 8 Geschätztes technisches Potenzial von Restbiomassen aus Sägewerken im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).

Stadt/Landkreis	Restbiomassen aus Sägewerk [in t _{TM} /km ²]							
	Sägemehl und/oder Holzspäne				Weitere Restbiomassen neben Sägemehl/Holzspäne			
	Laubbäume		Nadelbäume		Laubbäume		Nadelbäume	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Kassel, Stadt	0.0	0.0	0.8	0.8	0.1	0.1	1.4	1.4
Landkreis Kassel	0.4	0.4	8.7	8.5	0.8	0.8	15.5	15.1
Werra-Meißner-Kreis	0.4	0.4	7.8	7.7	0.7	0.7	14.0	13.7
Waldeck-Frankenberg	0.7	0.7	13.5	13.1	1.3	1.3	24.0	23.5
Schwalm-Eder-Kreis	0.5	0.5	9.4	9.1	0.9	0.9	16.7	16.3
Hersfeld-Rotenburg	0.4	0.4	8.5	8.3	0.8	0.8	15.3	14.9
Fulda	0.4	0.4	8.4	8.2	0.8	0.8	15.1	14.7

Sägespäne sind die Holzreste, die entstehen, wenn ein Baumstamm mit einer Säge zur Herstellung von Holz geschnitten wird. Die meisten Sägespäne sind grün (nicht trocken) und ziemlich gleichmäßig in Größe und Form. Sägespäne werden im Allgemeinen auch als "Sägemehl" bezeichnet, was bedeutet, dass die Partikel durch ein Sieb mit einer Maschenweite von 20 passieren können. Leider sind die Verwendungsmöglichkeiten von grünem Sägemehl relativ begrenzt. Grünes Sägemehl kann zum Heizen von Haushalten in speziellen Sägemehllöfen verwendet werden, obwohl dies nicht sehr verbreitet ist, sowie zum Räuchern von Fleisch. Nach der Trocknung kann das Sägemehl durch Vergasung, Verbrennung und Pyrolyse zur Erzeugung von Strom, Wärme und Öl genutzt werden. Darüber hinaus hat Sägemehl viele wünschenswerte Eigenschaften, die es zu einem beliebten Material für die Herstellung von Faserverbundwerkstoffen machen: Es ist saugfähig, abrasiv, voluminös und faserig, nicht leitend und körnig. Eine Vielzahl von Produkten, wie z. B. Einstreu, Schleifmittel, Isolierung und Verpackungen, können mit diesem Verfahren aus Sägemehl hergestellt werden.

Bei der Betrachtung der Biomassepotenziale weiterer sekundärer Reststoffe insbesondere aus der Holzverarbeitenden Industrie, so wird in den kommenden zehn Jahren mit einem leichten Zuwachs gerechnet (Tabelle 9). Biomassen aus Rückständen aus der Zellstoff- und Papierindustrie sollen im Regierungsbezirk Kassel in den kommenden Jahren stabil bleiben.

Tabelle 9 Geschätztes technisches Potenzial von weiteren z.T. holzigen Restbiomassen aus der Holzverarbeitenden Industrie sowie aus der Zellstoff- und Papierindustrie im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).

Stadt/Landkreis	Weitere sekundäre Reststoffe aus der Holzindustrie [in t _{TM} /km ²]							
	Holzverarbeitende Industrie				Rückstände aus der Zellstoff- und Papierindustrie			
	halbfertige Holzwerkstoffe		weitere Holzverarbeitung		Rindenrückstände		Schwarzlauge	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Kassel, Stadt	0.2	0.2	5.7	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0
Landkreis Kassel	2.2	2.3	6.8	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Werra-Meißner-Kreis	2.0	2.1	3.0	3.1	4.6	4.6	20.8	20.8
Waldeck-Frankenberg	3.3	3.6	4.6	4.8	4.6	4.6	20.8	20.8
Schwalm-Eder-Kreis	2.3	2.5	5.2	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Hersfeld-Rotenburg	2.1	2.3	3.5	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Fulda	2.1	2.2	6.3	6.4	2.3	2.3	10.4	10.4

In Zellstoff- und Papierfabriken fallen je nach technologischem Niveau, Zellstoff- und Papiersorten und Holzqualität unterschiedliche Mengen an energiereicher Biomasse als Abfälle an. Diese Abfälle fallen in allen Prozessstufen an: Holzaufbereitung, Zellstoff- und Papierherstellung, Chemikalienrückgewinnung, Altpapieraufbereitung, Abwasserauf-

bereitung. Die energetische Verwertung von Abfällen unterschiedlicher Herkunft hat sich zu einer allgemein akzeptierten Alternative zu deren Entsorgung entwickelt. Die Zellstoff- und Papierindustrie bekundet ihr Interesse an der Anpassung und Integration fortschrittlicher Technologien zur Energieumwandlung aus Biomasse in ihren Fabrikationsbetrieben. Die industrielle Übernahme dieser neuen Technologien hat das Potenzial für eine höhere Effizienz, niedrigere Kapitalkosten und einen sichereren Betrieb als konventionelle Betriebe, die fossile Brennstoffe zur Energiegewinnung verbrennen. Die Verbrennung mit Energierückgewinnung hat den Vorteil der hygienischen Entsorgung, der Volumenreduzierung und der Rückgewinnung thermischer Energie in Form von Dampf oder überhitztem Wasser, das für Heizung und Stromerzeugung genutzt werden kann. Hierbei ist die generierte Schwarzlauge der wichtigste Biomassebrennstoff in einer Zellstofffabrik.

Schwarzlauge ist ein recyceltes Nebenprodukt, das beim Aufschluss von Holz in der Papierherstellungsindustrie entsteht (Abbildung 8). Genauer gesagt ist es die Substanz, die übrig bleibt, nachdem die Zellulosefasern entfernt wurden, um Papierfasern zu bilden. Es besteht aus Lignin, Wasser und anderen Chemikalien, die im Extraktionsprozess verwendet werden. Sie ist ein wichtiger flüssiger Brennstoff in der Zellstoff- und Papierindustrie. Schwarzlauge wird durch Verbrennung oder Vergasung in Kesseln oder Vergasern vor Ort zurückgewonnen und recycelt. Das Ergebnis dieser Prozesse sind Wärmeenergie, Kohlendioxid und rückgewinnbare Chemikalien. Der Dampf, der bei der Schwarzlaugeerückgewinnung erzeugt wird, trägt wesentlich zum Energiebedarf der Zellstoff- und Papierfabriken bei. Zurückgewonnene Chemikalien werden in Weißlauge recycelt, die die ursprüngliche Aufschlammung von Chemikalien ist, die im Zellstoffprozess verwendet wird, wodurch der Chemikalienbedarf des Zellstoffprozesses um fast 90 Prozent reduziert wird.



Abbildung 8 Holzspäne (links) und Holzmehl (Mitte) als relevante sekundäre Reststoffe aus der Holzindustrie sowie Schwarzlauge (rechts) aus der Zellstoff- und Papierindustrie im Regierungsbezirk Kassel.

Sekundäre Reststoffe der Industrie, die landwirtschaftliche Produkte verwenden

Bei der agroindustriellen Verarbeitung fällt eine große Menge an Nebenprodukten und Abfällen an. Fruchtnebenprodukte wie Bagasse, Schalen, Abfälle, Stängel, Schalen, Kleie und Samen machen mehr als 50 % der frischen Früchte aus und haben manchmal einen höheren Nährstoff- oder Funktionsgehalt als das Endprodukt [19]. Obst- und Lebensmittelabfälle entstehen auch durch Beschädigungen während des Transports, der Lagerung und der Verarbeitung. Die wachsende Beliebtheit von Fruchtsäften, Nektaren, tiefgekühlten und minimal verarbeiteten Produkten hat in den letzten Jahren auch die Produktion von Nebenprodukten und Abfällen erhöht. Nebenprodukte und Abfälle haben Auswirkungen auf ökologische, wirtschaftliche und soziale Bereiche. Für die Umwelt tragen sie zu den Treibhausgasemissionen bei [20]. Viele dieser Biomaterialien werden nicht verwertet und landen auf kommunalen Deponien, wo sie aufgrund der mikrobiellen Zersetzung und der Sickerwasserproduktion ernsthafte Umweltprobleme verursachen. In einigen Fällen werden die Nebenprodukte verbrannt, um Pilze und Parasiten zu entfernen. Aus wirtschaftlicher Sicht

sind die negativen Auswirkungen auf die Kosten zurückzuführen, die durch die Handhabung von festen Abfällen in Deponien entstehen. Außerdem stellt das Management großer Mengen verschiedener abbaubarer Materialien eine Herausforderung dar [21, 22].

Eine für den Regierungsbezirk Kassel nennenswerte sekundäre Restbiomasse aus der agroindustriellen Verarbeitung ist die Getreidekleie (Tabelle 10). Getreidekörner werden in der Regel gemahlen, um die faserige Kleie zu entfernen. Beim Mahlen ist die Kleie, die vom stärkehaltigen Endosperm des Korns getrennt wird, ein wichtiges Nebenprodukt. Der Begriff "Kleie" wird in der Regel auf die äußeren Schichten des Korns angewandt und seine Zusammensetzung hängt stark von der Kornart, der Korngröße, -form und -reife, der Größe des Keims, der Dicke des Perikarps, der Dauer und dem Zustand der Kornlagerung, dem Konditionierungsprozess des Korns vor dem Mahlen, während des Mahlens und den verwendeten Mahlmaschinen ab [23]. Bei der Vermahlung von Weizenkörnern beträgt die gewonnene Kleie ca. 15 % und setzt sich aus mehrschichtigen Materialien wie äußerem und innerem Perikarp, Testa, hyaliner Schicht, Aleuronschicht und einem Teil des stärkehaltigen Endosperms zusammen [24, 25] und bei Gerste beträgt die Ausbeute an Mahlnebenprodukten ca. 30-40 % [26]. Obwohl die Mikronährstoffe im Allgemeinen in höheren Konzentrationen im äußeren Teil des Korns vorhanden sind, wird dieser oft unterbewertet und vorrangig als Tierfutter verwendet [24]. Dennoch gewinnt die Kleie in der menschlichen Ernährung zunehmend Bedeutung etwa in Müsli, Grahambrot oder in Knäckebrot.

Tabelle 10 Geschätztes technisches Potenzial von Getreidekleie im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).

Stadt/Landkreis	Geschätzte Biomasse von Getreidekleie [in t _{TM} /km ²]	
	2020	2030
Kassel, Stadt	1.1	1.1
Landkreis Kassel	13.8	13.9
Werra-Meißner-Kreis	10.9	11.0
Waldeck-Frankenberg	19.6	19.9
Schwalm-Eder-Kreis	16.4	16.5
Hersfeld-Rotenburg	11.7	11.8
Fulda	14.7	14.8

Kommunale biologisch abbaubare Abfälle

Die für diese Studie interessanten kommunalen Abfälle umfassen biologisch abbaubare Abfälle des gesammelten Siedlungsabfalls, ohne Textil und Papier (Tabelle 11). In Deutschland werden jährlich rund neun Millionen Tonnen Bio- und Grünabfälle gesammelt und verwertet. Der daraus resultierende Kompost wird in der Landwirtschaft, im Garten- und Landschaftsbau eingesetzt. 1,9 Mio. Tonnen der gesammelten Bioabfälle werden zudem vor der Kompostierung in Biogasanlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt [27]. Diese Menge wird in den kommenden Jahren voraussichtlich noch steigen.

Das Hessische Statistische Landesamt veröffentlichte im November 2020, dass es zu einer Zunahme der gesamten Abfallmenge kam, welcher insbesondere auf den Anstieg der Bioabfälle zurückging. Diese wurden zum größeren Teil über die in Hessen flächendeckend eingeführten Biotonnen eingesammelt. Insgesamt gingen damit im Jahr 2019 über die Biotonne 557 100 Tonnen Bioabfälle aus privaten Haushalten bei Entsorgungsbetrieben ein. Das waren 4,4 Prozent oder 6 Kilogramm pro Kopf mehr als 2018. Die Biotonne wird außer für Küchenabfälle auch für Rasen- und Heckenschnitt genutzt. Ein weiterer, geringerer Teil der Bioabfälle stammte aus der Grünschnittsammlung von Garten- und Parkabfällen. Deren Menge nahm 2019 gegenüber dem Vorjahr um 6,9 Prozent auf 285 900 Tonnen zu. Das entsprach 45 Kilogramm pro Kopf. Die Zunahme der Bioabfälle resultierte vor allem aus dem

höheren Anfall an Rasen- und Heckenschnitt sowie Garten- und Parkabfällen. Der Trend des Zuwachses an Biomüll ist jedoch nicht der in dieser Studie benutzten S2Biom Datenbank zu entnehmen.

Tabelle 11 Geschätztes technisches Potenzial von biologisch abbaubaren kommunalen Abfällen im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).

Stadt/Landkreis	Geschätzte Biomasse von biologisch abbaubaren kommunalen Abfällen [in t _{TM} /km ²]			
	ungetrennt gesammelt		getrennt gesammelt	
	2020	2030	2020	2030
Kassel, Stadt	21.7	21.4	21.7	21.4
Landkreis Kassel	26.1	25.8	26.1	25.8
Werra-Meißner-Kreis	11.4	11.2	11.4	11.2
Waldeck-Frankenberg	17.7	17.5	17.7	17.5
Schwalm-Eder-Kreis	20.0	19.8	20.0	19.8
Hersfeld-Rotenburg	13.5	13.3	13.5	13.3
Fulda	23.9	23.6	23.9	23.6

Eine detaillierte Reststoffquantifizierung von Biomüll im Landkreis Kassel ergab, dass durch die Abfallentsorgung jährlich durchschnittlich 41.100 t Bioabfall und 9.400 t Gartenabfälle gesammelt werden [18]. Die Hälfte davon allein in Lohfelden, die übrige Menge teilt sich auf die Standorte Fulda und Hofgeismar auf. Davon werden rund 32.000 t in der Biogasanlage von Lohfelden vergärt und darauf folgernd zu diversen Erden und Komposten verarbeitet. Die Abfallentsorgung externisiert jedes Jahr durchschnittlich 9.000 t Bioabfall und bezahlt für eine Tonne 65 €. Die externisierte Menge entspricht bei einem Trockenmasseanteil von 35 % rund 3.100 t Trockensubstanz.

Alt- und Gebrauchtholz (Nachverbraucherholz)

Aufgrund der Materialeigenschaften von Holz und seiner Doppelnatur als Werkstoff und Energieträger gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Wiederverwendung und das Recycling von Altholz. Die Richtlinie VDI-2243 des Vereins Deutscher Ingenieure nennt vier verschiedene Möglichkeiten der Wiederverwendung und des Recyclings von Materialien und Produkten, je nach Anwendungsbereich und technischem Aufwand bei der Aufbereitung. Die ersten beiden Optionen werden gemäß ISO/EN 14041 als "closed-loop"-Recycling betrachtet, während die zweiten beiden als "open-loop"-Recycling klassifiziert werden. Die Einordnung eines konkreten Falles in eine der vier Optionen ist jedoch bis zu einem gewissen Grad subjektiv. Bei der Herstellung von Holzwerkstoffplatten aus Alt- und Gebrauchtholz, liegen in Deutschland die durchschnittlichen Anteile zwischen 5 -20 % (maximal 60 %), während z.B. in Italien Holzwerkstoffplatten aus 100 % Post-Consumer-Holz hergestellt werden [28]. Eine direkte Wiederverwendung von Holz im industriellen Maßstab ist in der Regel nicht möglich. Aufgrund unterschiedlicher Formen, Qualitäten und Verunreinigungen ist eine arbeitsintensive, teure Wiederaufbereitung erforderlich [29]. Dennoch ist die Wiederverwendung von Holzpaletten [30] und Verpackungselementen sowie die Verwendung von standardisierten Baumaterialien wie Latten, Balken oder Brettern in kleinen, dezentralen Einzelfällen gängige Praxis [29]. Eine weitere, ebenfalls mengenmäßig kleine Ausnahme ist die Verwendung von Wertholz, antiken und handwerklich gefertigten Möbeln, Paneelen, Wandverkleidungen, Parkettböden sowie gelegentlich auch von alten Türen und Fenstern [28]. Die im Rahmen der Erstellung der S2Biom Datenbank geschätzten Biomassepotenziale für Altholz im Regierungsbezirk Kassel gehen von einem Zuwachs dieser Biomasse in den nächsten zehn Jahren aus (Tabelle 12). Bei der Aufnahme des Potenzials von Altholz als mögliche Ressource für die Herstellung von Holzkohle ist es von besonderer Bedeutung, gerade hinsichtlich der Nutzung der Kohle als Einstreu in der Geflügelhaltung, dass man den Grad der chemischen Belastung berücksichtigt. Somit wurde unterteilt in schadstoffhaltiges

Nachverbraucherholz (u.a. mit Kunststoff beschichtetes Sperrholz, Holzschutzmittel) und naturbelassenes Nachverbraucherholz.

Tabelle 12 Geschätztes technisches Potenzial von Alt- und Gebrauchtholz im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu).

Stadt/Landkreis	Alt- und Gebrauchtholz (Nachverbraucherholz) [in t _M /km ²]			
	schadstoffhaltig		naturbelassen	
	2020	2030	2020	2030
Kassel, Stadt	1.8	1.8	8.6	8.8
Landkreis Kassel	2.1	2.2	10.3	10.6
Werra-Meißner-Kreis	0.9	0.9	4.5	4.6
Waldeck-Frankenberg	1.4	1.5	7.0	7.2
Schwalm-Eder-Kreis	1.6	1.7	7.9	8.2
Hersfeld-Rotenburg	1.1	1.1	5.3	5.5
Fulda	1.9	2.0	9.5	9.7

Eignung der Biomassen für die Herstellung von Pflanzenkohle

Die Entwicklung neuer Strategien für ein nachhaltiges Abfallmanagement ist unerlässlich, um organische Abfälle von den Deponien fernzuhalten. Die Herausforderung besteht darin, diese organischen Abfälle in organische Ergänzungen umzuwandeln, die in landwirtschaftliche Praktiken integriert werden können. So ist das Interesse an der Pyrolyse von organischen Abfällen zur Erzeugung von Bioenergie und Pflanzenkohle als Recyclingoption in letzter Zeit stark gestiegen und ist zu einer alternativen Strategie zur Kompostierung und anderen biologischen Abfallbehandlungen geworden. Pflanzen- und Aktivkohle zieht große Aufmerksamkeit als potenzielles Mittel zur Kohlenstoffsequestrierung auf sich, da Kohlenstoff (C) aus dem schnellen biologischen atmosphärischen C-Kreislauf in den viel langsameren geologischen Kreislauf überführt werden kann [31]. Die ökologischen und agronomischen Vorteile von Pflanzenkohle sind abhängig von der Art der Pflanzenkohle. Obwohl die Herstellung von Pflanzenkohle für diverse Zwecke einfach auf der Auswahl des Ausgangsmaterials zu basieren scheint, ist ihre Herstellung zur Verbesserung der Umwelt oder dem Einsatz in der Landwirtschaft komplex. Die Auswahl des Ausgangsmaterials, die Pyrolysetemperaturen und die Art der Pyrolyse können das Endprodukt der Pflanzenkohle stark beeinflussen [32].

In Bezug auf das Ausgangsmaterial ist es wichtig zu verstehen, wie die anfänglichen Eigenschaften des Ausgangsmaterials die endgültigen Kohleeigenschaften beeinflussen. Es hat sich gezeigt, dass die Ausgangsmaterialien eine wichtige Rolle bei der Erzeugung von Pflanzenkohle mit deutlich unterschiedlichen chemischen Eigenschaften spielt [33, 34]. Im Allgemeinen enthalten holzbasierte Kohlen mehr C und weniger pflanzenverfügbare Nährstoffe, güllebasierte Kohlen zeigen gegenteilige Trends, und grasbasierte Pflanzenkohlen liegen typischerweise irgendwo zwischen holz- und güllebasierten Kohlen [35]. Diese Eigenschaften können jedoch durch die Pyrolysetemperatur und die für die Kohleherstellung verwendete Pyrolysetechnik verändert werden.

Pyrolysetemperatur und Produktionstechnik spielen eine Schlüsselrolle bei der Erzeugung von Pflanzen- und Aktivkohlen mit verschiedenen chemischen und strukturellen Eigenschaften. Zum Beispiel ändert sich die Nährstoffverfügbarkeit drastisch, wenn die Pyrolysetemperatur erhöht wird [36]. Insbesondere beobachtet man mit steigender Pyrolysetemperatur typischerweise einen steigenden C-, Phosphor (P)-, Kalium (K)-, Kalzium (Ca)-, Aschegehalt, pH-Wert und spezifische Oberfläche der Pflanzenkohle sowie einen sinkenden Stickstoff (N)-, Wasserstoff (H)- und Sauerstoff (O)-Gehalt [35]. Bei der Wahl der technischen Pyrolysevariante neigt die langsame Pyrolyse im Allgemeinen dazu,

Pflanzkohlen mit mehr N, Schwefel (S), verfügbarem P, Ca, Magnesium (Mg), sowie mit einer höheren spezifischen Oberfläche und Kationenaustauschkapazität (KAK) im Vergleich zur schnellen Pyrolyse zu erzeugen. Die aktuelle Literatur enthält eine Fülle an Informationen bezüglich der Wahl des Ausgangsmaterials, der Pyrolyseart und der Temperatur. Allerdings gibt es noch immer in der Literatur eine gewisse Unsicherheit mit zum Teil sehr vagen Beschreibungen, wie die Pflanzkohleeigenschaften durch die Wahl des Ausgangsmaterials, des Pyrolysetyps und der verwendeten Temperatur beeinflusst werden [35].

Nichtsdestotrotz, Ippolito und Kollegen (2020) schlussfolgerten in einer umfassenden Meta-Studie, dass der vielleicht wichtigste Einfluss auf die endgültigen Kohleeigenschaften die Wahl des Ausgangsmaterials ist. Die Pyrolyse von holzbasierten Restbiomassen erzeugt typischerweise eine Pflanzkohle, die im Vergleich zu anderen Biomassen die größte spezifische Oberfläche aufweist. Pflanzen-, Gras- und Mist-/Biofeststoff-basierte Biomassen führen üblicherweise zu Pflanzkohlen, die im Vergleich zu holzbasierten Kohlen eine erhöhte KAK aufweist. Basierend auf dem von Ippolito und Kollegen (2020) evaluierten Datensatz scheint es möglich zu sein, einige Pflanzkohle-Nährstoffe einfach aus der Gesamtnährstoffanalyse vorherzusagen. Die gesammelten Daten zeigten nämlich, dass Ippolito und Kollegen (2020) zum einen den verfügbaren N aus Weichholz-, Mais-, Schweine- und Rindergülle-Kohlen, ferner den verfügbaren P aus Mais-, Weizen- und Reisstroh-Kohlen, sowie den verfügbaren K aus Hartholz-, Weichholz- und Weizenkohlen einigermaßen vorhersagen konnten.

Derzeit wird die Anwendung von Pflanzkohle in der Landwirtschaft, ob zur Bodenverbesserung oder in der Tierhaltung, hauptsächlich durch die Kosten der Pflanzkohleproduktion und -anwendung begrenzt, die höher sind als die Kosten anderer organischer Materialien, die typischerweise verwendet werden. Die Kosten des Ausgangsmaterials sind ein entscheidender Input für die Wirtschaftlichkeitsanalyse, besonders wenn Pflanzkohle aus reiner Holzbiomasse hergestellt wird. Um die Produktionskosten zu senken, werden andere alternative Ausgangsstoffe wie landwirtschaftliche und städtische Abfälle derzeit untersucht [37]. In entwickelten Ländern hat die Verwendung von organischen Abfällen als billiger Rohstoff mehrere Vorteile, da diese Abfälle kostenlos zur Verfügung stehen oder sogar Einnahmen generieren und/oder Entsorgungskosten sparen [38].

Pflanzkohle in der Tierhaltung

Die vorrangige Wirkung von Pflanzkohle in der Geruchs- und Nährstoffbindung kann sehr gut im Stallmanagement genutzt werden. Dabei geht es nicht nur um die N-Bindung, sondern auch um die Verbesserung des Stallklimas. Durch den Einsatz von Pflanzkohle wird auch die Verrottung der Gülle gefördert. Durch die Reduzierung der Verluste kann die Humusbildung auf dem Feld wiederum gefördert werden. Da hochwertige Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen ungiftig und damit sogar fütterbar und essbar sind, veranlasste dies zahlreiche Landwirte Versuche durchzuführen, bei denen Pflanzkohle nicht nur mit Gülle gemischt wurde, sondern auch als Input in ihre Tierhaltungssysteme einbezogen wurde. Die schrittweise Zugabe von Pflanzkohle zu Silage, Futter, Einstreumaterial und Güllegrube zeigte, dass Pflanzkohle in Kaskaden eingesetzt werden kann [39]. Zusätzlich zu den direkten Vorteilen für die Tierhaltung, die weiter unten im Detail diskutiert werden, wird Pflanzkohle so mit organischen Nährstoffen angereichert, was die Wirtschaftlichkeit der Biokohleanwendung erhöht und gleichzeitig zahlreiche Umweltvorteile entlang des (kaskadischen) Weges bietet [39].

Wenn Pflanzenkohle mit Silage kombiniert wird, kann sie die Bildung von Mykotoxinen reduzieren, Pestizide binden, die Bildung von Buttersäure unterdrücken und die Menge an Milchsäurebakterien erhöhen [40]. Landwirte beobachteten, dass bei der Kombination von Pflanzenkohle mit Stroh oder Sägemehl-Einstreu bei 5-10 vol% Klauenkrankheiten, Gerüche und Nährstoffverluste reduziert werden konnten [40]. Außerdem berichteten Landwirte, dass die Zugabe von 0,1 % Pflanzenkohle in einer Güllegrube Gerüche, Oberflächenkrusten und Nährstoffverluste reduzierte [3, 41]. Während dieser Kaskaden wird die Pflanzenkohle mit organischen Nährstoffen und funktionellen Gruppen angereichert, während die KAK und Redoxaktivität steigt und der pH-Wert sinkt [42]. Analysen zeigen, dass durch die Anreicherung der Pflanzenkohle mit flüssigen organischen Nährstoffen (sei es im Verdauungstrakt, in der Einstreu, in der Güllegrube oder durch Co-Kompostierung) die inneren Oberflächen der porösen Kohle mit einer organischen Schicht durchtränkt werden [42, 43]. Dies erhöht sowohl die Wasserspeicherkapazität als auch die Nährstoffaustauschkapazität [44, 45]. Die Pflanzenkohle wird so zu einem effizienteren pflanzenwachstumsfördernden Bodenzusatz, der das Recycling von Nährstoffen aus organischen Reststoffen der Tierhaltung verbessert [46]. Der kaskadische Einsatz von Pflanzenkohle in Tierhaltungssystemen reduziert auch den umweltschädlichen Verlust von Ammoniak durch Verflüchtigung oder Nitrat durch Auswaschung [47] und hat das Potenzial, Treibhausgasemissionen wie Lachgas (N_2O) [3, 48] oder Methan (CH_4) [49] zu reduzieren.

Als im Jahr 2012 die kaskadische Nutzung von Pflanzenkohle und insbesondere deren Zugabe zu Futtermitteln in Deutschland und der Schweiz begann, begann auch der Pflanzenkohlemarkt in Europa erheblich zu wachsen. Seitdem wird der größte Teil der industriell hergestellten Pflanzenkohle in Europa für Tierfutter, Einstreu, Güllebehandlung und damit für die anschließende Bodenausbringung verkauft [3]. Der Hersteller "Sonnenerde" in Österreich bietet beispielsweise grobkörnige Pflanzenkohle an, die aus Getreidespelzen hergestellt wird und keine Flecken verursacht (Abbildung 9). Der Hersteller gibt an, dass die Tiere sie auch problemlos fressen können. Die zertifizierte Pflanzenkohle kann sowohl in konventionellen als auch in biologischen Betrieben eingesetzt werden. Die biologisch erzeugte Pflanzenkohle wird zu einem Preis von 1,50 - 1,75 EUR/kg, je nach Abnahmemenge, verkauft. Im Jahr 2016 führte die European Biochar Foundation einen neuen Biokohle-Zertifizierungsstandard speziell für Tierfutter ein (European Biochar Foundation (EBC), 2018), um eine Qualitätskontrolle sowie die Konformität mit europäischen Vorschriften für Tierfutter zu ermöglichen.



Abbildung 9 Pflanzenkohle aus Getreidespelzen als Einstreuzusatz in der Tierhaltung.

Bei oraler Aufnahme verbessert Pflanzenkohle nachweislich die Wirksamkeit der Nährstoffaufnahme, adsorbiert Toxine und verbessert allgemein die Tiergesundheit [50]. Aguilar und Kollegen (2013) [51] untersuchten unter kontrollierten Laborbedingungen die Wirksamkeit der Anwendung von organischen Rückständen, wie Präriegras, Sorghumstroh und Holzspäne, Pflanzen- bzw. Holzkohle (hergestellt sowohl aus den zuvor erwähnten organischen Rückständen als auch aus losem und pelletiertem Rindermist) und Aktivkohle bei

der Emissionskontrolle von Distickstoffmonoxid (N_2O), umgangssprachlich auch als Lachgas bezeichnet, Methan (CH_4) und Kohlestoffdioxid (CO_2) in Rindermastställen [51]. Die Ergebnisse zeigten, dass die topische Anwendung von organischen Rückständen und Kohle auf trockener Gülle eine signifikante Reduzierung der N_2O - und CO_2 -Emissionen zeigte, aber keinen Einfluss auf die CH_4 -Emissionen hatte (Abbildung 10). Bei der Anwendung auf feuchter Gülle hatten die organischen Rückstände keinen signifikanten Einfluss auf die THG-Emissionen. Die topische Anwendung von Pflanzen- bzw. Holzkohle zeigte in den ersten 8 Tagen keine signifikante Reduzierung der THG-Emissionen. Ab dem 10. und 15. Tag reduzierte die Anwendung von Pflanzenkohle-Materialien signifikant die N_2O - (bis zu 63 %) und CH_4 -Emissionen (bis zu 73 %) im Vergleich zur Kontrolle (d.h. ohne eine Zusatzeinstreu). Dabei erschien die eingestreute Pflanzenkohle welche aus Dung (lose oder pelletiert) hergestellt wurde, das vielversprechendste Material zur Reduzierung der THG-Emissionen von Stalloberflächen zu sein, da ihre Wirkung ähnlich der von Aktivkohle war. Die Methode der Anwendung von Kohle (d.h. topisch vs. gemischt) hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Wirksamkeit des Materials bei der Reduzierung der THG-Emissionen. Die Adsorption an der Kohle oder der Aktivkohle schien ein Mechanismus zur Verringerung der N_2O -Emissionen aus Futtermittelgülle zu sein. Jedoch auch andere Mechanismen wie z.B. die NH_4^+ - Immobilisierung, NO_3^- - Adsorption und NH_4^+ - Adsorption spielen höchstwahrscheinlich bei der N_2O -Minderung eine wesentliche Rolle [51].

Hinsichtlich des Einsatzes von Pflanzenkohle in der Geflügelhaltung, schrieben Totsek und sein Kollege Beeson bereits im Jahr 1953, dass Kohleprodukte seit mindestens 1880 in der US-amerikanischen Schweinemast und seit 1940 im Futter für Geflügel verwendet werden [52]. Von allen Veröffentlichungen über den leistungssteigernden Einsatz von Pflanzenkohle hat sich ein Großteil auf die Verwendung bei Geflügel konzentriert, nicht zuletzt, weil wissenschaftliche Studien mit Geflügel einfacher und kostengünstiger durchzuführen sind als mit großen Wiederkäuern oder Schweinen [39]. Eine der häufiger zitierten Studien ist die von Kana und Kollegen (2010) [53], die systematisch zwei verschiedene Pflanzenkohlen, eine aus Maiskolben und die andere aus Kanarienbaumsamen (*Bakeridesia integerrima*), an Masthühner in unterschiedlichen Fütterungskonzentrationen von 0 % bis 1 % pro kg Futter verfütterten. Die Fütterung beider Biokohlen führten zu einer bis zu 0,6 % größeren, meist signifikanten Gewichtszunahmen, während die höheren Dosierungen zu keiner weiteren signifikanten Gewichtszunahme, aber auch zu keinem Gewichtsverlust im Vergleich zur Kontrolle führten. Die Studie ist ein wichtiger Hinweis darauf, dass Pflanzenkohle, die aus nicht-holziger Biomasse gewonnen wird und einen höheren Aschegehalt aufweist, auch für die Fütterung geeignet sein könnte, was bisher von der European Biochar Foundation (EBC) (2012) nicht erlaubt ist [39]. In einer späteren Studie mit denselben Pflanzenkohlen untersuchten die Autoren, ob Hühner dank des Kohle-Zusatzes mit 20 % Kichererbsen gefüttert werden können, einem Futtermittel, das zwar eiweißreich ist, aber im Allgemeinen von Hühnern schwer verdaut werden kann. Überraschenderweise konnten bei Zugabe der aschereichen Pflanzenkohle aus Maiskolben die gekochten Kichererbsen gefüttert werden und sorgten für die gleiche Gewichtszunahme bei den Broilern wie die Kontrolle ohne Kichererbsen. Die aschearme Pflanzenkohle aus den Baumsamen zeigte hier jedoch nicht den gleichen Effekt [53].

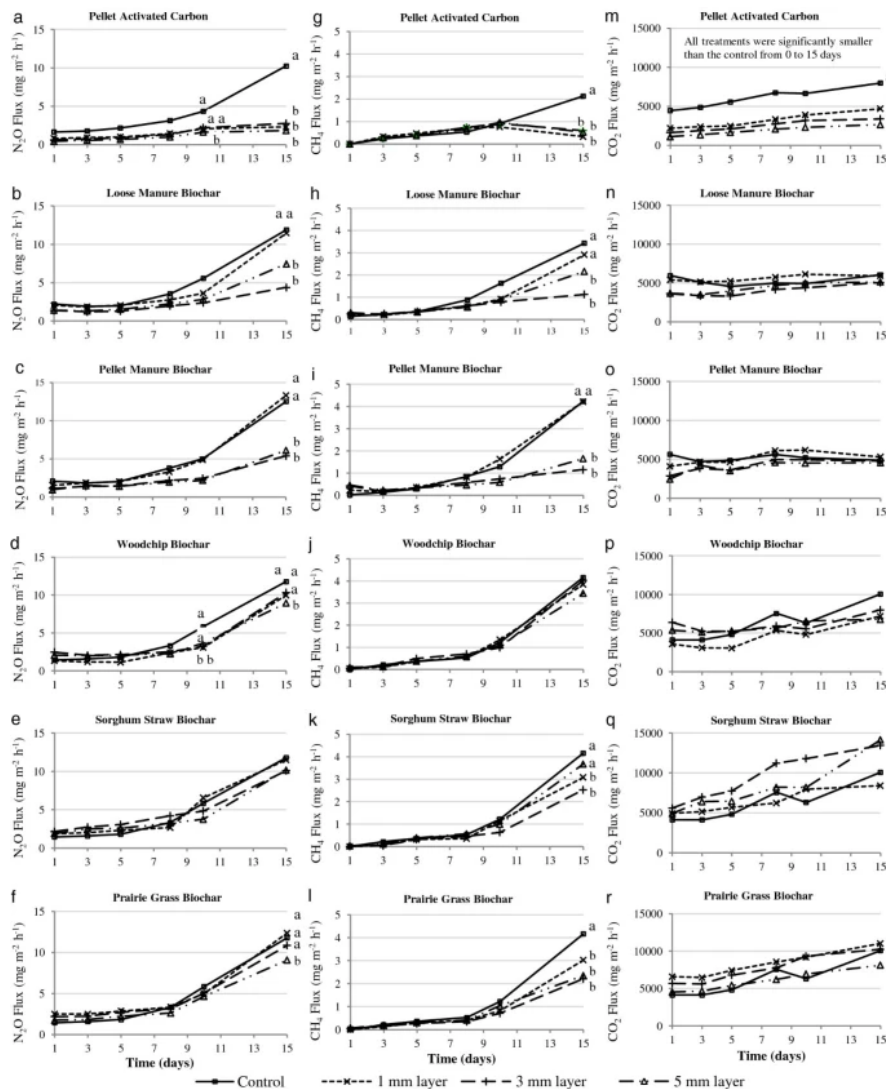


Abbildung 10 Auswirkungen der topischen Anwendung von Pflanzenkohle (Biochar) und Aktivkohle (Activated carbon) auf THG-Emissionen aus Feuchtmist. Quelle: [51]

Bakr (2007) verwendete traditionell hergestellte Zitrusholzkohle, die auf dem lokalen Markt in Nablus gekauft wurde, und fügte sie in sehr hohen Dosierungen von 0 %, 2 %, 4 % und 8 % dem Standard-Masthähnchenfutter zu. Bei 2 % wurden während der ersten drei Wochen signifikante Steigerungen des Körpergewichts, der Futteraufnahme und der Futtereffizienz im Vergleich zur Kontrolle gemessen. Nach dieser anfänglichen Periode waren alle Ergebnisse ähnlich. Besonders bemerkenswert an dieser Studie ist, dass selbst die sehr hohe Fütterungsdosis von 8 % einer Pflanzenkohle von zumindest zweifelhafter Qualität keine nachteiligen Effekte verursachte. Kutlu, Ünsal & Görgülü (2001) [54] verwendeten ebenfalls sehr hohe Pflanzenkohle-Dosierungen von bis zu 10 % des Grundfutters und stellten fest, dass alle Dosierungen die Grundfutteraufnahme in den ersten 28 Tagen signifikant erhöhten, ebenso die Gewichtszunahme und die Futtereffizienz sowohl von Masthähnchen als auch von Legehennen, aber sie zeigten keine signifikant höheren Zunahmen nach dieser Anfangsperiode [39].

Eine polnische Arbeitsgruppe unter Leitung von Teresa Majewska führte zwischen 2000 und 2012 mehrere Fütterungsversuche an Hühnern und Puten durch [55]. Sie erzielten durchweg positive Ergebnisse mit Dosierungen von 0,3 % einer Hartholz-Kohle. Sie fanden nicht nur eine höhere Gewichtszunahme und eine bessere Futtereffizienz, sondern auch höhere

Proteingehalte in den Brustmuskeln und eine signifikant niedrigere Mortalität im Vergleich zur Kontrolle. Majewska et al. erklärten diese Verbesserungen durch (1) die Entgiftung von Futterbestandteilen, (2) die Reduzierung der Oberflächenspannung des Verdauungsbreis und (3) die Verbesserung des Fettabbaus in der Leber [39]. Auch in der Legehennenhaltung konnten mehreren Studien beobachten, dass die Festigkeit der Eierschalen durch die Zufütterung von Pflanzenkohle verbessert werden konnte [54]. Yamauchi, Ruttanavut & Takenoyama (2010) fanden eine Steigerung der Eierproduktion von fast 5 %, wenn Hennen mit einer Mischung aus Bambus-Pflanzenkohle und Holzessig gefüttert wurden [56].

Schmidt und Kollegen (2019) schlussfolgerten in einer umfangreichen Meta-Studie dass die Verwendung von Pflanzen- und Pflanzenaktivkohle als Futtermittelzusatz in der Tierhaltung das Potenzial hat, die Tiergesundheit, die Futtermitteleffizienz und die Produktivität des Viehbestands zu verbessern, Nährstoffverluste und Treibhausgasemissionen zu reduzieren und die Dungqualität und damit die Bodenfruchtbarkeit zu erhöhen. In Kombination mit anderen guten landwirtschaftlichen Praktiken könnte Pflanzenkohle die gesamte Nachhaltigkeit der Tierhaltung verbessern. Die Analyse von 112 wissenschaftlichen Arbeiten über Biokohle-Futterzusätze hatte gezeigt, dass in den meisten Studien und für alle Nutztierarten positive Effekte auf verschiedene Parameter wie Wachstum, Verdauung, Futtereffizienz, Toxinadsorption, Blutwerte, Fleischqualität und/oder Emissionen gefunden werden konnten [39]. Ein relevanter Teil der Studien erzielte jedoch Ergebnisse, die statistisch nicht signifikant waren. Am wichtigsten ist aber, dass in keiner der überprüften Publikationen signifikante negative Auswirkungen auf die Tiergesundheit gefunden wurden.

Das EIP-Agri Projekt „CarboFeet“ untersuchte die Beimischung von zertifizierter Pflanzenkohle im Mischfutter von Putenhähnen und Masthühnern unter besonderer Berücksichtigung von Tierwohlaspekten. Obgleich dieses Projekt keine nennenswert schnellere Gewichtsentwicklung bei Masthühnern und Puten durch den Einsatz von Futterkohle feststellen konnte, so fand diese OG jedoch einen positiven Effekt der Kohle auf die Tiergesundheit. So wiesen Masthühner mit Kohle in der Einstreu gesündere Fußballen mit signifikant weniger Entzündungen und Läsionen auf [5, 6].

Somit ist abschließend noch einmal auf die Besonderheit von Pflanzenkohle verwiesen, welche durch eine enorme Oberfläche des Kohlenstoffgerüsts mit Hohlräumen und Poren, in denen Wasser und auch Nährstoffe (zum Beispiel auch N-Verbindungen, die an der Luft Ammoniak freisetzen) gespeichert werden können, charakterisiert ist. Eine Studie der Landwirtschaftskammer Niedersachsen setzte 100 g aktivierter Pflanzenkohle zu je 1.000 g Strohgranulat und 1 m² Stallboden in einem Hähnchenstall ein. Es konnte festgestellt werden, dass die Einstreu scharffähiger und trockener blieb und die Fußballen der Masthähnchen wurden durch den Schlachthof objektiv als besser bewertet, im Gegensatz zu den zeitgleichen Kontrolldurchgängen. Die Versuchsteilnehmer berichteten, dass die Stallluft angenehmer, die Tiere vitaler und die Kotkonsistenz fester war.

Grundsätzlich stellen Pflanzen- und Aktivkohlen aus biogenen Reststoffen ein vielversprechendes Material als Einstreuzusatz in der Geflügelhaltung zur Reduzierung und Prävention von Fußballenläsionen und Ammoniak-Emissionen dar. Konkrete und belastbare Ergebnisse hinsichtlich der Wirkungseffizienz der eingesetzten Pflanzenkohlen fehlen jedoch gänzlich, weswegen hier ein dringender Forschungsbedarf besteht. So könnten die im EIP-Agri-Projekt CAREFUL gewonnenen Ergebnisse dazu beitragen, wesentliche Wissenslücken im Hinblick auf die Wirkungsweise von verschiedenen Pflanzenkohlen in Bereich der Mastgeflügelhaltung zu schließen.

Literatur

- [1] A.I. Casoni; V.S. Gutierrez; M.A. Volpe; P.M. Hoch. Synthesis of Value Added Product Processes from Residual Biomass. In: *13th International Symposium on Process Systems Engineering (PSE 2018)*. Mario R. Eden, Marianthi G. Ierapetritou, Gavin P. Towler, Eds.; Elsevier, **2018**; Vol. 44; pp. 397–402.
- [2] Tomczyk, A.; Sokołowska, Z.; Boguta, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Rev Environ Sci Biotechnol*, **2020**, 19, 191–215.
- [3] Kammann, C.; IPPOLITO, J.; Hagemann, N.; Borchard, N.; Cayuela, M.L.; ESTAVILLO, J.M.; Fuertes-Mendizabal, T.; JEFFERY, S.; KERN, J.; Novak, J.; RASSE, D.; SAARNIO, S.; Schmidt, H.-P.; Spokas, K.; Wrage-Mönnig, N. Biochar as a tool to reduce the agricultural greenhouse-gas burden - knows, unknowns and future research needs. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, **2017**, 25, 114–139.
- [4] Hessische Statistische Landesamt. Landwirtschaftszählung 2020. www.statistik.hessen.de (Accessed January 15, 2021).
- [5] Hinz, K.; Stracke, J.; Schättler, J.K.; Kemper, N.; Spindler, B. Effects of Enriched Charcoal as Permanent 0.2% Feed-Additive in Standard and Low-Protein Diets of Male Fattening Turkeys: An On-Farm Study. *Animals : an open access journal from MDPI*, **2019**, 9.
- [6] Hinz*, K.; Stracke, J.; Schättler, J.K.; Spindler, B.; Kemper, N. *Foot pad health and growth performance in broiler chickens as affected by supplemental charcoal and fermented herb extract (FKE): an on-farm study*; Verlag Eugen Ulmer, **2019**.
- [7] Riber, A.B.; Rangstrup-Christensen, L.; Hansen, M.S.; Hinrichsen, L.K.; Herskin, M.S. Characterisation of footpad lesions in organic and conventional broilers. *Animal : an international journal of animal bioscience*, **2020**, 14, 119–128.
- [8] Dreier, T., Ed. *Ganzheitliche Systemanalyse und Potenziale biogener Kraftstoffe*; E und M Energie-und-Management-Verl.-Ges: Herrsching, **2000**.
- [9] FNR - Agency for Renewable Resources. S2Biom Database of biomass conversion technologies. www.s2biom.eu (Accessed January 15, 2021).
- [10] Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. *Wald- und Wuchsgebiete in Hessen*, **2021**.
- [11] Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. *Waldzustandsbericht 2020: Kassel*, **2020**.
- [12] Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. *Biomassepotenzialstudie Hessen – Stand und Perspektiven der energetischen Biomassenutzung in Hessen: Materialband*; Wiesbaden, **2010**.
- [13] Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen. *Stand und Perspektiven des Energiepflanzenanbaus in Hessen: Bedeutung, Anbauverfahren, Nachhaltigkeit*; Kassel, **2012**.
- [14] Pude, R. Aktuelle Informationen aus der Miscanthus-Forschung. www.miscanthus.de (Accessed Januar 2021).
- [15] OpenGeoEdu, Geo-Informationssysteme, CC BY-SA 4.0. Biomassepotenzial, Beispiel Getreidestroh (Accessed Januar 2021).
- [16] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 2nd ed.; Springer: Heidelberg, **2009**.
- [17] Piepenschneider, M.; Bühle, L.; Hensgen, F.; Wachendorf, M. Energy recovery from grass of urban roadside verges by anaerobic digestion and combustion after pre-processing. *Biomass and Bioenergy*, **2016**, 85, 278–287.
- [18] Robrecht, C. *Alternatives Verwertungskonzept für Straßenbegleitgrün und Bioabfall im Landkreis Kassel: B.Sc. Arbeit*; Witzenhausen, **2019**.
- [19] Ayala-Zavala, J.F.; Vega-Vega, V.; Rosas-Domínguez, C.; Palafox-Carlos, H.; Villa-Rodríguez, J.A.; Siddiqui, M.W.; Dávila-Aviña, J.E.; González-Aguilar, G.A. Agro-

- industrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives. *Food Research International*, **2011**, *44*, 1866–1874.
- [20] Girotto, F.; Alibardi, L.; Cossu, R. Food waste generation and industrial uses: A review. *Waste management (New York, N.Y.)*, **2015**, *45*, 32–41.
- [21] Nóvoa-Muñoz, J.C.; Simal-Gándara, J.; Fernández-Calviño, D.; López-Periago, E.; Arias-Estévez, M. Changes in soil properties and in the growth of *Lolium multiflorum* in an acid soil amended with a solid waste from wineries. *Bioresource technology*, **2008**, *99*, 6771–6779.
- [22] Pateiro-Moure, M.; Nóvoa-Muñoz, J.C.; Arias-Estévez, M.; López-Periago, E.; Martínez-Carballo, E.; Simal-Gándara, J. Quaternary herbicides retention by the amendment of acid soils with a bentonite-based waste from wineries. *Journal of hazardous materials*, **2009**, *164*, 769–775.
- [23] Pavlovich-Abril, A.; Rouzaud-Sández, O.; Torres, P.; Robles-Sánchez, R.M. Cereal bran and wholegrain as a source of dietary fibre: technological and health aspects. *International journal of food sciences and nutrition*, **2012**, *63*, 882–892.
- [24] Hemery, Y.; Chaurand, M.; Holopainen, U.; Lampi, A.-M.; Lehtinen, P.; Piironen, V.; Sadoudi, A.; Rouau, X. Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part I: Influence of ultra-fine grinding. *Journal of Cereal Science*, **2011**, *53*, 1–8.
- [25] Hemery, Y.; Holopainen, U.; Lampi, A.-M.; Lehtinen, P.; Nurmi, T.; Piironen, V.; Edelman, M.; Rouau, X. Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part II: Electrostatic separation of particles. *Journal of Cereal Science*, **2011**, *53*, 9–18.
- [26] Marconi, E.; Graziano, M.; Cubadda, R. Composition and Utilization of Barley Pearling By-Products for Making Functional Pastas Rich in Dietary Fiber and β -Glucans. *Cereal Chemistry Journal*, **2000**, *77*, 133–139.
- [27] Wiemer, K.; Kern, M.; Raussen, T., Eds. *Biogas-Atlas 2014/15: Anlagenhandbuch der Vergärung biogener Abfälle in Deutschland und Europa*; Witzenhausen-Institut f. Abfall, Umwelt u. Energie: Witzenhausen, **2014**.
- [28] Werner, F.; Althaus, H.-J.; Richter, K. Post-consumer wood in environmental decision-support tools. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, **2002**, 97–106.
- [29] Stahel, R.; Schuler, B.; Ledergerber, E. *Altholz, eine vernachlässigte Ressource: NFP 12, Holz, erneuerbare Rohstoff-und Energiequelle*; Rügger, **1987**.
- [30] Hekkert, M.P.; Joosten, L.A.J.; Worrell, E. Reduction of CO₂ emissions by improved management of material and product use: the case of transport packaging. *Resources, Conservation and Recycling*, **2000**, *30*, 1–27.
- [31] Spokas, K.A. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, **2010**, *1*, 289–303.
- [32] Cao, X.; Sun, S.; Sun, R. Application of biochar-based catalysts in biomass upgrading: a review. *RSC Adv*, **2017**, *7*, 48793–48805.
- [33] Novak, J.M.; Sigua, G.C.; Ducey, T.F.; Watts, D.W.; Stone, K.C. Designer Biochars Impact on Corn Grain Yields, Biomass Production, and Fertility Properties of a Highly-Weathered Ultisol. *Environments*, **2019**, *6*, 64.
- [34] Funke, A.; Ziegler, F. Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, **2010**, *4*, 160–177.
- [35] Ippolito, J.A.; Cui, L.; Kammann, C.; Wrage-Mönnig, N.; Estavillo, J.M.; Fuertes-Mendizabal, T.; Cayuela, M.L.; Sigua, G.; Novak, J.; Spokas, K.; Borchard, N. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*, **2020**, *2*, 421–438.

- [36] Nguyen, T.T.N.; Xu, C.-Y.; Tahmasbian, I.; Che, R.; Xu, Z.; Zhou, X.; Wallace, H.M.; Bai, S.H. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis. *Geoderma*, **2017**, *288*, 79–96.
- [37] Meyer-Kohlstock, D.; Schmitz, T.; Kraft, E. OrganicWaste for Compost and Biochar in the EU: Mobilizing the Potential. *Resources*, **2015**, *4*, 457–475.
- [38] López-Cano, I.; Cayuela, M.; Sánchez-García, M.; Sánchez-Monedero, M. Suitability of Different Agricultural and Urban Organic Wastes as Feedstocks for the Production of Biochar—Part 2: Agronomical Evaluation as Soil Amendment. *Sustainability*, **2018**, *10*, 2077.
- [39] Schmidt, H.-P.; Hagemann, N.; Draper, K.; Kammann, C. The use of biochar in animal feeding. *PeerJ*, **2019**, *7*, e7373.
- [40] Calvelo Pereira, R.; Muetzel, S.; Camps Arbestain, M.; Bishop, P.; Hina, K.; Hedley, M. Assessment of the influence of biochar on rumen and silage fermentation: A laboratory-scale experiment. *Animal Feed Science and Technology*, **2014**, *196*, 22–31.
- [41] Schmidt, H.P. Schmidt, H. P. (2012). Treating liquid manure with biochar. *Ithaka Journal*, *2012*, 273–276.
- [42] Joseph, S.; Kammann, C.I.; Shepherd, J.G.; Conte, P.; Schmidt, H.-P.; Hagemann, N.; Rich, A.M.; Marjo, C.E.; Allen, J.; Munroe, P.; Mitchell, D.R.G.; Donne, S.; Spokas, K.; Graber, E.R. Microstructural and associated chemical changes during the composting of a high temperature biochar: Mechanisms for nitrate, phosphate and other nutrient retention and release. *The Science of the total environment*, **2018**, *618*, 1210–1223.
- [43] Hagemann, N.; Joseph, S.; Schmidt, H.-P.; Kammann, C.I.; Harter, J.; Borch, T.; Young, R.B.; Varga, K.; Taherymoosavi, S.; Elliott, K.W.; McKenna, A.; Albu, M.; Mayrhofer, C.; Obst, M.; Conte, P.; Dieguez-Alonso, A.; Orsetti, S.; Subdiaga, E.; Behrens, S.; Kappler, A. Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility. *Nature communications*, **2017**, *8*, 1089.
- [44] Schmidt, H.; Pandit, B.; Martinsen, V.; Cornelissen, G.; Conte, P.; Kammann, C. Fourfold Increase in Pumpkin Yield in Response to Low-Dosage Root Zone Application of Urine-Enhanced Biochar to a Fertile Tropical Soil. *Agriculture*, **2015**, *5*, 723–741.
- [45] Conte, P.; Marsala, V.; Pasquale, C. de; Bubici, S.; Valagussa, M.; Pozzi, A.; Alonzo, G. Nature of water-biochar interface interactions. *GCB Bioenergy*, **2013**, *5*, 116–121.
- [46] Kammann, C.I.; Schmidt, H.-P.; Messerschmidt, N.; Linsel, S.; Steffens, D.; Müller, C.; Koyro, H.-W.; Conte, P.; Joseph, S. Erratum: Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Scientific reports*, **2015**, *5*, 12378.
- [47] Liu, Q.; Zhang, Y.; Liu, B.; Amonette, J.E.; Lin, Z.; Liu, G.; Ambus, P.; Xie, Z. How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis. *Plant Soil*, **2018**, *426*, 211–225.
- [48] Borchard, N.; Schirrmann, M.; Cayuela, M.L.; Kammann, C.; Wrage-Mönnig, N.; Estavillo, J.M.; Fuertes-Mendizábal, T.; Sigua, G.; Spokas, K.; Ippolito, J.A.; Novak, J. Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis. *The Science of the total environment*, **2019**, *651*, 2354–2364.
- [49] JEFFERY, S.; Verheijen, F.G.; Kammann, C.; Abalos, D. Biochar effects on methane emissions from soils: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, **2016**, *101*, 251–258.
- [50] Toth, J.D.; Dou, Z. Use and Impact of Biochar and Charcoal in Animal Production Systems. In: *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*. Guo, M., He, Z., Uchimiya, S.M., Eds.; American Society of Agronomy and Soil Science Society of America: Madison, WI, USA, **2016**; pp. 199–224.
- [51] Aguilar, O.A.; Maghirang, R.; Trabue, S.L.; Rice, C.W.; Erickson, L.E. Laboratory evaluation of surface amendments for controlling greenhouse gas emissions from beef cattle feedlots. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, **2013**, *4*, 1–14.

- [52] Totusek, R.; Beeson, W.M. The Nutritive Value of Wood Charcoal for Pigs. *Journal of Animal Science*, **1953**, *12*, 271–281.
- [53] Kana, J.R.; Tegua, A.; Mungfu, B.M.; Tchoumboue, J. Growth performance and carcass characteristics of broiler chickens fed diets supplemented with graded levels of charcoal from maize cob or seed of *Canarium schweinfurthii* Engl. *Tropical animal health and production*, **2011**, *43*, 51–56.
- [54] Kutlu, H.R.; Ünsal, I.; Görgülü, M. Effects of providing dietary wood (oak) charcoal to broiler chicks and laying hens. *Animal Feed Science and Technology*, **2001**, *90*, 213–226.
- [55] Majewska, T.; Mikulski, D.; Siwik, T. Silica grit, charcoal and hardwood ash in turkey nutrition. *J. Elem.*, **2012**.
- [56] Yamauchi, K.; Ruttanavut, J.; Takenoyama, S. Effects of dietary bamboo charcoal powder including vinegar liquid on chicken performance and histological alterations of intestine. *J. Anim. Feed Sci.*, **2010**, *19*, 257–268.

Abbildungsquellen

Titelbild Celsius at wikivoyage shared, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

Abbildung 1 Hagar66, CC0, via Wikimedia Commons

Abbildung 2 (links & rechts) Celsius at wikivoyage shared, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons; (Mitte) H2OMy at German Wikipedia, Public domain, via Wikimedia Commons

Abbildung 3 GNR, Universität Kassel

Abbildung 4 Alakangas, VTT; <https://www.eubia.org/cms/wiki-biomass/biomass-resources/challenges-related-to-biomass/recovery-of-forest-residues>

Abbildung 5 Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)

[ps://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/bilder/fittosize__600_0_32657e079ca058f1635e34656b762e78_26012016_hm_miscanthus_giganteus.jpg](https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/bilder/fittosize__600_0_32657e079ca058f1635e34656b762e78_26012016_hm_miscanthus_giganteus.jpg)

Abbildung 6 (links) Paul Trainer (DBFZ),

<https://learn.opengeoedu.de/biomassepotenzial/vorlesung/beispiel/getreidestroh>; (Mitte) Bodoklecksell, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons; (rechts) No machine-readable author provided. Jonathunder assumed (based on copyright claims)., CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

Abbildung 7 (links) Aebi Schmidt, <https://baumaschinen.online/artikel/transporter-faehrt-stufenlos-von-null-bis-000508>; (rechts) Behringer, <https://www.behringer-landschaftspflege.de/landschaftspflege/heckenschnitt/>

Abbildung 8 (links) Przykuta, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons; (Mitte) CC0 Public Domain, <https://pxhere.com/de/photo/76984>; (rechts) RenFuel, <https://renfuel.se/wp-content/uploads/2018/07/Svartlut1-1.jpg>

Abbildung 9 (links und Mitte) www.biomassehof.de, (rechts) www.sonnenerde.at

Abbildung 10 aus Aguilar, O.A.; Maghirang, R.; Trabue, S.L.; Rice, C.W.; Erickson, L.E. Laboratory evaluation of surface amendments for controlling greenhouse gas emissions from beef cattle feedlots. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, **2013**, *4*, 1–14.