



Foto: K. Stenchly

# OG CAREFUL - Pflanzenkohle als Geflügeleinstreu

## Abschlussbericht

Kathrin Stenchly, Korbinian Kaetzl, Anna Olschewsky, Melissa Gurny, Frauke Umbach,  
Michael Wachendorf und Ute Knierim

September 2023



Europäischer Landwirtschaftsfonds für  
die Entwicklung des ländlichen Raums:  
Hier investiert Europa  
in die ländlichen Gebiete.



Hessen nimmt an der  
Europäischen Innovations-  
partnerschaft (EIP) teil.



## Impressum

### Hauptverantwortlicher der OG

Universität Kassel  
Prof. Dr. Michael Wachendorf  
Fachgebiet Grünlandwissenschaft und  
Nachwachsende Rohstoffe  
Steinstraße 19  
37213 Witzenhausen  
Tel.: +49 5542 98-1334  
E-Mail: [mwach@uni-kassel.de](mailto:mwach@uni-kassel.de)

Universität Kassel  
Prof. Dr. Ute Knierim  
Fachgebiet Nutztierethologie und  
Tierhaltung  
Nordbahnhofstraße 1a  
37213 Witzenhausen  
Tel.: +49 5542 98-1647  
E-Mail: [uknierim@uni-kassel.de](mailto:uknierim@uni-kassel.de)

### Für die Förderung zuständige ELER-Verwaltungsbehörde:

Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz,  
Landwirtschaft und Verbraucherschutz  
- ELER-Verwaltungsbehörde -  
Referat VII 6  
Mainzer Straße 80  
65189 Wiesbaden  
E-Mail: [eler@umwelt.hessen.de](mailto:eler@umwelt.hessen.de)  
Internet: [www.eler.hessen.de](http://www.eler.hessen.de)

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	iv
Tabellenverzeichnis .....	vi
Abkürzungsverzeichnis .....	vii
1 Vorhabenplanung .....	1
1.1 Erläuterung der Situation zu Vorhabenbeginn .....	1
1.2 Aufgabenstellung und Zielformulierung des Vorhabens .....	2
1.3 Arbeitsplan .....	2
2 Verlauf des Vorhabens .....	5
2.1 Arbeitspaket 1 „Laufende Zusammenarbeit der OG“ .....	5
2.2 Arbeitspaket 2 „Quantifizierung des Restbiomassepotenzials“ .....	5
2.3 Arbeitspaket 3 „Herstellung und Charakterisierung von Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen“ .....	8
2.4 Arbeitspaket 4 „Praxisversuche mit Kohle als Einstreuzusatz“ .....	23
2.5 Arbeitspaket 5 „Ökonomie - Wertschöpfungsketten und Businessplan“ .....	33
3 Ergebnisse und Zielerreichung .....	34
3.1 Haupt- und Nebenergebnisse des Vorhabens .....	34
3.1.1 Arbeitspaket 1 „Laufende Zusammenarbeit der OG“ .....	34
3.1.2 Arbeitspaket 2 „Quantifizierung des Restbiomassepotenzials“ .....	36
3.1.3 Arbeitspaket 3 „Herstellung und Charakterisierung von Pflanzen- und Aktivkohlen“ .....	37
3.1.4 Arbeitspaket 4 „Praxisversuche mit Kohle als Einstreuzusatz“ .....	51
3.1.5 Arbeitspaket 5 „Ökonomie - Wertschöpfungsketten und Businessplan“ .....	65
3.2 Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen .....	66
3.3 Erreichung der Ziele des Vorhabens .....	67
3.3.1 Arbeitspaket 1 „Laufende Zusammenarbeit der OG“ .....	67
3.3.2 Arbeitspaket 2 „Quantifizierung des Restbiomassepotenzials“ .....	67
3.3.3 Arbeitspaket 3 „Herstellung und Charakterisierung von Pflanzen- und Aktivkohlen“ .....	69
3.3.4 Arbeitspaket 4 „Praxisversuche mit Kohle als Einstreuzusatz“ .....	69
3.3.5 Arbeitspaket 5 „Ökonomie - Wertschöpfungsketten und Businessplan“ .....	70
4 Ergebnisverwertung, Kommunikation und Verstetigung .....	72
4.1 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis .....	72
4.1.1 Arbeitspaket 1 „Laufende Zusammenarbeit der OG“ .....	72
4.1.2 Arbeitspaket 2 „Quantifizierung des Restbiomassepotenzials“ .....	72
4.1.3 Arbeitspaket 3 „Herstellung und Charakterisierung von Pflanzen- und Aktivkohlen“ .....	72
4.1.4 Arbeitspaket 4 „Praxisversuche mit Kohle als Einstreuzusatz“ .....	72
4.1.5 Arbeitspaket 5 „Ökonomie - Wertschöpfungsketten und Businessplan“ .....	73
4.2 (Geplante) Verwertung/Verbreitung und Nutzung der Ergebnisse .....	74
4.2.1 Arbeitspaket 1 „Laufende Zusammenarbeit der OG“ .....	74
4.2.2 Arbeitspaket 2 „Quantifizierung des Restbiomassepotenzials“ .....	75
4.2.3 Arbeitspaket 3 „Herstellung und Charakterisierung von Pflanzen- und Aktivkohlen“ .....	75

4.2.4	Arbeitspaket 4 „Praxisversuche mit Kohle als Einstreuzusatz“ .....	75
4.2.5	Arbeitspaket 5 „Ökonomie - Wertschöpfungsketten und Businessplan“ .....	76
4.3	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit .....	77
4.3.1	Arbeitspaket 1 „Laufende Zusammenarbeit der OG“ .....	77
4.3.2	Arbeitspaket 2 „Quantifizierung des Restbiomassepotenzials“ .....	77
4.3.3	Arbeitspaket 3 „Herstellung und Charakterisierung von Pflanzen- und Aktivkohlen“ ....	78
4.3.4	Arbeitspaket 4 „Praxisversuche mit Kohle als Einstreuzusatz“ .....	79
4.3.5	Arbeitspaket 5 „Ökonomie - Wertschöpfungsketten und Businessplan“ .....	79
5	Zusammenarbeit in der Operationellen Gruppe (OG) .....	81
5.1	Gestaltung der Zusammenarbeit .....	81
5.2	Mehrwert des Formats einer OG .....	81
5.3	Weitere Zusammenarbeit .....	81
6	Verwendung der Zuwendung .....	83
7	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	84
8	Literaturverzeichnis .....	85
9	Annex .....	89
	Annex I: Einstufung der im Rahmen stattgefundenen Praxisversuche .....	89
	Annex II: Finales Boniturschema zur Erfassung des Tierwohls der Masthühner .....	90
	Annex III: Beurteilerübereinstimmungen .....	95
	Annex IV: Methodik der Staubmessung .....	96
	Annex V: Ergebnisse der ersten Versuchsphase .....	98
	Annex VI: Erstelltes Factsheet zum CAREFUL-Projekt, .....	104
	Annex VII: Kurzstudie zur Quantifizierung des Restbiomassepotenzials in Nordhessen .....	105

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Karte des Regierungsbezirks Kassel .....	6
Abbildung 2 Laborpyrolyseanlage Pyreka 9050 .....	8
Abbildung 3 Arbeitsschema der Pyreka 9050 .....	9
Abbildung 4 Schwingmühle SM500nano von Retsch .....	12
Abbildung 5 Filtration der Kohle-Jodlösungssuspension .....	13
Abbildung 6 Titration .....	13
Abbildung 7 Universalschüttler SM-30 .....	14
Abbildung 8 Messaufbau zur pH-Bestimmung .....	14
Abbildung 9 Filterbank .....	15
Abbildung 10 Nabatherm CP320 .....	16
Abbildung 11 Ausglühen der Tiegel und Veraschung .....	16
Abbildung 12 Aschebildung durch Trocknung .....	17
Abbildung 13 Exsikkator .....	18
Abbildung 14 Aschereste .....	18
Abbildung 15 Muffelofen .....	19
Abbildung 16 Mikrowelle AP Multiwave PRO .....	21
Abbildung 17 Spectrogreen FMX46 .....	22
Abbildung 18 Erkundungsverhalten .....	24
Abbildung 19 KohleEinstreu im Scharraum .....	24
Abbildung 20 Methodenerprobung zur Ammoniakmessung .....	25
Abbildung 21 Ammoniakmessung .....	26
Abbildung 22 Ammoniakgehalte .....	26
Abbildung 23 Bestimmung der WHK I .....	27
Abbildung 24 Bestimmung der WHK II .....	27
Abbildung 25 Einstreusubstrate in der Geflügelhaltung .....	28
Abbildung 26 Untersuchung der Fußballen .....	31
Abbildung 27 Wägung eines Tiers .....	31
Abbildung 28 Trocknung der Einstreuproben (Bildautor: Gurny) .....	32
Abbildung 29 Multimediale Lern- und Lehr-App .....	35
Abbildung 30 Konversionsraten der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	41
Abbildung 31 pH-Wert der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	42
Abbildung 32 Elektrische Leitfähigkeit der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	43
Abbildung 33 Iodzahl der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	44
Abbildung 34 Aschegehalt der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	44
Abbildung 35 Organische Bestandteile der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	45
Abbildung 36 Organische Bestandteile der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	46
Abbildung 37 Anteil an stabilen Kohlestoff der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	47
Abbildung 38 Kohlenstoffanteil der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	47
Abbildung 39 Wasserstoffanteil der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	48
Abbildung 40 Stickstoffanteil der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	49
Abbildung 41 Schwefelanteil der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	49
Abbildung 42 Anteile an Kalium und Kalzium der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	50
Abbildung 43 Anteile an Magnesium und Phosphor der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen .....	50
Abbildung 44 Beispiel eines Tiers mit Fußballenveränderungen (Bildautor: Gurny) .....	51
Abbildung 45 Fußballengesundheit .....	52
Abbildung 46 Fersenhöckerveränderungen .....	53
Abbildung 47 Beispiel eines Tieres mit deutlicher Kloakenverschmutzung (Bildautor: Gurny) .....	54
Abbildung 48 Gefiederverschmutzung (Schmutzfläche) .....	55
Abbildung 49 Gefiederverschmutzung (Verklebung) .....	56
Abbildung 50 Einstreufeuchte .....	57
Abbildung 51 Ammoniakemissionen .....	58
Abbildung 52 Korrelationsmatrix .....	62
Abbildung 53 Zusammenhang zwischen Besatz-dichte und Einstreufeuchte (n=37) .....	63

Abbildung 54 Zusammenhang zwischen Einstreu-feuchte und Fußballenveränderungen (n=37). .....	63
Abbildung 55 Mittlere maximale Wasserkapazitäten (in Vol.-%).....	64
Abbildung 58 Schematische Darstellung des Verfahrens zur Integrierten Erzeugung von Festbrennstoff und Biogas aus Biomasse (IFBB-Verfahren). .....	68
Abbildung 56 Das CAREFUL-Projekt-Artefakt .....	74
Abbildung 57 Konferenz des REVEAL-Netzwerkes .....	74

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Auflistung der hergestellten Pflanzen- und Pflanzenaktivkohle .....	11
Tabelle 2 Übersicht über die begleiteten Durchgänge und Stichprobengrößen .....	30
Tabelle 3 Nährstoffzusammensetzung des grasartigen Rohmaterials.....	36
Tabelle 4 Nährstoffzusammensetzung des IFBB-Presskuchens .....	36
Tabelle 5 Nährstoffzusammensetzung von Kirschkernen und Dinkelspelzen .....	36
Tabelle 6 Nährstoffzusammensetzung, Asche- und Ligningehalt von Eichensägemehl .....	37
Tabelle 7 Nährstoffzusammensetzung, Asche- und Ligningehalt von <i>Miscanthus</i> .....	37
Tabelle 8 Eigenschaften der Pflanzenkohlen aus Straßenbegleitgrün .....	38
Tabelle 9 Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen von Feucht- und Streuobstwiese .....	38
Tabelle 10 Chemisch-physikalische Eigenschaften der generierten Pflanzenkohlen aus Kirschkernen und Dinkelspelzen. ....	39
Tabelle 11 Schwermetallgehalte der Dinkelspelzenkohle.....	40
Tabelle 12 Chemisch-physikalische Eigenschaften der generierten Pflanzenkohlen aus Eichen- Sägemehl.....	40
Tabelle 13 Prävalenzen starker Fußballenveränderungen .....	51
Tabelle 14 Prävalenzen starker Fersenhöckerveränderungen .....	52
Tabelle 15 Prävalenzen flüssigen, ungeformten Kots.....	53
Tabelle 16 Prävalenzen verschmutzter Kloaken .....	54
Tabelle 17 Prävalenzen stark verschmutzten Gefieders.....	54
Tabelle 18 Prävalenzen verklebten Gefieders .....	55
Tabelle 19 Wassergehalt der Einstreu .....	56
Tabelle 20 Ammoniakkonzentrationen .....	57
Tabelle 21 Temperatur und Luftfeuchte .....	58
Tabelle 22 Rohdichten in der Frischsubstanz und Trockensubstanz.....	64

## Abkürzungsverzeichnis

AK/AC	Aktivkohle/ Activated carbon (engl.)
BC	Biochar (Pflanzenkohle ohne Aktivierung; engl.)
DG	Durchgang
DKR	Dräger-Kurzzeitröhrchen
FM	Frischmasse
LW	Lebenswoche
Max	Maximum
Min	Minimum
NSP	Nicht-Stärkehaltige Polysaccharide (englisch: „non-starchy polysaccharides“)
OG	Operationelle Gruppe
SD	Standardabweichung
TS	Trockensubstanz
WHK	Wasserhaltekapazität

## Zusammenfassung / Abstract

Gegenstand des Innovationsvorhabens CAREFUL waren Untersuchungen zur Fragestellung, ob Pflanzenkohle als Zusatz zur herkömmlichen Einstreu einen präventiven Effekt auf die Entstehung von Fußballenerkrankungen beim Mastgeflügel haben kann. Hierbei erprobte die OG CAREFUL eine aus regional anfallenden Restbiomassen produzierte Pflanzenkohle (u.a. Dinkelspelzen und Waldholzhackschnitzel), welche als zusätzliches Einstreusubstrat in der ökologischen Geflügelhaltung eingesetzt wurde. Beginnend wurden Restbiomassen der nordhessischen Region, welche für die Herstellung von Pflanzenkohle geeignet erschienen, quantifiziert und ihre qualitative Vielfalt im Rahmen einer Kurzstudie zusammengetragen. Vielversprechende Restbiomassen wurden mittels einer Laboranlage pyrolysiert und deren Karbonisat chemisch-physikalisch analysiert. Um Effekte der eingebrachten Pflanzenkohlen im Rahmen von Praxisversuchen auf die Tiergesundheit zu eruieren, wurden umfangreiche Bonituren in der 2., 7./8. und 11. Lebenswoche durchgeführt. Die Pflanzenkohle wurde ab der 2. Lebenswoche mit ca. 250 g Kohle pro Quadratmeter eingesetzt und alle zwei Wochen nachgestreut. Die abschließende Datenlage ließ erkennen, dass der Zusatz von Pflanzenkohle in der Einstreu bei unverändertem Einstreumanagement der beteiligten Landwirte zu keiner Verbesserung in der Prävention von Fußballenläsionen führte. Ebenso konnten unter Praxisbedingungen keine positiven Effekte auf Einstreuqualität (Feuchte) sowie das Stallklima (Ammoniakkonzentration) nachgewiesen werden. Darüber hinaus zeigte die Pflanzenkohle Einschränkungen hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit, indem sie sich hoch reaktiv mit der Umgebungsfeuchte zeigte.

The purpose of the CAREFUL innovation project was to investigate whether biochar as an additive to conventional litter can prevent the onset of foot pad diseases in broiler chickens. The use of biochar, produced from regional residual biomass (including spelt kernels and forest wood pieces), was tested for its effect on litter quality, housing climate, and animal health. Firstly, residual biomasses from the north Hesse region that appeared suitable for biochar production were quantified and their qualitative diversity was collated. In a laboratory plant, residual biomass was pyrolyzed, and its carbonisation product analysed. To ascertain the effect of biochar on animal health in practice, extensive monitoring was conducted during the animals' 2<sup>nd</sup>, 7<sup>th</sup>/8<sup>th</sup>, and 11<sup>th</sup> week of life. From the 2<sup>nd</sup> week of life, approximately 250 g of biochar per square metre was applied and reapplied every 2 weeks. The final data revealed that the addition of biochar did not significantly enhance the prevention of foot pad lesions when litter management of the participating farmers remained unchanged. Further no positive effects on litter quality (moisture) or housing climate (ammonia concentration) could be demonstrated. Additionally, the use of biochar showed limitations regarding practical applicability as it rapidly absorbed moisture from the environment due to its high reactivity.

# 1 Vorhabenplanung

## 1.1 Erläuterung der Situation zu Vorhabenbeginn

Zur Beurteilung der Tiergesundheit und des Tierwohls in der Geflügelhaltung werden seit vielen Jahren Fußballenveränderungen oder -läsionen bei Geflügel untersucht. Die Entstehung und insbesondere Prävention dieser entzündlichen Erkrankung, die aufgrund der hervorgerufenen Schmerzen das Tierwohl und die Beweglichkeit der Tiere stark beeinträchtigt, war und ist Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte (Berg 1998, Ekstrand *et al.* 1998, Keppler & Knierim 2010, Dunlop *et al.* 2016). Gemäß einer umfangreichen Studie von Ekstrand *et al.* (1998) in Schweden mit über 100 Millionen Broilern, wurde bei über 88 % der untersuchten Betriebe Fußballenläsionen festgestellt.

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 (NH<sub>3</sub>) und zu einer erhöhten Belastung mit pathogenen Bakterien und Arthropoden (u.a. Milben) führen (Abd El-Wahab *et al.* 2012). Erhöhte Ammoniakgehalte in der Stallluft wiederum beeinflussen nachweislich das Tierwohl negativ. Gründe für feuchte Einstreu können, neben verschiedenen Haltungs- und Managementeinflüssen, infektiöse Durchfallerkrankungen der Tiere oder eine ungünstige Futterzusammensetzung sein (Dunlop *et al.* 2016). Insbesondere in der ökologischen Geflügelhaltung führen die Restriktionen hinsichtlich zulässiger Eiweißquellen im Futter zu relativ hohen Rohproteingehalten, die zu feuchteren Ausscheidungen der Tiere führen und somit können, verglichen mit der konventionellen Haltung, verstärkt Probleme mit Fußballenveränderungen auftreten.

Um die Tiergesundheit und das Tierwohl nachhaltig zu verbessern, ist daher die Entwicklung und Erprobung von neuartigen Einstreusubstraten in der Geflügelhaltung, wofür bisher überwiegend Langstroh, Häckselstroh, Hobelspäne und pelletierte Strohgranulate eingesetzt werden, zwingend erforderlich. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Untersuchung sowohl der Feuchtigkeitsaufnahmekapazität als auch der Abtrocknungsdauer der Einstreusubstrate. Neben der Prävention von Fußballenerkrankungen kann dies ggf. auch zu einem geringeren Einsatz von Medikamenten, wie beispielsweise von Antibiotika, beitragen.

Pflanzkohle ist ein kohlenstoffreiches Produkt, welches aus biogenen Rohstoffen mittels Pyrolyse unter dem Ausschluss von Sauerstoff bei Temperaturen von meist unter 700°C hergestellt wird (Lehmann & Joseph 2010). Die Aktivierung der Pflanzkohlen kann durch geeignete Modifizierungsmaßnahmen, wie beispielsweise die Zugabe von Oxidationsmitteln bei hohen Temperaturen erfolgen, wodurch die spezifische Oberfläche der Pflanzkohle weiter erhöht wird. Pflanzen- und Aktivkohlen stellen aufgrund ihrer hohen spezifischen Oberfläche und der daraus resultierenden hohen Wasseraufnahmefähigkeit und Adsorptionseigenschaften hinsichtlich einer Vielzahl schädigender Substanzen und Mikroorganismen einen vielversprechenden Einstreuzusatz dar (Gehrlach & Schmidt 2012). Für die Herstellung von Pflanzen- und Aktivkohlen werden jedoch häufig hochwertiges Holz und fossile Kohlen oder importierte Kohlen auf Basis von Kokosnussschalen verwendet. Diese hochwertigen Rohstoffe werden jedoch bereits umfangreich genutzt, wodurch die Nutzung dieser Kohlen als Einstreuzusatz in der Geflügelhaltung in Konkurrenz zu den bisherigen Verwertungspfaden erfolgen würde. Demgegenüber finden ländliche (z.B. Landschaftspflegeschnitt, Obstbaumschnitt, landwirtschaftliche Restbiomassen,

Extensivgrünland) und städtische Restbiomassen (z.B. Laub, Grünschnitt) kaum oder gar keine Verwendung. Vielmehr erfolgt häufig eine mehr oder weniger geordnete Entsorgung, welche sich negativ auf Ökosystemleistungen und Biodiversität von Landschaften auswirken kann.

In Deutschland liegt das jährliche, technische Biomasse-Reststoffpotential, welches bislang nicht genutzt wird, bei rund 30.9 Mio. t Trockensubstanz, woraus bei einem Konversionsfaktor von 15 % etwa 4.6 Mio. t Pflanzenkohle erzeugt werden könnte (Brosowski *et al.* 2015). Durch die Nutzung dieser Restbiomassen zur regionalen Produktion von hochwertigen Pflanzen- und Aktivkohlen und die Verwendung dieser als Einstreuzusatz in der Geflügelhaltung, kann ggf. nicht nur das Tierwohl in der Geflügelhaltung verbessert werden, sondern auch ein Beitrag zur Stärkung des ländlichen Raums (in welchem ein Großteil der Biomassen anfällt) geleistet werden.

### 1.2 Aufgabenstellung und Zielformulierung des Vorhabens

Das übergeordnete Ziel des Innovationsvorhabens war die Herstellung und Analyse von Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen aus bislang nicht genutzten Restbiomassen in Nordhessen und ihre Verwendung als Einstreuzusatz in der Mastgeflügelhaltung zur Verbesserung der Tiergesundheit und damit des Tierwohls. Kohlen weisen aufgrund ihrer porösen Struktur ein hohes Adsorptionsvermögen von Nährstoffen und Stickstoffverbindungen auf. Darüber hinaus besitzen sie eine hohe Wasserspeicherkapazität. Aufgrund dieser Eigenschaften könnte der Einsatz von Pflanzen- und Aktivkohlen in der Geflügelhaltung zu einer Verbesserung des Stallklimas aufgrund reduzierter Ammoniakemissionen und zu einer trockeneren Einstreu beitragen. Hierdurch sollen Fußballenerkrankungen bei Mastgeflügel vorgebeugt werden. Um Effekte der eingebrachten Pflanzenkohlen im Rahmen von Praxisversuchen auf ökologischen Mastgeflügelhöfen auf die Tiergesundheit zu eruieren, sollten umfangreiche Bonituren bei den nordhessischen OG Praxispartnern durchgeführt werden. Im Falle eines präventiven und damit eines positiven Effekts auf die Tiergesundheit, sollte eine Wirtschaftlichkeitsprüfung zum Einsatz von Pflanzenkohlen in der Mastgeflügelhaltung für die nordhessische Region vorgenommen werden.

### 1.3 Arbeitsplan

Der Arbeitsplan des Vorhabens war unterteilt in fünf Arbeitspakete (AP1-AP5). AP1 war für die Koordination der OG verantwortlich. Dies umfasste u.a. die Koordination der wissenschaftlich-administrativen Tätigkeiten innerhalb der OG, den Austausch zwischen den Beteiligten, Öffentlichkeitsarbeit, das Berichtswesen und die Kommunikation mit dem Projektträger sowie die Kontrolle der Finanzen bzw. die Abrechnungen mit dem Projektträger. Die koordinativen Aufgaben wurden hauptverantwortlich von der Geschäftsstelle des Kompetenzzentrums für Klimaschutz und Klimaanpassung der Universität Kassel, der damals antragstellenden Institution, sowie auf betrieblicher Ebene von den OG Praxismitgliedern, übernommen.

AP2 befasste sich mit der Quantifizierung des vorhandenen Restbiomassepotentials in Nordhessen und der Ermittlung geeigneter Biomassen für die Erzeugung hochwertiger Pflanzen- und Aktivkohlen als Einstreuzusatz in der Geflügelhaltung. Mittels Informationen von Behörden, Entsorgungsbetrieben, Genossenschaften und Kooperativen sowie Landwirten

wurde eine Übersicht zu vielversprechenden Restbiomassen des nordhessischen Raums erstellt und in einer Kurzstudie umfassend dargestellt. Die identifizierten Restbiomassen wurden hinsichtlich ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften untersucht und klassifiziert, sowie potenzielle Verwertungspfade ermittelt. Wenn notwendig erfolgte eine Aufbereitung der Biomassen mittels IFBB-Verfahren. Die IFBB-Produkte wurden anschließend charakterisiert. Angesiedelt am Fachgebiet für Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe wurden diese Untersuchungen hauptverantwortlich von Mitarbeiter\*innen der Universität Kassel durchgeführt sowie von den OG Praxismitgliedern in beratender Funktion.

In AP 3 wurden die in AP 2 identifizierten und für vielversprechend beurteilten Restbiomassen im Labormaßstab zu Pflanzen- und Aktivkohlen verarbeitet. Die Herstellung der Pflanzen- und Aktivkohlen erfolgte in einem Labor-Pyrolyse- und Aktivierungsreaktor der Firma Pyreg GmbH (PYREKA), wodurch eine direkte Übertragung der Pyrolyse- und Aktivierungseinstellungen auf großtechnische Anlagen möglich wäre. Die erzeugten Pflanzen- und Aktivkohlen wurden hinsichtlich ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften analysiert und es wurden Untersuchungen zu geeigneten Aufbereitungsverfahren der Kohlen durchgeführt (z.B. Pellettierung), um eine Staubentwicklung bei der Ausbringung und während des Versuchs in den Ställen zu vermeiden. Die Arbeiten im Labormaßstab (Pyrolyse von Restbiomassen) wurden durch Mitarbeiter\*innen der Universität Kassel durchgeführt. Die Herstellung der notwendigen Mengen für die Praxisversuche sollten entweder durch die Pyreg GmbH oder dem Eigenbetrieb Baden-Baden durchgeführt werden. Die OG Praxismitglieder fungierten in der Beratung und Beurteilung der Eignung der Kohlen in der Praxis.

In AP 4 sollten die in AP3 auf der großtechnischen Anlage produzierten Pflanzen- und Aktivkohlen in den beteiligten Geflügelbetrieben eingesetzt und hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit als Einstreuzusatz untersucht werden. Hierzu sollten die Kohlen je nach Umsetzbarkeit in den Stallungen der OG Praxismitglieder zeitgleich parallel oder in aufeinanderfolgenden Durchgängen mit der betriebsüblichen Einstreu ohne Kohlezusatz verglichen werden. Je nach verwendeter Einstreu der Landwirte sollten die Kohlen in unterschiedlichen Konzentrationen zur Einstreu zugemischt bzw. zusätzlich eingebracht. Anschließend sollten die Effekte auf die Einstreu- und Stallluftqualität untersucht werden. Mittels regelmäßiger Bonituren mit Schwerpunkt auf die Fußballengesundheit war es geplant, aussagekräftige Tierwohlindikatoren an einer stichprobenartigen Anzahl an Tieren regelmäßig und für jeden Versuchsdurchgang zu erfassen. Die Kotkonsistenz sollte in der 2. Lebenswoche und im letzten Mastdrittel beurteilt und eine Stichprobe von Tieren zu diesen Zeitpunkten gewogen werden. Eingesetzte Futtermittel und -mengen, Abgänge und deren vermutliche Ursachen sowie (medikamentöse) Behandlungen sollten kontinuierlich dokumentiert werden. Diese Arbeiten waren am Fachgebiet für Nutztierethologie und Tierhaltung der Universität Kassel angesiedelt und fanden in enger Zusammenarbeit mit den OG Praxispartnern statt.

Der Arbeitsplan von AP5 sah vor, die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete ökonomisch auszuwerten und einen Investment- und Businessplan zur Umsetzung der untersuchten Verwertungspfade und Wertschöpfungsketten zu erstellen. Hierzu sollten in einem ersten Schritt die Bergungs- und Verarbeitungskosten der in AP2 identifizierten Restbiomassen ermittelt werden. Neben den Kosten sollte eine monetäre Bewertung des IFBB-Presssaftes zur Biogasproduktion erfolgen. Unter Berücksichtigung der in AP3 ermittelten Eigenschaften der produzierten Kohlen, vor allem aber aufgrund ihrer Wirksamkeit als Einstreuzusatz hinsichtlich der Prävention von Fußballerkrankungen in der ökologischen Mastgeflügelhaltung

(AP4), sollte eine ökonomische Bewertung des entwickelten Verwertungskonzepts erfolgen. In AP5 sollten darüber hinaus Strategien zur flächendenkenden Umsetzung der geeigneten untersuchten Kohlen als Einstreuzusatz in der Geflügelhaltung untersucht werden sowie eine umfassende Kosten-Nutzen-Rechnung des geplanten Innovationsvorhaben durchgeführt und die wichtigsten Faktoren identifiziert werden, die die wirtschaftlich-technische Machbarkeit beeinflussen. Unter der Verfügbar-machung der erhobenen Daten durch Mitarbeiter\*innen der Universität Kassel, sollten diese Arbeiten von PowerWave-Projects in Zusammenarbeit mit Daniel Rüdtenklau (Bioenergie GbR Calden) durchgeführt werden.

Hauptverantwortlich für das Innovationsvorhaben war das Kompetenzzentrum für Klimaschutz und Klimaanpassung der Universität Kassel mit Prof. Dr. Michael Wachendorf als geschäftsführender Direktor und Dr. habil. Kathrin Stenchly als Geschäftsführerin. Mitglieder der OG CAREFUL umfassten das Fachgebiet für Nutztierethologie und Tierhaltung unter der Leitung von Frau Prof. Dr. Ute Knierim mit Unterstützung von Frau Dr. Anna Olschewsky und Herr Dr. Daniel Gieseke sowie das Fachgebiet für Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Michael Wachendorf mit Unterstützung von Herrn Dr.-Ing. Korbinian Kaetzel und den wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen Frau Anastasia Hübner, Frauke Umbach und Melissa Gurny. Unsere Praxispartner waren die Bioland – Frischgeflügel Roth GbR, Schlachtbetrieb Bio Frischgeflügel GmbH, Schäfer BIOgeflügelhof KG, die Landwirte Sylva und Gerhard Hüppe, Biolandhof Krieger sowie Frau Katharina Nennwitz vom Biolandhof Werragut. Die OG CAREFUL wurde von Daniel Rüdtenklau bei der Entwicklung und Implementierung von Verwertungsstrategien für Restbiomassen beraten. Mit der OG CAREFUL assoziiert waren der Bioland e.V. und der Geflügelwirtschaftsverband Hessen e.V.

## 2 Verlauf des Vorhabens

### 2.1 Arbeitspaket 1 „Laufende Zusammenarbeit der OG“

Die Arbeiten in AP1 umfassten vorrangig wissenschaftlich-administrative Koordinations-tätigkeiten. Beginnend umfassten diese vor allem Personalmanagement sowie den Aufbau der Webpräsenz der OG CAREFUL. Nach Einarbeitung der Projektmitarbeiterin, standen koordinative Aufgaben im Rahmen von wissenschaftlicher Begleitung der Laboranalytik und der Versuchsaufbauten, Restbiomassengenerierung (Kontaktaufnahme, Projektbeschreibung, Transportlogistik) sowie logistische Planung und Umsetzung der Biomasseaufbereitung und Pflanzenkohleproduktion (Maschinennutzungszeiten, etc.) auf dem Versuchsgelände des Fachgebiets für Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe in Neu-Eichenberg im Vordergrund. Für die anstehenden Praxisversuche wurden umfängliche koordinative Aufgaben hinsichtlich Durchführung, Materialbeschaffung und Bau durch AP1 durchgeführt. Fortwährend, und soweit möglich, wurde an Vernetzungstreffen teilgenommen bzw. neue Arbeitsvernetzungsgruppen Universitäts-intern initiiert. Nach Erhebung erster Daten aus Labor und Praxisversuch wurden diese für Vorlesungen, welche zu diesem Zeitpunkt größtenteils online stattfanden, aufbereitet und an Studierende vermittelt. Ebenso wurden Teilnahmen an internationalen Konferenzen vorbereitet (Projektflyer, Poster, Ausstellungsstücke). Arbeitsschritte im Rahmen von AP1 umfassten ebenso die Planung und Organisation der OG Partnertreffen und Workshops.

Arbeiten von AP1 waren über die gesamte Projektlaufzeit geplant, somit kam es zu keinen zeitlichen Veränderungen gegenüber dem eingereichten Aktionsplan. Inhaltlich mussten aufgrund der lang vorherrschenden Corona-Pandemie der Auftakt-Workshop ausfallen sowie konnten Vernetzungstätigkeiten nur stark eingeschränkt wahrgenommen werden.

### 2.2 Arbeitspaket 2 „Quantifizierung des Restbiomassepotenzials“

Zu Beginn des Projektes wurde eine Quantifizierung des Restbiomassepotenzials für die nordhessische Region durchgeführt und die Ergebnisse in einer Kurzstudie zusammengeführt, welche zu April 2021 vorlag. Im ersten Arbeitsschritt wurde die Untersuchungsregion definiert. Die Untersuchungsregion wurde auf den Regierungsbezirk Kassel begrenzt, 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).

Im nächsten Schritt wurde der Begriff der Restbiomassen für die Datenaufnahme von den OG Mitgliedern definiert. In dem Forschungsvorhaben CAREFUL wurde sich darauf geeinigt, dass der Begriff „Restbiomassen“ für alle pflanzlichen Rest- und Abfallstoffe verwendet wird, die bei Produktionsprozessen (z.B. dem Anbau/Verarbeitung landwirtschaftlicher Produkte) und der Erstellung von Dienstleistungen (z.B. der Flächen- und Landschaftspflege) in der Untersuchungsregion anfallen. Diese Definition diene dazu den Begriff der Restbiomassen einzuordnen und von anderen Biomassen abzugrenzen. Die Definition beinhaltet grundsätzlich alle Arten von Restbiomassen und Abfallstoffe, unabhängig davon, ob es für einzelne Biomassenströme bereits Verwertungspfade gibt oder nicht.



Stadt/Landkreis	Fläche [in km <sup>2</sup> ]	Bevölkerungsdichte 2019 [in Einwohner je km <sup>2</sup> ]
Kassel, Stadt	106,78	1893
Landkreis Kassel	1.292,92	183
Werra-Meißner-Kreis	1.024,70	98
Waldeck-Frankenberg	1.848,44	85
Schwalm-Eder-Kreis	1.538,51	117
Hersfeld-Rotenburg	1.097,12	110
Fulda	1.380,40	162
Fulda, Stadt	104,04	660

**Abbildung 1** Karte des Regierungsbezirks Kassel

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

Ein Biomassepotenzial wurde definiert als eine Ressource, die in der Regel erschlossen wird und teilweise noch ungenutzt ist (HMUKLV 2010, 2020). 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 (Ayala-Zavala *et al.* 2011, Girotto *et al.* 2015, HMUKLV 2020, OpenGeoEdu 2021, Pude 2021). So haben zahlreiche Autoren, u.a. Girotto *et al.* 2015 und Nóvoa-Muñoz *et al.* 2008, 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 engen produktions- und verfahrenstechnischen Zusammenhängen (Pateiro-Moure *et al.* 2009). Zur Potenzialabschätzung müssen verschiedene Annahmen getroffen werden, die die Ergebnisse stark beeinflussen. Hartmann *et al.* (2016) 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 Ungleichgewichts zwischen Energieangebot und Energiebedarf, bzw. Rohstoffangebot und -nachfrage ermittelt.

Zur Einteilung der Restbiomassen wurden zehn Oberkategorien gebildet. Diese umfassten (1) Produkte aus Forstwirtschaft, (2) Primäre Reststoffe aus Wäldern, (3) Primärprodukte von lignozellulosehaltigen Biomasse-Pflanzen, (4) Landwirtschaftliche Reststoffe, (5) Grünland, (6) Sonstige Landnutzungsprodukte, (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 umfassten jeweils eine detaillierte Auflistung der unterschiedlich anfallenden Restbiomassen. Die Datenerhebung fand hauptsächlich unter Bezugnahme der S2Biom Datenbank der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR; [www.s2biom.eu](http://www.s2biom.eu)) statt.

Basierend auf den Ergebnissen der Kurzstudie, in Absprache mit allen OG-Partnern sowie unter Berücksichtigung von verfügbaren Restbiomassen, wurden insgesamt sieben (Rest)Biomassen im Rahmen des CAREFUL Projektes genauer untersucht. Hierbei handelte es sich einerseits um grasartiges Landschaftspflegematerial, welches Proben von **Straßenbegleitgrün**, sowie von einer **Feucht- und Streuobstwiese** umfasste.

Für diese grasartigen Biomassen erfolgte eine Aufbereitung mittels IFBB-Verfahren. Diese Abkürzung steht für „Integrierte Festbrennstoff- und Biogasproduktion aus Biomasse“ (kurz IFBB) und ist eine Technologie, um insbesondere grasartige Biomassen aufzubereiten. Durch Waschen und eine mechanische Auftrennung der Biomasse wird mittels IFBB die Qualität der flüssigen und festen Bestandteile erhöht (Grass *et al.* 2008, Wachendorf *et al.* 2009). Aus dem festen Anteil wird ein relativ trockener, faserreicher Presskuchen hergestellt. Der flüssige Anteil ist ein Presssaft mit hohem Gehalt von verwertbaren Zuckern. Während des IFBB-Verfahrens werden die in der Rohbiomasse enthaltenen Mineralstoffe zum großen Teil in den Presssaft übertragen und in der Folge kann der Presssaft zur Biogasproduktion verwendet oder als Dünger ausgebracht werden. Der Presskuchen kann als Brennstoff genutzt werden oder aber wie in unserem Fall zu Pflanzenkohle umgewandelt werden [→ AP3]. Im Vergleich zur Rohbiomasse enthält der Presskuchen weniger Mineralien und hat daher einen besseren Heizwert. Die IFBB-Technologie ermöglicht auf diese Weise eine Umwandlung von (geringwertiger) Rohbiomasse zu Produkten mit potenziell höherem Marktwert. Für die Pyrolyse dieses Materials wurde entweder das getrocknete und pelletierte Rohmaterial verwendet bzw., zum Zwecke eines Vergleichs, der ebenso pelletierte Presskuchen.

Ferner wurden zwei Restbiomassen aus der Landwirtschaft und der verarbeitenden Industrie von landwirtschaftlichen Produkten auf ihre Elementarzusammensetzung sowie Asche und Lignin im Labor untersucht und anschließend pyrolysiert. Diese umfassten **Kirschkerne** und **Dinkelspelzen**.

Bei einem regionalen Sägewerk in Hedemünden wurde **Eichen-Sägemehl**, also eine holzige Biomasse, angefragt. Diese wurde ebenso im Labor untersucht, pelletiert und anschließend karbonisiert.

Als nachwachsender Rohstoff findet **Miscanthus** zwar vorrangig Verwendung als Festbrennstoff in Form von Häckselgut, Pellets oder Briketts, wurde jedoch im Rahmen dieser Untersuchung aufgrund seiner vielversprechenden Elementarzusammensetzung ebenso analysiert und in pelletierter Form pyrolysiert.

### **Änderungen zum Aktionsplan**

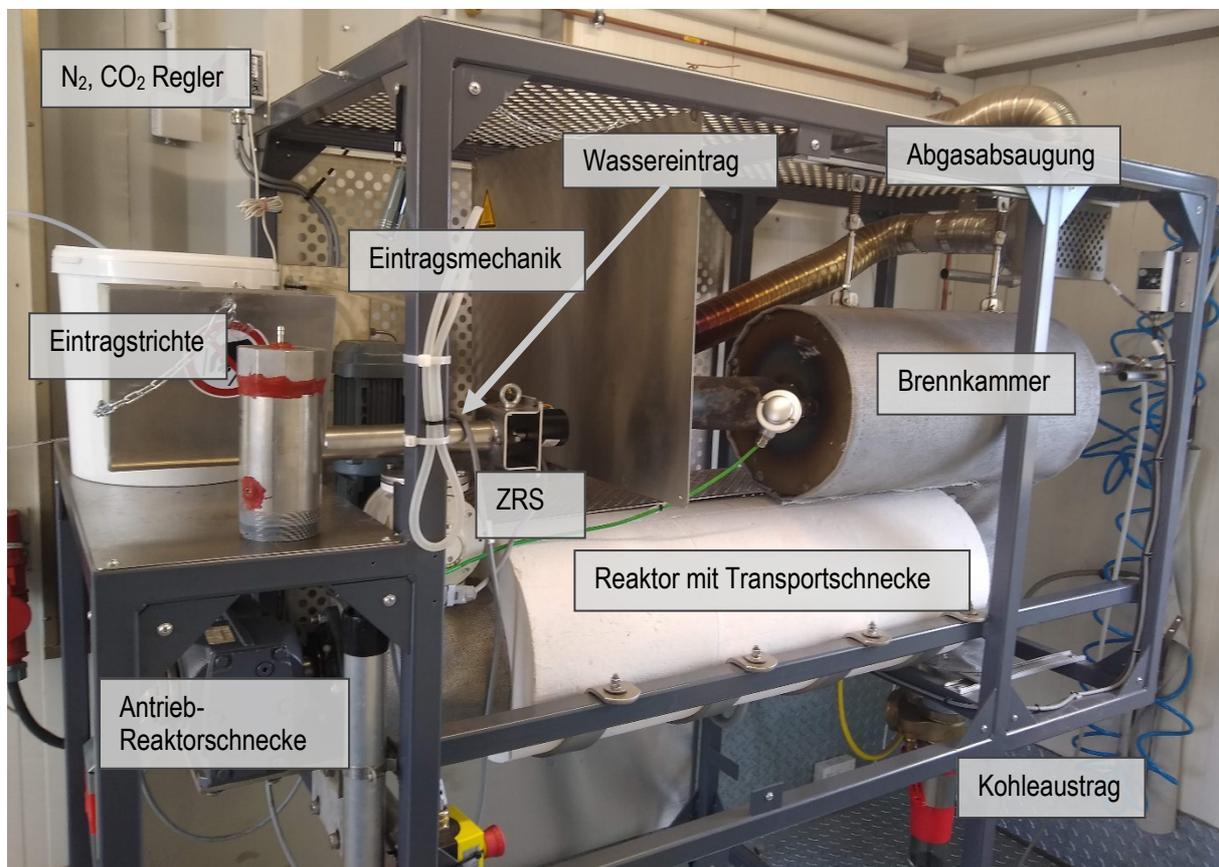
Die Quantifizierung des Restbiomassepotenzials der nordhessischen Untersuchungsregion sowie die Zusammenstellung der Ergebnisse in Form einer Kurzstudie konnten im geplanten Zeitrahmen abgeschlossen werden. Anders als im Aktionsplan angedacht, wurden vielversprechende Restbiomassen jedoch kontinuierlich über die gesamte Projektlaufzeit aufbereitet und auf die Eignung ihres Karbonisat als Einstreuzusatz in der Geflügelhaltung untersucht. Dies ist dem geschuldet, dass nicht alle vorab identifizierten Restbiomassen zum Zeitpunkt des ersten Projektjahres verfügbar waren und/oder in dem vorgegebenen Zeitrahmen verarbeitet werden konnten.

### 2.3 Arbeitspaket 3 „Herstellung und Charakterisierung von Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen“

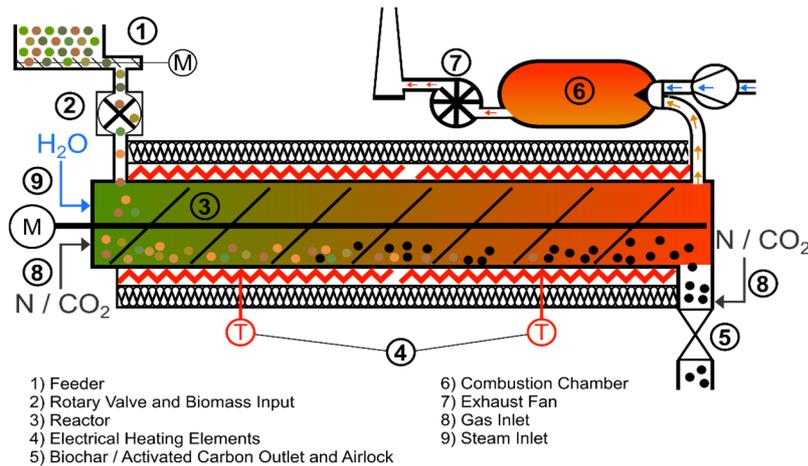
In AP3 wurden die in AP2 identifizierten Restbiomassen im Labormaßstab zu Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen verarbeitet. Hierzu wurden vorab standardisierte Pyrolyse- und Aktivierungsverfahren entwickelt, um eine Vergleichbarkeit der generierten Pflanzenkohlen zu gewährleisten.

#### **Pyrolyse- und Aktivierungsprozess mit der Pyreka 9050**

Die Pyreka 9050 der Firma PYREG GmbH (Dörth) ist eine im Labormaßstab konzipierte Pyrolyseanlage zur Karbonisierung und/oder Aktivierung von verschiedenen Ausgangsmaterialien. Durch die von PYREG einstellbaren Prozessparameter ist es möglich, eine Vielzahl von Pyrolysemodellen zu fahren und zusätzlich, durch weitere leichte Modifikationen, sämtliche in Abbildung 2 und 3 bezeichneten Funktionsgruppen manuell einzuregulieren oder durch Sensoren zu überwachen. Weitere Veränderungen sind bereits in Planung.



**Abbildung 2** Laborpyrolyseanlage Pyreka 9050  
Laborpyrolyseanlage Pyreka 9050 mit wichtigen Baugruppen (Quelle: PYREG GmbH, 2020, modifiziert durch von Ahn).



**Abbildung 3** Arbeitsschema der Pyreka 9050  
 Wichtige funktionelle Einheiten und Arbeitsschema der Pyreka 9050 (Quelle: K. Kaetzi).

### Standardisierungen im Funktionsprozess

Erste Versuche mit dem Auslieferungszustand der Pyreka verliefen erfolgreich. Es stellte sich jedoch zeitnah heraus, dass einige Prozessschritte mehr überwacht und standardisiert werden mussten, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Infolgedessen wurden für die Arbeiten an der Pyreka folgende Standards festgelegt (Auszug):

1. Die Eintragsmessung der Biomasse erfolgt direkt, d.h. bevor das Material in die Zellenradschleuse übergeben wird. Die Eintragsmechanik wurde in diesem Sinne modifiziert, so dass sie ausgehängt werden kann.
2. Die Taktung der Zellenradschleuse (ZRS) wird mit der Taktung des Eintrags synchronisiert.
3. Standardströme für  $N_2$  im Reaktor werden auf 6-7 l/min festgelegt.
4. Tracertests müssen aufgrund der verschiedenen Transporteigenschaften der Biomasse im Reaktor durchgeführt werden. Anhand dieser kann dann die Taktung für die Verweilzeit ermittelt werden. (Anmerkung: für eine statistische Sicherheit sollten mindestens 5 Tracertests durchgeführt werden, die Transportmechanismen, besonders unter Temperatureinfluss müssen noch genauer analysiert werden).
5. Der Reaktor benötigt ausreichende Zeit um steady-state (Gleichgewichtsbedingungen) ausbilden zu können. D.h. vor der Produktion einer Probe muss der Reaktor eine gewisse Zeit mit den Probenparametern „einlaufen“. Für die Pyreka in Neu-Eichenberg wird im Allgemeinen die doppelte Verweilzeit nach Erstaustrag Kohle angenommen.
6. Eintragsmengen (Gewichte) müssen mit dem sich einstellenden Volumenstrom im Reaktor abgeglichen werden. Wenn die maximalen Mengen überschritten werden, kommt es zu Verstopfungen, wenn sie weit unterschritten werden, zu Veraschung des Karbonisats.

Im Rahmen von Untersuchungen zu Pflanzkohleeigenschaften aus **Straßenbegleitgrün** wurde das getrocknete und pelletierte Rohmaterial verwendet bzw., zum Zwecke eines Vergleichs, der ebenso pelletierte Presskuchen. Da die Prozessparameter während der Pyrolyse eine wichtige Rolle für die Eigenschaften der Pflanzkohle spielen (Ippolito *et al.* 2020, Lehmann & Joseph 2009), wurden die Produktionsparameter mit zwei Temperaturen von 400 °C (niedrig) und 750 °C (hoch) und einer moderaten Verweilzeit von ca. 30 Minuten eingestellt. So konnte eine Generierung von Pflanzkohlen mit einem breiten Eigenschaftsspektrum sichergestellt werden. Die verwendeten Parameter ermöglichen eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf einen großtechnischen Reaktor, z. B. Pyreg P500 (Pyreg GmbH, Dörth, Deutschland).

Im Rahmen von Untersuchungen zu Pflanzkohleeigenschaften aus **Feuchtwiesen- und Streuobstwiesenmaterial** wurden neben einer Pflanzkohle (BC), zwei verschiedene Pflanzenaktivkohlen (AC) produziert. Hierbei wurde das Material für die Pyrolyse mittels IFBB-Verfahren [AP2] vorbehandelt, sodass nur die generierten Presskuchen in Form von Pellets karbonisiert wurden. Alle Kohleprodukte wurden bei 900 °C generiert, wobei ein Teil der Kohlen ein Aktivierungsgrad von 50 % erhielt und ein weiterer Teil wurde zu 100 % aktiviert. Der Oxidationsgrad wurde als stöchiometrischer Anteil des Sauerstoffs definiert, der mit Dampf zugeführt wurde, um 50 % oder 100 % des Kohlenstoffgehalts der Biomasse zu oxidieren. Die vereinfachte partielle Oxidationsreaktion während der Pyrolyse und Aktivierung wurde wie folgt angenommen:



Die Pflanzen(aktiv)kohlen wurden in einem einstufigen Pyrolyse- und Aktivierungsprozess bei 900 °C und 25 Minuten Verweilzeit hergestellt. Diese drei Pflanzkohleprodukte, nämlich Pflanzkohle (BC), Pflanzenaktivkohle mit einem Oxidationsgrad von 50 % (AC 50 %) sowie AC mit einem Oxidationsgrad von 100 % (AC 100 %) wurden jeweils für die Feucht- und Streuobstwiese analysiert. Die Analytik wurde hierbei erweitert um Spezifische Oberfläche, Mikroporenvolumen (< 2 nm), Mesoporen-Volumen (2 – 28 nm) sowie Gesamtes Porenvolumen (< 28 nm).

Die untersuchten Biomassen aus Landwirtschaft und verarbeitender Industrie, namentlich **Kirschkerne** und **Dinkelspelzen**, wurden für die Pyrolyse weder vorbehandelt noch pelletiert. Diese beiden Biomassen wurden jeweils mit nur einer Prozesstemperatur pyrolysiert. Kirschkerne wurden bei 450 °C und 30 min Verweilzeit, Dinkelspelzen bei einer Temperatur von 550 °C und 30 min Verweilzeit pyrolysiert.

Als Surrogat einer holzigen Restbiomasse wurde **Eichen-Sägemehl** pelletiert und bei jeweils 400 °C und 750 °C mit einer Verweilzeit von 30 min karbonisiert.

**Miscanthus** wurde als Ausgangsmaterial verwendet um Einfluss von Verweilzeit, Prozesstemperatur und Oxidationspotential auf die Eigenschaften von biogenen Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen zu untersuchen. Im ersten Schritt wurde eine Pflanzkohle aus pelletiertem *Miscanthus*-Material bei 900 °C und 30 min Verweilzeit im Reaktor produziert (Tabelle 1). Diese Pflanzkohle diente als eine Art Kontrolle (Control). Im zweiten Schritt wurden Pflanzkohlen produziert mit einer einheitlichen Verweilzeit von 10 min (BC10), jedoch unterschiedlicher Temperaturen. Beginnend mit 300 °C wurden weitere *Miscanthus*-Pflanzkohlen bei 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C sowie 900 °C hergestellt. Diese

Temperaturreihe wurde ebenso verwendet, um Pflanzenkohlen herzustellen, welche jedoch eine Verweilzeit von 60 min im Reaktor aufwiesen (BC60). In einem vierten Schritt wurden Aktivkohlen hergestellt mit einer einheitlichen Verweilzeit von 30 min (AC30), jedoch mit unterschiedlichen Oxidationsgraden, namentlich 25 %, 50 %, 75 %, 100 % und 125 %. Die fünfte Gruppe bildete Pflanzenkohlen mit einem Oxidationsgrad von 100%, jedoch entweder mit einer Verweilzeit von 10 min, 20 min, 30 min oder 40 min im Reaktor.

**Tabelle 1** Auflistung der hergestellten Pflanzen- und Pflanzenaktivkohle  
Auflistung der hergestellten Pflanzen- und Pflanzenaktivkohle mit *Miscanthus* als Ausgangssubstrat mit Angaben zur Verweilzeit, Pyrolysetemperatur und Oxidationsgrad (Aktivkohlen).

Gruppen	Probe_Nr	Probe	Bemerkung
BM	441_053_01	SB Miscanthus (roh)	Biomasse, pelletiert
Control	456_053_03	SB Miscanthus BC 900°C/30min 0/0	0 l/min N2 in ZRS; 0 l/min in Reaktor
	456_053_01	SB Miscanthus BC 900°C/30min 0/N2	0 l/min N2 in ZRS; 5,5 l/min in Reaktor
	456_053_02	SB Miscanthus BC 900°C/30min N2/N2	Überdruck N2 in ZRS; 7L/min in Reaktor
BC(10)	456_053_04	SB Miscanthus BC Matrix I (300°C/10min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor, starke Rauchtentw. im A-beh.
	456_053_05	SB Miscanthus BC Matrix I (400°C/10min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor
	456_053_06	SB Miscanthus BC Matrix I (500°C/10min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor
	456_053_07	SB Miscanthus BC Matrix I (600°C/10min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor
	456_053_08	SB Miscanthus BC Matrix I (700°C/10min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor
	456_053_09	SB Miscanthus BC Matrix I (800°C/10min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor
	456_053_10	SB Miscanthus BC Matrix I (900°C/10min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor
BC(60)	456_053_11	SB Miscanthus BC Matrix VI (300°C/60min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor
	456_053_12	SB Miscanthus BC Matrix VI (400°C/60min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor
	456_053_13	SB Miscanthus BC Matrix VI (500°C/60min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor
	456_053_14	SB Miscanthus BC Matrix VI (600°C/60min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor
	456_053_15	SB Miscanthus BC Matrix VI (700°C/60min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor
	456_053_16	SB Miscanthus BC Matrix VI (800°C/60min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor
	456_053_17	SB Miscanthus BC Matrix VI (900°C/60min, N2)	6-7 L/min N2 in Reaktor
AC(30)	457_053_01	SB Miscanthus AC 900°C/30min 25%	ganz ohne N2, H2O-Aktivierung
	457_053_02	SB Miscanthus AC 900°C/30min 50%	ganz ohne N2, H2O-Aktivierung
	457_053_03	SB Miscanthus AC 900°C/30min 75%	ganz ohne N2, H2O-Aktivierung
	457_053_04	SB Miscanthus AC 900°C/30min 100%	ganz ohne N2, H2O-Aktivierung
	457_053_05	SB Miscanthus AC 900°C/30min 125%	ganz ohne N2, H2O-Aktivierung
AC(v)	457_053_07	SB Miscanthus AC 900°C/10min 100%	ganz ohne N2, H2O-Aktivierung
	457_053_06	SB Miscanthus AC 900°C/20min 100%	ganz ohne N2, H2O-Aktivierung
	457_053_04	SB Miscanthus AC 900°C/30min 100%	ganz ohne N2, H2O-Aktivierung
	457_053_08	SB Miscanthus AC 900°C/40min 100%	ganz ohne N2, H2O-Aktivierung

Die generierten Pflanzen(aktiv)kohlen der o.g. Biomassen wurden anschließend im Labor auf ihre chemisch-physikalischen Eigenschaften untersucht. Vor der Analyse wurden die Pflanzenkohlen auf weniger als 1 mm gemahlen und über Nacht bei 105 °C getrocknet.

#### **Analytik: Probenvorbereitung, Mahlen, Homogenisieren, Trocknen**

Die Probenvorbereitung für die im Folgenden aufgelisteten Analysen erfolgte an der Universität Kassel, am Fachgebiet Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe. Dies beinhaltete vorab eine Vermahlung der luftgetrockneten Kohlen auf Analysefeinheit (laut Vorschrift in Singh *et al.* 2017) zwischen 850 µm und 150 µm (Abbildung 4). Für einige Analysen erwies es sich als vorteilhaft gleich mit der Trockensubstanz zu arbeiten. So wurden Biomassen und Pflanzenkohlen bei 105 °C, Pflanzenaktivkohle bei 150 °C im Trockenschrank getrocknet.



**Abbildung 4** Schwingmühle SM500nano von Retsch mit den verschiedenen Stufen der Verarbeitung: 1. Füllung des Mahlgefäßes mit Stahlkugeln, 2. Hinzugeben der Probe, 3. Prüfung des Ergebnisses (Bildautor: von Ahn).

## Physikalisch-chemische Parameter

### **Jodadsorptionszahl**

Die Bestimmung der Jodadsorptionszahl gilt als schneller Test auf die innere spezifische Oberfläche von porösen Kohlen. Durch sie wird die Jodmenge definiert, die aus einer Jodlösung bestimmter Molarität an eine definierte Menge (Aktiv-)Kohle adsorbiert, d.h. aus der Lösung entfernt wird. Der Vorteil der Jodadsorption ist die geringe Größe des Jodmoleküls, so dass Mikro- (< 2 nm), Meso- (2 bis < 50 nm) und Makroporen (> 50 nm) in die Bestimmung einbezogen werden (Brendel & Dohmann 1997). Die Prozedur wurde in Anlehnung an die von der European Chemical Industry Council (CEFIC) veröffentlichten Anleitung durchgeführt (CEFIC 1986), wobei bei Kohlen mit sehr geringer innerer Oberfläche von der vorgegebenen Normalität der Jodlösung abgewichen wurde.

#### *Durchführung nach CEFIC (1986), modifiziert:*

Die Bestimmung der Jodzahl erfolgte an getrockneten, gemahlene Kohlen. Pflanzenkohlen (ohne Aktivierung) wurden bei 105 °C, aktivierte Pflanzenkohlen bei 150 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Da die Kohlen schnell Feuchtigkeit aufnehmen, wurden sie bis zur weiteren Verwendung im Exsikkator heruntergekühlt und gelagert.

Nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur wurden die Proben in saubere, mit Normschliff versehene 250 ml Erlenmeyerkolben eingewogen. Die Menge betrug zwischen 1 und 2 g<sub>TS</sub>, je nach der zu erwartenden Größe der inneren Oberfläche. D.h. bei Kohlen von erwartet „schlechterer“ Adsorptionsqualität wurde eine höhere und bei erwartungsgemäß „besseren“ Kohlen respektive eine geringere Menge eingewogen. Die Wäagegenauigkeit lag bei vier Nachkommastellen (1 mg).

Als Vorbereitung auf die eigentliche Bestimmung der Jodzahl wurde die eingewogene Kohle mit 10 ml 5 %iger HCl vermischt und für 30 s aufgeköcht. Nachdem die Mischung auf Raumtemperatur abgekühlt war, wurde sie mit 100 ml 0.1 N Jodlösung aufgefüllt, sofort verschlossen, für 30 s kräftig geschüttelt und über einen Faltenfilter abfiltriert, wobei die ersten 30 ml verworfen wurden (Minimierung von Kontaminationen; Abbildung 5). Die restlichen ca.

70 ml Filtrat wurden in einem sauberen Becherglas aufgefangen und unter Rühren 50 ml davon mittels einer Pipette in einem Weithals-Erlenmeyerkolben überführt.

Die Bestimmung der Jodzahl erfolgte durch Titration (Abbildung 6). Hierfür wurde die Jodlösung auf einem Magnetrühr Tisch kräftig durchmischt und gleichzeitig mit 0.1 N Natriumthiosulfatlösung bis zum Farbumschlag ins Hellgelbe titriert. Da die Farbänderung von hellgelb zu farblos sehr schlecht zu erkennen war, wurden 1 ml Stärkelösung zur Jodlösung hinzugegeben, wodurch eine tiefblaue Färbung entstand, welche durch fortgesetzte Titration sich deutlich graduell entfärbte.



**Abbildung 5** Filtration der Kohle-Jodlösungssuspension deutlich zu erkennen ist die rotbraune Färbung des Filtrats (Bildautor: Wedmann).



**Abbildung 6** Titration mittels elektronischer Titrierhilfe (links). Auf Magnetrührer stehender Erlenmeyerkolben, gefüllt mit bereits mit Stärkelösung versetzten Jodlösung (rechts; Bildautor: Wedmann).

Die bei der Titration verbrauchte Menge an Natriumthiosulfat bis zur kompletten Entfärbung wurde notiert und die Jodzahl wie folgt berechnet:

$$\text{Restnormalität ermitteln: } Nr = N2 \frac{V}{50}$$

Korrekturfaktor A anhand der Restnormalität (Nr) aus der Faktortabelle auslesen

$$\text{Jodzahl berechnen: } In = A * \frac{(12693 * N1) - (279,246 * N2 * V)}{m}$$

Mit:

X = mg Jod, adsorbiert an Aktivkohle

N1 = Normalität der Jodlösung

N2 = Normalität der Natriumthiosulfatlösung

v = Volumen der Natriumthiosulfatlösung [ml]

m = Einwaage der Kohle [g]

A = Korrekturfaktor

### **pH-Wert**

Zur Analyse des pH-Wertes der verschiedenen Pflanzen(aktiv)kohlen kam die Vorschrift wie vorgeschlagen in Singh *et al.* (2017) zum Einsatz. Da das vereinheitlichte Probenmaterial (homogenisiert) nur in begrenzten Mengen zur Verfügung stand, und für alle Analysen

ausreichen sollte, wurde bei der Messung des pH-Wertes, und später auch bei der Leitfähigkeit auf Replikate verzichtet und nur an der Probe selbst eine Doppelbestimmung (bzw. zweite Messung der Pufferlösungen) zur Verifizierung der Plausibilität des ersten Messwertes vorgenommen.

Für die Bestimmung des pH-Wertes wurden 5.0 g gemahlene und getrocknete Pflanzen- und/oder Pflanzenaktivkohle in 100 ml Schott-Laborgewindeflaschen eingewogen und mittels Dispensette 50 ml VE-Wasser hinzugefügt. Die Flaschen wurden fest verschlossen und 1 h bei ca. 20 °C mittels Horizontalschüttler (SM-30) gut vermischt (Abbildung 7). Hierbei wurde darauf geachtet, dass sich in der Flasche keine Kohleränder bilden und der Kohlenstaub komplett in Suspension gebracht wurde. Um dies zu erreichen wurde eine hohe Schüttelintensität von 250 pro Sekunde eingestellt.



**Abbildung 7** Universalschüttler SM-30  
Mischen der Kohlesuspension auf Universalschüttler SM-30 der Edmund Bühler GmbH (Bildautor: von Ahn).



**Abbildung 8** Messaufbau zur pH-Bestimmung der Kohlesuspension (Bildautor: von Ahn).

Nach Ablauf der ersten Stunde im Schüttler wurden die Flaschen entnommen und vor dem Messen 30 min auf der Arbeitsfläche ruhen lassen, damit sich die Kohle etwas absetzen kann. Die Messung erfolgte mit einem dreipunktkalibrierten pH-Meter der Firma WTW (pH3310; pH-Elektrode: SenTix41). Hierbei wurde mittels Elektrodenhalterung die Messsonde bis kurz über der Kohleschicht (wenn möglich) in die Lösung eingetaucht und nach ca. 1 - 2 min, wenn der Messwert stabil blieb, der angezeigte pH-Wert notiert (Abbildung 8).

### **Leitfähigkeit**

Zur Bestimmung der Leitfähigkeit der verschiedenen Kohlesuspensionen kam die in Singh *et al.* (2017) empfohlene Methode zum Einsatz. Für die Analyse wurden 5.0 g gemahlene und getrocknete Pflanzen- und/oder Pflanzenaktivkohle in 100 ml Schott-Flaschen eingewogen und mittels Dispensette 50 ml VE-Wasser hinzugefügt. Die Flaschen wurden fest verschlossen und 1 h bei ca. 20 °C mittels Horizontalschüttler (SM-30) gut vermischt. Hierbei wurde darauf geachtet, dass sich in der Flasche keine Kohleränder bilden und der Kohlenstaub komplett in Suspension gebracht wurde. Um dies zu erreichen wurde eine Schüttelintensität von 250 pro Sekunde eingestellt.

Nach Ablauf der ersten Stunde im Schüttler wurden die Flaschen entnommen und für 30 min ruhen gelassen. Die sich anschließende Filtration (mit Whatman V2 Filterpapier) wird als

optionalen Schritt in der Analysemethode (Singh *et al.* 2017) erwähnt (Abbildung 9). Erfahrungen am Fachgebiet zeigen, dass dies sinnvoll ist, um stabile Messwerte zu erhalten.



**Abbildung 9** Filterbank für die Analyse der Leitfähigkeit von Kohlensuspensionen (Bildautor: von Ahn).

Um den Einfluss des Ionengehaltes des hinzugefügten deionisierten Wassers, bzw. den aus dem Filter ausgewaschenen Salzen quantifizieren zu können wurden über den gesamten Prozessweg 6 Blanks mitgeführt und als Hintergrundwert von den Leitfähigkeitsmessungen abgezogen. Die Messung der EC-Werte der Proben erfolgte mit einem kalibrierten WTW Multi 3420 mit WTW-Leitfähigkeitssonde.

### **Trockensubstanz (Proximate Analysis)**

Die Analysen im Rahmen der Proximate Analysis erfolgten gemäß dem Standard ASTM D1762-84 (vgl. Singh *et al.* 2017). Die Bestimmung der Trockensubstanz, bzw. der Anteil des Wassers an der analysenfeuchten Probe war der erste Schritt in der „Proximate Analysis“. Aus dem Anteil an TS in der Probe können später alle Analyseergebnisse (wenn nicht schon als TS analysiert) auf den Anteil Trockenmasse der Analyseneinwaage normiert werden.

Die Ermittlung des TS-Gehaltes kann auf verschiedene Wege erfolgen, welche sich oft durch die Genauigkeit der Ergebnisse unterscheiden. Die zwei Standard-Verfahren zur TS-Analyse sind das manuelle Einwiegen einer bestimmten Menge an Ausgangssubstanz in ein wasserfreies Gefäß, mit anschließendem Erhitzen bis zur Gewichtskonstanz (bei definierten Temperaturen). Das zweite Verfahren verläuft über die Nutzung eines automatischen Feuchtemessers. Dieses Verfahren ist zeiteffektiv, gilt jedoch als ungenau. Beide Verfahren kamen im Rahmen dieser Untersuchungen zum Einsatz: die automatische Feuchtemessung für die Erfassung des benötigten Wassergehaltes für die Aktivierung in der Pyreka und die genauere Variante für die Kalkulation der Analyseergebnisse.

Zur manuellen Bestimmung des TS-Gehaltes (als Vorstufe zur Bestimmung des Ascheanteils, bzw. als Rechengrundlage für die Analyseergebnisse) wurden Porzellantiegel im Muffelofen bei 550 °C für 2 h wasserfrei geglüht, danach in einen Exsikkator überführt und auf Raumtemperatur abgekühlt (Abbildung 10 und 11).



**Abbildung 10** Nabatherm CP320 Programmierbarer Muffelofen (Bildautor: von Ahn).



**Abbildung 11** Ausglühen der Tiegel und Veraschung bei 650°C (Bildautor: von Ahn).

Im Anschluss wurden 1 bis 2 g Frischmasse (auf vier Nachkommastellen genau) eingewogen und bei 105 °C (Pflanzkohle und Biomasse) bzw. 150 °C (Pflanzenaktivkohle) im Muffelofen bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

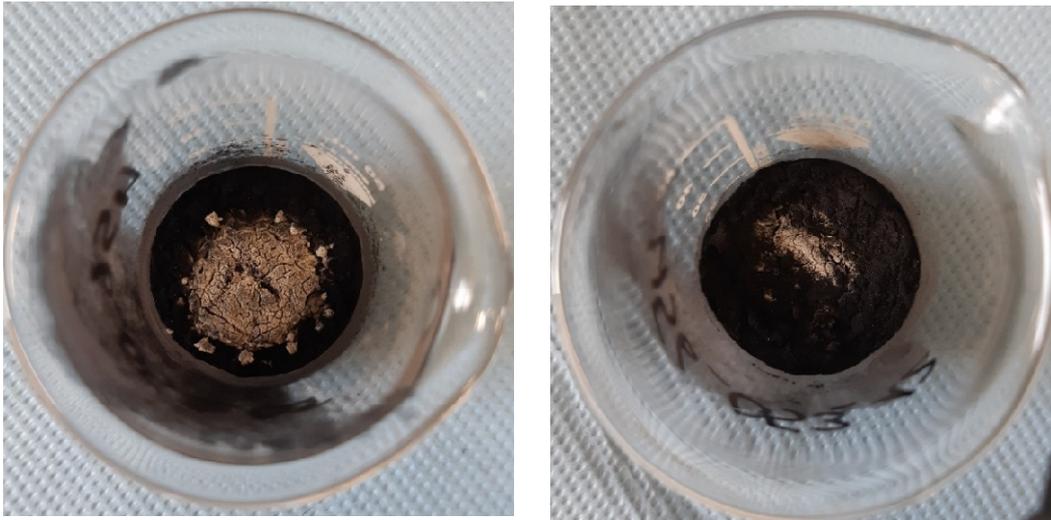
Um eine Vergleichbarkeit der Kohleproben zu gewährleisten, sollten beide Kohletypen, Pflanzkohlen und Pflanzenaktivkohlen, bei 150 °C getrocknet werden. Dies erwies sich jedoch als methodisch ungeeignet, da die bei niedriger Temperatur (bis 500 °C Reaktortemperatur) produzierte Pflanzkohle bei der Behandlung mit 150 °C heißer Umgebungsluft im Trockenschrank bereits Veraschung aufwies (Abbildung 12).

Die Tiegel wurden anschließend wieder in einen Exsikkator zum Abkühlen überführt und das Trockengewicht ausgewogen.

$$Probe\ Auswaage\ trocken\ [g] = Trockenauswaage\ mit\ Tiegel\ TS\ [g] - Tiegel\ TS\ [g]$$

Die Berechnung des TS-Gehaltes in % erfolgt gemäß:

$$TS\ [\%] = \frac{Probe\ Auswaage\ trocken\ [g] * 100}{Probe\ Einwaage\ frisch\ [g]}$$



**Abbildung 12** Aschebildung durch Trocknung  
Aschebildung durch Trocknung bei 150°C (Bildautor: von Ahn).

### **Aschegehalte (Proximate Analysis)**

Mit den ermittelten Trockengewichten der einzelnen Proben konnte im Anschluss der Aschegehalt und, als Differenz zwischen Probe<sub>TS</sub> [g] und Asche [g], der Anteil an organischer Substanz errechnet werden.

Dazu wurden die Tiegel erneut in den Muffelofen verbracht und bei 550 °C (Biomasse) bzw. 650 °C (Pflanzenkohlen) bis zur Gewichtskonstanz verascht. Nach Überführung und Abkühlung im Exsikkator wurden die Tiegel erneut ausgewogen und der Aschgehalt und Gehalt an organischer Trockensubstanz errechnet (Abbildung 13 und 14):

$$\text{Asche Auswaage [g]} = \text{Ascheauswaage mit TiegelTS [g]} - \text{TiegelTS [g]}$$

$$\text{Asche [\%]} = \frac{\text{Asche Auswaage [g]} * 100}{\text{Probe Auswaage trocken [g]}}$$

$$\text{oTS [\%]} = 100 - \text{Asche [\%]}$$



**Abbildung 13** Exsikkator zur trockenen Lagerung und zum Abkühlen lassen von heißen Proben (Bildautor: von Ahn).



**Abbildung 14** Aschereste in Porzellantiegeln (Bildautor: von Ahn).

### ***Flüchtige organische Verbindungen (VOC; Proximate Analysis)***

Die VOC-Bestimmung an den Pflanzenkohlen und Pflanzenaktivkohlen erfolgte an trockenen Proben, d.h. die Kohlen wurden bei 105 °C und Aktivkohlen bei 150 °C vorgetrocknet.

Zur Vorbereitung der Untersuchung wurden die Glasiegel mit Deckel (Sauerstoffabschluss) bei 950 °C für 10 min gegläht, um Staub und Feuchtigkeit zu entfernen. Nach dem Herunterkühlen im Exsikkator wurde deren Trockengewicht, Position im Probenhalter, eingewogene Probennummer und deren exaktes Gewicht (TS) notiert. Das Austreiben der flüchtigen Bestandteile erfolgte im Muffelofen bei 900 °C / 7 min Verweilzeit (bei Biomassen) und 950 °C / 10 min (bei Kohlen; Abbildung 15).

Nach dieser Hitzebehandlung wurden die Tiegel aus dem Muffelofen entfernt, für 10 min auf einer feuerfesten Unterlage ruhen gelassen, zum weiteren Abkühlen auf Raumtemperatur in einen Exsikkator überführt und zu gegebener Zeit ausgewogen. Die Berechnung des Anteils flüchtiger Bestandteile erfolgte durch:

$$VOC [\%] = \frac{(\text{Tiegelgeglüht [g]} + \text{Einwaage ProbeTS [g]}) - \text{Auswaage Tiegel mit Probe950°C [g]}}{\text{Einwaage ProbeTS [g]}} * 100$$



**Abbildung 15** Muffelofen  
Muffelofen, Glastiegel und Werkzeug zum  
Bestimmen der flüchtigen Bestandteile (Bildautor:  
von Ahn).

### ***Fixed Carbon (Stabiler Kohlenstoff; Proximate Analysis)***

Der Anteil an Fixed Carbon ist der Anteil des Kohlenstoffs im Material/Biomasse, der auch noch bei hohen Temperaturen bzw. unter atmosphärischen Bedingungen als stabiler Kohlenstoff erhalten bleibt. Das heißt, Fixed C wird auch über längere Zeiträume nur in geringem Maß in die Atmosphäre abgegeben und dient somit als Kohlenstoffspeicher, bzw. CO<sub>2</sub> Speicher. Die Berechnung erfolgte gemäß:

$$\text{Fixed Carbon [\%]} = 100 \% \text{ Trockensubstanz} - \text{Aschegehalt [\%]} - \text{Volatilegehalt [\%]}$$

### **Elementanalyse**

#### ***Hauptelemente (C, H, N, S)***

Die Hauptelementanalyse auf C, H, N und S erfolgte am Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik des Instituts für Wasser, Abfall und Umwelt der Universität Kassel. Zum Einsatz kam ein „vario MACRO cube“ – CHNOS Elementaranalysator der Firma Elementar Analysensysteme GmbH. Die Analytik erfolgte gemäß den Normen DIN 51732 und DIN EN ISO 21663.

Die Funktion des Gerätes (zusammengefasst und stark vereinfacht nach: Elementar Analysensysteme GmbH, 2019) beruht im Wesentlichen auf der Verbrennung einer definierten Menge einer Probe, wobei sich die Gerätekonfiguration (durch Ein- oder Ausbau von verschiedenen Verbrennungsrohren, Absorptionssäulen, Reduktionssäulen) auf verschiedene Analysemodi umstellen lässt. So entstehen z.B. im Modus CHNS im Verbrennungsrohr (mit WO<sub>3</sub>-Granulat als Katalysator) die Gase: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> welche über ein Trägergas in eine Reduktionssäule geleitet werden. Hier werden Stickoxide zu N<sub>2</sub> und SO<sub>3</sub> zu SO<sub>2</sub> reduziert. Flüchtige Halogenen werden parallel zu diesem Prozessschritt durch Absorption an Silberwolle beseitigt. Die Auftrennung des Verbrennungsgases im Trägergasstrom in die einzelnen detektierbaren Bestandteile erfolgt über die elementspezifischen

Adsorptionssäulen. Hier werden über verschiedene Zwischenschritte die einzelnen Komponenten adsorbiert, durchgelassen oder (durch Aufheizung) desorbiert.

In der Anleitung des Elementaranalysators wird folgender Prozessweg zur Verdeutlichung der Vorgänge bei der CHNS-Analyse aufgezeigt (nach Elementar Analysensysteme GmbH, 2019; gekürzt und vereinfacht):

Adsorptionssäulen auf Standby-Temperatur

- N<sub>2</sub> wird mit dem Trägergas zum Detektor durchgelassen
- CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> werden an den entsprechenden Säulen adsorbiert

CO<sub>2</sub>-Desorption

- Aufheizung der CO<sub>2</sub>-Adsorptionssäule
- CO<sub>2</sub> wird desorbiert und mit dem Trägergas in den Detektor geschleust

H<sub>2</sub>O-Desorption

- Aufheizung der H<sub>2</sub>O-Adsorptionssäule
- H<sub>2</sub>O wird desorbiert und mit dem Trägergasstrom in den Detektor geschleust

SO<sub>2</sub>-Desorption

- Aufheizung der SO<sub>2</sub>-Desorptionssäule
- SO<sub>2</sub> wird desorbiert, getrocknet und mit dem Trägergasstrom in den Detektor geschleust

Wie aus dem o.g. Prozessablauf ersichtlich ist, wird das Verbrennungsgas stofflich zerlegt und dem Detektor (in diesem Gerät ein Wärmeleitfähigkeitsdetektor) in zeitlich getrennten „Paketen“ geliefert. So ist dieser in der Lage die verschiedenen Gaskomponenten nach Art und Konzentration zu unterscheiden, diese in elektrische Messsignale umzuwandeln und (über weitere Zwischenschritte) an die Datenverarbeitungseinheit zur finalen Interpretation weiterzuleiten.

### **Neben- und Spurenelemente (ICP-OES)**

Spezielle Neben- und Spurenelemente wurden am ICP-OES des Labors OPATS/GNR gemäß DIN EN ISO 16967: 2015 bestimmt. Dies umfasste die Elemente Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na, und Cu. Die Analyse unterteilte sich in 2 Schritte, dem Aufschluss der Substanz und der Analyse mittels ICP-OES. Nachfolgend werden die beiden Schritte kurz erläutert.

#### ***Aufschluss in der „Anton Paar Multiwave PRO mit 41HVT56 Rotor“***

Zum Aufschluss der Substanz wurden rund 0.1 g Pflanzenkohle<sub>TS105°C</sub>, rund 0.1 g Pflanzenaktivkohle<sub>TS150°C</sub> bzw. rund 0.5 g Biomasse<sub>TS105°C</sub> in spezielle Teflon-Druckbehälter eingewogen (die Gewichte wurden als Basis für die späteren Berechnungen exakt notiert). Nachfolgend wurden das Aufschlussmedium (10 ml HNO<sub>3</sub>, 65 % bei Kohle und 6 ml HNO<sub>3</sub>, 65 % bei Biomasse) mittels Multipette hinzugefügt, der Druckbehälter fest verschlossen und in den Rotor der Mikrowelle gegeben (Abbildung 16).

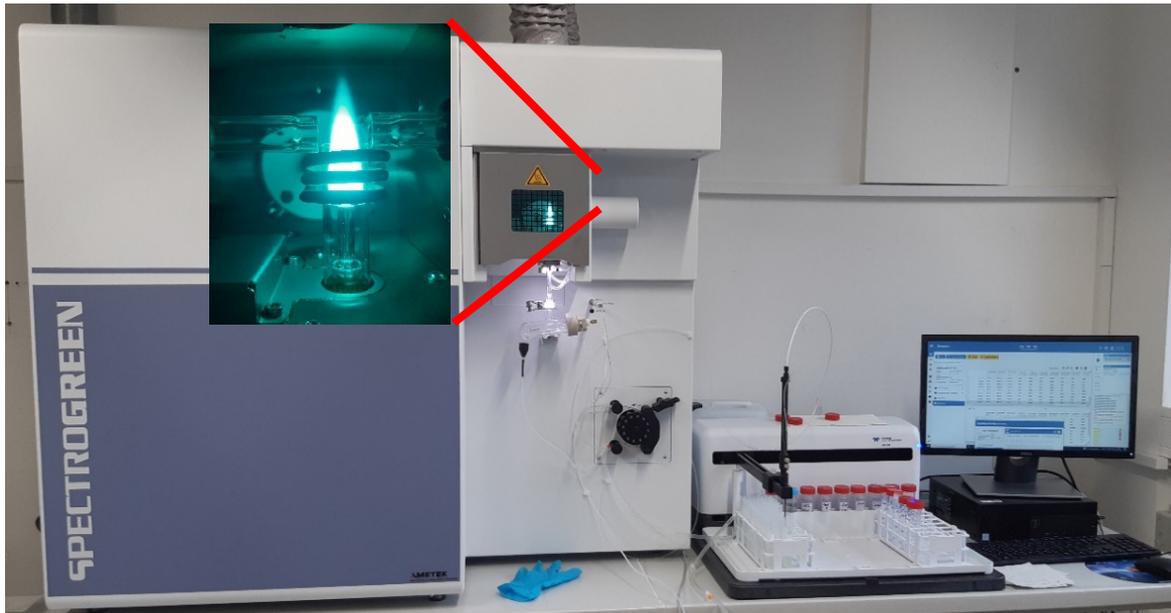


**Abbildung 16** Mikrowelle AP Multiwave PRO Befüllen der Aufschlussröhrchen (oben) und Blick in die Mikrowelle AP Multiwave PRO mit Rotormagazin (rechts; Bildautor: von Ahn).



Da die Behälter nicht beschriftet werden können, erfolgte die komplette Zuordnung der Proben, deren Gewichte, und die Ergebnisse über die Positionsnummer, welche in der Mikrowelle vergeben wurde. Im weiteren Verlauf erfolgte der Säureaufschluss unter Druck und Temperaturen bis zu 200 °C. Nach vollständigem Aufschluss wurden die Teflon-Druckgefäße vorsichtig geöffnet und der Inhalt durch mehrfaches Spülen in einen Messkolben überführt und wenn notwendig bis zur 50 ml Markierung mit VE-H<sub>2</sub>O aufgefüllt. Als letzter Schritt wurde der Inhalt des Kolbens abfiltriert und stand, nachdem die Filtrate in Fläschchen gefüllt und in die vorgesehenen Positionen im Probenhalter gestellt wurden für die eigentliche Analytik bereit.

Die Analytik mittels ICP-OES (Spectrogreen FMX46/2020) erfolgte automatisch (Abbildung 17). Die Proben, Standards und Blanks wurden gemäß dem einprogrammierten Raster angefahren und über eine Kapillare eingesaugt. Die angesaugte, flüssige Probe wird im Vernebler zerstäubt und dem Plasma (6000-8000 K) als Aerosole zugeführt. Aufgrund der hohen Temperaturen verdampfen die Tröpfchen, Moleküle werden dissoziiert und die entstehenden Atome ionisiert/angeregt. Beim Übergang in energetisch niedrigere Zustände emittieren diese angeregten Atome wiederum elementspezifisch Strahlung, welche durch die Optik im Gerät zerlegt und analysiert wird. Zwischen den Proben erfolgte ein Spülen der Kapillare und Schläuche mit VE-H<sub>2</sub>O und anteilmäßig mit wenigen ml der nächsten Probe, um Kontaminationen zu vermindern.



**Abbildung 17** Spectrogreen FMX46 mit Zerstäuber und Plasmakammer (links), automatischer Probensammler (mittig) und Auswerteeinheit (links; Bildautor: von Ahn).

### **Auswahl geeigneter Kohlen für die Praxisversuche**

Nach Auswertung der in AP2 und AP3 ermittelten Daten zu Biomasseeigenschaften und -verfügbarkeit sowie zur Unbedenklichkeit der generierten Pflanzenkohle als Einstreuzusatz in der Mastgeflügelhaltung, wurde sich von den OG Partnern auf eine Pflanzenkohlesorte geeinigt, welche in den Praxisversuchen eingesetzt werden sollte. Als Ausgangsbiomasse für die generierte Pflanzenkohle dienen Dinkelspelzen, welche bei 550 °C und einer Verweilzeit von 30 min generiert wurde.

### **Änderungen zum Aktionsplan**

Änderungen zum Aktionsplan umfassten vorrangig zeitliche Verschiebungen in der Datenerhebung weiter in die Projektlaufzeit hinein, u.a. da die Anlieferung und Installation der PYREKA-Anlage verspätet stattfand. Zudem kam es zu einer zeitlichen Verlagerung aufgrund der erschwerten Beschaffung notwendiger Mengen der identifizierten Restbiomassen. Eine inhaltliche Veränderung betraf die Produktion größerer Mengen an Pflanzenkohle aus der identifizierten Restbiomasse. Eine Auftragspyrolyse bei Pyreg GmbH direkt oder aber im Eigenbetrieb Baden-Baden war wegen defekter Anlagen und schwieriger Ersatzteilsituation aufgrund der Corona-Pandemie nicht umsetzbar. So wurden die für die Praxisversuche benötigten Mengen an Dinkelspelzenkohle bei einem offiziellen EBC-zertifizierten Händler, namentlich bei der Firma Fetzer Rohstoffe & Recycling GmbH, eingekauft.

## 2.4 Arbeitspaket 4 „Praxisversuche mit Kohle als Einstreuzusatz“

### **Erste Versuchsphase**

Um die Ausgangslage in den Mastställen der OG-Betriebe zu ermitteln, wurden im Sommer 2021 alle Kooperationsbetriebe besucht. Es wurden Basisdaten wie Hühnergenetik, Besatzdichte, Mastdauer, Mastablauf, Futterzusammensetzung, verwendete Einstreumaterialien, Medikamentengabe, sowie Haltungsbedingungen in den Stallungen und im Auslauf erfasst und mit den Landwirten konkrete Vorstellungen und mögliche Vorgehensweisen beraten.

Darüber hinaus diente diese Versuchsphase der Etablierung der anzuwendenden Methoden sowie ersten Beobachtungen, wie die Tiere auf den Kohlezusatz in der Einstreu reagieren. In Bezug auf die geplanten Erhebungen am Tier wurde das Forschungsvorhaben über den Tierschutzbeauftragten der Universität Kassel dem Regierungspräsidium Kassel, Dezernat Veterinärwesen und Verbraucherschutz, schriftlich vorgestellt und eine Beurteilung beantragt, ob dieses als Tierversuch im Sinne des Tierschutzgesetzes bzw. der Tierschutz-Versuchstierverordnung eingeordnet wird. Laut E-Mail-Korrespondenz vom 02.08.2021 erachtete die zuständige Behörde die geplanten Untersuchungen nicht als Tierversuch im genannten Sinn (Annex I).

Als nächster Schritt wurde die Fragestellung zunächst unter weitgehend kontrollierten Bedingungen im experimentellen Maßstab auf einem der Partnerbetriebe untersucht, der dafür die notwendigen Voraussetzungen mit mehreren weitgehend baugleichen kleinen Mobilställen bot.

### **Methodenentwicklung**

#### ***Entwicklung eines Boniturschemas zur Erhebung der tierbezogenen Tierwohlintikatoren und Reliabilitätsprüfung***

Basierend auf bereits vorhandenen Boniturschemata (z.B. Welfare Quality® 2009; Knierim *et al.* 2020) wurden Definitionen und bebilderte Anleitungen für die Erhebung der Tierwohlintikatoren auf den Betrieben maßgeblich von Dr. Daniel Gieseke (Fachgebiet Nutztierethologie und Tierhaltung, Universität Kassel) entwickelt (Annex II) und in der Praxisanwendung auf ihre Praktikabilität und Reliabilität (Annex III) geprüft. Über die ursprünglich geplanten Indikatoren ‚Fußballenveränderungen‘ und ‚Durchfall‘ hinaus wurden zusätzlich ‚Fersenhöckerveränderungen‘ und Gefiederverschmutzung, differenziert nach verschmutzter Fläche, möglichen Verklebungen und noch spezifisch für die Kloake (‚Gefiederverschmutzung - Fläche‘, ‚Gefiederverschmutzung - Struktur‘, ‚Kloakenverschmutzung‘) einbezogen. Diese Ergänzung erlaubte eine umfassendere Beurteilung möglicher Effekte des Kohleinsatzes auf das Wohlergehen der Tiere. Bedingt durch einen Personalwechsel fand vor Beginn der Datenerhebung im Juni 2021 zusätzlich eine Schulung weiterer Mitarbeiter:innen mit Theorie, praktischer Übung und vier Beurteilerabgleichen im Stall bzw. am Schlachthof statt, bei denen unterschiedliche Lebenswochen der Tiere (Lebenswochen 2, 7, 12, 14) im Sinne einer robusten Reliabilitätsüberprüfung berücksichtigt wurden. Die Beurteilerübereinstimmung wurde mittels des prevalence-adjusted biasadjusted kappa (PABAK) geprüft, wobei die Beurteilungen des Trainers (Dr. Gieseke) als Silberstandard verwendet wurden. Die Ergebnisse lassen sich in Anlehnung an die Einordnung von Kappa-Werten durch Landis und Koch (1977) als durchweg akzeptabel (bis auf eine Ausnahme bei der Kloakenverschmutzung) und ganz überwiegend gut bewerten. Somit war eine zuverlässige

Datenerhebung zu erwarten. Nach der ersten Versuchsphase wurden Definitionen im Boniturschema bezüglich der Indikatoren Gefiederzustand und Kloakenverschmutzung weiter optimiert, um eine klarere Abgrenzung der Noten zu erreichen.

Aufgrund eines erneuten Wechsels der Projektmitarbeiterin wurde 2022 eine weitere Schulung notwendig, die in vergleichbarer Art und mit vergleichbaren Ergebnissen erfolgte (Annex III).

### ***Kohleapplikation im Stall***

Im September 2021 wurde ein Vorversuch zur Beigabe von Pflanzenkohle in die Sägemehleinstreu im Scharraum eines mobilen Legehennenstalls durchgeführt (Abbildung 18, 19). Ziel war es einerseits, das Verhalten der Hühner nach der Pflanzenkohlezugabe zu beobachten, aber auch das „Verhalten“ der Pflanzenkohle als Beigemisch zur herkömmlichen Einstreu zu eruieren. Ausgangsmaterial dieser Pflanzenkohle waren Dinkelspelzen [→ AP2].



**Abbildung 18** Erkundungsverhalten der Legehennen während des Einbringens der Pflanzenkohle (Bildautor: Stenchly).

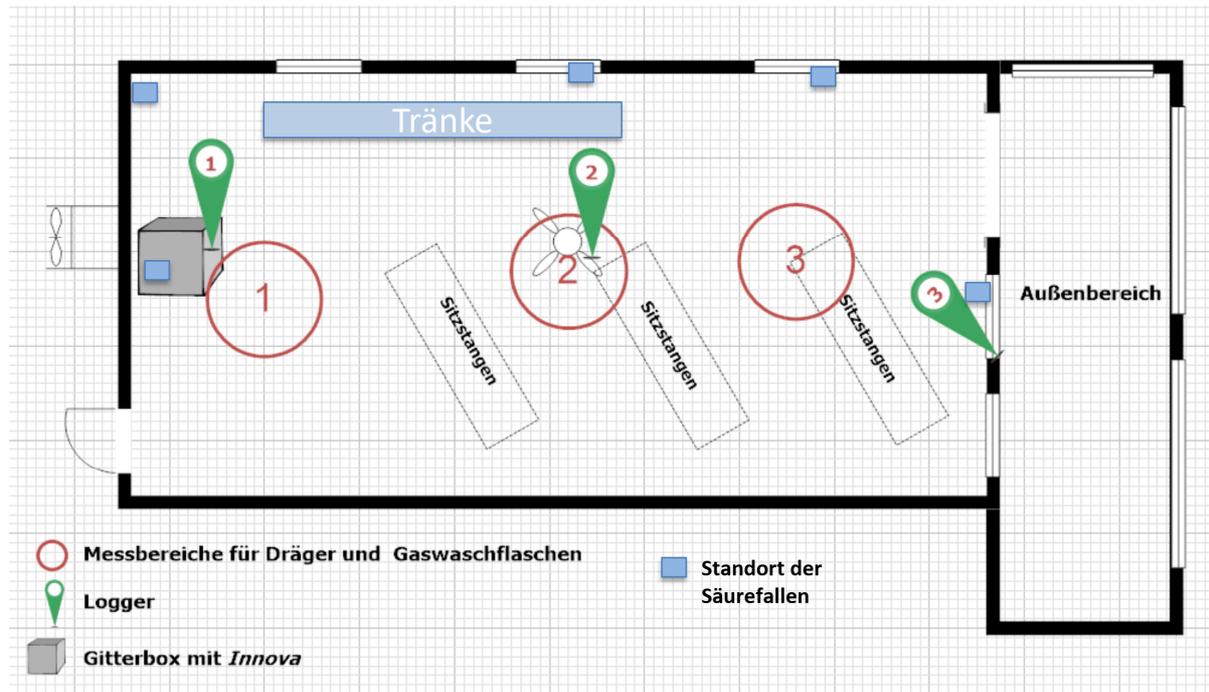


**Abbildung 19** KohleEinstreu im Scharraum Erkundungsverhalten nach dem Ausbringen der Kohle. (Bildautor: Umbach).

Es wurden rund 105 kg (Trockensubstanz) Dinkelspelzenkohle zusätzlich zur bereits frisch eingebrachten Sägespäne-Einstreu in den Scharraum eingebracht. Nach der Einstreu der Pflanzenkohle in den Scharraum, verhielten sich die Tiere neugierig, begannen die Pflanzenkohle aufzupicken und zu scharren. Die Pflanzenkohle war bereits nach 10-minütiger Scharaktivität der Hennen nicht mehr sichtbar, da sie sehr gut in die Einstreu eingearbeitet wurde. Ein mehrtägiger Austausch mit dem Betriebsleiter erbrachte, dass die Pflanzenkohle im Scharraum keinen offensichtlichen Effekt auf das Eierlegeverhalten o.ä. hatte.

### Ammoniakmessungen

Zunächst wurden vier verschiedene Verfahren der Ammoniakmessung erprobt, die kontinuierliche Messung mit einem photoakustischen Infrarot-Multigasanalysator (INNOVA-Gasmessgerät, Los Gatos Research), Langzeitmessungen mit Säurefallen (Glasfaserfilter mit 1 M Schwefelsäure getränkt) sowie Spotmessungen mit Gaswaschflaschen (mit 3 % Borsäure und 1 M Schwefelsäure) und Dräger-Kurzzeitröhrchen (DKR).



**Abbildung 20** Methodenerprobung zur Ammoniakmessung  
Dargestellt sind die verschiedenen Messstationen und unterschiedlichen Systemen im Masthühnerstall (Quelle: Hübner).

Die Ammoniak-Messungen erfolgte bei allen Methoden auf Kopfhöhe der Tiere (10-35 cm), mit Ausnahme der Säurefallen, welche sich teilweise auf den Fensterbänken der Stallung befanden. Für die Messung mit dem INNOVA-Gasmessgerät wurde ein „Schutzkäfig“ konstruiert, um Tiere und elektrische Geräte voneinander zu schützen. Als Staubschutz wurde über das INNOVA-Gerät ein Pollenschutzvlies gespannt.

Die Verweilzeit der Säurefallen betrug 48 h, vereinzelt auch 72 h, sowie einmalig 120 h. Im Labor wurden die Filter samt dem darauf befindlichen Staub mit 30 ml 1 M Schwefelsäure in ein Aufschlussgefäß eines Wasserdampfdistillationssystems (VAPODEST, C. Gerhardt GmbH & Co. KG) überführt und der Ammoniakgehalt ermittelt.

Bei der Ammoniakmessung mit Gaswaschflaschen wurde an jedem Messpunkt über eine Pumplaufzeit von mehreren Minuten Stallluft ungefiltert durch je eine Flasche mit 3 % Borsäure und durch eine Flasche mit 1 M Schwefelsäure geleitet. Während der Messung stand die Gaswaschflasche auf der Einstreu im Stall und wurde durch ein Drahtgitter vor Bepicken durch die Hühner geschützt. Im Labor wurde anschließend der Stickstoffgehalt der Borsäure-Gaswaschflaschen über Säure-Base-Titration ermittelt, und der Ammoniakgehalt rechnerisch

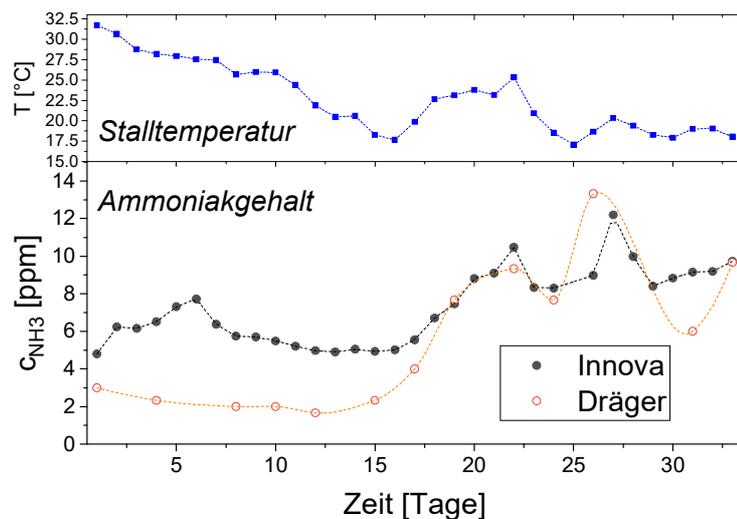
ermittelt. Die Schwefelsäure Gaswaschflaschen wurden nach Kjeldahl (1883) mithilfe des VAPODEST-Systems analysiert.

Die Messung mittels Dräger-Kurzzeitröhrchen (Abbildung 21) erfolgte dreimal pro Woche. Hierfür wurden Dräger-Röhrchen „Ammoniak 2/a“, mit einem Messbereich von 2 bis 30 ppm verwendet. Es handelt sich um eine Glasampulle mit pH-Indikator und Skala, durch die über eine Handpumpe ein definiertes Luftvolumen gezogen wird, hier 10-mal 100 mL Stallluft. Ein optischer Indikator an der Pumpe signalisiert, wann ein Hub vollständig ausgeführt wurde.

Die Messungen mit Gaswaschflaschen und Säurefallen erwiesen sich aus einer Reihe von Gründen als nicht praktikabel, bei ersteren vor allem weil die geringen Luftvolumina bei der Messung zu sehr hohen Schwankungen führten und bei Letzteren, weil das Abtrocknen der Glasfaserfilter und damit das Ende der Messung nicht exakt bestimmbar war. Der Vergleich der Messergebnisse zwischen INNOVA-Gasmessgerät und den Kurzzeitmessungen mit der Dräger-Gasspürpumpe zeigte weitgehend gute Übereinstimmungen (Abbildung 22), die es erlauben sollten, relevante Konzentrationsunterschiede zu erkennen. Auch vor dem Hintergrund der problematischen Einwirkung von Stallstaub auf das Messgerät wurde die punktuelle Messung mit DKR als schnelle und in der Praxis einfach durchführbare Methodik für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.



**Abbildung 21** Ammoniakmessung mittels Drägerröhrchen- und pumpe (Bildautor: Lehnert).



**Abbildung 22** Ammoniakgehalte Gemessen mittels INNOVA Gasmonitor und Dräger-Kurzzeitröhrchen im Zusammenhang mit der Stalltemperatur.

### Staubmessungen

Bezüglich der Wahl der Messmethodik wurde Expertise von Herrn PD Dr. Jochen Schulz (AG Tierhygiene und Tierhaltung, Institut für Tierhygiene, Tierschutz und Nutztierethologie, Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover) eingeholt, der uns zudem leihweise zwei Pumpen und sechs Filterköpfe zur Staubmessung zur Verfügung stellte.

Die Staubmengen im Stall wurden gravimetrisch ermittelt (Annex IV: Methodik der Staubmessung. Laut Büscher *et al.* (2012) ist das gravimetrische Verfahren aufgrund der

speziellen Staubzusammensetzung im Geflügelstall dem spektroskopischen Messverfahren an Genauigkeit überlegen. Das Aerosolspektrometer überschätzt die tatsächliche Staubbelastung und ist daher mittels eines gravimetrischen Korrekturfaktors zu korrigieren.

### **Untersuchung der Einstreueigenschaften**

Für verschiedene Einstreusubstrate, Sägespäne, Stroh und Dinkelspelzen, wurden exemplarisch die Ausgangs-Trockensubstanzgehalte gemessen; sie unterschieden sich leicht voneinander und betragen 91.7 %, 89.8 % und 85.4 %.

Eine weitere wichtige Eigenschaft von Einstreumaterialien stellt die maximale Wasserhaltekapazität (WHK) dar. Diese ist definiert als die maximale Wassermenge, die ein Substrat bis zur vollen kapillaren Sättigung aufzunehmen und gegen die Schwerkraft zu halten vermag (BGK 2006). So kann eine hohe Wasseraufnahmekapazität der Einstreu möglicherweise zu einer Verbesserung des Wohlbefindens der Tiere beitragen, indem Feuchtigkeit aufgenommen und von der Oberfläche ins Innere der Einstreu transportiert wird. Die WHK stellt somit eine interessante Größe dar, um Einstreuarten zu charakterisieren und zu vergleichen.

Zur Analytik der WHK wurde eine von Umbach (2021) entwickelte Versuchsanordnung (Abbildung 23) verwendet, die originär zur Beprobung von Substraten für den Außenbereich konstruiert worden war, um die Reaktion verschiedener Materialien auf Niederschläge zu testen. Zur Durchführung der Wassersättigungsversuche wurden die Proben in die Plexiglasapparatur eingewogen und anschließend über 12 Stunden wassergesättigt. Anschließend wurden die Proben zum Abtropfen auf ein Drahtgitter gestellt (Abbildung 24). Nach zwei Stunden war in der Regel das überschüssige Wasser aus den Grobporen abgelaufen und die Proben wurden zurückgewogen.



**Abbildung 23** Bestimmung der WHK I  
Grundaufbau der Versuchsanordnung zur Bestimmung der WHK (Bildautor: Umbach).



**Abbildung 24** Bestimmung der WHK II  
Abtropfen der wassergesättigten Einstreumaterialproben. V.l.n.r.: Stroh mit Kohlezusatz, Papierpellets, Stroh, Papierpellets mit Kohlezusatz (Bildautor: Umbach).

Die verschiedenen von den OG-Partnern verwendeten Einstreumaterialien wurden in Bezug auf ihre Rohdichte, also ihr Raumgewicht (g/L), in der Frisch- und Trockensubstanz und ihre WHK untersucht: grob gehäckseltes Gerstenstroh, Papierpellets und Dinkelspelzen (Abbildung 25, obere Reihe). Die Einstreumaterialien wurden jeweils ohne sowie mit Zusatz von 15 und 30 % Pflanzenkohle getestet. Hinzu kamen Versuche mit reiner

Dinkelspelzenkohle. Die Versuchsdurchgänge wurden jeweils in dreifacher Wiederholung durchgeführt. Darüber hinaus wurden die ermittelten WHK in Volumenprozent mit Ergebnissen aus einer früheren methodisch gleichen Untersuchung anderer praxisüblicher Substrate ohne Kohlezusatz (Sägemehl, Dinkelspelz-, Holz- und Strohmehlpellets, Abbildung 25, untere Reihe) verglichen.



**Abbildung 25** Einstreusubstrate in der Geflügelhaltung  
Obere Reihe: Substrate der OG-Mitglieder; v.l.n.r.: Stroh, Dinkelspelzen, Papierpellets sowie verwendete Dinkelspelzenkohle als Einstreuzusatz; untere Reihe: Einstreusubstrate zum Vergleich; v.l.n.r.: Sägemehl, Dinkelspelzpellets, Holzpellets, Strohmehlpellets (Bildautor: Umbach).

### ***Kontrollierte Untersuchungen in kleinem Maßstab***

Zwischen August und November 2021 wurden acht Gruppen von je 70 nicht-gesexnten Tieren der Genetik Hubbard Colonyield 57 im Alter von neun Wochen in vier Mobilställe mit jeweils zwei voneinander getrennten Abteilen eingestallt. In der Öko-Mastgeflügelhaltung ist pro Tier eine Grünauslauffläche von mindestens vier Quadratmetern, bei mobilen Ställen von 2.5 m<sup>2</sup> pro Tier vorgeschrieben. Hier betrug die Fläche des Grünauslaufes mit je etwa 230 m<sup>2</sup> knapp 3.3 m<sup>2</sup> pro Tier. Die Besatzdichte pro Abteil (15 m<sup>2</sup> Gesamtfläche) betrug 4.7 Tiere pro m<sup>2</sup> Stallfläche. Damit wurde bei einem durchschnittlichen Endgewicht von ca. 3,500 g die nach EU-Öko-VO (2020) maximal zulässige Besatzdichte von 21 kg Lebendgewicht/m<sup>2</sup> deutlich unterschritten.

Pflanzkohle aus Dinkelspelzen (Moola Pflanzkohle, Fa. Fetzer Rohstoffe & Recycling GmbH) wurde zu zwei Zeitpunkten in je ein Abteil pro Mobilstall eingebracht. Der erste Zeitpunkt war vor der Einstallung. Bezogen auf rund 50 kg Stroheinstreu pro Abteil wurden 30 % des Trockengewichtes an Pflanzkohle zusätzlich eingestreut (15 kg je Abteil). Gut drei Wochen später wurden die gleichen Mengen Pflanzkohle in den entsprechenden Abteilen nachgestreut.

In der neunten Lebenswoche (bei Einstallung in die Mobilställe) und elften Lebenswoche sowie kurz vor der Schlachtung in der 14. Lebenswoche wurden in jedem Stallabteil 35 zufällig ausgewählte Einzeltiere (50 % aller Tiere) bezüglich der tierbezogenen Indikatoren beurteilt und gewogen. Die Tiergewichte wurden mithilfe einer elektronischen Hühnerwaage (Modell

„BAT1“, VEIT Electronics, Tschechien) auf ein Gramm genau ermittelt. Die Kotkonsistenz wurde im Anschluss an die Bonitur der Tiere an je 35 Kothaufen aus verschiedenen Bereichen des Stallabteils beurteilt.

Die Boniturergebnisse wurden als Prozentanteile der Tiere bzw. Kothaufen mit Boniturnote 1 und 2 (jegliche Veränderungen) oder nur mit Boniturnote 2 (schwere Veränderungen) an der beurteilten Zahl je Abteil berechnet. Aus den Tiergewichten wurde auch die Uniformität der Gruppen ermittelt (Anteil der Tiere mit Gewichten innerhalb  $\pm 10\%$  vom Mittelwert).

Nach der Schlachtung der Tiere erfolgte eine weitere Bonitur der Fußballen an den vom Körper abgetrennten Füßen. Da die Fußpaare am Schlachthof aber nicht mehr Einzeltieren zugeordnet werden konnten, diente die Bonitur hier in erster Linie einer genaueren Adspektion und bildlichen Dokumentation von Fußballenentzündungen, wie sie am lebenden Tier nicht möglich gewesen wären.

Erhebungen bezüglich des Stallklimas umfassten kontinuierliche Messungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte mit einem Aufnahmeintervall von 10 min mittels USB-Klima-Datenlogger (VOLTCRAFT, Typ DL-121TH, Messgenauigkeit  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  Temperatur,  $\pm 3\%$  relative Luftfeuchte), der in einer Höhe von 1 m über dem Boden in jedem Stall installiert war.

Außerdem wurden zwei Staubmesskampagnen durchgeführt. Die Staubmessungen erfolgten jeweils an vier aufeinanderfolgenden Tagen zeitgleich in zwei Abteilen (jeweils mit und ohne Pflanzenkohle). In der ersten Messkampagne vom 26.10.-29.10.2021 wurde jeweils über 24 h gemessen, während die Messzeit in der zweiten Kampagne vom 14.11.-17.11.2021 jeweils auf acht Stunden pro Tag (09.00-17.00 Uhr) begrenzt war. Insgesamt wurden auf diese Weise acht Messwerte pro Messkampagne ermittelt.

Zur Bestimmung der  $\text{NH}_3$ -Emission der Einstreu fanden zwei Messkampagnen mit dem INNOVA-Gasmessgerät statt, wobei die Messung nicht auf Tierhöhe, sondern innerhalb der Einstreu erfolgte. Die erste Messung wurde als Kontrolle kurz vor Einstellung der Tiere in einem Mobilstall in beiden Abteilen, also ohne und mit Pflanzenkohle, durchgeführt. Ferner wurden die Emissionsmessungen an zwei verschiedenen Standorten im Stall vorgenommen (im Tränken- und Ruhebereich), um mikrolokale Unterschiede feststellen zu können. Die zweite  $\text{NH}_3$ -Emissions-Messung fand während der 13. Lebenswoche der Masthühner in allen Versuchsabteilen statt.

**Zwischenergebnisse und Schlussfolgerungen:** Da keine Effekte des Kohleeinsatzes auf die Tiergesundheit oder das Stallklima festzustellen waren (Annex V), wurden für die zweite Versuchsphase mit Praxisversuchen folgende geänderten Versuchsbedingungen festgesetzt: Einsatz der Kohle bereits in der Aufzucht und nachfolgend in zweiwöchigen Abständen; Erfassung der Einstreufeuchte als wichtigen Einflussfaktor bezüglich Fußballenveränderungen (Mayne *et al.* 2007); keine weiteren Staubmessungen außer einmal am Anfang der zweiten Versuchsphase in den Mobilställen, in denen die notwendige Messtechnik installiert war; Ammoniakmessungen mit Träger-Kurzzeitröhrchen zur Dokumentation der Versuchsbedingungen.

## Zweite Versuchsphase: Feldversuche (September 2022–Mai 2023)

Im abschließenden Praxisversuch wurden im Zeitraum vom 12.09.2022 bis 08.05.2023 insgesamt neun Durchgänge mit rund 14,000 langsamer wachsenden Masthühnern (Hubbard Coloryield, Hubbard JA-757 sowie Hubbard JA-57) begleitet, von denen insgesamt über alle Untersuchungstermine rund 8,500 Tiere bonitiert wurden (Tabelle 2).

**Tabelle 2** Übersicht über die begleiteten Durchgänge und Stichprobengrößen.

Anzahl Durchgänge (DG)	durchschnittliche Gruppengröße	Stichprobengröße (Tierwohlintikatoren)	Stichprobengröße (Kot)
2 DG mit je 2 sequenziellen Gruppen	1980	237	60
1 DG mit je 2 sequenziellen Gruppen	1000	214	55
2 DG mit je 2 zeitgleichen Gruppen	610	192	50
4 DG mit je 2 zeitgleichen Gruppen	80	37	15

### Haltungsbedingungen

Die Ausstattung der Stallungen reichte von neueren, isolierten Festställen mit vollautomatisierter Fütterung, Heizung und Lüftung, über Altbauten mit automatisierter Fütterung oder händischer Fütterung. Einige Betriebe nutzten Mobilställe, wobei sich deren Ausstattung zwischen den Betrieben, ähnlich wie bei den Festställen, unterschied. In allen betreuten Durchgängen war das grundlegende Haltungssystem eine Bodenhaltung mit Freilandzugang. Dennoch waren betriebliche Abläufe und Dauer der jeweiligen Aufzucht- und Mastphasen unterschiedlich. Angesichts dieser Vielfalt der Haltungsbedingungen wurde darauf geachtet, dass die jeweils miteinander zu vergleichenden Paare, jeweils eine Gruppe mit und eine Gruppe ohne Kohleinsatz in der Einstreu, weitgehend gleiche Haltungsbedingungen aufwiesen. Aufgrund baulicher Gegebenheiten war es nicht immer möglich, diese zwei Gruppen zeitgleich zu realisieren. Sie wurden hintereinander, mit einem zeitlichen Abstand von fünf Wochen, in einem Fall von zwölf Wochen, durchgeführt. Insgesamt wurden neun Versuchspaare realisiert.

Die Küken wurden teils als Eintagsküken, teils in der zweiten Lebenswoche eingestallt, da sie vorher von der Brüterei aufgezogen worden waren. Zu Beginn der Aufzucht wurden die Küken in den älteren Stallungen meist auf Sägespänen, später auf Stroh gehalten. In den neueren Ställen wurden Papierpellets während der Aufzucht genutzt. Die Aufzuchtphase dauerte fünf bis sechs Wochen. In der Mastphase wurde mit Dinkel- oder Gerstenhäckselstroh je nach Bedarf nachgestreut. In einigen Ställen wurde täglich, in anderen alle zwei bis drei Tage nachgestreut. Nach Umstallung in die Mastphase wurde den Tieren in Abhängigkeit von der Witterung Grünauslauf angeboten. Aufgrund von Geflügelpest im Nachbarlandkreis eines Betriebs, bestand für drei Gruppen ein Aufstallungsgebot. In den Ställen wurde Wasser ad libitum über Nippeltränken mit Auffangschalen und/oder Rundtränken bereitgestellt. Es gab verschiedene Fütterungsstrategien: einphasige, zweiphasige oder sechshephasige Fütterung. Der Großteil der Futtermischungen bestand aus Weizen aus Eigenanbau oder von Kooperationsbetrieben, und wurde mit zugekauften Starter- sowie Ergänzungsfuttermitteln komplementiert. Andere Futterkomponenten waren beispielsweise Hafer-Erbsen-Gemenge, Hanfsamen, Ackerbohnen oder Leinkuchen.

In der 11.–13. Lebenswoche wurden die Tiere geschlachtet. Dabei wurden nicht alle Tiere auf einmal ausgestallt, sondern über den angegebenen Zeitraum immer die schwersten Tiere ausgewählt.

### **Versuchsdurchführung**

In den Kohlegruppen wurde auf allen Betrieben ab der zweiten Lebenswoche und nachfolgend in zweiwöchigen Abständen Pflanzenkohle aus Dinkelspelzen (Moola Pflanzenkohle, Fetzer Rohstoffe & Recycling GmbH) auf die herkömmlich genutzte Einstreu aufgebracht. Bei Einsatz von Papierpellets als Einstreu waren dies 80 g/m<sup>2</sup>, bei Stroheinstreu 250 g/m<sup>2</sup>. Aufgrund eingeschränkter Verfügbarkeit wurde bei einem Durchgang teilweise und bei einem anderen Durchgang ausschließlich Pflanzenkohle aus Waldholzhackschnitzeln derselben Firma verwendet.

Die Kohle wurde in BigBags während des Versuchszeitraums gelagert. Bei feuchten Umgebungsbedingungen zog die Kohle Wasser aus der Luft, weswegen die aktuell benötigten Mengen vor dem Ausbringen in Trockenschränken des universitären Versuchshofs in Neu-Eichenberg vorgetrocknet wurden. Danach wurde die Kohle in Plastikfässern mit Bügelverschlüssen gelagert. Zeitweise war es aufgrund von Personalmangel nicht möglich, ausreichende Mengen zu trocknen, so dass Kohle mit etwas höheren Feuchtegehalten eingesetzt werden musste. Ein Volumen-Gewichts-Vergleich von gezielt getrockneter Kohle mit der gelagerten Kohle zeigte, dass die gelagerte Kohle bei gleichem Volumen in etwa das doppelte Gewicht hatte.

In Bezug auf die Tierwohlintikatoren wurde zu den drei Zeitpunkten 2., 7./8. und 11. Lebenswoche eine Stichprobe von Tieren in Abhängigkeit von der jeweiligen Gruppengröße bonitiert (Abbildung 26). Die Stichprobengröße wurde so berechnet, dass die Prävalenzschätzung mindestens eine Genauigkeit von  $\pm 5$  %-Punkten bei 90 %iger Sicherheit aufwies. Somit wurden deutlich mehr als die ursprünglich geplanten 50 Tiere je Gruppe und Bonitur beurteilt (Tabelle 2). Die erste Bonitur diente der Bewertung der Ausgangslage vor Einbringen der ersten Kohle. Der zweite Boniturtermin deckte den Wechsel zwischen Aufzucht und Mast auf den Betrieben in der 7. bzw. 8. Lebenswoche ab, die letzte Bonitur in der 11. Lebenswoche erfolgte, bevor die ersten Tiere zur Schlachtung aus den Gruppen entnommen wurden. Die Erfassung aller tierbezogenen Indikatoren wurde in der gesamten Versuchsphase von der gleichen Person durchgeführt.



**Abbildung 26** Untersuchung der Fußballen eines Huhns (Bildautor: Lehnert).



**Abbildung 27** Wägung eines Tiers mit einer BAT1 Waage (Bildautor: Lehnert).

Die Tiergewichte wurden mithilfe einer elektronischen Hühnerwaage (Modell „BAT1“, VEIT Electronics, Tschechien) auf ein Gramm genau ermittelt (Abbildung 27).

Etwaiger Durchfall wurde anhand der Kotkonsistenz im Anschluss an die Bonitur an so vielen Kothaufen aus verschiedenen Bereichen des Stallabteils beurteilt, dass diese Stichprobenzahl in etwa einem Viertel der Stichprobengröße der zu beurteilenden Tiere entsprach.

Die Feuchte der Einstreu wurde in jeder Gruppe auf allen Betrieben zu drei Zeitpunkten direkt vor dem Nachstreuen der Kohle erfasst, nämlich in der 4., 8./9., und 11. Lebenswoche. Dazu wurden stets je zwei Proben, etwa eine bis zwei Handvoll Einstreumaterial, aus dem Ruhe- sowie aus dem Tränkebereich entnommen und in eine umgestülpte Plastiktüte gefüllt. Das durchschnittliche Gewicht der frischen Proben lag bei etwa 130 g. Die Proben wurden verschlossen und am selben Tag eingewogen. Eine Probe diente der direkten Verarbeitung und Analyse des Wassergehalts. Dazu wurde sie über 24 Stunden im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet (Abbildung 28) und am nächsten Tag zurückgewogen. Somit konnte die Trockensubstanz errechnet werden, welche im Kehrwert die Einstreufeuchte widerspiegelt. Die weitere Probe dient als Rückstellprobe und ist aktuell im Tiefkühler des Fachgebiets Grünlandwissenschaften und Nachwachsende Rohstoffe gelagert.



**Abbildung 28** Trocknung der Einstreuproben (Bildautor: Gurny).

Die Messungen des Ammoniakgehaltes der Stallluft mittels Dräger Gasspürpumpe erfolgte zu den Boniturterminen im Ruhebereich und im Futter- und/ oder Tränke-Bereich auf Kopfhöhe der Tiere, 10–35 cm über dem Boden wie in Kapitel 2.4.1.1 beschrieben. Erreichte der Farbumschlag des Indikatorsubstrats schon vor Abschluss der zehn Hübe den Endpunkt der Skala, wurde die Konzentration in Abhängigkeit von den tatsächlich getätigten Hüben auf einen Liter Luft hochgerechnet.

Luftfeuchte und -temperatur wurden auf allen Betrieben mittels USB-Klima-Datenloggern (Voltcraft, Typ DL-121TH;  $\pm 1$  °C Temperatur,  $\pm 3$  % relative Luftfeuchte) in den Aufzucht-

sowie den Mastställen in einem Aufnahmeintervall von 60 Minuten erfasst. Die Logger waren in ca. einem Meter Höhe über dem Boden angebracht. Die Ergebnisse wurden adspektorisch auf Unregelmäßigkeiten oder Ausreißer geprüft.

Die einmalige Messung der Staubgehalte der Stallluft wurde zeitgleich in zwei Abteilen (jeweils mit und ohne Pflanzenkohle), am 22.11.2022 über 24 Stunden durchgeführt.

### **Datenauswertung**

Die Ergebnisse zu den Tierwohlindikatoren wurden für die statistische Analyse bei dreistufigen Noten dichotomisiert in Note 0 und 1 einerseits und Note 2 andererseits (Fußballen, Fersenhöcker: keine oder leichte Veränderungen versus starke Veränderungen, Kotkonsistenz: fest oder weich versus flüssig, Gefiederverschmutzung: keine oder leichte Verschmutzung versus schwere Verschmutzung). Die Indikatoren Kloakenverschmutzung und Gefiederverklebung waren bereits zweistufig (Note 0: sauber und Note 1: verschmutzt bzw. verklebt).

Die Prüfung auf mögliche Unterschiede zwischen den Behandlungs- und Kontrollgruppen und verschiedenen Boniturzeitpunkten erfolgte mit dem Programm „R“ mittels generalisierter linearer gemischter Modelle. Fixe Faktoren waren der Pflanzenkohleeinsatz (ja/nein) und die Boniturzeitpunkte (Bonituren 2 und 3), zufällige Faktoren waren die Gruppe, genestet in Durchgang und Betrieb, um die wiederholten Messungen sowie die unterschiedlichen betrieblichen Bedingungen zu berücksichtigen, sowie die Ausgangslage (Bonitur 1 ohne Kohleeinsatz), da diese nach unserer Erwartung die Ergebnisse der Bonituren 2 und 3 unabhängig vom Kohleeinsatz beeinflusst haben kann.

Auch in Bezug auf Ammoniakkonzentrationen und die Einstreufeuchte wurden mögliche Unterschiede zwischen den Behandlungs- und Kontrollgruppen und verschiedenen Boniturzeitpunkten mittels generalisierter linearer gemischter Modelle überprüft. Hier waren die fixen Faktoren neben Pflanzenkohleeinsatz und Boniturzeitpunkten der Ort der Probeentnahme (Ruhe- oder Tränkebereich). Hinsichtlich der Einstreufeuchte umfassten die Boniturzeitpunkte Bonitur 1-3, wobei die Probenahme stets etwa zwei Wochen nach den Tierbonituren lag (siehe oben). Zufällige Faktoren waren die Gruppe, genestet in Durchgang und Betrieb.

## 2.5 Arbeitspaket 5 „Ökonomie - Wertschöpfungsketten und Businessplan“

Unter diesem Arbeitspaket sollten die Ergebnisse der Arbeitspakete 2 bis 4 ökonomisch ausgewertet werden, um einen Investment- und Businessplan zur Umsetzung der untersuchten Verwertungspfade und Wertschöpfungsketten zu erstellen. Aufgrund arbeitstechnischer Verzögerungen in AP2-AP4 (u.a. durch Personalwechsel, Corona-Pandemiebedingte Einschränkungen) lagen die notwendigen Daten für eine ökonomische Betrachtung erst im Juni 2023 vor. Da zudem die abschließende Datenlage erkennen ließ, dass der Zusatz von Pflanzenkohle in der Einstreu bei unverändertem Einstreumanagement der beteiligten Landwirte zu keiner wesentlichen Verbesserung in der Prävention von Fußballenläsionen führte, ebenso zu keiner messbaren Besserung des Stallklimas oder der Einstreufeuchte, wurden keine Arbeiten im Rahmen von AP5 vorgenommen.

### 3 Ergebnisse und Zielerreichung

#### 3.1 Haupt- und Nebenergebnisse des Vorhabens

##### 3.1.1 Arbeitspaket 1 „Laufende Zusammenarbeit der OG“

In verschiedenen Studien konnte ein positiver Effekt der Zugabe von Pflanzenkohle in Tierhaltungssystemen nachgewiesen werden. Insbesondere konnten Nährstoffe langfristig gebunden und Ammoniakemissionen gesenkt werden, und so das Stallklima für Tier und Landwirt verbessert werden. Weitere Untersuchungen hinsichtlich des Zusammenwirkens von Pflanzenkohleigenschaften (Porengrößen und deren Verteilung, Funktionelle Gruppen an der Oberfläche, etc.) und der Umwelt, in welche diese eingebracht wird (Einstreu, Boden, Biogasanlagen, Kompost), sind somit von entscheidender Bedeutung. Das Wissen um die Vielfalt an Funktionen, welche die „richtige“ Pflanzenkohle in seiner Umwelt leisten kann, gilt ebenso zu kommunizieren wie ausbleibende oder gar schädigende Effekte. Dabei sollte der Wissenstransfer nicht nur innerhalb der Wissenschafts- oder Agrarpraxisgemeinschaft vorgenommen werden, sondern auch zu der Bevölkerung, welche ebenso als wichtige „Endkunden“ und Nutzer von Pflanzenkohleprodukte für ihre Hobbygärten und/oder -tierhaltung betrachtet werden müssen.

Aufgrund der Corona-Pandemie mit eingeschränkten Möglichkeiten der Öffentlichkeitsarbeit sowie einer eingeschränkten Zielgruppe, welche man durch die Veröffentlichung einer Projektwebseite im universitären Kontext erreicht, betrachten wir die Teilnahme an mehreren internationalen transdisziplinären Konferenzen als Innovation im Bereich des Wissenstransfers von universitär koordinierter Forschung nach außen.

Hierbei hervorzuheben war die erfolgreiche Bewerbung des OG CAREFUL Konsortiums im Rahmen der REVEAL Konferenz unser Projekt als Artefakt im September 2022 sowie Juni 2023 vorstellen zu dürfen.

REVEAL ist ein europäisches Bildungsnetzwerk für kompetenzorientiertes Lernen und Validierung. Es hat sich seit 2005 entwickelt und besteht derzeit aus Institutionen und Einzelpersonen aus 22 europäischen Mitgliedstaaten, darunter Universitäten, europäische Dachverbände, Bildungseinrichtungen, Schulen, Berufsbildungseinrichtungen und verschiedene Nichtregierungsorganisationen ([www.reveal-eu.org](http://www.reveal-eu.org)). Seit 10 Jahren organisiert die REVEAL-Gemeinschaft Konferenzen über Innovationen im Bereich des lebenslangen Lernens. Unter dem Titel „Towards a Circular Sustainability Culture“ fand die 14. Konferenz des REVEAL Netzwerkes am 14.09.2022 im Kulturzentrum Musa e.V. in Göttingen statt. Die 15. Konferenz stand unter dem Motto „Open Learning and Development Spaces for Sustainability and Local Development“ und fand am 14.06./15.06.2023 statt. Die REVEAL-konzentrieren sich auf die Vermittlung von Konzepten und Ideen zum Einsatz von Pflanzenkohle in verschiedenen Bereichen, wie u.a. in der Bauindustrie, erneuerbare Energien, Naturschutz, Abfallwirtschaft, Abwasserreinigung, Stadt- und Landschaftspflege sowie in der Landwirtschaft. Der Wissenstransfer sollte hierbei unter der Nutzung von „Artefakten“ sowie innovativer Lern- und Entwicklungsansätze zur Umsetzung von digitalem Lernen gefördert werden.

Die Konferenzen wurden dahingehend konzipiert, dass auch eine interaktive Wissensvermittlung über eine digitale Informations- und Lernplattform für die Teilnehmer bereitgestellt wurde. So erhielt jedes Artefakt ein individuelles Symbol, welches in einer App über ein mobiles Endgerät aufgesucht und weitergehende Informationen gefunden werden

konnten. Diese Lern-App wurde anschließend als Lern- und Lehrmedium auf mehreren Konferenzen und Ausstellungen übernommen.

Folgt man dem Symbol des Hühnchens in der App, so gelangt man auf die Informationsseite des Projektes CAREFUL mit kompakten Informationen zu unseren Projektzielen, Partnern und Förderprogramm (Abbildung 29). Ein Projekt Fact Sheet (Annex VI) wird als Download angeboten sowie eine Bildergalerie und Kontaktdetails. Diese Lern- und Lehr-App wurde dauerhaft und für jedermann zugänglich unter <https://threec.eu/threec-exhibition-nantes/> bereitgestellt.



**Abbildung 29** Multimediale Lern- und Lehr-App  
 Durch REVEAL entwickelte und durch ThreeC fortgeführte multimediale Lern- und Lehr-App zu Möglichkeiten der Applikationen von Pflanzenkohlen mit CAREFUL als Lern-Einheit.

Ebenso wurden insbesondere die im Rahmen von AP2 und AP3 erhobenen Daten zu Eigenschaften von Restbiomassen und deren Karbonisat von AP1 aufbereitet sowie zusammengeführt und dem sich neu gründenden europäischen CASCADE Kompetenzzentrum (<https://cascade.nweurope.eu>) zur Verstetigung übermittelt.

## 3.1.2 Arbeitspaket 2 „Quantifizierung des Restbiomassepotenzials“

**Quantifizierung des Restbiomassepotenzial der nordhessischen Region**

Hauptziel des Arbeitspaketes 2 war die Quantifizierung des vorhandenen Restbiomassepotenzials in der Untersuchungsregion Nordhessen sowie die Ermittlung geeigneter Biomassen für die Erzeugung von Pflanzen- und Aktivkohlen als Einstreuzusatz in der Geflügelhaltung. Die Ergebnisse zur Quantifizierung des vorhandenen Restbiomassepotenzials wurden im Rahmen einer Kurzstudie zusammengefasst dargestellt (Annex VII) und werden hier nicht weiter aufgeführt.

**Untersuchungen zu chemisch-physikalischen Eigenschaften der (Roh)Biomassen  
Grasartiges und krautiges Landschaftspflegematerial**

Bei einem Vergleich dieser drei grasartigen Biomassen fällt vor allem der geringe Ascheanteil in den Proben der Streuobstwiese auf (Tabelle 3). Das Straßenbegleitgrün war, wie vermutet, charakterisiert durch ein höheren Stickstoff- und vor allem Schwefelgehalt. Betrachtet man die Elementarzusammensetzung der generierten Presskuchen, so wird eine z.T. leichte Erhöhung des Kohlenstoffanteils sowie eine Aufkonzentrierung des Lignins und Reduktion des Ascheanteils erkennbar (Tabelle 4).

**Tabelle 3** Nährstoffzusammensetzung des grasartigen Rohmaterials

Nährstoffzusammensetzung, Asche- und Ligningehalt des grasartigen Rohmaterials (Silage), einschließlich Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Kalium (K), Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Phosphor (P), Schwefel (S) und Chlor (Cl), gemessen in % Trockenmasse.

Rohmaterial/Silage	C	O	H	N	K	Ca	Mg	P	S	Cl	Ash	Lignin
Straßenbegleitgrün	45	30	4.7	2.6	2.7	1.3	0.3	NA	0.42	0.72	17.2	9.5
Feuchtwiese (Naturschutzwiese)	41	34	4.8	1.4	NA	1.1	0.12	0.14	0.09	NA	19.4	10
Streuobstwiese	48	40	5.5	1.1	NA	0.8	0.37	0.08	0.09	NA	5.4	10

**Tabelle 4** Nährstoffzusammensetzung des IFBB-Presskuchens

Nährstoffzusammensetzung, Asche- und Ligningehalt des IFBB-Presskuchens der grasartigen Restbiomassen, einschließlich Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Kalium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Phosphor (P), Schwefel (S) und Chlor (Cl), gemessen in % Trockenmasse.

IFBB-Presskuchen	C	O	H	N	K	Ca	Mg	P	S	Cl	Ash	Lignin
Straßenbegleitgrün (Kassel)	45	33	5.0	2.0	0.8	1.0	0.16	NA	0.19	0.11	14.4	14
Feuchtwiese (Naturschutzwiese Werra- Meißner-Kreis)	46	38	5.4	1.3	NA	1.1	0.15	0.11	0.08	NA	9.6	14
Streuobstwiese (Naturschutzwiese Werra- Meißner-Kreis)	50	41	5.6	1.0	NA	0.8	0.03	0.03	0.03	NA	3.2	13

**Restbiomassen aus der Landwirtschaft und der verarbeitenden Industrie**

Mit einem hohen Kohlenstoff- und Ligninanteil sowie einem sehr geringen Ascheanteil stellten die in dieser Kategorie untersuchten Kirschkerne, eine Restbiomasse aus der Lebensmittelindustrie, ein vielsprechendes Ausgangsmaterial für die Pyrolyse dar.

**Tabelle 5** Nährstoffzusammensetzung von Kirschkernen und Dinkelspelzen

Nährstoffzusammensetzung, Asche- und Ligningehalt von Restbiomassen aus Landwirtschaft und verarbeitender Industrie, einschließlich Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Kalium (K), Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Phosphor (P), Schwefel (S) und Chlor (Cl), gemessen in % Trockenmasse.

Rohmaterial/Silage	C	O	H	N	K	Ca	Mg	P	S	Cl	Ash	Lignin
Kirschkerne	51	41	6.8	0.3	2.0	0.9	0.5	0.9	0.3	NA	0.3	40
Dinkelspelzen	48	42	6.4	2.3	0.5	0.3	0.07	0.29	NA	NA	7.0	10

### Holzige Restbiomassen

Das Eichen-Sägemehl wies erwartungsgemäß einen recht hohen Kohlenstoff- und geringen Ascheanteil auf (Tabelle 6). Ebenso geringe Werte von Schwefel, Chlor und Stickstoff.

**Tabelle 6** Nährstoffzusammensetzung, Asche- und Ligningehalt von Eichensägemehl

Nährstoffzusammensetzung, Asche- und Ligningehalt des Eichensägemehls, einschließlich Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Kalium (K), Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Phosphor (P), Schwefel (S) und Chlor (Cl), gemessen in % Trockenmasse.

Rohmaterial/Silage	C	O	H	N	K	Ca	Mg	P	S	Cl	Ash	Lignin
Sägemehl aus Sägewerk (Eiche)	50	44	5.0	0.4	0.1	0.1	0.02	< 0.10	0.06	0.03	0.6	15

### Miscanthus

Die *Miscanthus* Biomasse war vor allem durch einen geringen Ascheanteil und relativ hohen Ligninganteil charakterisiert (Tabelle 7).

**Tabelle 7** Nährstoffzusammensetzung, Asche- und Ligningehalt von *Miscanthus*

Nährstoffzusammensetzung, Asche- und Ligningehalt der *Miscanthus* Biomasse, einschließlich Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Kalium (K), Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Phosphor (P), Schwefel (S) und Chlor (Cl), gemessen in % Trockenmasse.

Rohmaterial/Silage	C	O	H	N	K	Ca	Mg	P	S	Cl	Ash	Lignin
<i>Miscanthus</i>	48	40	5.4	0.25	NA	NA	NA	NA	0.1	0.1	2.0	18

### 3.1.3 Arbeitspaket 3 „Herstellung und Charakterisierung von Pflanzen- und Aktivkohlen“

#### Grasartiges und krautiges Landschaftspflegematerial

##### Straßenbegleitgrün

Grundsätzlich konnte man bei der Untersuchung zum Straßenbegleitgrün feststellen, dass die höhere Prozesstemperatur von 750 °C zu einer Zunahme des Ascheanteils und zu einer Abnahme des Sauerstoff-, Wasserstoff- und Kohlenstoffanteils geführt hat (Tabelle 8). Ebenso verhielt es sich mit dem Anteil des Stickstoffs, wohingegen der Schwefelanteil konstant blieb. Kalzium, Magnesium und Kalium erhöhen sich in ihrem Gewichtsanteil bei Erhöhung der Prozesstemperatur. Bei einem Vergleich der Pflanzenkohlen, welche entweder aus dem Rohmaterial oder dem IFBB-Presskuchen generiert wurden, lässt sich feststellen, dass durch die Auswaschung der Mineralien vorab eine Pflanzenkohle mit einem höheren Kohlenstoffanteil und einem geringeren Ascheanteil erzeugt werden konnte. Wie man sehr gut an den Werten erkennen kann, waren Kalzium, Magnesium und Kalium zu geringeren Anteilen in der Pflanzenkohle aus dem IFBB-Presskuchen vorhanden. Die elektrische Leitfähigkeit der Pflanzenkohle aus dem IFBB-Presskuchen war um ein 10faches geringer als die der Pflanzenkohle, welche aus dem Rohmaterial gewonnen wurde.

Der ermittelte pH-Wert von 7.75 bei Pflanzenkohlen generiert aus dem IFBB-Presskuchen bei 400 °C scheint aufgrund eines Messfehlers entstanden zu sein. Dieser müsste in der Theorie ebenso zwischen 9.5 und 10 liegen.

**Tabelle 8** Eigenschaften der Pflanzenkohlen aus Straßenbegleitgrün

Mittelwerte der ermittelten Eigenschaften der Pflanzenkohlen produziert bei 400 °C und 750 °C entweder aus siliertem Rohmaterial oder IFBB-Presskuchen von Straßenbegleitgrün.

Parameter	Einheit	Pflanzenkohle aus Rohmaterial (Silage)		Pflanzenkohle aus IFBB-Presskuchen	
		400 °C	750 °C	400 °C	750 °C
Asche	%TM	41.52	53.59	32.29	43.98
C	%TM	41.47	38.71	49.85	48.46
O	%TM	12.28	5.56	12.90	5.53
H	%TM	2.04	0.59	2.53	0.69
N	%TM	2.48	1.35	2.39	1.30
S	%TM	0.203	0.200	0.043	0.046
O/C-Verhältnis		0.22	0.11	0.19	0.09
H/C-Verhältnis		0.59	0.18	0.61	0.17
Ca	g·kg <sup>-1</sup> TM	31.76	40.61	23.77	30.46
Mg	g·kg <sup>-1</sup> TM	8.16	10.27	4.11	5.44
K	g·kg <sup>-1</sup> TM	58.95	71.44	14.16	18.14
pH-Wert		10.50	10.59	(7.75)	10.21
Elektrische Leitfähigkeit (EC)	µS·cm <sup>-1</sup>	10413.0	10323.0	1037.7	1461.0
Massenausbeute	%	39.8	32.5	41.2	31.6
Kohlenstoffausbeute	%	36.8	28.0	45.6	34.0

### Feucht- und Streuobstwiese

Wie bereits bei der Analyse der jeweiligen IFBB-Presskuchen [AP2] erkennbar, wurden die Unterschiede der Materialien bei den generierten Pflanzen(aktiv)kohlen noch deutlicher. Aus Streuobstwiesenmaterial generierte Pflanzenkohle (BC) und Pflanzenaktivkohle (AC) wies einen signifikant geringeren Anteil an Asche und einen signifikant höheren Anteil an Kohlenstoff auf (Tabelle 9). Weitere auffallende Unterschiede zwischen den Pflanzen(aktiv)kohletypen bestand in der Spezifischen Oberfläche, welche bei Pflanzen(aktiv)kohlen aus dem Streuobstwiesenmaterial größer war. Dies ist auch in der ermittelten Jodzahl erkennbar, welche ein Maß für die Spezifische Oberfläche darstellt. Ebenso waren deutliche Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit messbar, welche um ein Dreifaches bei der Streuobstwiesen-basierten BC und AC größer war.

**Tabelle 9** Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen von Feucht- und Streuobstwiese

Mittelwerte der ermittelten Eigenschaften der Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen produziert bei 900 °C und mit 50 % oder 100 % Aktivierung entweder aus dem IFBB-Presskuchen von Feucht- oder Streuobstwiese.

Parameter	Einheit	Pflanzen(aktiv)kohleprodukte					
		Feuchtwiese			Streuobstwiese		
		BC	AC50%	AC100%	BC	AC50%	AC100%
Asche	%TM	37.3	43.8	48.3	13.0	15.3	18.9
C	%TM	55.3	50.4	44.9	79.5	76.4	71.8
O	%TM	5.3	4.1	5.4	5.2	6.1	6.9
H	%TM	1.2	0.9	0.8	1.2	1.3	1.7
N	%TM	0.7	0.6	0.6	1.0	0.7	0.7
S	%TM	0.18	0.09	0.07	0.20	0.15	0.12
O/C-Verhältnis		0.07	0.06	0.09	0.05	0.06	0.07
H/C-Verhältnis		0.26	0.22	0.21	0.17	0.21	0.28
Ca	g·kg <sup>-1</sup> TM	47.7	52.6	57.8	37.2	51.5	41.4
Fe	g·kg <sup>-1</sup> TM	8.2	8.5	(20.2)	2.3	4.2	5.1
Mg	g·kg <sup>-1</sup> TM	7.9	8.7	9.5	10.1	13.5	13.5
Al	g·kg <sup>-1</sup> TM	9.4	10.7	11.8	0.5	0.7	0.6
Na	g·kg <sup>-1</sup> TM	1.4	1.6	1.6	1.2	1.5	1.5
P	g·kg <sup>-1</sup> TM	3.7	4.0	4.4	2.0	2.7	2.7
Cu	g·kg <sup>-1</sup> TM	0.06	0.07	0.09	0.05	0.07	0.07
Cr	g·kg <sup>-1</sup> TM	0.19	0.07	(1.95)	0.11	0.32	0.48
K	g·kg <sup>-1</sup> TM	8.3	8.7	10.1	7.1	9.4	9.5

Ni	g·kg <sup>-1</sup> TM	0.36	0.03	0.12	0.02	0.04	0.03
Mn	g·kg <sup>-1</sup> TM	0.79	0.84	1.04	0.18	0.24	0.25
Zn	g·kg <sup>-1</sup> TM	0.10	0.11	0.16	0.08	0.13	0.16
Spezifische Oberfläche	m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	160	277	399	370	477	434
Mikroporenvolumen (< 2 nm)	m <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup>	0.02	0.04	0.04	0.08	0.08	0.07
Mesoporen-Volumen (2 - 28 nm)	m <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup>	0.14	0.22	0.35	0.20	0.30	0.28
Gesamtes Porenvolumen (< 28 nm)	m <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup>	0.16	0.26	0.39	0.28	0.38	0.35
Jodzahl	mg·g <sup>-1</sup>	209	331	278	320	559	559
pH-Wert		10.3	11.4	11.3	12.1	11.3	11.8
Elektrische Leitfähigkeit (EC)	μS·cm <sup>-1</sup>	766	611	633	2460	1626	2100

Vergleicht man die chemisch-physikalischen Eigenschaften der jeweilig erzeugten Pflanzen(aktiv)kohlen eines Ausgangsmaterials, so wird erkennbar, dass durch die Zugabe von Wasserdampf zum Pyrolyseprozess das Porenvolumen unter Abnahme des Kohlenstoffanteils vergrößert werden konnte.

### **Pflanzkohlen aus Landwirtschaft und verarbeitender Industrie**

Kirschkern- und Dinkelspelzen wurden mit jeweils nur einer Temperatureinstellung karbonisiert. Die ermittelten chemisch-physikalischen Eigenschaften der hierbei generierten Pflanzkohlen sind Tabelle 10 zu entnehmen.

Wie bereits erwähnt, wurden beide Ausgangsbiosmassen, außer Trocknung, nicht vorbehandelt, d.h. weder zerkleinert noch pelletiert. Insbesondere die Kirschkern- behielten ihre harte Form bei und große Mengen des Kohlenstoffs blieben nach thermischer Behandlung erhalten. Ferner wiesen die generierten Pflanzkohlen aus Kirschkernen einen sehr geringen Ascheanteil auf.

Im Hinblick auf den Einsatz der Dinkelspelzenkohle in den geplanten Praxisversuchen, wurde die Pflanzkohle auf Schwermetalle durch die Firma eurofins analysiert (Tabelle 11). Hierbei wurden die Grenzwerte für Schwermetalle nach EBC-Zertifizierungs-kategorie EBC-Futter als Richtlinie zur Beurteilung der Unbedenklichkeit verwendet.

**Tabelle 10** Chemisch-physikalische Eigenschaften der generierten Pflanzkohlen aus Kirschkernen und Dinkelspelzen.

Parameter	Einheit	Kirschkern-kerne	Dinkelspelzen
		450 °C	550 °C
Asche	%TM	0.3	22.0
C	%TM	75	70.4
O	%TM	20	4.8
H	%TM	3.2	1.8
N	%TM	3.0	0.95
S	%TM	NA	0.07
Ca	g·kg <sup>-1</sup> TM	NA	5.5
Mg	g·kg <sup>-1</sup> TM	NA	2.7
K	g·kg <sup>-1</sup> TM	NA	10.7
pH-Wert		8.8	9.4
Elektrische Leitfähigkeit (EC)	μS·cm <sup>-1</sup>	187	NA
Spezifische Oberfläche	m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	220	237
Gesamtporenvolumen	m <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup>	0.07	NA
Wasserhaltekapazität	%		497

**Tabelle 11** Schwermetallgehalte der Dinkelspelzenkohle bezogen jeweils auf die Trockensubstanz (TS) und mit Angaben zu Grenzwerten nach EBC-Futter-Zertifizierung.

Schwermetall	Einheit	EBC-Futter Grenzwert	Dinkelspelzenkohle
Blei (Pb)	mg/kg (88 % TS)	10	0.43
Cadmium (Cd)	mg/kg (88 % TS)	0.8	0.017
Kupfer (Cu)	mg/kg TS	70	7
Nickel (Ni)	mg/kg TS	25	1
Quecksilber (Hg)	mg/kg (88 % TS)	0.1	0.0025
Zink (Zn)	mg/kg TS	200	43
Chrom (Cr)	mg/kg TS	70	4
Arsen (As)	mg/kg (88 % TS)	2	0.11
Silber (Ag)	mg/kg TS	Kein Grenzwert, nur deklarationspflichtig	< 5

### **Pflanzenkohle aus Eichen-Sägemehl**

Auch bei dem Vergleich der generierten Pflanzenkohlen mit Eichen-Sägemehl als Ausgangsmaterial wird der Einfluss der Prozesstemperatur auf die Kohleeigenschaften ersichtlich (Tabelle 12). So weisen Hochtemperaturkohlen einen höheren Kohlenstoffanteil auf. Interessant ist der signifikante Anstieg des pH-Wertes von 7 (400 °C) auf 10 (750 °C), sowie der elektrischen Leitfähigkeit von rund 80 auf 585. Der Kohleertrag lag bei rund 48 % (400 °C) bzw. bei 36 % (750 °C).

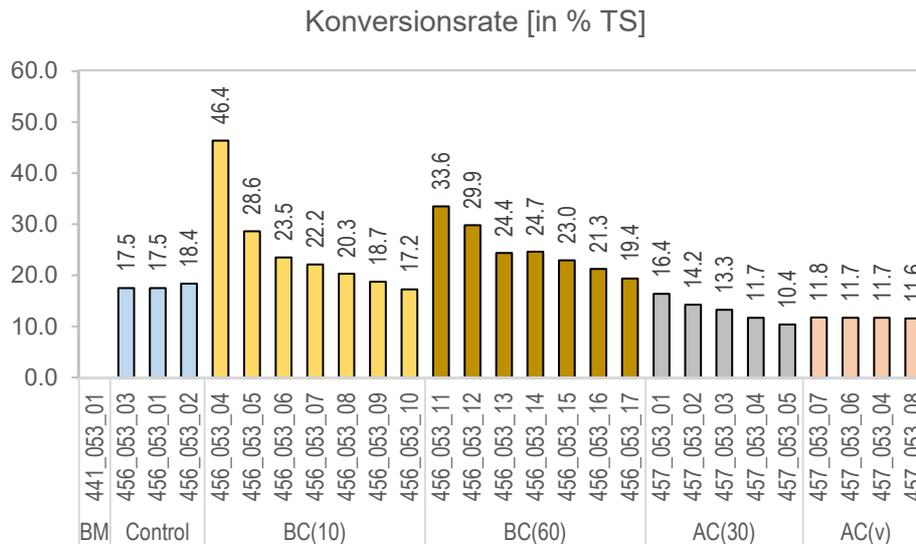
**Tabelle 12** Chemisch-physikalische Eigenschaften der generierten Pflanzenkohlen aus Eichen-Sägemehl

Parameter	Einheit	Prozesstemperatur	
		400 °C	750 °C
Asche	%TM	2.23 ± 0.07	3.37 ± 0.06
C	%TM	75.97 ± 0.55	90.10 ± 0.51
O	%TM	18.78 ± 0.58	5.10 ± 0.49
H	%TM	2.62 ± 0.03	1.11 ± 0.02
N	%TM	0.38 ± 0.01	0.32 ± 0.00
S	%TM	0.005 ± 0.000	0.003 ± 0.002
Ca	g·kg <sup>-1</sup> TM	7.07 ± 0.20	10.39 ± 0.06
Mg	g·kg <sup>-1</sup> TM	0.24 ± 0.03	0.43 ± 0.03
K	g·kg <sup>-1</sup> TM	2.64 ± 0.00	3.80 ± 0.06
pH-Wert		7.12 ± 0.02	10.00 ± 0.04
Elektrische Leitfähigkeit (EC)	µS·cm <sup>-1</sup>	82.0 ± 2.8	587.0 ± 3.6

### **Pflanzenkohlen aus Energiepflanzen**

**Miscanthus** wurde als Ausgangsmaterial verwendet um Einfluss von Verweilzeit, Prozesstemperatur und Oxidationspotential auf die Eigenschaften von biogenen Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen zu untersuchen. Somit wird im Folgenden etwas detaillierter auf die chemisch-physikalischen Eigenschaften der generierten Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen aus *Miscanthus* eingegangen.

**Konversionsrate:** Die Konversionsrate dient als Messwert wie viel Inputmasse bei der Pyrolyse in die gasförmige Phase übergegangen ist, bzw. als Feststoff erhalten bleibt, und spiegelt sehr gut die Pyrolysebedingungen wider. Hochtemperaturkohlen, bzw. Aktivkohlen zeigen die niedrigsten Reststoffgehalte (Kohle + Asche) und die höchste Ausgasung bzw. bei Aktivkohlen auch Abbrand. Bei einem Vergleich der zwei Pflanzenkohle-Gruppen BC(10) und BC(60) sowie der Pflanzenaktivkohlegruppe AC(30) erkennt man sehr deutlich eine Zunahme der Konversionsraten mit Anstieg der Pyrolysetemperatur, bzw. des Aktivierungsgrades (Abbildung 30).



**Abbildung 30** Konversionsraten der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbiomasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.

So fiel die Konversionsrate in Gruppe BC(10) von 46.4 % (bei 300 °C) schrittweise mit dem Erhöhen der Reaktortemperatur auf 17.2 % (bei 900 °C). Das Gruppenmittel betrug 31.8 %. Bei Gruppe BC(60) war eine ähnliche Entwicklung zu erkennen. Die maximale Konversionsrate lag hier bei 19.4 % (bei 900 °C) und ging im Zuge der schrittweisen Temperaturreduzierung auf 33.6 % (bei 300 °C) zurück. Das Gruppenmittel betrug 26.6 %. Für die Gruppe AC(30) war ein ähnlicher, wenngleich auch schwächerer Trend erkennbar. Da die Aktivkohle in diesem Experiment mit 900 °C und 30 min Verweilzeit hergestellt wurde, kann davon ausgegangen werden, dass der Substanzverlust bei gleichen Pyrolyseparametern aber schrittweise Erhöhung der Zugabe eines Aktivierungsmittels hauptsächlich aus Abbrand von festem Kohlenstoff und weniger durch das weitere Austreiben von flüchtigen Bestandteilen bestand. Der Gruppenmittelwert betrug 13.4 %.

Die Gruppe AC(v) stellte einen Sonderfall dar, hier blieben Temperatur (900 °C) und die Zugabe von Aktivierungsmedium gleich und nur die Verweilzeit wurde in Schritten von 10 min auf 40 min erhöht. Diese Gruppe zeigte keine deutlichen Veränderungen in der Konversionsrate, so dass darauf geschlossen werden kann, dass der Einfluss der Verweilzeit der Temperatur und Angebot an Aktivierungsmedium stark untergeordnet ist.

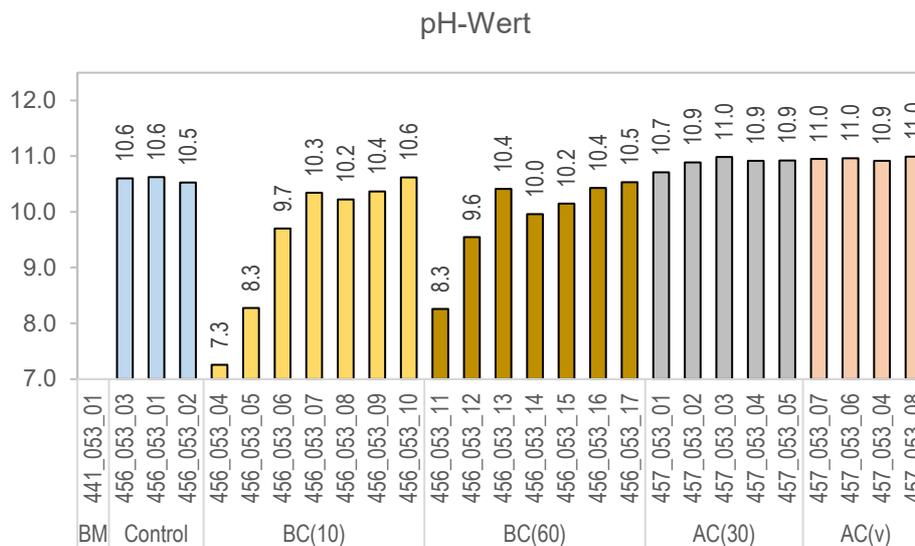
Die Kontrollgruppe diente anfänglich nur dazu, um den Einfluss des Nebenluftzuges der Pyreka abschätzen zu können. Hier ist jedoch erkennbar, dass bei einer Erhöhung der Inertität der Reaktoratmosphäre (stufenweise Zugabe von Stickstoff bis hin zur Sättigung) die Konversionsrate leicht sank. Dies kann evtl. durch reduzierte Abbrandverluste unter komplettem O<sub>2</sub>-Abschluss erklärt werden.

**pH-Wert:** Die pH-Werte der beiden Pflanzenkohle-Gruppen (BC) zeigten mit Zunahme der Pyrolysetemperatur einen deutlichen Trend hin zu einer erhöhten Alkalinität (Abbildung 31). Die ermittelten Werte in Kohlensuspension lagen zwischen pH 7.3 und 10.5-10.6.

Die niedrigen pH-Werte der Pflanzenkohlen, welche bis 400 °C pyrolysiert wurden, kann durch den nicht vollständigen Austrieb flüchtiger organischer Verbindungen erklärt werden.

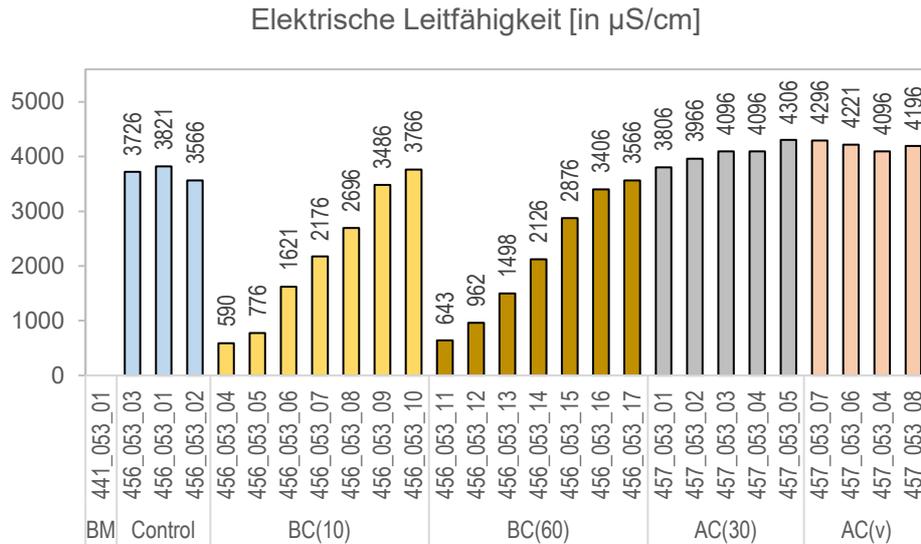
Insbesondere organische Säuren („Holzessig“) und saure, hochsiedende organische Verbindungen (z.B. Teere, Phenole) verbleiben im Pyrolysat und konkurrieren mit Basenbildnern (Mg<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup>).

Für die hier betrachtete *Miscanthus*-Biomasse konnte festgestellt werden, dass Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen ab einer Pyrolysetemperatur von rund 500 °C stabile pH-Werte von über pH 10 einstellen. Durch den zusätzlichen Reinigungseffekt und relative Zunahme der Asche in Bezug auf die Gesamtkohle reagierten die Pflanzenaktivkohlen AC(30) und AC(v) stärker basisch als die Hochtemperaturpflanzenkohle. Ihre Werte lagen alle stabil um pH 11. Ein derartiger Effekt, dass steigende Pyrolysetemperaturen zu höheren pH-Werten führen, wurden auch von Rafiq *et al.* (2016) an Pflanzenkohlenserien aus Mais-Ernteresten festgestellt.



**Abbildung 31** pH-Wert der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbiomasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.

**Elektrische Leitfähigkeit:** Ähnlich den Ausführungen zum pH-Wert haben hier im Produkt verbliebene Anionen und Kationen (H<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>, gelöste Salze) einen wesentlichen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit (Abbildung 32). Vor allem bei den beiden Pflanzenkohlegruppen BC(10) und BC(60) ist ein sehr schöner „rampenförmiger“ Verlauf mit Zunahme der Leitfähigkeit hin zu Hochtemperaturkohlen zu erkennen, was mit einer Abnahme der H<sup>+</sup> und Zunahme der K<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup> und Mg<sup>+</sup> Ionen korrespondierte, welche in Lösung Basen bilden (u.a. KOH). Die Pflanzenaktivkohlegruppe AC(30) folgten diesem Trend, jedoch schwächer in ihrer Ausbildung. Die Gruppe AC(v) schien sich anders zu verhalten. Das kann aber nicht mit statistischer Sicherheit bestätigt werden, da die Probenanzahl und die Abweichungen in der Leitfähigkeit zu gering waren.



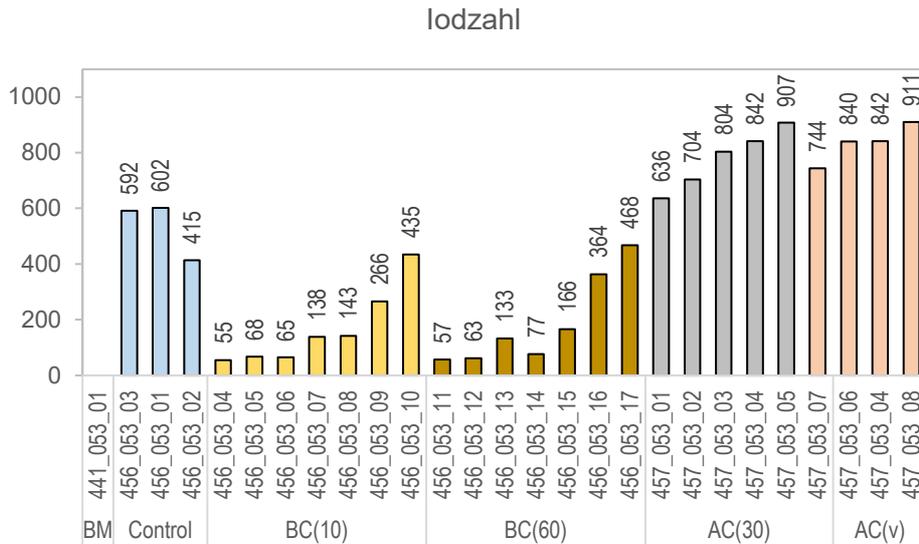
**Abbildung 32** Elektrische Leitfähigkeit der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbiomasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.

**Jodzahl:** Die Jodzahl gibt an, welche Menge Jod an eine definierte Menge aufbereiteter Pflanzen(aktiv)kohle adsorbiert werden kann. Sie definiert so eine einfache Methode, um die Oberflächenaktivität (effektive Oberfläche) von Adsorptionsmitteln zu bewerten und korreliert sehr gut mit der BET-Oberfläche (Meteku 2014). Da Jod ein kleines Molekül ist, ist es somit möglich den gesamten Porenraum der Nano- Meso- und Makroporen der Pflanzen- und Pflanzenaktivkohle zu bewerten.

Die Ergebnisse zeigten eine zu erwartende Verteilung der Jodzahlen, respektive der Adsorptionskapazität der Pflanzen(aktiv)kohlen (Abbildung 33). Zwischen den Gruppen BC(10) und BC(60) war kein signifikanter Unterschied festzustellen. Ihre Werte schwankten zwischen rund 60 (bei 300 °C) und 450 (bei 600 °C). Beide Mittelwerte lagen bei rund  $175 \pm 11$ . Dies entspricht einer schlechten Adsorptionskapazität. Die Pflanzenaktivkohlegruppen AC(30) und AC(v) wiesen bei dieser Analytik deutlich differenzierte Ergebnisse auf. Hier war der klassische Zusammenhang zwischen Aktivierung (Menge des Mediums und der Verweilzeit) deutlich erkennbar (vgl. Bergna *et al.* 2020).

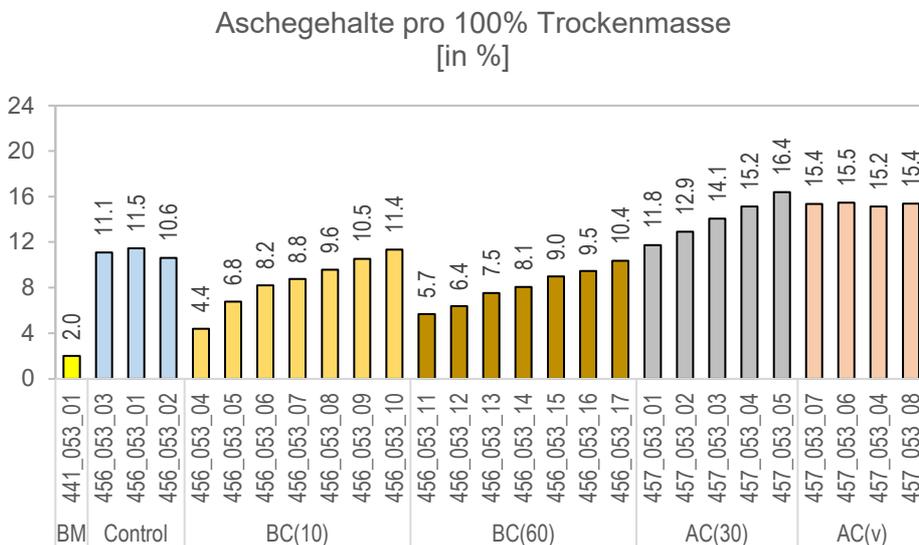
Die Aktivkohlegruppe AC(30) wies Jodzahlen im Bereich von 636 (25 % Aktivierung) und 907 (125 % Aktivierung) auf, und zeigte demnach einen starken Einfluss von Aktivierungsgrad, hervorgerufen durch die verfügbare Menge an Aktivierungsmedium auf die Adsorptionseigenschaften. Die Gruppe AC(v) zeigte ein ähnliches Bild. Hier wurde das molare Verhältnis Kohlenstoff/Sauerstoff aus Aktivierungsmedium bei 1/1 gehalten und nur die Verweilzeit im Reaktor erhöht. Beide Versuche, mit AC(30) und mit AC(v), konnten demnach zeigen, dass es möglich ist ein qualitativ hochwertiges Adsorptionsmaterial (für Jod) herzustellen.

Jodzahlen kommerziell vertriebener und in Kläranlagen eingesetzte Aktivkohlen auf Steinkohlebasis liegen ebenso bei rund 1,000 (Norit: 1,170 mg/g; Pulsorb: 1,045 mg/g).



**Abbildung 33** lodzahl der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbiomasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.

**Aschegehalt:** Abbildung 34 visualisiert die ermittelten Aschegehalte in den Pflanzen(aktiv)kohle-Proben. Auch hier ist wieder das charakteristische rampenförmige Ansteigen der Werte von Niedrigtemperaturpyrolyse hin zu Hochtemperaturpyrolyse, und weiter zu Aktivierung erkennbar (vgl. Rafiq *et al.* 2016).



**Abbildung 34** Aschegehalt der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbiomasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.

Aufgrund der Kontrollgruppe, und hier v.a. der Probennummer 456\_053\_02 (durch N<sub>2</sub>-Überdruck fast vollkommen inerte Atmosphäre im Reaktor) wurde in dieser Untersuchung für diese Pyrolyseparameter rund 11 % Aschegehalt (900 °C/30 min/Inertgas) als Referenz angesehen, in welcher fast nur noch fester Kohlenstoff vorhanden ist und flüchtige

Bestandteile überwiegend entfernt wurden. Dies korrelierte auch mit den Ergebnissen für die Gruppen BC(10) und BC(60). Bei den Gruppen AC(30) und AC(v) war der Anstieg der Aschegehalte wiederum mit dem gleichzeitigen Abbau von bis dahin festem Kohlenstoff (und evtl. letzten Resten schwer flüchtiger Bestandteile) zu erklären. Das entspricht den technologischen Vorgängen der Aktivkohleherstellung, bei denen Porenräume „freigebrannt“ werden und die Kohlenstoffoberfläche durch oxidative Erosion vergrößert wird.

**Organische (organogene) Bestandteile an der Trockensubstanz:** Diese Analyse bestimmt die Gehalte an organischer, bzw. organogener Bestandteile, anteilig an der vorgelegten Trockensubstanz. Im Allgemeinen lässt sich die Zusammensetzung analysefeuchter Biomasse wie folgt charakterisieren:

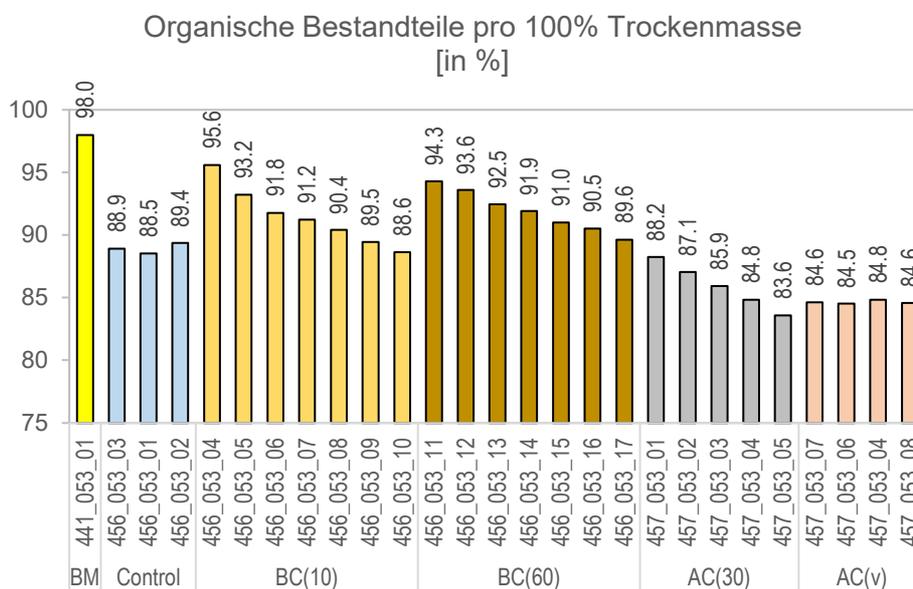
Frischmasse = Restfeuchte + Mineralik (später als Asche) + organische Substanz

Der Anteil organischer Substanz ergibt sich also als Differenz zwischen:

Frischmasse - Restfeuchte = Trockensubstanz

Trockensubstanz – Asche = Organische Substanz

Der Anteil an organischer Substanz in der Probe ist eine gute Maßzahl über den Grad der Pyrolyse. So zeigen die Ursprungsbiomassen hohe Anteile an Organik, welche im Verlaufe zunehmender Intensität der Karbonisierung hin zu organogenem Kohlenstoff (und gasförmige Moleküle) abgebaut werden (Abbildung 35). Typischerweise lässt sich die sehr gut verfolgen, wenn man die Zusammensetzung der Ausgangsbiomasse und der Pyrolyseprodukte über den Verlauf BC(60) bis hin zu AC(30) betrachtet. Es erfolgte eine stetige Abnahme der organisch/organogenen Substanz von 98 % bis hin zu 84 %.

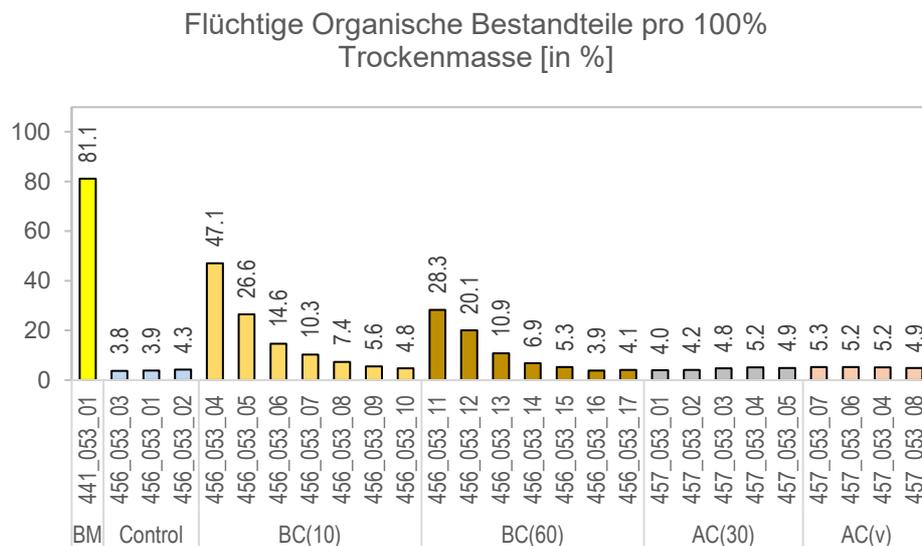


**Abbildung 35** Organische Bestandteile der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbiomasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.

**Flüchtige Organische Bestandteile:** Als flüchtige Organik werden diejenigen organischen Bestandteile bezeichnet, welche sich bei bestimmten Temperaturen (abhängig von Methode

und Substanz) in einer inerten Atmosphäre aus restfeuchtefreien Biomassen austreiben lassen. Zurück bleiben Asche und organogener Kohlenstoff.

Wie Abbildung 36 zeigt, haben die Biomassen (TS) sehr hohe Gehalte an flüchtigen organischen Bestandteilen, welche sich aber schon unter niedrigen Temperaturen (ersichtlich aus den Folgeproben der Pyrolyseserie) reduzieren ließen. In dieser Untersuchung konnten schon bei einer Pyrolysetemperatur von 400 °C eine Reduzierung der flüchtigen Bestandteile um ca. 75 % (441\_053\_01: 81.1 % → 456\_053\_12: 20.1 %) erreicht werden. Eine weitere Erhöhung der Prozesstemperatur auf über 500°C zeigte im Experiment bei keinen der Vergleichsgruppen signifikante Erfolge, jegliche weitere Reduzierung war nur marginal. Verallgemeinert lässt sich sagen, dass eine negative Korrelation zwischen Pyrolysetemperatur und Anteil flüchtiger Bestandteile im Endprodukt besteht (vgl. Junna *et al.* 2016).



**Abbildung 36** Organische Bestandteile der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbioasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.

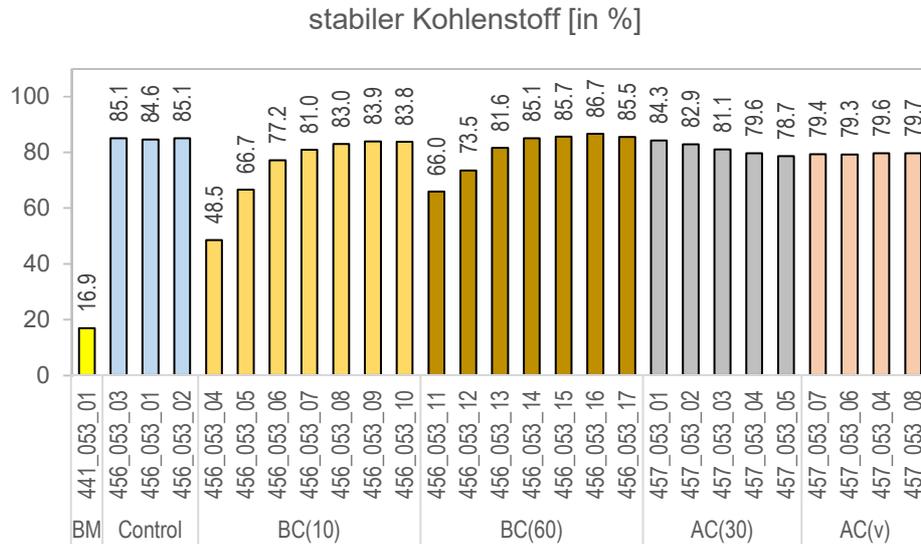
**Stabiler Kohlenstoff:** Als stabiler Kohlenstoff wird der Anteil an Kohlenstoff bezeichnet, der aus der Biomasse durch Pyrolyse stabilisiert wurde. Er zeichnet sich durch eine besonders hohe Umweltbeständigkeit aus und wird als Hoffnungsträger der CO<sub>2</sub>-Speicherung in Böden gesehen.

Der Anteil an stabilem Kohlenstoff wird als Prozentsatz angegeben, wobei hier wiederum als Basis am besten die Trockenmasse benutzt wird.:

$$\text{Stabiler Kohlenstoff [\%]} = 100\% (\text{Biomasse TS}) - \text{Asche [\%]} - \text{Flüchtige org. Bestandteile [\%]}$$

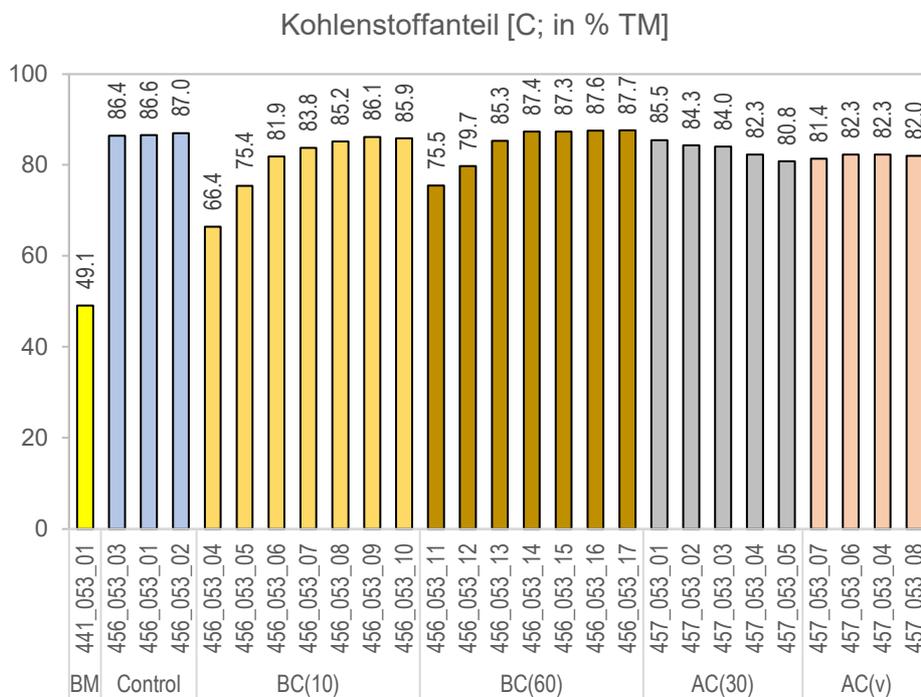
Wie in Abbildung 37 sehr gut erkennbar, ist der stabile C-Gehalt in der Frischbiomasse am geringsten. Mit zunehmender Pyrolyseintensität stieg der Gehalt an und erreichte unter Standardpyrolysebedingungen ab ca. 600 °C mit rund 85 % sein Optimum, welches sich bis 900 °C Pyrolysetemperatur nicht änderte. Weiterhin war zu erkennen, dass die Verweilzeit bei Pflanzenkohle einen leichten Einfluss auf die Ausbildung von stabilem C hatte. Im direkten Vergleich der beiden Gruppen BC(10) und BC(60) schien die höhere Verweilzeit einen positiven Einfluss auf die Erträge von stabilem Kohlenstoff zu haben. Die sinkenden Anteile an

stabilen Kohlenstoff in den beiden Gruppen AC(30) und AC(v) scheinen auf einen Abbrand durch die Aktivierung hinzudeuten.



**Abbildung 37** Anteil an stabilem Kohlenstoff der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbioasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.

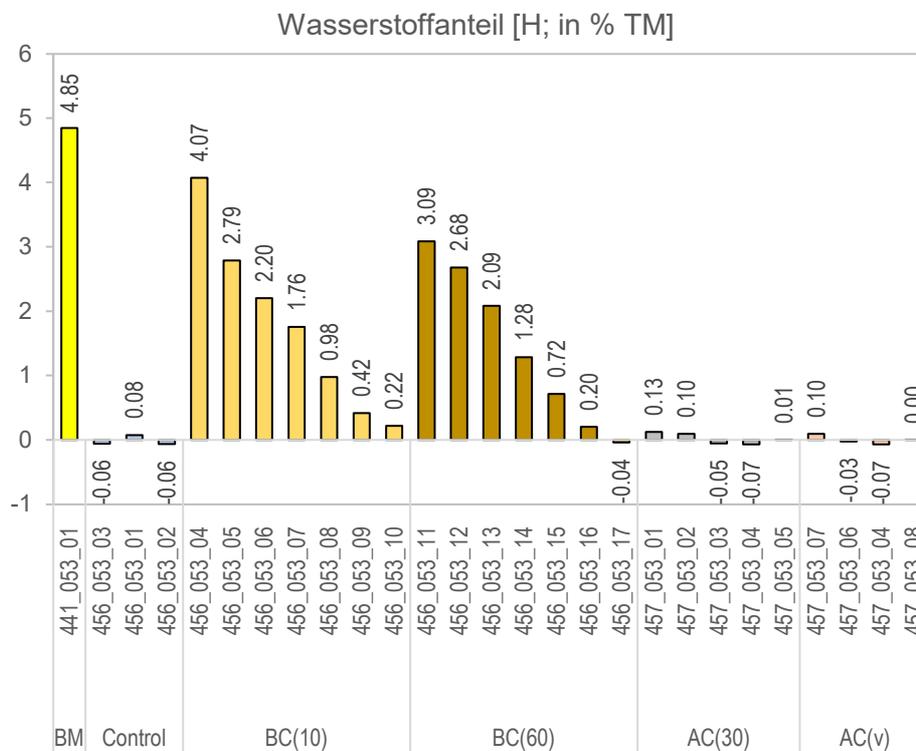
**C, H, N, (S):** Im Rahmen dieser Untersuchung wurden nur die Hauptelemente der organischen Verbindungen bestimmt. Diese beinhalteten: Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Schwefel.



**Abbildung 38** Kohlenstoffanteil der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbioasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.

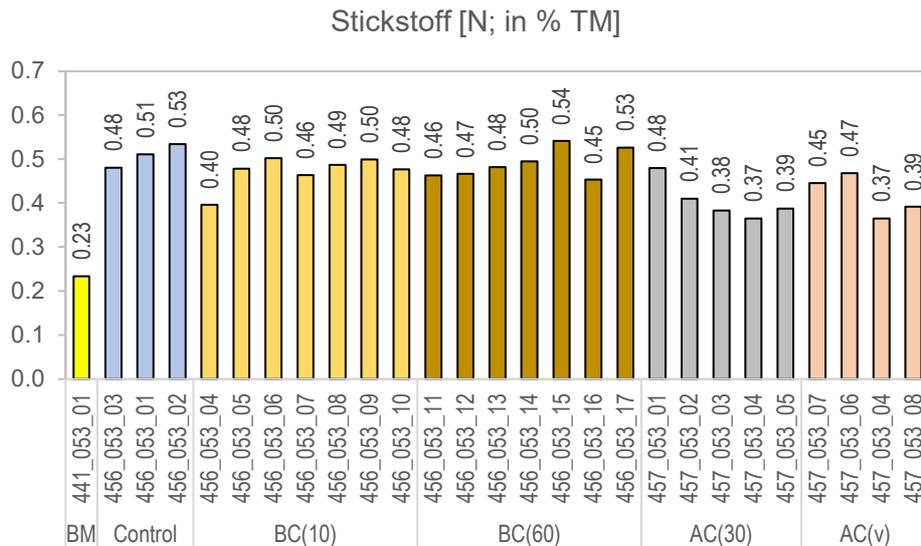
Mit zunehmender Pyrolysetemperatur und/oder Verweilzeit stieg der Kohlenstoffanteil an (Abbildung 38). Die stärksten Veränderungen waren hierbei von 300 °C auf 600 °C zu erkennen. Eine weitere Erhöhung der Pyrolysetemperatur veränderte den C-Gehalt nur noch marginal. Ebenfalls werden die rückläufigen Kohlenstoffgehalte der Pflanzenaktivkohlegruppen AC(30) und AC(v) durch die bei der Aktivierung ablaufenden Oxidationsprozesse zu erklären sein.

**Wasserstoff (H):** Die Auswertung der Analyse hinsichtlich der Wasserstoffgehalte der *Miscanthus*-Kohleproben in Abhängigkeit der Prozessparameter legt nahe, dass die analysierten Wasserstoffgehalte an die organischen und organisch-flüchtigen Bestandteilen gebunden sind (Abbildung 39). Die Rohbiomasse sowie die Pflanzenkohlen mit niedrigen Pyrolysegraden wiesen die höchsten Wasserstoffgehalte auf, wobei Hochtemperaturpyrolyse und insbesondere die produzierten Pflanzenaktivkohlen keine signifikanten Wasserstoffgehalte mehr aufwiesen.

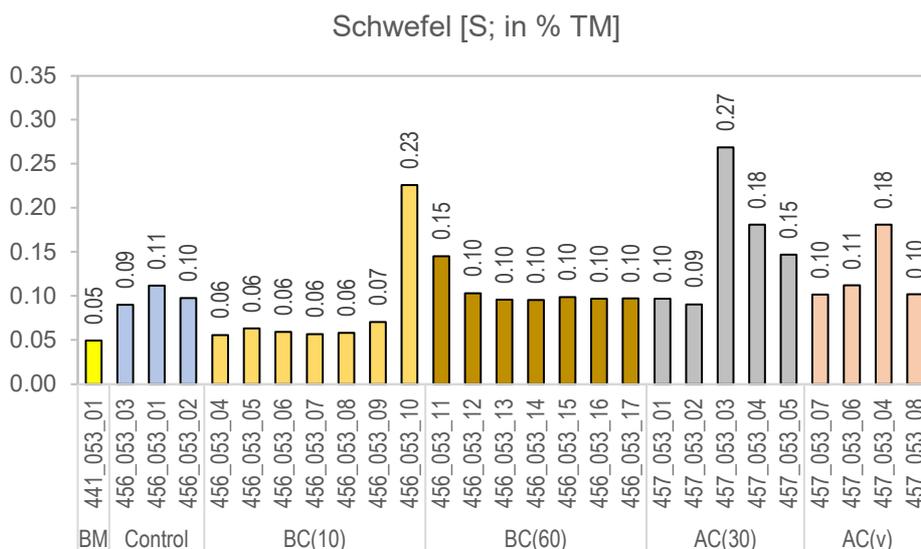


**Abbildung 39** Wasserstoffanteil der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbiomasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.

**Stickstoff (N) & Schwefel (S):** Die Verteilung der Stickstoff- und Schwefelgehalte, wie sie in den Abbildungen 40 und 41 dargestellt sind, ließen keine eindeutigen Schlussfolgerungen über deren Verhalten während des Pyrolyseprozesses zu.

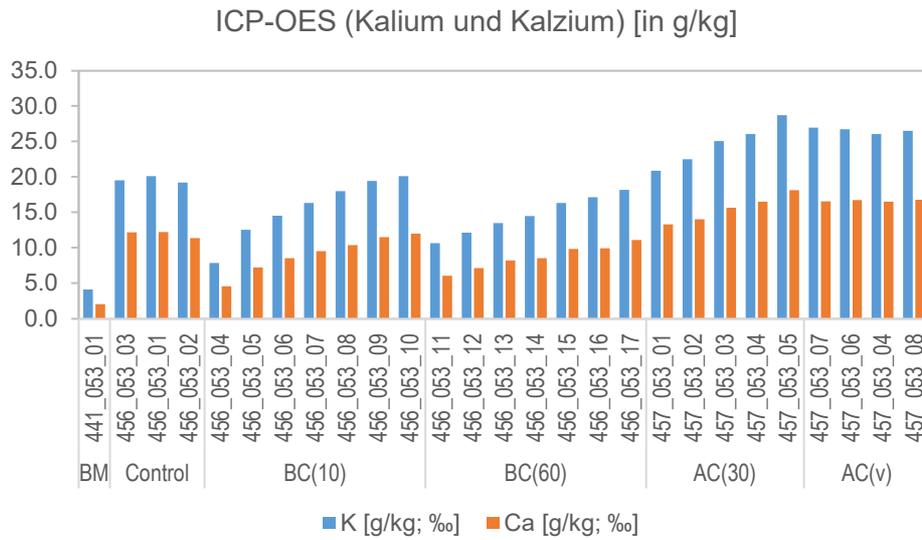


**Abbildung 40** Stickstoffanteil der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbiomasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.

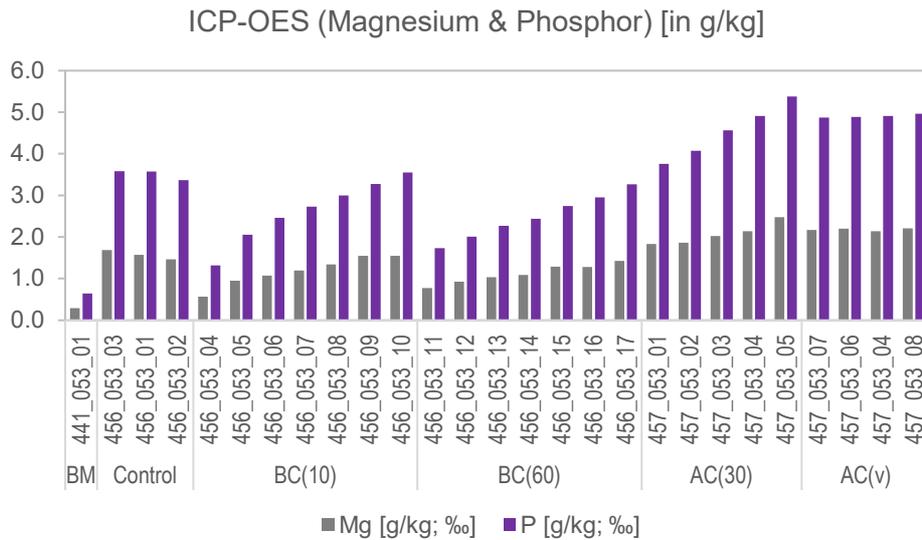


**Abbildung 41** Schwefelanteil der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbiomasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.

**Nebenelemente Kalium (K), Kalzium (Ca), Magnesium (Mg) und Phosphor (P):** Die Verteilung der Nebenelemente (Abbildung 42 und 43) in den Proben wurden u.a. analysiert, um den Zusammenhang zwischen pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und Aschegehalte zu eruieren. Gültig für die hier verarbeitete *Miscanthus*-Biomasse und den daraus generierten Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen können wir schlussfolgern, dass ein hoher Aschegehalt mit einem hohen Anteil an vor allem basisch reagierender Ionen, wie  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  und  $Mg^{2+}$ , korreliert. Damit einhergehend wiesen diese Kohleprodukte einen hohen pH-Wert auf. Ferner, große Mengen an stark basisch reagierenden Ionen in den Kohleprodukten korrelierte mit einem hohen Salzgehalt und einer hohen Leitfähigkeit.



**Abbildung 42** Anteile an Kalium und Kalzium der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbioasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.



**Abbildung 43** Anteile an Magnesium und Phosphor der produzierten Pflanzen(aktiv)kohlen mit *Miscanthus* als Ausgangsbioasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten, Prozesstemperaturen und Oxidationslevel.

## 3.1.4 Arbeitspaket 4 „Praxisversuche mit Kohle als Einstreuzusatz“

**Felduntersuchungen**

Die durchschnittlichen Prävalenzen starker **Fußballenveränderungen** (Abbildung 44) über alle Erhebungszeitpunkte unterschieden sich nicht signifikant zwischen Kohle- und Kontrollgruppen ( $p = 0.977$ , Tabelle 13), sie nahmen aber von Bonitur 2 zu Bonitur 3 signifikant zu ( $p = 0.015$ , Tabelle 13).

**Tabelle 13** Prävalenzen starker Fußballenveränderungen

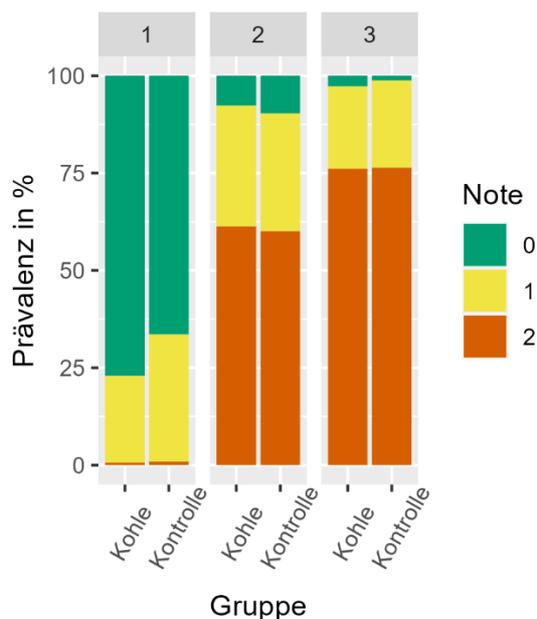
Durchschnittliche Prävalenzen (%) starker Fußballenveränderungen (Note 2) in den Kohle- und Kontrollgruppen und zu verschiedenen Messzeitpunkten (Bonitur 1-3; n=9 Durchgänge).

		Mittelwert $\pm$ SD	Median	Min	Max
<b>Gruppe</b>	Kohle	68.68 $\pm$ 27.87	74.23	18.92	99.16
	Kontrolle	68.21 $\pm$ 28.32	81.42	24.32	98.45
<b>Messzeitpunkt</b>	1 (2. LW)	27.75 $\pm$ 18.76	26.12	2.25	53.72
	2 (7./8. LW)	60.66 $\pm$ 29.69	58.64	18.92	96.85
	3 (11. LW)	76.23 $\pm$ 23.85	90.62	27.03	99.16

\*LW= Lebenswoche

**Abbildung 44** Beispiel eines Tiers mit Fußballenveränderungen (Bildautor: Gurny).

Einen Überblick über die Verteilung aller Noten für die Fußballengesundheit zu den verschiedenen Boniturzeitpunkten gibt Abbildung 45.



**Abbildung 45** Fußballengesundheit

Dargestellt sind die Prävalenzen (%) verschiedener Noten (grün: 0, keine Veränderungen, gelb: 1, leichte Veränderungen, orange: 2, starke Veränderungen, siehe auch Annex II) zu den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten (Bonitur 1: 2. Lebenswoche, Bonitur 2: 7./8. Lebenswoche, Bonitur 3: 11. Lebenswoche) (n=9 Durchgänge).

Im Mittel über alle Erhebungszeitpunkte waren die Prävalenzen starker **Fersenhöckerveränderungen** in den Kohlegruppen etwas niedriger als in den Kontrollgruppen und nahmen von Bonitur 2 zu Bonitur 3 zu (Tabelle 14), aber weder zwischen den Gruppen ( $p = 0.990$ ), noch zwischen den Messzeitpunkten ( $p = 0.099$ ) waren sie signifikant unterschiedlich.

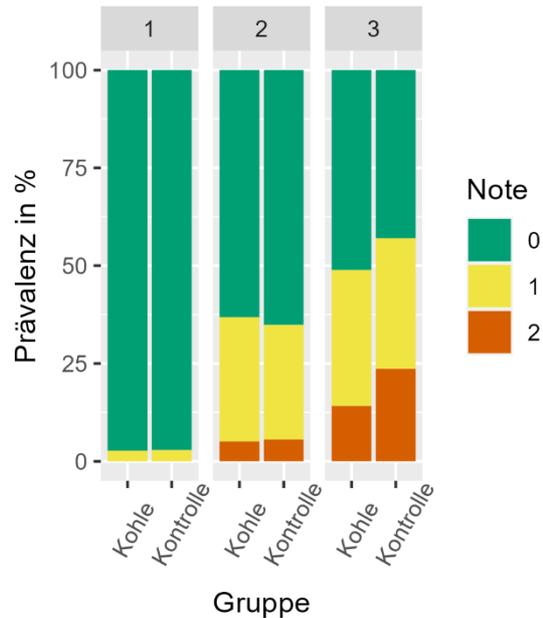
**Tabelle 14** Prävalenzen starker Fersenhöckerveränderungen

Durchschnittliche Prävalenzen (%) starker Fersenhöckerveränderungen (Note 2) in unterschiedlichen Gruppen (Kohle- und Kontrollgruppe) und zu verschiedenen Messzeitpunkten (Bonitur 1-3; n=9 Durchgänge).

		Mittelwert	±	SD	Min	Max
<b>Gruppe</b>	Kohle	9.60	±	8.52	0.00	29.91
	Kontrolle	14.59	±	18.54	0.00	57.81
<b>Messzeitpunkt</b>	1 (2. LW)	0.12	±	0.20	0.00	0.42
	2 (7./8. LW)	5.32	±	7.09	0.00	27.00
	3 (11. LW)	18.88	±	16.79	2.70	57.81

\*LW= Lebenswoche

Einen Überblick über die Verteilung aller Noten für die Fersenhöckergesundheit zu den verschiedenen Boniturzeitpunkten gibt Abbildung 46.



**Abbildung 46** Fersenhöckerveränderungen

Dargestellt sind die Prävalenzen (%) verschiedener Noten (grün: 0, keine Veränderungen, gelb: 1, leichte Veränderungen, orange: 2, starke Veränderungen, siehe auch Annex II) zu den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten (Bonitur 1: 2. Lebenswoche, Bonitur 2: 7./8. Lebenswoche, Bonitur 3: 11. Lebenswoche; n=9 Durchgänge).

Durchfall (Note 2: flüssiger, ungeformter Kot) trat über alle Erhebungszeitpunkte nicht in unterschiedlichem Ausmaß zwischen Kohle- und Kontrollgruppen ( $p = 0.824$ ) auf und nahm auch nicht über die Zeit zu ( $p = 0.157$ , Tabelle 15).

**Tabelle 15** Prävalenzen flüssigen, ungeformten Kots

Durchschnittliche Prävalenzen (%) flüssigen, ungeformten Kots (Note 2) in unterschiedlichen Gruppen (Kohle- und Kontrollgruppe) und zu verschiedenen Messzeitpunkten (Bonitur 1-3; n=9 Durchgänge).

		Mittelwert ± SD	Min	Max
<b>Gruppe</b>	Kohle	6.78 ± 7.46	0.00	26.67
	Kontrolle	4.86 ± 4.77	0.00	16.00
<b>Messzeitpunkt</b>	1 (2. LW)	4.97 ± 3.50	0.00	10.00
	2 (7./8. LW)	4.98 ± 5.55	0.00	16.00
	3 (11. LW)	6.67 ± 6.93	0.00	26.67

\*LW= Lebenswoche

Der Anteil von Tieren mit verschmutztem **Kloakenbereich** (Abbildung 47) unterschied sich nicht signifikant zwischen den Kontroll- und Kohlegruppen ( $p = 0.728$ ), er nahm aber von Bonitur 2 zu Bonitur 3 tendenziell zu ( $p = 0.089$ ; Tabelle 16).

**Tabelle 16** Prävalenzen verschmutzter Kloaken

Durchschnittliche Prävalenzen (%) verschmutzter Kloaken (Note 1) in unterschiedlichen Gruppen (Kohle- und Kontrollgruppe) und zu verschiedenen Messzeitpunkten (Bonitur 1-3; n=9 Durchgänge).

		Mittelwert ± SD	Min	Max
<b>Gruppe</b>	Kohle	27.72 ± 11.53	4.64	48.65
	Kontrolle	24.14 ± 10.16	8.86	45.95
<b>Messzeitpunkte</b>	1 (2. LW)	9.71 ± 5.17	4.26	20.21
	2 (7./8. LW)	23.10 ± 9.21	4.64	37.84
	3 (11. LW)	28.75 ± 11.88	8.86	48.65

\*LW= Lebenswoche

**Abbildung 47** Beispiel eines Tieres mit deutlicher Kloakenverschmutzung (Bildautor: Gurny).

Im Durchschnitt waren die Prävalenzen starker **Gefiederverschmutzung** (Note 2, verschmutzte Federn im Brust-/Bauchbereich, sowie an Flügeln oder Beinen) signifikant höher in den Kohlegruppen als in den Kontrollgruppen ( $p = 0.005$ ); zudem war eine signifikante Zunahme von Tieren mit starker Gefiederverschmutzung im Verlauf der Mastperiode zu beobachten ( $p = 0.008$ ; Tabelle 17).

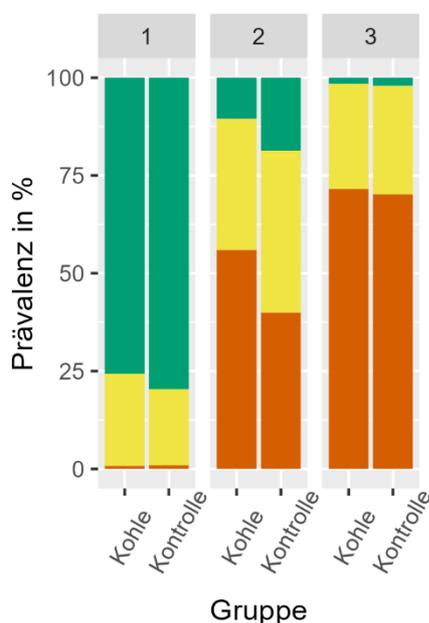
**Tabelle 17** Prävalenzen stark verschmutzten Gefieders

Durchschnittliche Prävalenzen (%) stark verschmutzten Gefieders (Note 2) in unterschiedlichen Gruppen (Kohle- und Kontrollgruppe) und zu verschiedenen Messzeitpunkten (Bonitur 1-3; n=9 Durchgänge).

		Mittelwert ± SD	Min	Max
<b>Gruppe</b>	Kohle	63.73 ± 18.70	32.43	100.00
	Kontrolle	55.04 ± 28.01	10.81	98.96
<b>Messzeitpunkt</b>	1 (2. LW)	0.82 ± 1.33	0.00	4.15
	2 (7./8. LW)	47.91 ± 23.82	10.81	85.59
	3 (11. LW)	70.86 ± 18.11	40.54	100.00

\*LW= Lebenswoche

Einen Überblick über die Verteilung aller Noten für die Gefiederverschmutzung (Fläche) zu den verschiedenen Boniturzeitpunkten gibt Abbildung 48.



**Abbildung 48** Gefiederverschmutzung (Schmutzfläche)

Dargestellt sind die Prävalenzen (%) verschiedener Noten (grün: 0, keine Verschmutzung, gelb: 1, leichte Verschmutzung, orange: 2, starke Verschmutzung, siehe auch Annex II) zu den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten (Bonitur 1: 2. Lebenswoche, Bonitur 2: 7./8. Lebenswoche, Bonitur 3: 11. Lebenswoche; n=9 Durchgänge).

Auch die Prävalenzen **verklebten Gefieders** waren signifikant höher in Gruppen mit Kohlezusatz als in den Kontrollgruppen ( $p = 0.065$ ), und es gab einen deutlichen Anstieg an Tieren mit verklebtem Gefieder vom Beginn der Mast (Bonitur 2) zum Ende der Mast (Bonitur 3;  $p < 0.0001$ ; Tabelle 18).

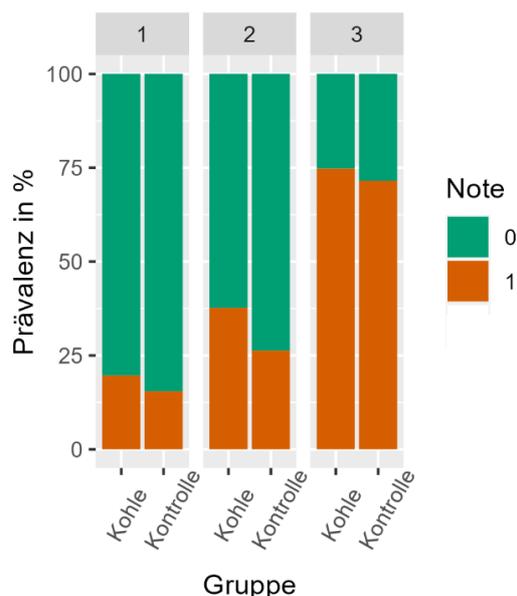
**Tabelle 18** Prävalenzen verklebten Gefieders

Durchschnittliche Prävalenzen (%) verklebten Gefieders (Note 1) in unterschiedlichen Gruppen (Kohle- und Kontrollgruppe) und zu verschiedenen Messzeitpunkten (Bonitur 1-3; n=9 Durchgänge).

		Mittelwert $\pm$ SD	Min	Max
<b>Gruppe</b>	Kohle	56.22 $\pm$ 27.84	8.00	95.33
	Kontrolle	48.91 $\pm$ 31.31	2.70	97.40
<b>Messzeitpunkt</b>	1 (2. LW)	17.74 $\pm$ 9.32	2.13	31.61
	2 (7./8. LW)	31.97 $\pm$ 24.36	2.70	72.07
	3 (11. LW)	73.16 $\pm$ 17.10	48.65	97.40

\*LW= Lebenswoche

Die Verteilung aller Noten zur Gefiederverschmutzung (Verklebung) zu den verschiedenen Boniturzeitpunkten ist in Abbildung 49 zu sehen.



**Abbildung 49** Gefiederverschmutzung (Verklebung)

Dargestellt sind die Prävalenzen (%) verschiedener Noten (grün: 0, keine Verklebung, orange: 1 verklebtes Gefieder, siehe auch Annex II) zu den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten (Bonitur 1: 2. Lebenswoche, Bonitur 2: 7./8. Lebenswoche, Bonitur 3: 11. Lebenswoche; n=9 Durchgänge).

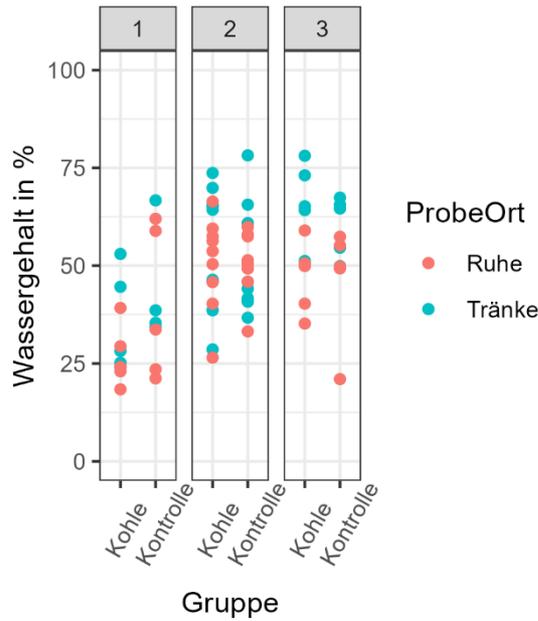
Die **Einstreufeuchte** unterschied sich nicht signifikant zwischen Kohle- und Kontrollgruppen ( $p = 0.109$ ), sie stieg aber im Lauf der Mastperiode signifikant an ( $p = 0.001$  von Messzeitpunkt 1 zu 2,  $p = 0.015$  von Messzeitpunkt 2 zu 3; Tabelle 19). Numerisch waren höhere Feuchtegehalte in den Tränkebereichen festzustellen (Abbildung 50, Tabelle 19), die sich aber nicht signifikant von den Feuchtegehalten in den Ruhebereichen unterschieden ( $p = 0.311$ ).

**Tabelle 19** Wassergehalt der Einstreu

Durchschnittlicher Wassergehalt der Einstreu (%) in unterschiedlichen Gruppen (Kohle- und Kontrollgruppe), zu verschiedenen Messzeitpunkten sowie an verschiedenen Probeorten (Ruhe- und Tränkebereich) (n=9 Durchgänge).

		Mittelwert $\pm$ SD	Min	Max
<b>Gruppe</b>	Kohle	48.2 $\pm$ 16.6	18.4	78.1
	Kontrolle	49.9 $\pm$ 13.6	21.0	78.2
<b>Messzeitpunkt</b>	1 (4. LW)	36.7 $\pm$ 14.7	18.4	66.7
	2 (8./9. LW)	51.8 $\pm$ 12.4	26.5	78.2
	3 (11. LW)	55.1 $\pm$ 13.3	21.0	78.1
<b>Probeort</b>	Ruhe	45.1 $\pm$ 13.8	18.4	66.4
	Tränke	52.4 $\pm$ 15.7	24.1	78.2

\*LW=Lebenswoche



**Abbildung 50** Einstreufeuchte

Dargestellt sind die gemessenen Wassergehalte (%) der Proben aus den verschiedenen Gruppen (Kohle, Kontrolle), zu unterschiedlichen Messzeitpunkten (1: 4.LW, 2: 9./10. LW, 3:11. LW), im Ruhebereich (orange) oder Tränkebereich (blau; n=75).

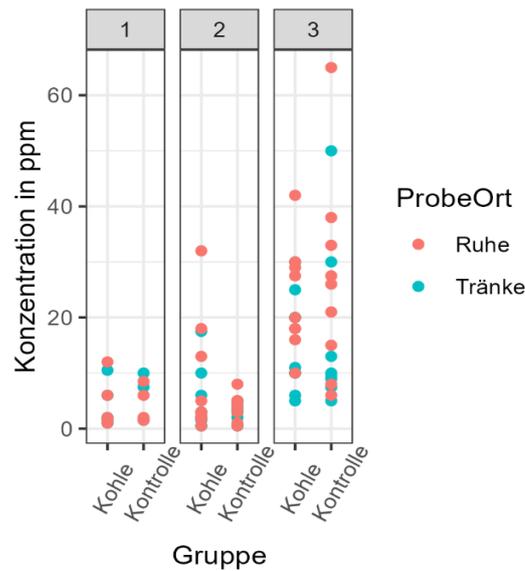
Die **Ammoniakkonzentrationen** unterschieden sich nicht signifikant zwischen Kohle- und Kontrollgruppen ( $p = 0.465$ ), nahmen aber von Bonitur 2 zu 3 signifikant zu ( $p = 0.003$ , Tabelle 20). Der Ort der Probenahme hatte keinen signifikanten Effekt auf die Höhe der Ammoniakkonzentration ( $p = 0.416$ , Abbildung 51).

**Tabelle 20** Ammoniakkonzentrationen

Durchschnittliche Ammoniakkonzentrationen in unterschiedlichen Gruppen (Kohle- und Kontrollgruppe), zu verschiedenen Messzeitpunkten (Bonitur 1-3) sowie an verschiedenen Probeorten (Ruhe- und Tränkebereich) (n=9 Durchgänge).

		Mittelwert	±	SD	Min	Max
<b>Gruppe</b>	Kohle	13.00	±	11.10	0.50	42.00
	Kontrolle	12.32	±	14.89	0.50	65.00
<b>Messzeitpunkt</b>	1 (2. LW)	4.58	±	3.75	1.00	12.00
	2 (7./8. LW)	5.08	±	6.28	0.50	32.00
	3 (11. LW)	20.24	±	13.69	5.00	65.00
<b>Probeort</b>	Ruhe	15.67	±	14.67	0.50	65.00
	Tränke	9.65	±	10.55	0.50	50.00

\*LW=Lebenswoche



**Abbildung 51** Ammoniakemissionen

Dargestellt sind die Ammoniakkonzentrationen (in ppm) in Kohle- und Kontrollgruppen zu verschiedenen Messzeitpunkten (Bonitur 1: 2. LW, Bonitur 2: 7./8. LW, Bonitur 3: 11. LW) und im Ruhebereich (orange) oder Tränkebereich (blau) (n=90).

Die relative **Luftfeuchte** nahm im Verlauf der Mast zu (Tabelle 21). In der ersten und zweiten Lebenswoche (LW) war die Luftfeuchte mit < 50 % etwas niedriger als angestrebt, befand sich dann aber überwiegend im Optimalbereich von 50 bis 70 % (DLG- Ausschuss Geflügel, 2021); andere Quellen geben als Optimalbereich 50 bis 80 % an (z.B. Länderarbeitsgruppe Stallklima 2006). Die im Verlaufe der Mast abnehmenden **Durchschnittstemperaturen** lagen während der Aufzucht im Optimalbereich (DLG- Ausschuss Geflügel (2021): 32 bis 33 °C bei Einstallung, Reduzierung in ca. 1-Grad-Schritten auf 20 °C). Allerdings lagen in der Mast die Minimaltemperaturen entsprechend der kalten Jahreszeit und der teilweise nicht oder wenig gedämmten Ställe teilweise unter dem Gefrierpunkt und die Durchschnittswerte ab der siebten Lebenswoche unter der empfohlenen Temperatur von 20 °C (Tabelle 21).

**Tabelle 21** Temperatur und Luftfeuchte im Mittel aller Durchgänge (n= 9) sortiert nach Alter der Tiere (LW).

Tieralter	Temperatur			Luftfeuchte		
	Mittelwert ± SD	Min	Max	Mittelwert ± SD	Min	Max
1	34.0 ± 2.3	28.7	38.1	35.5 ± 8.8	22.8	67.4
2	30.3 ± 2.8	25.4	38.5	43.2 ± 12.1	22.8	72.3
3	27.8 ± 3.3	20.1	36.6	54.4 ± 15.1	26.1	89.6
4	25.2 ± 2.6	19.1	32.8	58.2 ± 12.9	28.9	89.2
5	24.2 ± 3.1	14.3	30.6	62.2 ± 12.5	31.8	88.8
6	20.3 ± 4.0	5.7	26.9	66.7 ± 9.0	47.3	99.4
7	18.6 ± 5.3	1.6	28.5	68.0 ± 7.6	42.3	87.8
8	16.1 ± 5.0	2.2	25.6	67.6 ± 8.4	39.1	90.8
9	14.7 ± 5.5	2.4	28.2	70.0 ± 8.1	35.8	88.6
10	14.6 ± 5.5	-1.3	30.0	70.0 ± 9.0	42.7	92.9
11	15.8 ± 4.4	8.8	25.4	72.3 ± 10.3	40.4	90.7
12	21.3 ± 2.8	14.3	27.3	69.3 ± 8.1	51.7	78.5

Die einmalige Messung von **Staubgehalten** in der Stallluft bestätigte, dass keine Unterschiede zwischen Ställen mit und ohne Kohleinstreu bestanden (3.3 mg/m<sup>3</sup> mit Kohle, 4.1 mg/m<sup>3</sup> ohne

Kohle). Auch wenn die Werte gegenüber der ersten Versuchsphase ( $1.6 \text{ mg/m}^3$  bzw.  $1.9 \text{ mg/m}^3$ ) etwas höher waren, möglicherweise weil am Tag der Messung ein Mitarbeiter Stroh eingestreut hatte, lagen sie deutlich unter dem Grenzwert von Hahn und Möhlmann (2011) von  $10 \text{ mg/m}^3$  für die einatembare Staubfraktion. Die Staubmessung erfolgte mit einem Glasfilter mit einer Porengröße von  $1.6 \mu\text{m}$ , somit sammelte sich sämtlicher Staub mit einer Partikelgröße  $> 1.6 \mu\text{m}$  darauf. Partikel  $< 2.5 \mu\text{m}$  lassen sich fast vollständig einatmen (thorax- und alveolengängig), Partikel  $> 10 \mu\text{m}$  Partikelgröße sammeln sich beim vermehrt in den oberen Atemwegen (Wang *et al.* 2023). Auch wenn der Grenzwert dem Arbeitsschutz und nicht dem Tierschutz dient, erlaubt er eine grobe Einschätzung, dass die hier gemessenen Staubmengen als unproblematisch bewertet werden können.

### **Diskussion der Zielerreichung**

Der fehlende Effekt des Einsatzes von Pflanzenkohle auf die Entstehung von Fußballenveränderungen war unerwartet. In anderen Untersuchungen in der konventionellen Masthühnerhaltung war eine Minderung der Prävalenzen von Fußballendermatitis durch den Zusatz von Kohle in der Einstreu oder in der Fütterung (Albiker & Zweifel 2019, Hinz *et al.* 2019), nur in der Fütterung (Hinz *et al.* 2019) oder nur in der Einstreu (Linhoss *et al.* 2019) festgestellt worden. Verglichen mit dem CAREFUL-Projekt war von Linhoss *et al.* (2019) fast doppelt so viel Kohle eingestreut worden ( $0.97 \text{ kg/m}^2$  versus  $0.5 \text{ kg/m}^2$  in 28 Tagen), das herkömmlich genutzte Einstreusubstrat war ebenfalls unterschiedlich (Sägemehl versus überwiegend Stroh). Außerdem standen die schnell wachsenden Tiere für kürzere Zeit auf der Einstreu (Schlachtung am 35. Tag versus ab dem 85. Tag) und die Einstreu wies geringere Feuchtegehalte auf ( $26.1$  bzw.  $29.1 \%$  vs.  $48.2 \%$  bzw.  $49.9 \%$  in den Kohle- bzw. Kontrollgruppen). Möglicherweise war die eingebrachte Kohlemenge im vorliegenden Projekt nicht ausreichend, um die erwünschten Ergebnisse zu erzielen. Allerdings wurden die Untersuchungen von Linhoss *et al.* (2019) in experimentellem Maßstab durchgeführt; die Umrechnung der eingesetzten Kohlemengen auf Praxisbedingungen ergibt recht hohe Kohlemengen. Schon für einen Stall mit 2,000 Tieren, hier also  $90 \text{ m}^2$  in der Aufzucht und  $200 \text{ m}^2$  in der Mast, würden über eine Mastzeit von 85 Tagen grob gerechnet  $282 \text{ kg}$  Kohle benötigt, was eine logistische und ökonomische Herausforderung darstellen könnte. Aus diesem Grund wurde im vorliegenden Projekt nach optischem Eindruck eine Kohlemenge festgelegt, die noch annähernd flächendeckend ausgebracht werden konnte und die dann regelmäßig alle 14 Tage nachgestreut wurde, insgesamt fünfmal in jedem Mastdurchgang. Die resultierenden  $250 \text{ g/m}^2$  pro Einstreuvorgang ergaben über einen Mastdurchgang für einen entsprechenden Betrieb mit einer Stallfläche von  $90 \text{ m}^2$  in der Aufzucht und  $200 \text{ m}^2$  in der Mast eine benötigte Kohlemenge von  $195 \text{ kg}$ . Die insgesamt eingebrachte Kohlemenge entsprach zwar nicht den  $15 \text{ Vol.-%}$ , die im unten beschriebenen Laborversuch (Kap. 3.1.4.3) untersucht worden waren, sondern ungefähr  $10 \text{ Vol.-%}$  bei Stroheinstreu. Aber selbst diese Menge erwies sich in einem Stall mit Papierpellets als Einstreusubstrat als zu hoch, da es zu Verschmutzungen der Lüftungstechnik kam. Daher wurde in dieser Konstellation die Kohlemenge nochmals auf  $80 \text{ g/m}^2$  reduziert. Ohnehin ist sowohl ein Volumen- als auch ein Gewichtsvergleich zwischen verschiedenen Untersuchungen problematisch, da Pflanzenkohle je nach Ausgangssubstrat und Behandlung unterschiedliche Partikelgrößen aufweisen kann sowie je nach Feuchtegehalt sehr unterschiedliche Gewichte bei gleichem Volumen. Da im vorliegenden Projekt überwiegend frisch getrocknete Kohle eingesetzt wurde, ist nicht auszuschließen, dass die geringeren Kohlemengen gegenüber Linhoss *et al.* (2019) bezogen auf das Gewicht mit geringeren Unterschieden bezogen auf das Volumen einhergingen.

Im Vergleich von Kohle als Futterzusatz (1 % der Ration), als Einstreuzusatz (0.3 kg/m<sup>2</sup> alle drei Tage) oder einer Kombination der beiden fanden Albiker & Zweifel (2019) den stärksten positiven Effekt auf die Fußballengesundheit bei der Kohle als Futterzusatz. Gegen einen Einsatz von Kohle als Futterzusatz im vorliegenden Projekt sprach aber, dass in der EU-Öko-VO (2020) Pflanzenkohle bisher nicht als zulässiger Futterzusatz aufgeführt ist.

Beim Einsatz von Kohle nur als Einstreuzusatz stellten Albiker & Zweifel (2019) teils sogar mehr Fußballenveränderungen gegenüber der Kontrolle fest. Bei Untersuchung der Füße am Schlachthof stellten sie viele Kohlereste an den Füßen fest und vermuteten, dass kleine Verletzungen an den Fußballen durch scharfe oder harte Kanten der Kohle entstanden waren, die Entzündungserreger als Eintrittspforten dienten (Albiker & Zweifel 2019). Auch Strašifák und Juhás (2023) weisen in ihrer Literaturübersicht auf solche möglichen Zusammenhänge bei harter oder grober Einstreu (z.B. Stroh) hin. Die im CAREFUL-Projekt genutzte Dinkelspelzenkohle erschien aber mit Korngrößen zwischen 0 und 50 mm nicht scharfkantig und führte auch nicht zu mehr Fußballenentzündungen. Dagegen könnten in einigen Fällen höhere Distelanteile im Stroh auch generell das verstärkte Auftreten von Fußballenentzündungen befördert haben.

Sehr wahrscheinlich bewirkte vor allem die hohe Einstreufeuchte in den hier untersuchten Ställen, dass mit der Pflanzenkohle keine Effekte erzielt wurden. Generell besteht das Ziel, die Einstreufeuchte und damit den Kontakt der Tiere mit feuchten Oberflächen niedrig zu halten. Orientierungswerte laut Literatur liegen zwischen maximal 35–40 % Wassergehalt (El-Wahab *et al.* 2012, McGahan *et al.* 2014). Mehrere Untersuchungen mit Puten (Mayne *et al.* 2007, Youssef *et al.* 2011), aber auch mit Masthühnern (Cengiz *et al.* 2011), unterstrichen die große Bedeutung der Einstreufeuchte, und weniger der Verschmutzung der Einstreu (durch Kot), für die Fußballengesundheit. In der vorliegenden Untersuchung wurden die besonderen Herausforderungen in der ökologischen Masthühnerhaltung deutlich, in der kalten Jahreszeit die Einstreu durchweg ausreichend trocken zu halten. Während gegenüber der konventionellen Hühnermast die Besatzdichte als ein die Einstreufeuchte erhöhender Faktor (eigene Ergebnisse, Petek *et al.* 2014) deutlich geringer ist, sind andere Einflussfaktoren, deutlich schwieriger in einem günstigen Bereich zu halten. Dazu gehören die Fütterung und das Stallklimamanagement.

In der ökologischen Geflügelfütterung ist insbesondere die bedarfsgerechte Versorgung mit essenziellen Aminosäuren herausfordernd, da die Auswahl an Eiweißkomponenten begrenzt ist bzw. deren Kosten begrenzend wirken und synthetische Aminosäuren nicht eingesetzt werden dürfen. Häufig kann die bedarfsgerechte Versorgung nur über insgesamt höhere Rohproteingehalte im Futter erreicht werden. Für die Verstoffwechslung erhöhter Proteingehalte im Futter werden aber höhere Wassermengen benötigt, die über das Tränkwasser aufgenommen, aber auch mit dem überschüssigen Stickstoff wieder ausgeschieden werden (Collett 2012). Hinzu kommt, dass unverdautes Protein im Blinddarm eine Dysbiose befördern kann, die über die Förderung von Entzündungsprozessen im Dünndarm zu mehr dünnflüssigem Kot führen kann (Collett 2012). Außerdem können einzelne Eiweißkomponenten, wie Sojabohnenmehl, durch hohe Gehalte von Nicht-Stärke-Polysacchariden (NSP) und Kalium, hohe Wasser- und auch Schleimgehalte im Kot verursachen (El-Wahab *et al.* 2018, Schmidt *et al.* 2010). Eine alternative Strategie, die Versorgung mit essenziellen Aminosäuren zu sichern, ist eine energiereduzierte Fütterung, die durch eine höhere Futterraufnahme durch die Tiere kompensiert wird. Schmidt *et al.* (2010)

stellten aber fest, dass ökologische, energiereduzierte Futterrationen durch die erhöhten Gehalte an NSP, die vor allem in der Gerüstsubstanz von Getreidekörnern bzw. in rohfaserreichen Futtermitteln enthalten sind, laxierend wirken und in der Folge zur Beeinträchtigung der Einstreuqualität und höheren Prävalenzen von Fußballenläsionen gegenüber einer energetisch besser ausgestatteten Futterration führten.

Generell besteht in der kalten Jahreszeit das Risiko, dass eine reduzierte Raumventilation zu wenig überschüssige Feuchte aus dem Stall und der Einstreu abführt (Linhoss *et al.* 2019, Meluzzi *et al.* 2008). In der ökologischen Haltung wird das Problem im Herbst und Winter verschärft, weil sowohl die Temperaturführung als auch das Trockenhalten der Einstreu durch die offenen Auslaufklappen erschwert ist, durch die direkt oder durch die Tiere zusätzliche Feuchtigkeit eingetragen werden kann. Außerdem beeinträchtigen die offenen Auslaufklappen eine angemessene Luftführung, über die Feuchtigkeit abgeführt werden soll. Auch begünstigen die meist wenig isolierten Ställe mit einem eher geringen Luftvolumen die Kondensation an kühleren Stellen im Stall. Insofern ist in der kalten Jahreszeit im Gegensatz zu Ergebnissen von Schmidt *et al.* (2010) nicht mit einem positiven Effekt eines Grünauslauf auf die Fußballengesundheit gegenüber geschlossenen Ställen zu rechnen.

Tatsächlich bewegten sich die im Projekt festgestellten durchschnittlichen Prävalenzen von schweren Fußballen-, aber auch von Fersenhöckerveränderungen in einem hohen Bereich, deutlich oberhalb der von KTBL und Universität Kassel (2020) vorgeschlagenen Alarmwerte für die betriebliche Eigenkontrolle, und zeigen entsprechenden Handlungsbedarf an.

Da die Einstreufeuchte als eine der Hauptursachen für Fußballenveränderungen bei Mastgeflügel gesehen wird (El-Wahab *et al.* 2012, Haslam *et al.* 2007, Shepherd & Fairchild 2010, Mayne *et al.* 2007, Meluzzi *et al.* 2008), sollten Maßnahmen darauf abzielen, den Wassergehalt in der Einstreu auf maximal 35–40 % zu begrenzen (El-Wahab *et al.* 2012). Dazu gehört die Wahl eines geeigneten Einstreusubstrats (Bilgili *et al.* 2009, Pepper & Dunlop 2021, Strašifák & Juhás 2023), ausreichend häufige Einstreupflege mit Nachstreuen (Ekstrand & Algers 1997), die Verminderung von Wassereintrag über die Tränken durch regelmäßige Kontrollen, ggf. Druckregulierung oder Wahl geeigneter Tränkeformen, eine Optimierung der Fütterung (El-Wahab *et al.* 2018, Schmidt *et al.* 2010) und ggf. eine Reduzierung der Besatzdichte (Petek *et al.* 2014). Entscheiden sind auch Maßnahmen im Bereich Lüftung (Linhoss *et al.* 2019, Meluzzi *et al.* 2008) und ggf. Heizung.

In Bezug auf Ammoniakemissionen konnte der erwartete mindernde Effekt des Pflanzenkohlezusatzes gleichermaßen, im Gegensatz zu anderen Untersuchungen mit Pflanzenkohle als Zusatz in der Einstreu oder in der Hühnerfütterung (1 % bzw. 2 und 4 % der Ration; Albiker & Zweifel 2019, Kalus *et al.* 2020), nicht festgestellt werden. Auch bei Albiker & Zweifel (2019) lagen die Mengen eingestreuter Kohle deutlich höher als im CAREFUL-Projekt (0.3 kg/m<sup>2</sup> Kohle alle drei Tage versus 0.25 kg/m<sup>2</sup> alle 14 Tage). Ein weiterer Unterschied lag in der Dauer der Mast (37 Tage versus 84 Tage). Je länger die Mastdauer, desto höher ist der Eintrag an Wasser und Kot (Miles *et al.* 2011), wodurch Ausgangsstoffe (Harnstoff, Proteine) für die Ammoniaksynthese geliefert und der Entstehungsprozess durch höhere Einstreufeuchte gefördert wird (Seedorf 2013).

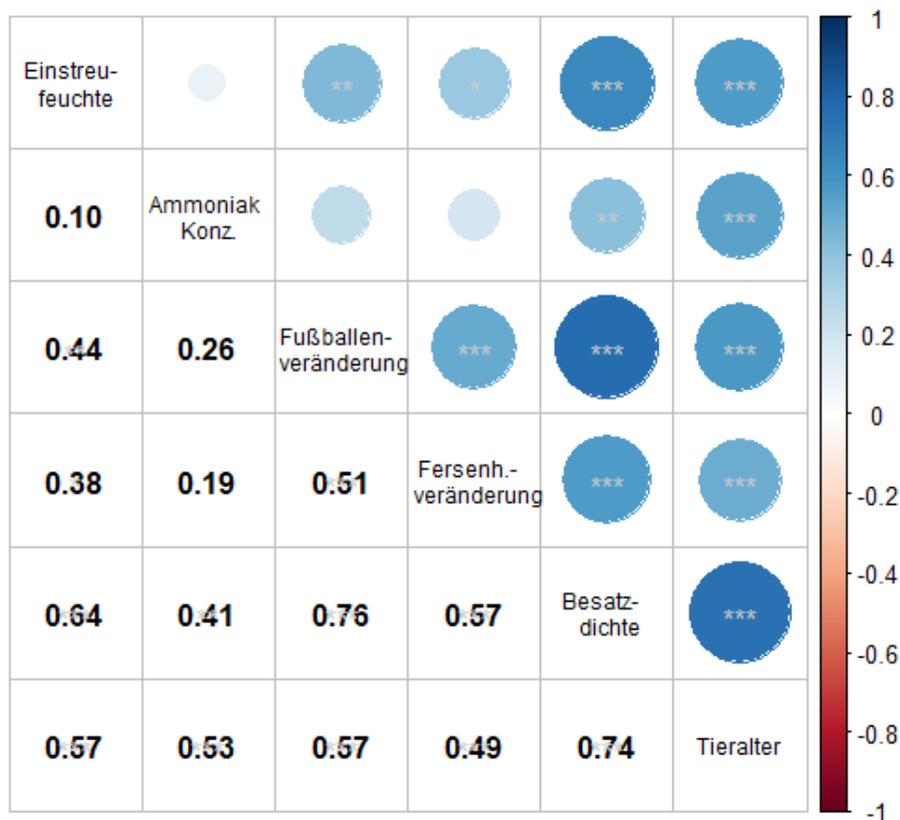
Neben Berichten über positive Effekte des Kohleinsatzes auf die Fußballengesundheit und den Ammoniakgehalt der Stallluft wurden in Untersuchungen zu Wirkungen von Kohle als Zusatz in der Geflügelfütterung auch Verbesserungen von Leistungsparametern und der

Darmgesundheit erzielt (Kana *et al.* 2011, Rattanawut 2014). Im vorliegenden Projekt, in dem die Kohle ausschließlich als Einstreuzusatz verwendet wurde, war auch zu beobachten, dass die Tiere Kohle aufpickten; dennoch bewirkte dies keine Unterschiede zwischen den Gruppen hinsichtlich des Umfangs von dünnflüssigerem Kot und verschmutztem Kloakenbereich.

Allerdings hatten mehr Tiere in den Kontrollgruppen verschmutztes oder verklebtes Gefieder, was beispielsweise die Thermoregulation von Hühnern beeinträchtigen kann (Mota-Rojas *et al.* 2021). Hier hat wahrscheinlich die relativ feine Kohle im Zusammenspiel mit den eher hohen Einstreufeuchten das Verschmutzungspotential vergrößert. Dies unterstreicht, dass bei sehr hohen Einstreufeuchten ein Kohlezusatz nicht das Mittel der Wahl für eine Gegenmaßnahme ist.

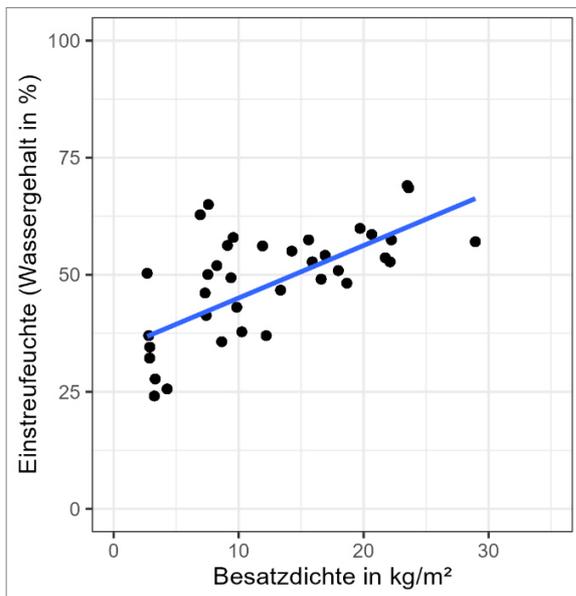
**Nebenergebnisse aus den Feldversuchen**

Aufgrund der nicht festzustellenden Unterschiede zwischen Kohle- und Kontrollgruppen wurden mögliche Zusammenhänge zwischen Fußballen- und Fersenhöckerveränderungen und den Umgebungsbedingungen im Gesamtdatensatz näher untersucht. Zunächst wurde in Form einer Korrelationsmatrix (Pearson-Korrelation) untersucht, wie ausgewählte Parameter miteinander in Zusammenhang stehen (Abbildung 52). Untersuchte Parameter waren die Einstreufeuchte (%), Ammoniakkonzentration (ppm), Prävalenzen starker Fußballen- und Fersenhöckerveränderungen (%), die Besatzdichte (kg Lebendgewicht/m<sup>2</sup>) und das Tieralter (Wochen).

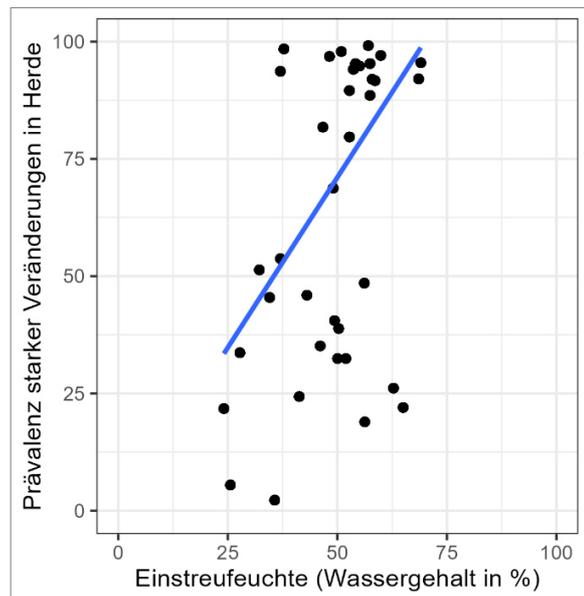


**Abbildung 52** Korrelationsmatrix. Dieser Plot zeigt, wie verschiedene Variablen (angegeben in der Diagonale) miteinander korrelieren. Die Größe und Farbe der Kreise im oberen Dreieck zeigen eine Bewertung des Ausmaßes der Korrelation entsprechend der Skala rechts plus Signifikanzlevel (\*: p<0.05, \*\*: p<0.01, \*\*\*: p<0.001); die Zahlen im unteren Dreieck geben den Korrelationskoeffizienten (r), an (n= 47).

Abgesehen von der bereits vorher beschriebenen Zunahme von Einstreufeuchte, Ammoniakgehalten sowie Fußballen und Fersenhöckeränderungen mit zunehmendem Alter im Laufe der Mast, zeigten sich die stärksten (moderaten bis hohen) Zusammenhänge zwischen der Besatzdichte und allen anderen Variablen (Einstreufeuchte: siehe auch Abbildung 53). Auch die Bedeutung der Einstreufeuchte für die Prävalenzen von Fußballenveränderungen wurde deutlich (siehe auch Abbildung 54). In Herden mit hohen Prävalenzen starker Fußballenveränderungen lag der Wassergehalt in der Einstreu meist über den empfohlenen Maximalwerten von 35-40 % (El-Wahab *et al.* 2012, Abbildung 54).



**Abbildung 53** Zusammenhang zwischen Besatzdichte und Einstreufeuchte (n=37).



**Abbildung 54** Zusammenhang zwischen Einstreufeuchte und Fußballenveränderungen (n=37).

### Diskussion der Zielerreichung

Interessant ist der nur sehr geringe gefundene Zusammenhang zwischen Ammoniakgehalt der Stallluft und Einstreufeuchte, der anderen Untersuchungsergebnissen (Miles *et al.* 2011, Youssef *et al.* 2011) widerspricht. Das könnte einerseits darauf hinweisen, dass ein Teil der Feuchte nicht den Ausscheidungen der Tiere entstammte, sondern tatsächlich in den Stall eingetragen worden war. Andererseits bewegten sich die Einstreufeuchten überwiegend in Bereichen, die ohnehin die Ammoniakentstehung befördern (Miles *et al.* 2011), so dass keine abgestufte Wirkung zu erkennen war. Gleichmaßen waren nur sehr geringe Zusammenhänge zwischen Ammoniakgehalt und Fußballengesundheit festzustellen, die in gleicher Weise erklärt werden könnten. Dennoch waren die durchschnittlichen Ammoniakkonzentration zum Ende der Mast mit über 20 ppm und Maximalwerten von bis zu 65 ppm nicht unproblematisch. Entsprechend der TierSchNutzV (2006) sollen dauerhaft 20 ppm nicht überschritten werden. Ein reduzierter Luftaustausch im Stall zum Wärmerückhalt wird eine große Rolle für diese hohen Werte gespielt haben. Hohe Ammoniakkonzentrationen über längere Zeit erhöhen das Risiko für verschiedenen Atemwegserkrankungen und Sekundärinfektionen wie der Newcastle-Krankheit, *Escherichia coli*-Infektionen und

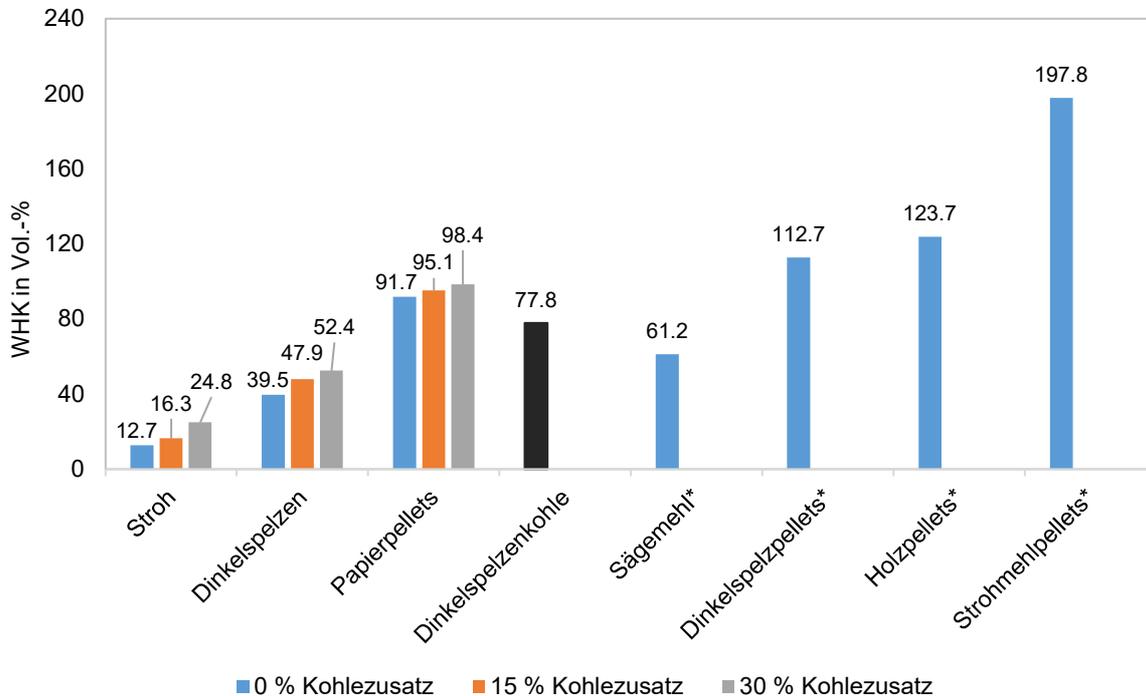
Kokzidiose (Anderson *et al.* 1964, Seedorf 2013). Ein Ziel sollte es also sein, die Ammoniakkonzentrationen niedrig zu halten.

**Laboruntersuchungen der Einstreueigenschaften**

Die verschiedenen von den OG-Partnern verwendeten Einstreumaterialien zeigten deutlich unterschiedliche Wasserhaltekapazitäten (WHK). Dabei wies Stroh im Vergleich zu den anderen Materialien die geringste WHK auf. Die Zugabe von Pflanzenkohle (15 oder 30 %) wirkte sich bei allen untersuchten Substraten positiv auf die WHK aus (Tabelle 22). Insbesondere beim Stroh konnte durch die höhere Zugabe von 30 % Pflanzenkohlezusatz die WHK des Ausgangssubstrates fast verdoppelt werden, während die Effekte bei den ohnehin saugfähigeren Substraten geringer ausfielen. Gleichzeitig wurde deutlich, dass insbesondere pelletierte Produkte bereits ohne Kohlezusatz deutlich höhere Wasserhaltekapazitäten aufweisen (Tabelle 22).

**Tabelle 22** Rohdichten in der Frischsubstanz und Trockensubstanz  
Mittlere Rohdichten (RD) in der Frischsubstanz (FS) und Trockensubstanz (TS) und Wasserhaltekapazitäten (WHK) der Einstreumaterialien mit unterschiedlichen Anteilen von Pflanzenkohlezusatz in Gramm je Liter.

Einstreu-substrat	RD <sub>FS</sub> [g/L]	RD <sub>TS</sub> [g/L]	WHK Reinsubstrat [g H <sub>2</sub> O/L]	WHK 15 % Kohle [g H <sub>2</sub> O/L]	WHK 30 % Kohle [g H <sub>2</sub> O/L]
Stroh	25	23	127.3	162.6	248.0
Dinkelspelzen	79	70	395.2	479.3	524.0
Papierpellets	450	410	916.5	950.9	984.4
Dinkelspelzen-Kohle	179	82	777.6	N/A	N/A



**Abbildung 55** Mittlere maximale Wasserkapazitäten (in Vol.-%)  
Auf der x-Achse sind verschiedenen Einstreusubstrate mit und ohne Kohlezusätze, daneben Vergleichswerte reiner Pflanzenkohle sowie weiterer Substrate zu sehen. (\*Quelle: Umbach, 2021).

### Diskussion der Zielerreichung

Es wurde zwar im Einklang mit Linhoss *et al.* (2019) deutlich, dass die Zugabe von Pflanzenkohle eine Möglichkeit darstellt, um die WHK der Einstreu zu erhöhen, aber auch andere Alternativen, wie pelletierte Einstreusubstrate, sind zu erwägen. Ein großer Einfluss verschiedener Einstreumaterialien auf die Einstreufeuchte wurde auch in weiteren Arbeiten festgestellt (Kuleile *et al.* 2019, Shepherd & Fairchild 2010, Sirri *et al.* 2007). Tatsächlich konnte aber in der Praxisanwendung ein Effekt des Kohlezusatzes auf die Einstreufeuchte nicht bestätigt werden. Die Gründe dafür können vielfältig sein. So bezieht sich die maximale Wasserhaltekapazität im Laborversuch immer auf die Trockensubstanz, um vergleichbare Werte ermitteln zu können. Unter Praxisbedingungen liegt die Einstreu jedoch als Frischsubstanz vor, was je nach Ort und Dauer der Lagerung stark variierende Ausgangsfeuchtegehalte bedeuten kann. Demnach stellt sich das Wasseraufnahmevermögen der Substrate im Stall i.d.R. niedriger dar als unter Laborbedingungen. Insbesondere bei der verwendeten Dinkelspelzenkohle fiel auf, dass diese auf hohe Luftfeuchtigkeit mit hohen Wassergehalten reagierte, was auch am Vergleich zwischen Trocken- und Frischmasserohdichte ablesbar ist (ca. 80 vs. 180 g/L, Tabelle 22). Die Lagerbedingungen wirkten sich bei den anderen untersuchten Substraten nicht in gleichem Ausmaß auf die Wassergehalte aus. Eine ideale Einstreu hat nicht nur eine hohe Wasserhaltekapazität, sondern auch die Fähigkeit, das Wasser wieder freizugeben, so dass es aus dem Stall abgeführt werden kann (Bilgili *et al.* 2009, Pepper & Dunlop 2021, Strašifák & Juhás 2023).

Auch die Porosität des Materials ist zu bedenken. Sie ist Voraussetzung für die Möglichkeit der Hühner, das Einstreusubstrat zur Ausübung arteigenen Verhaltens wie Erkunden, Scharren und Staubbaden zu nutzen. Einstreumaterial, welches durch Koteintrag verklumpt ist („caked litter“) verfügt nicht mehr über diese Eigenschaft, kann jedoch trotzdem eine hohe WHK aufweisen. So zeigten Dunlop *et al.* (2015), dass sich die WHK der Einstreu im Laufe des Mastdurchgangs vergrößern kann. Das Einstreumaterial wird im Laufe der Mast mit Kot, Futterresten und Federn angereichert. Die WHK steigt, während die Porosität der Einstreu kontinuierlich abnimmt. Diese auf den ersten Blick widersprüchlich erscheinenden Ergebnisse, die schon 1970 von Reed & McCartney (zitiert nach Dunlop *et al.* 2015) berichtet wurden, kommen dadurch zustande, dass die Formel zur Berechnung der WHK sehr sensibel auf eine Erhöhung der Trockenrohichte reagiert, die durch Anreicherung mit Kot im Laufe der Mast begründet ist. So hielt bei Dunlop *et al.* (2015) das gleiche Volumen an Einstreu am 31. Mast-Tag doppelt so viel Wasser wie die frische Einstreu an Tag 1. Die Einstreuqualität sollte somit nicht allein anhand der WHK beurteilt werden.

#### 3.1.5 Arbeitspaket 5 „Ökonomie - Wertschöpfungsketten und Businessplan“

Unter diesem Arbeitspaket sollten die Ergebnisse der Arbeitspakete 2 bis 4 ökonomisch ausgewertet werden, um einen Investment- und Businessplan zur Umsetzung der untersuchten Verwertungspfade und Wertschöpfungsketten zu erstellen. Aufgrund arbeitstechnischer Verzögerungen in AP2-AP4 (u.a. durch Personalwechsel, Corona-Pandemiebedingte Einschränkungen) lagen die notwendigen Daten für eine ökonomische Betrachtung erst im Juni 2023 vor. Da zudem die abschließende Datenlage erkennen ließ, dass der Zusatz von Pflanzenkohle in der Einstreu bei unverändertem Einstreumanagement der beteiligten Landwirte zu keiner wesentlichen Verbesserung in der Prävention von Fußballenläsionen führte, ebenso zu keiner messbaren Besserung des Stallklimas oder der Einstreufeuchte, wurden keine Arbeiten im Rahmen von AP5 vorgenommen.

### 3.2 Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen

Das übergeordnete Ziel des Innovationsvorhabens CAREFUL war die Herstellung von hochwertigen Pflanzen- und Aktivkohlen aus bislang nicht genutzten Restbiomassen im nordhessischen Raum und ihre Verwendung als Einstreuzusatz in der Geflügelhaltung zur Prävention von Fußballenerkrankungen. Obgleich die abschließende Datenlage erkennen ließ, dass der Zusatz von Pflanzenkohle aus Dinkelspelzen und Waldholzhackschnitzel in der Einstreu bei unverändertem Einstreumanagement zu keiner Verbesserung in der Prävention von Fußballläsionen führte, leistete das Vorhaben aufgrund der inhaltlich vielschichtigen Arbeitspakete wertvolle Beiträge zu mehreren der förderpolitischen Ziele des EIP-Agri. Im Arbeitspaket 2 wurde eine Quantifizierung und Charakterisierung des Restbiomassepotentials im Umland von Kassel vorgenommen. Als interessante Restbiomassen für die Herstellung von Pflanzenkohlen wurden insbesondere grasartige und krautige Biomassen aus der Landschaftspflege betrachtet, welche wiederum nach einem geeigneten Aufbereitungsschritt zu vielversprechenden Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen im Rahmen von Arbeitspaket 3 verarbeitet wurden. Durch die Verwertung von lokal verfügbaren Restbiomassen zum Aufbau einer nachhaltigen und innovativen regionalen Wertschöpfungskette, welche u.a. eine Herstellung von Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen vorsieht, könnten regionale Lösungen zur Stärkung des ländlichen Raums entwickelt werden. Ein in den ländlichen Raum integriertes Abfallmanagementsystem für die Reststoffverwertung von landwirtschaftlichen Nebenprodukten (biogene Abfälle wie Mist, Spelzen, Grünschnitt) könnte das Spektrum an Erwerbsmöglichkeiten im ländlichen Raum erweitern und zu einer Diversifizierung in der Landwirtschaft beitragen. Dies würde Kommunen und anderen Gebietskörperschaften eine optimierte und nachhaltige Nutzung ihrer biogenen Ressourcen ermöglichen. Gleichzeitig werden Anreize für eine biodiversitätsfördernde Bewirtschaftung von extensivem Grünland geschaffen. Unter Betrachtung des Potenzials von Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen auch im Bereich der Pflanzenproduktion als ein Bodenhilfsstoff zu fungieren, können die im Rahmen von CAREFUL generierten Daten ebenso einen kleinen Beitrag zum EIP- Agri Ziel „Entwicklung effektiver, umweltgerechter und/oder ökologischer Anbau- und Nutzungsverfahren“ leisten.

Entsprechend dem förderpolitischen Ziel, die Tiergerechtigkeit von Haltungsverfahren zu verbessern, fokussierte das vorliegende Projekt darauf, das verbreitete und bekannte Problem einer unbefriedigenden Fußballengesundheit bei ökologisch gehaltenen Masthühnern, insbesondere während der kalten Jahreszeit, durch den Einsatz von Pflanzenkohle in der Einstreu zu mindern. Im Gegensatz zu den vielversprechenden eigenen Laborergebnissen, wonach die Wasserhaltekapazität der Einstreu durch Kohlezusatz erhöht werden kann, und Berichten aus der Literatur, konnte im Praxiseinsatz nicht der gewünschte Effekt einer reduzierten Einstreufeuchte und Ammoniakkonzentration in der Stallluft und folglich einer verbesserten Fußballengesundheit erzielt werden. Allerdings wurde erneut die Relevanz des Themas unterstrichen und die Zusammenhänge zwischen Einstreufeuchte und Fußballengesundheit bestätigt.

Der im Projekt generierte Datensatz zu Tierwohlindikatoren in der ökologischen Masthühnerhaltung ist im Vergleich zu bisherigen publizierten Untersuchungen sehr umfangreich und basiert auf beachtlichen Stichprobengrößen. Er bietet somit ideale Voraussetzungen für weitergehende Analysen, wie sie derzeit im Rahmen einer Masterarbeit im Hinblick auf Fersenhöckeränderungen durchgeführt werden, einem weiteren

Tierwohlproblem, zu dem aktuell nur wenige wissenschaftliche Erkenntnisse vorliegen. Diese Ergebnisse einschließlich des nicht realisierten Effektes des Kohlezusatzes sollen in einer wissenschaftlichen Zeitschrift (z.B. Poultry Science) veröffentlicht werden. Außerdem wurde ein Beitrag zur nächsten Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau 2024 an der Justus-Liebig-Universität Gießen eingereicht. Damit soll das Wissen über Zusammenhänge zwischen Haltung, Management und Tierwohl in der ökologischen Masthühnerhaltung erweitert werden, um darauf aufbauend praxiswirksame Empfehlungen zur Verbesserung der Tiergerechtigkeit entwickeln zu können. Im Rahmen des Projektes und während der Abschlussveranstaltung wurden den beteiligten Tierhalter:innen bereits konkrete Empfehlungen insbesondere zur Wahl des Einstreumaterials und zum Heizungs- und Lüftungsmanagement in den Ställen gegeben. Im lebendigen Austausch mit ihnen wurden aber auch die vielfältigen Herausforderungen in der ökologischen Masthühnerhaltung deutlich. Beim Abschlusstreffen bekundeten die Praktiker:innen erneut ihr Interesse, auch über die Projektlaufzeit hinaus an den Themen weiterzuarbeiten.

### 3.3 Erreichung der Ziele des Vorhabens

#### 3.3.1 Arbeitspaket 1 „Laufende Zusammenarbeit der OG“

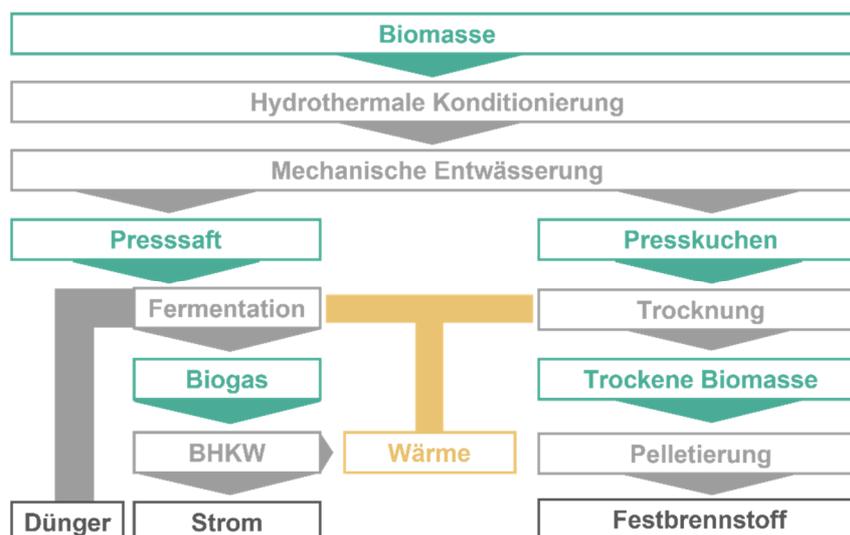
Ziele der Koordinationsarbeiten umfassten u.a. ein Auftaktworkshop zur Vorstellung des EIP-Vorhabens sowie drei öffentliche Workshops, welche jedoch aufgrund der im Projektzeitraum vorherrschenden COVID-19 Pandemie nicht in der geplanten Ausführlichkeit durchgeführt werden konnten. Ebenso führte ein häufiger Personalwechsel auf der Projektmitarbeiterstelle zu starken Abweichungen in der zeitlichen Planung. Somit lagen die notwendigen Daten für eine abschließende Evaluierung der Effekte von Pflanzenkohle aus Dinkelspelzen und Waldholzhackschnitzel auf die Fußballengesundheit erst zum Ende des Projektzeitraums vor. Dies machte eine Kommunikation von Projektergebnissen im Rahmen von den geplanten öffentlichen Workshops schwierig. Somit wurden die geplanten öffentlichen Workshops umgestaltet und Ergebnisse aus AP2 und AP3 im Rahmen der o.g. REVEAL-Konferenzen in Göttingen sowie Biochar-Konferenzen in Enschede (Niederlande) und Nantes (Frankreich) präsentiert. Hierzu wurde mittels unseres „Artefakts“ auf das CAREFUL Projekt verwiesen, inklusive Informationen zu den Projektzielen und -partnern sowie fördernde Institutionen. Zeitgleich fand ein Workshop zur Herstellung von Pflanzenkohle mit Hilfe eines KonTikis statt um unsere Projektergebnisse „greifbar“ zu vermitteln.

#### 3.3.2 Arbeitspaket 2 „Quantifizierung des Restbiomassepotenzials“

Der Fokus der Arbeiten in AP2 lag auf die Quantifizierung des Restbiomassepotenzials für die nordhessische Region und die Ergebnisse wurden im Rahmen einer Kurzstudie zusammenfassend dargestellt. Diese Studie ließ erkennen, dass das (Rest)Biomassepotenzial für diese Region enorm ist. Es bedarf jedoch weitere intensive Forschung, um die praktikabelste und effizienteste Kombination oder das Portfolio von Biomassenutzungsoptionen zu ermitteln, die auf die spezifischen Bedingungen einer bestimmten Region oder eines bestimmten Gebiets zugeschnitten sind. Der notwendige Forschungsbedarf wird umso deutlicher, wenn man das Restbiomassepotenzial von ganz Deutschland betrachtet. Das jährliche technisch bisher nicht genutzte Biomassepotenzial von Rest- und Abfallstoffen für Deutschland kann mit 14-48 Mio. Mg<sub>TS</sub> abgeschätzt werden (Brosowski *et al.* 2015, 2019). Während das Waldholzpotenzial unter Berücksichtigung

ökologischer Restriktionen bereits überwiegend stofflich und energetisch genutzt wird bzw. in Deutschland bereits übernutzt wird (Beck-O'Brian *et al.* 2022), werden jährlich rund 3.9 Mio. Mg<sub>TS</sub> an grasartigen und krautigen Biomassen, beispielsweise aus extensiven landwirtschaftlichen Systemen und Naturschutzflächen, ungenutzt am Standort belassen (Brosowski *et al.* 2015, 2019, Hensgen *et al.* 2016). Zunehmend werden Grünflächen aufgegeben bzw. nicht mehr bewirtschaftet (Poschlod *et al.* 2005), was zu einem erheblichen Verlust an biologischer Vielfalt führt, und die Ausbreitung invasiver Arten fördert (Stenchly *et al.* 2021).

Derzeit ist eine energetische Nutzung der grasartigen und krautigen Biomasse stark eingeschränkt, da einerseits hohe Konzentrationen von Lignin, Zellulose und Hemizellulose zu geringen Biogaserträgen führen (Richter *et al.* 2009, Hensgen *et al.* 2014) und andererseits hohe Gehalte an Stickstoff zu hohen NO<sub>x</sub>-Emissionen in Verbrennungsprozessen führen, sowie von Chlor und Schwefel, die die Korrosion der Brennkammer fördern (Oberberger *et al.* 2006, Hensgen *et al.* 2012). Ein aussichtsvolles Verfahren zur vollumfänglich energetischen Nutzung grasartiger und krautiger Restbiomassen stellt das Verfahren zur Integrierten Erzeugung von Festbrennstoff und Biogas aus Biomassen (IFBB-Verfahren) dar (Wachendorf *et al.* 2009; Abbildung 58). Hierbei werden mittels hydrothermaler Konditionierung und mechanischer Entwässerung Mineralstoffe (u.a. Asche, Cl und S) und leicht abbaubare organische Verbindungen in eine energiereiche Pressflüssigkeit überführt und ein mineralarmer, faserreicher Presskuchen erzeugt (Hensgen *et al.* 2012, 2014). Während aus der Flüssigphase Biogas bzw. Strom erzeugt werden kann, eignet sich der Presskuchen nach einer Trocknung mittels überschüssiger Wärme aus der Biogasverstromung als Festbrennstoff (Richter *et al.* 2009).



**Abbildung 56** Schematische Darstellung des Verfahrens zur Integrierten Erzeugung von Festbrennstoff und Biogas aus Biomasse (IFBB-Verfahren).

In Studien konnte gezeigt werden, dass dieses Verfahren ökonomisch tragfähig sein kann (Blumenstein *et al.* 2012) und einen ökologischen Mehrwert gegenüber dem Status Quo bietet (Bühle *et al.* 2012). Eine praktische Umsetzung ist jedoch aufgrund der relativ langen Verfahrenskette und bisher geringen Erlösen für Energieträger (Biogas, Strom und Festbrennstoff) schwierig.

### 3.3.3 Arbeitspaket 3 „Herstellung und Charakterisierung von Pflanzen- und Aktivkohlen“

Insbesondere die Ergebnisse aus den Untersuchungen zu den chemisch-physikalischen Eigenschaften von Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen, welche aus grasartigem Landschaftspflegematerial produziert wurden, sind im Sinne der Gestaltung einer nachhaltigen Bioökonomie, welche u.a. die Schließung von regionalen Kreisläufen verfolgt, von großem Interesse [→ 3.3.2]. Ebenso gab uns die umfassende Untersuchung zum Einfluss von Prozesstemperatur, Verweilzeit und Oxidationsgrad, mit *Miscanthus* als ein Biomassensurrogat aus der Landwirtschaft, entscheidende Hinweise zur Optimierung von Pyrolyseprozessparametern, welche bei der Umwandlung von Restbiomassen in Pflanzen(aktiv)kohle beitragen.

Wichtig anzumerken, bei dem Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierhaltung, ist die strenge Einhaltung von Verfahrensprozessen bei der Herstellung von Pflanzenkohle sowie die Grenzwerte für Schwermetalle, karzinogene PAKs, polychlorierte-Dioxine, -Furane und PCB sowie Fluor. Im Rahmen von CAREFUL wurde die in den Praxisversuchen eingebrachte Dinkelspelzenkohle nach dem EBC-Futter-Zertifikat analysiert und als unbedenklich für den Einsatz in der Geflügelhaltung eingestuft. Diese weitergehenden Analysen konnten jedoch nicht für die, ansonsten vielversprechenden, Pflanzen(aktiv)kohlen aus grasartigen und krautigen Biomassen aus Landschaftspflegemaßnahmen (Feuchtwiesen, Streuobstwiese) durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang konnte eine am Fachgebiet für Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe durchgeführte Untersuchung zum Thema von Eigenschaften erzeugter Pflanzenkohlen mittels unterschiedlicher Pyrolysetechnologien zeigen, dass selbst Weidenschnitt (*Salix* sp.) aus einem ökologischen Agroforstbetrieb sehr hohe Werte an Chrom und Cadmium aufwies. Insbesondere die Pflanzenkohle welche in einer Erdgrube bzw. mittels KonTiki hergestellt wurden, überstiegen die durch das EBC vorgegebenen Grenzwerte um ein Vielfaches. Diese beiden Pyrolysetechnologien werden oft im Rahmen von DIY-Videos Kleingärtnern und Selbstversorgern als preiswerte Methode der Pflanzenkohleproduktion präsentiert, sowie Applikationsmöglichkeiten im Gartenbau und Tierhaltung vorgestellt. Demnach ist vor allem im Bezug auf den Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierhaltung darauf zu verweisen, dass die einzubringende Kohle umfassend laboranalytisch untersucht werden muss, bzw. nur EBC-zertifizierte Pflanzenkohle verwendet werden sollte.

### 3.3.4 Arbeitspaket 4 „Praxisversuche mit Kohle als Einstreuzusatz“

Plangemäß wurde Pflanzenkohle in zwei Versuchsphasen auf ökologisch wirtschaftenden Betrieben mit Masthühnerhaltung eingesetzt. Der Einsatz der Kohle sowie die Erhebungen des Tierwohls wurden über den Versuchszeitraum hinweg optimiert und in der abschließenden Feldversuchsphase wurden insgesamt Daten von neun Durchgängen mit insgesamt rund 14,000 Tieren ausgewertet. Dabei wurden nicht nur zu zwei Zeitpunkten 50 Tiere, wie ursprünglich geplant, sondern über drei Zeitpunkte insgesamt etwa 8,500 Tiere bonitiert und damit deutlich genauere Prävalenzschätzungen erreicht. Auf eine Erfassung der Fußballengesundheit am Schlachtkörper wurde verzichtet, da die Fußpaare am Schlachthof nicht mehr den Einzeltieren zugeordnet werden konnten, und dieser Zeitpunkt durch die Erhebung am lebenden Tier abgedeckt wurde.

Neben der Erhebung des Tierwohls wurden ebenfalls in Übereinstimmung mit dem Projektplan Parameter des Stallklimas (Luftfeuchte und -temperatur, Staubentwicklung und

Ammoniakgehalt der Luft) sowie der Einstreuqualität erfasst. Die Staubmessungen wurden in der letzten Projektphase nur einmal wiederholt, und nicht, wie im AP4 beschrieben, kontinuierlich erfasst, da die umfassenden Aufzeichnungen und Ergebnisse der ersten Projektphase gezeigt hatten, dass keine negativen Effekte durch den Kohlezusatz auf die Staubentwicklung zu erwarten waren und die Messungen unter Feldbedingungen nicht in ausreichender Qualität umsetzbar waren. Aufgrund begrenzter personeller Kapazitäten wurden anstelle von wiederholten Messungen von Stickstoffgehalt und pH-Wert in der Einstreu Einstreuproben eingelagert, sodass diese ggf. im Rahmen einer Abschlussarbeit nachgeholt werden können. Ebenso stehen die Rückstellproben noch für eine eventuelle Charakterisierung hinsichtlich der chemisch-physikalischen Eigenschaften, zur Bestimmung pflanzenverfügbarer Nährstoffe sowie der Eignung der Einstreu als Düngemittel zur Verfügung. Da die Projektergebnisse keine Empfehlung des Einsatzes von Pflanzenkohle als Einstreuzusatz nahelegen, erscheint aber die Untersuchung weiterer möglicher Folgen des Einsatzes als unnötig.

Im Feldversuch konnte die Praxistauglichkeit der Kohle als Einstreuzusatz in der kritischen Jahreszeit von Herbst und Winter umfänglich getestet werden, wobei ein großer Teil der Diversität und Varianz in der Praxis durch unterschiedliche Stallbauten und -techniken, Einstreumaterialien, Fütterungs- und Haltungssysteme widergespiegelt werden konnte. Neben dem fehlenden Effekt der Kohle auf die Zielparameter Einstreufeuchte und Fußballengesundheit sowie Ammoniakgehalt der Stallluft kristallisierten sich dabei auch Praktikabilitätsprobleme in ihrer Anwendung heraus. Dazu gehörten Verschmutzungen der Lüftungstechnik bei Einsatz zu hoher Ausbringungsmengen und vor allem die hohe Reaktivität der Kohle mit Wasser in der Luft während ihrer Lagerung. Diese minderte das Potenzial, Feuchte aus der Einstreu zu ziehen. Dadurch ist eine Lagerung der Kohle in größeren Mengen in der Praxis nicht praktikabel. Außerdem nimmt die Kohle möglicherweise nicht nur Feuchte in der Einstreu, sondern auch aus der Luft auf. Dies ist im Herbst und Winter, den Jahreszeiten mit höherer Luftfeuchte und größeren Schwierigkeiten, die Einstreu trocken und die Fußballen der Hühner gesund zu halten, problematisch. In der ökologischen Masthühnerhaltung ist die Situation zusätzlich durch die offenen Auslaufklappen erschwert, durch die direkt oder durch die Tiere zusätzliche Feuchtigkeit eingetragen werden kann. Als weiteres Problem hat sich insbesondere in der ersten Versuchsphase gezeigt, dass die Kohle von den Tieren sehr schnell in tiefere Schichten der Einstreu gescharrt wurde. Dem wurde zwar durch das regelmäßige Nachstreuen in der zweiten Versuchsphase entgegengewirkt, es war aber dennoch zu beobachten, dass die Kohle schon ca. 30 Minuten nach dem Einstreuen nicht mehr sichtbar war. Daher ist es möglich, dass die Kohle ihre Wirkung in tieferen Schichten entfaltet hat, aber keine Auswirkung auf den unmittelbaren Bereich hatte, wo die Fußballen im Kontakt mit der Einstreu standen.

### 3.3.5 Arbeitspaket 5 „Ökonomie - Wertschöpfungsketten und Businessplan“

Ziel dieses Arbeitspakets war, die Ergebnisse der Arbeitspakete 2 bis 4 ökonomisch auszuwerten, um einen Investment- und Businessplan zur Umsetzung der untersuchten Verwertungspfade und Wertschöpfungsketten zu erstellen. Aufgrund arbeitstechnischer Verzögerungen in AP2-AP4 (u.a. durch Personalwechsel, Corona-Pandemiebedingte Einschränkungen) lagen die notwendigen Daten für eine ökonomische Betrachtung erst im Juni 2023 vor. Da zudem die abschließende Datenlage erkennen ließ, dass der Zusatz von Pflanzenkohle in der Einstreu bei unverändertem Einstreumanagement der beteiligten Landwirte zu keiner wesentlichen Verbesserung in der Prävention von Fußballenläsionen

## OG CAREFUL

führte, ebenso zu keiner messbaren Besserung des Stallklimas oder der Einstreufeuchte, wurden keine Arbeiten im Rahmen von AP5 vorgenommen. Somit wurden die für das AP5 formulierten Ziele nicht erreicht.

## 4 Ergebnisverwertung, Kommunikation und Verstetigung

### 4.1 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

#### 4.1.1 Arbeitspaket 1 „Laufende Zusammenarbeit der OG“

Arbeiten in AP1 umfassten u.a. das Forschungsdatenmanagement. Explizit wurden die im Rahmen von CAREFUL erhobenen Rohdaten sowie die statistisch ausgewerteten Ergebnisse auf einem projektinternen cloud-basierten Dokumentenmanagementsystem zusammenfassend hinterlegt. Diese Ergebnisse fließen bereits jetzt in andere laufende Forschungsprojekte der beteiligten Fachgebiete mit ein, bzw. werden die Daten nach Veröffentlichung in Form von wissenschaftlichen Artikeln in internationalen Fachzeitschriften für die Öffentlichkeit in vollem Umfang via eines Daten Repository (tbd) frei zur Verfügung gestellt.

#### 4.1.2 Arbeitspaket 2 „Quantifizierung des Restbiomassepotenzials“

Die zusammenfassende Kurzstudie zur Quantifizierung des Restbiomassenpotenzials des nordhessischen Raums als Produkt betrachtend, kann dieses als beratendes Dokument von einem großen Akteurskreis, u.a. aus dem Klimaschutz, der Ressourceneffizienz und Bioökonomie sowie der Kreislaufwirtschaft, genutzt werden, um eine Kaskadennutzung im Rahmen eines Gesamtkonzepts der Biomassenutzung zu planen und in der Praxis zu etablieren. Ebenso konnte der Projektzeitraum von CAREFUL genutzt werden, um das durch das Fachgebiet für Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe entwickelte IFBB-Verfahrenskonzept im Labormaßstab weiterzuentwickeln. Die Daten zu den physikalisch-chemischen Eigenschaften der untersuchten Restbiomassen kann ebenso als ein Produkt betrachtet werden, welches wichtige Hinweise auf mögliche kaskadierende Verwertungspfade gibt.

#### 4.1.3 Arbeitspaket 3 „Herstellung und Charakterisierung von Pflanzen- und Aktivkohlen“

Wie unter 2.3 beschrieben, wurden durch unseren Techniker Matthias Karl von Ahn an einer handelsüblichen Laborpyrolyseanlage, der PYREKA der PYREG GmbH, umfangreiche Modifikationen vorgenommen um den Pyrolyseprozess besser steuern und überwachen zu können. Diese erfolgreich getesteten Modifikationen stellen eine Erweiterung der derzeitigen deutschen Pyrolysetechnologie dar, welche im Labormaßstab betrieben werden kann. Ebenso können diese technischen Modifikationen als Grundlage für die Entwicklung einer großtechnischen Anlage dienen, welche zu Forschungszwecken verwendet werden soll.

Darüber hinaus stellen auch die produzierten Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen ein Produkt dar. Die Aufgabe besteht nun darin für diese Produkte die optimalen Anwendungsfelder in der land- und abfallwirtschaftlichen Praxis (Biogasanlagen, Kompostierungsanlagen, Pflanzenbau, etc.) zu bestimmen [Siehe Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit].

#### 4.1.4 Arbeitspaket 4 „Praxisversuche mit Kohle als Einstreuzusatz“

Basierend auf der umfassenden Untersuchung von Pflanzenkohle als Einstreuzusatz kann der Einsatz dieser beiden Kohleprodukte (aus Dinkelspelzen und Waldholzhackschnitzel) zur Verbesserung der Fußballengesundheit und damit des Tierwohls in der Masthühnerhaltung nicht empfohlen werden.

Die Untersuchungsergebnisse bestätigten die besonderen Herausforderungen in der ökologischen Masthühnerhaltung in der kalten Jahreszeit, die Einstreufeuchte und Ammoniakgehalte in der Stallluft sowie den Umfang von Fußballenveränderungen niedrig zu halten. Aus den Daten können aber auch Empfehlungen für die Praxis abgeleitet werden:

Eine Reduzierung der Einstreufeuchte auf maximal 35-40 % Wassergehalt entsprechend Literaturempfehlungen (El-Wahab *et al.* 2012, McGahan *et al.* 2014) führt zu niedrigeren Ammoniakemissionen und niedrigeren Prävalenzen von Fußballenentzündungen. Grundsätzlich kann dies durch angemessene Lüftung und ggf. Heizung, die Wahl geeigneter Einstreumaterialien, häufiges Nachstreuen und ggf. Entfernen nasser Einstreu, regelmäßige Tränkenkontrolle, Futteroptimierung und ggf. ein Senken der Besatzdichte erreicht werden. Auch eine Verbesserung der Darmgesundheit kann zu einer Verminderung von dünnflüssigem Kot und damit zu trockener Einstreu führen.

Dabei zeigte der festgestellte Rückgang von Fußballenläsionen innerhalb von 14 Tagen im kontrollierten Versuch, dass auch schwere Läsionen innerhalb dieser Zeitspanne abheilen können. Dies entspricht auch Ergebnissen bei Puten (Mayne *et al.* 2007), dass Fußballenentzündungen durch Feuchte in der Einstreu innerhalb von zwei bis vier Tagen induziert und durch Reduzierung der Feuchte innerhalb von 15 Tagen zur Abheilung gebracht werden konnten. Auch eine Untersuchung mit Masthühnern bestätigt, dass eine spätere Verbesserung des Einstreumanagements zu einer Verbesserung der Fußballengesundheit führen kann (Cengiz *et al.* 2011). Somit können zu jeder Zeit in der Mastphase durch Verbesserungen des Einstreumanagements im weitesten Sinne Verbesserungen des Tierwohls erzielt werden.

Derzeit wird der erhobene Datensatz für weitergehende Analysen zur bisher wenig untersuchten Tierwohlproblematik der Fersenhöckerveränderungen verwendet. Sowohl hierzu als auch zu den (fehlenden) Effekten des Kohlezusatzes in die Einstreu sind wissenschaftliche Veröffentlichungen geplant, die zur Erweiterung der Wissensgrundlage für Empfehlungen zur Verbesserung des Tierwohls von (ökologischen) Masthühnern beitragen werden.

### 4.1.5 Arbeitspaket 5 „Ökonomie - Wertschöpfungsketten und Businessplan“

Unter diesem Arbeitspaket sollte ein Investment- und Businessplan zur Umsetzung des untersuchten Verwertungspfad als ein Produkt generiert werden. Aufgrund arbeitstechnischer Verzögerungen in AP2-AP4 (u.a. durch Personalwechsel, Corona-Pandemiebedingte Einschränkungen) lagen die notwendigen Daten für eine ökonomische Betrachtung erst im Juni 2023 vor. Da zudem die abschließende Datenlage erkennen ließ, dass der Zusatz von Pflanzenkohle in der Einstreu bei unverändertem Einstreumanagement der beteiligten Landwirte zu keiner wesentlichen Verbesserung in der Prävention von Fußballenläsionen führte, ebenso zu keiner messbaren Besserung des Stallklimas oder der Einstreufeuchte, wurden keine Arbeiten im Rahmen von AP5 vorgenommen.

## 4.2 (Geplante) Verwertung/Verbreitung und Nutzung der Ergebnisse

### 4.2.1 Arbeitspaket 1 „Laufende Zusammenarbeit der OG“

Um unsere Projektidee sowie unsere erzielten Ergebnisse öffentlichkeitswirksam zu kommunizieren, hat sich das CAREFUL-Konsortium erfolgreich um eine Teilnahme an der internationalen REVEAL-Konferenz in Göttingen 2022 und 2023 beworben [Siehe 3.1.1]. Ebenso nahm das CAREFUL-Team an zwei internationalen Veranstaltungen in Enschede (Niederlande) sowie Nantes (Frankreich) teil. Im Rahmen dieser Veranstaltungen wurde unser „Artefakt“ ausgestellt, welches auf weitere Projektinformationen verwies, ebenso wurden Workshops zur Verarbeitung von grasartigen und krautigen Biomassen und deren Verwertung zu Pflanzenkohle durchgeführt (Abbildungen 56, 57).

Eine Projektwebseite wurde erstellt sowie ist das CAREFUL-Projekt eine Komponente in einer öffentlich zugänglichen multimedialen Lern- und Lehr-App über Möglichkeiten der Applikationen von Pflanzenkohlen in der Landwirtschaft [Siehe 3.1.1].



**Abbildung 57** Das CAREFUL-Projekt-Artefakt auf der 14. Konferenz des REVEAL-Netzwerkes in Göttingen, September 2022. Wegen starken Regenschauern bekam unser Artefakt einen Regenschirm (Bildautor: Stenchly).



**Abbildung 58** Konferenz des REVEAL-Netzwerkes oben: Das CAREFUL-Projekt-Artefakt auf der 15. Konferenz des REVEAL-Netzwerkes in Göttingen, Juni 2023. Unten: Ausstellung von landwirtschaftlichen Restbiomassen und deren Karbonisate (Bildautor: Stenchly).

Darüber hinaus haben Mitglieder der OG CAREFUL an mehreren eip-agri Vernetzungsworkshops teilgenommen, namentlich:

- EIP-Vernetzungsworkshop „Innovation und Zusammenarbeit in Hessen und Rheinland-Pfalz – Von der eigenen Position zu gemeinsamen Interessen“, 21. November 2019 in Limburg
- 4. Bundesweiter Workshop für OGs und IDLs: „EIP-Agri: Ergebnistransfer – aber wie?“, 12. August 2020, online
- „Textwerkstatt für OGs“, November 2020, online
- EIP-Vernetzungsworkshop „Innovation und Zusammenarbeit – und wie geht es danach weiter?“ Online-Workshop am 03. Dezember 2020, online

Das CAREFUL-Projekt-Team nahm am Vernetzungstreffen EIP-Agri – Netzwerk Fokus Tierwohl im Oktober 2022 teil und präsentierte die Projektidee und erste Ergebnisse.

### 4.2.2 Arbeitspaket 2 „Quantifizierung des Restbiomassepotenzials“

Im universitären Kontext finden die im Rahmen von CAREFUL generierten Daten ihre Verstetigung durch das Einbringen der Erkenntnisse in die Lehre. Ferner stellt der erhobene Datensatz eine Erweiterung des bereits bestehenden Datensatzes zu chemisch-physikalischen Eigenschaften von Restbiomassen sowie optimale Aufbereitungsverfahren für die Pyrolyse dar. Damit werden diese Daten zu einem späteren Zeitpunkt in themenspezifische Publikationen einfließen.

### 4.2.3 Arbeitspaket 3 „Herstellung und Charakterisierung von Pflanzen- und Aktivkohlen“

Auch die im Rahmen von AP3 generierten Daten finden ihre Verstetigung in der universitären Lehre durch Vermittlung von Pyrolysetechnologien, Prozessparametern sowie Pflanzen- und Pflanzenaktivkohleigenschaften. Darüber hinaus werden die in CAREFUL gewonnenen Erkenntnisse zu chemisch-physikalischen Eigenschaften von Pflanzen- und Aktivkohlen und den daran gebundenen Pyrolysetemperaturen, Verweilzeit und Oxidationsgrad als Kompetenz in das neu zu gründende CASCADE Kompetenzzentrum einfließen [Siehe 3.1.1]. Ferner werden die in CAREFUL produzierten Pflanzen- und Pflanzenaktivkohlen in weiteren Untersuchungen des Fachgebiets zum Thema anaerobe Vergärung und Abwasserreinigung genutzt. Auch werden diese Daten ein wesentlicher Bestandteil von themenspezifischen Publikationen zu einem späteren Zeitpunkt sein.

### 4.2.4 Arbeitspaket 4 „Praxisversuche mit Kohle als Einstreuzusatz“

Zu Beginn des Projekts fand ein Austausch mit Fachkollegen von der Georg-August-Universität Göttingen sowie von der Hochschule Osnabrück statt. Die OG Koordinatorin Frau Dr. Kathrin Stenchly ist Mitbegründerin der universitätsinternen „Geflügelgruppe Witzenhausen“, welche sich aus mehreren Fachgebieten des Fachbereiches Ökologische Agrarwissenschaften der Universität Kassel zusammensetzt, die Forschungsprojekte im Bereich der Geflügelhaltung durchführen. Hierbei fanden besonders im Projektanlauf regelmäßige Vernetzungsaktivitäten und Erfahrungsaustausch im Rahmen von Vortragsreihen und Workshops statt, wie u.a. eine Vortragsreihe über Forschungsergebnisse zum Thema Legehennenhaltung welche im September 2020 auf dem Versuchshof der Universität Kassel in Frankenhausen stattfand.

Die Ergebnisse der finalen Praxisversuchsphase werden in Form dieses Abschlussberichts veröffentlicht, und wurden bereits in einem Abschlusstreffen innerhalb der OG kommuniziert. Des Weiteren sind Veröffentlichungen der Nebenergebnisse und weitere Auswertungen des

Datensatzes in Bezug auf Fersenhöckerveränderung und Interaktionen zwischen verschiedenen Tierwohlindikatoren in Form einer Masterarbeit und eines wissenschaftlichen Artikels geplant.

Zusätzlich arbeiten Teile der OG schon jetzt wieder in weiteren Projekten zusammen (z.B. Neue Strategien zur Reduktion von Erkrankungen auf ökologischen Masthühnerbetrieben unter besonderer Berücksichtigung des Darmmikrobioms – ProBioHuhn, gefördert durch BMEL). Eine zukünftige weitere Zusammenarbeit mit den Landwirt:innen der OG in Forschungsvorhaben des Fachgebietes Nutztierethologie und Tierhaltung ist wahrscheinlich.

### 4.2.5 Arbeitspaket 5 „Ökonomie - Wertschöpfungsketten und Businessplan“

Unter diesem Arbeitspaket sollte ein Investment- und Businessplan zur Umsetzung des untersuchten Verwertungspfadens als ein Produkt generiert werden. Aufgrund arbeitstechnischer Verzögerungen in AP2-AP4 (u.a. durch Personalwechsel, Corona-Pandemiebedingte Einschränkungen) lagen die notwendigen Daten für eine ökonomische Betrachtung erst im Juni 2023 vor. Da zudem die abschließende Datenlage erkennen ließ, dass der Zusatz von Pflanzenkohle in der Einstreu bei unverändertem Einstreumanagement der beteiligten Landwirte zu keiner wesentlichen Verbesserung in der Prävention von Fußballenläsionen führte, ebenso zu keiner messbaren Besserung des Stallklimas oder der Einstreufeuchte, wurden keine Arbeiten im Rahmen von AP5 vorgenommen.

### 4.3 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

#### 4.3.1 Arbeitspaket 1 „Laufende Zusammenarbeit der OG“

Arbeiten in AP1 umfassten u.a. das Forschungsdatenmanagement. Explizit wurden die im Rahmen von CAREFUL erhobenen Rohdaten sowie die statistisch ausgewerteten Ergebnisse auf einem projektinternen cloud-basierten Dokumentenmanagementsystem zusammenfassend hinterlegt. Diese Ergebnisse fließen bereits jetzt in andere laufende Forschungsprojekte der beteiligten Fachgebiete mit ein, bzw. werden die Daten nach Veröffentlichung in Form von wissenschaftlichen Artikeln in internationalen Fachzeitschriften für die Öffentlichkeit in vollem Umfang via eines Daten Repository (tbd) frei zur Verfügung gestellt. Die wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Verwendungsmöglichkeiten und damit einhergehend die Anschlussfähigkeit der erhobenen Daten sind detailliert im Folgenden bei den jeweiligen Arbeitspaketen formuliert.

#### 4.3.2 Arbeitspaket 2 „Quantifizierung des Restbiomassepotenzials“

Die erstellte Kurzstudie ließ erkennen, dass das Restbiomassepotenzial für die nordhessische Region enorm ist. Es bedarf jedoch weitere intensive Forschung, um die praktikabelste und effizienteste Kombination oder das Portfolio von Biomassenutzungsoptionen zu ermitteln, die auf die spezifischen Bedingungen einer bestimmten Region zugeschnitten sind. Hierbei könnten Biomasseaufbereitungsverfahren, wie das IFBB-Verfahren, eine Doppelnutzung von ein und demselben Ausgangssubstrat durch die Separierung der Silage-Biomasse in feste und flüssige Phase erreichen und somit die Nutzungseffizienz steigern.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass der im IFBB-Verfahren erzeugte Presssaft sich sowohl für eine anaerobe Vergärung zu Biogas eignet (Wachendorf *et al.* 2009), kann jedoch ohne weitere Vorbehandlung mittels Fermentation auch zu hochwertige Plattformchemikalien konvertiert werden (Olszewska-Widdrat *et al.* 2019, 2020). Biotechnologische Verfahren und biobasierte Produkte stehen heute im Mittelpunkt verschiedener Studien als vielversprechende Alternativen zu petrochemischen Verfahren und Produkten. Milchsäure und Bernsteinsäure gehören zu den biobasierten organischen Zwischenprodukten von großem Interesse, da sie als wichtige Plattformchemikalien für die Entwicklung einer nachhaltigen chemischen Industrie angesehen und als Vorläufer für die Herstellung verschiedener Massenchemikalien, Polymere und Harze u.a. verwendet werden können (Pleissner *et al.* 2017). Milchsäure ist heute in der Lebensmittel-, Kosmetik-, Pharma- und Chemieindustrie als Monomer für die Herstellung von PLA (PolyLacticAcid – biobasierter Kunststoff) weit verbreitet. Milchsäure ist aufgrund ihrer vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten eine der wichtigsten Massenchemikalien mit einem Marktvolumen von 2.64 Mrd. USD im Jahr 2018 und einer erwarteten CAGR (Compound Annual Growth Rate) von 18.7 %. Die weltweite Forschung konzentriert sich auf die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen als Kohlenstoffsubstrate sowie als Quellen für Nährstoffzusätze (Abdel-Rahman *et al.* 2019). In diesem Zusammenhang besteht ein starkes Interesse daran, die Kosten für Rohstoffe zu senken und erneuerbare Ressourcen zu nutzen. Im Hinblick auf den Kostenaspekt von Bioprozessrohstoffen rückte die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen sowie landwirtschaftlichen Nebenprodukten in das Zentrum des öffentlichen Interesses. Der Markt für biobasierte Bernsteinsäure wächst mit einer derzeitigen jährlichen Produktionskapazität von 38,000 t und einem Marktpreis von 2.9 \$ kg<sup>-1</sup> sehr schnell. Die Senkung der Produktionskosten für Bernsteinsäure durch Fermentation würde dazu führen, dass sie sich als wichtiger Baustein im Zeitalter der Bioökonomie für die Herstellung zahlreicher chemischer Grundstoffe etabliert. Obwohl Bernsteinsäure bereits im industriellen

Maßstab hergestellt wird, befindet sich die weitere Entwicklung noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium.

Die Koppelung des IFBB-Verfahrens mit innovativen Prozessen und Technologien zur Gewinnung von biogenen Aktivkohlen und Plattformchemikalien stellt ein hochgradig innovatives Kaskadenkonzept unter Nutzung aller relevanten Prozessneben- und Reststoffströmen für die Etablierung einer nachhaltigen Bioökonomie durch die Inwertsetzung von Restbiomassen dar, dessen reale Nachhaltigkeitspotenziale durch eine umfangreiche Ökobilanzierung evaluiert und bewertet werden sollten [→ 4.3.5].

### 4.3.3 Arbeitspaket 3 „Herstellung und Charakterisierung von Pflanzen- und Aktivkohlen“

Wie bereits erwähnt, fokussieren sich die Arbeiten des Fachgebiets für Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe insbesondere auf die Erzeugung biobasierter Aktivkohlen aus grasartigen und krautigen Restbiomassen für die Abwasserbehandlung. Der Schutz aquatischer Ökosysteme und damit dem Leben unter Wasser sowie die Sicherstellung von sauberem Wasser resultiert u.a. in strengen Einleitgrenzwerten von potenziellen Schadstoffen durch kommunale Kläranlagen. Dies erfordert den Ausbau von Kläranlagen zur weitergehenden Abwasserbehandlung und Entfernung organischer Spurenstoffe aus anthropogenen Wirkstoffen in Industrie- und Haushaltschemikalien, Arzneimitteln und Bioziden, deren Einleitung über das kommunale Abwassersystem den dominierenden Eintragspfad in die Gewässer darstellt. Ein etabliertes Verfahren für die Entfernung der Spurenstoffe aus Abwässern stellt der Einsatz von Pulveraktivkohle sowie Ozon dar (Alt *et al.* 2016). Derzeitige Verfahren zur Spurenstoffelimination bewirken jedoch einen zusätzlichen Primärenergiebedarf von +20 % bis +100 % und ein zusätzliches Treibhauspotenzial von +10 % bis +100 % THP (Mutz *et al.* 2017). Mit bis zu 18 t CO<sub>2,Äq</sub> pro Tonne Aktivkohle hat die Herstellung der Aktivkohlen, welche bislang überwiegend auf Steinkohle basieren, einen großen Anteil an den derzeitigen Emissionen (Alt *et al.* 2016). Ebenso hat die Menge der notwendigen Dosierung von Aktivkohle zur Spurenstoffentfernung aus Abwässern einen signifikanten Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Bei einer flächendeckenden Umsetzung der sogenannten vierten Reinigungsstufe würden nach heutigem Wissensstand in Deutschland, Österreich und der Schweiz (D-A-CH) rund 41,000 Tonnen Aktivkohle pro Jahr benötigt werden (Alt *et al.* 2016). Unter der Annahme, dass bei der Herstellung von fossilen AK durchschnittlich 10 t<sub>CO<sub>2,Äq</sub></sub>/t<sub>AK</sub> freigesetzt werden und die AK anschließend verbrannt wird, besteht durch den Einsatz biogener AK ein CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial von rund 530,000 t CO<sub>2</sub>/a bzw. monetär einer jährlichen Summe von 29 Mio. € (mit einem CO<sub>2</sub>-Preis von 55 €/t im Jahr 2025) gegenüber fossilen AK. Vor diesem Hintergrund kann nur durch eine nachhaltige Substitution der eingesetzten fossilen AK durch biobasierte AK das Treibhauspotenzial der weitergehenden Abwasserreinigung langfristig gesenkt werden.

Hierbei stellt die Verwendung von holzbasierten Aktivkohlen zwar einen sehr attraktiven Ansatz dar, jedoch stünde dies in starker Konkurrenz mit bisherigen Verwertungspfaden von Holz. Die Nutzung von grasartigen und krautigen Restbiomassen hingegen wäre eine aussichtsreiche Alternative um Nutzungskonkurrenzen zu vermeiden, benötigt jedoch eine vergleichbare Aufbereitung wie Festbrennstoffe, um mittels Pyrolyse und Aktivierung in hochwertige Aktivkohlen umgewandelt zu werden (Atallah Al-Asad *et al.* 2022, Joseph *et al.* 2020, Ronsse *et al.* 2013). Es konnte bereits gezeigt werden, dass mittels einer Vorbehandlung mit dem IFBB-Verfahren, sowohl aus Grünschnitt als auch aus Bioabfall, grundsätzlich geeignete Aktivkohlen für die Abwasserreinigung erzeugt werden können und

dadurch die THG-Emissionen drastisch reduziert werden können (Atallah Al-Asad *et al.* 2022, Joseph *et al.* 2020). Ausgehend von einer Konversionsrate (Biomasse zu Aktivkohle) der Verfahrenskette von ca. 10 % (Joseph *et al.* 2020) würden ca. 500,000 t Biomasse, bzw. 13% der verfügbaren Grüngut-Restbiomasse in Deutschland (Brosowski *et al.* 2015) benötigt werden, um den prognostizierten jährlichen AK-Bedarf der D-A-CH Region zu decken. Im Sinne des Klimaschutzes stellt die Koppelung des IFBB-Verfahrens mit der biogenen Aktivkohleherstellung einen hochgradig innovativen Ansatz dar. Um eine schnelle Implementierung in der Praxis zu erreichen, ist nun eine gezielte Erforschung des Zusammenwirkens aus Restbiomasseaufbereitung und Pyrolyse- bzw. Aktivierungsparametern auf die AK-Qualität erforderlich, um sowohl AK mit konstant hoher Qualität zu erzeugen als auch potenzielle Limitierungen der Prozesskette bzw. von Restbiomassen zu identifizieren.

#### 4.3.4 Arbeitspaket 4 „Praxisversuche mit Kohle als Einstreuzusatz“

Für die wissenschaftliche Verwendung ist der im Projekt erhobene Datensatz für die Zukunft sehr wertvoll. Wie bereits ausgeführt, werden die Daten derzeit im Rahmen einer Masterarbeit in Bezug auf die Entstehung von Fersenhöckeränderungen und deren Zusammenhang mit anderen Tierwohlindikatoren analysiert, und es soll eine wissenschaftliche Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgen.

Wie in Kap. 4.1.4 diskutiert, wurde weiterer Forschungsbedarf zu Möglichkeiten der Prävention von Fußballenveränderungen insbesondere in der kalten Jahreszeit in der ökologischen Masthühnerhaltung deutlich. Berücksichtigt werden sollten dabei die besonderen Bedingungen eher kleiner Ställe und geöffneter Auslaufklappen mit Zugang zum Freiland.

#### 4.3.5 Arbeitspaket 5 „Ökonomie - Wertschöpfungsketten und Businessplan“

Die angedachten Arbeiten von AP5 zielten konkret darauf ab, die Fragen zur wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit des in CAREFUL geplanten (Technik/Management)-Konzeptes zur Erhöhung des Tierwohls durch die Entwicklung eines regional produzierten pflanzenkohlebasierten Einstreuzusatzstoffes in der Mastgeflügelhaltung zu klären. Da das primäre Ziel unseres Vorhabens, namentlich die Prävention von Fußballenerkrankung bei Mastgeflügel mittels der zusätzlichen Einstreu von Pflanzenkohlen aus Dinkelspelzen, nicht erreicht werden konnte, wurden die Arbeiten in AP5 nicht wie geplant durchgeführt. Im Laufe des Projektes, und insbesondere durch Arbeiten im Rahmen von AP2 und AP3, wurde jedoch deutlich, dass der Entwicklung eines Businessplans vorangestellt, eine umfängliche Machbarkeitsanalyse im Hinblick auf Schließung regionaler Stoffkreisläufe durchgeführt werden müsste. Hierbei ginge es um Analysen zur ressourcenbezogenen, technischen, wirtschaftlichen, politischen, juristischen und organisatorischen Machbarkeit. Beispielsweise ausgehend von den Ergebnissen der GIS- und kartenbasierten Untersuchungen und Befragungen zur Quantifizierung des Restbiomassepotenzials in der nordhessischen Untersuchungsregion sollten Forschungsfragen formuliert werden, welche die Thematik der infrastrukturellen Optimierung regionaler Stoffströme adressieren. Hierbei sollten in einem ersten Schritt Verfahrensketten für ein integriertes Stoffstrommanagement entwickelt werden, welche sich an der Anwendbarkeit bei der Umsetzung bzw. an den Einflussmöglichkeiten auf regionaler Ebene orientieren. Darauf aufbauend sollte die Entwicklung von Konzepten bzw. Ansätzen folgen, welche nicht nur technische Aspekte betrachten, sondern auch die regionalen Energie- und Finanzströme berücksichtigen.

Darüber hinaus ist für die Implementierung einer nachhaltigen und zirkulären Bioökonomie zur Substituierung fossiler Ressourcen, Rohstoffe und Energieträgern die Ermittlung, Quantifizierung und Bewertung der realen Nachhaltigkeitspotenziale von Verfahrensketten erforderlich. Durch die Berechnung von Ökobilanzen können ökologische Nachhaltigkeitspotenziale von unterschiedlichen Verfahren, Prozessen und Produkten ermittelt, bewertet und verglichen werden. Von besonderer Bedeutung ist dies im Rahmen weiterer Forschungsaktivitäten, u.a. um Umweltauswirkungen durch die Inwertsetzung von Restbiomassen zu quantifizieren und so ökologisch optimale Verwertungspfade zu identifizieren. Der methodische Ansatz würde hierbei u.a. die Identifizierung und Festlegung geeigneter funktioneller Einheiten für die jeweiligen Wirkungskategorien erneuerbare und nicht erneuerbare Energie, Treibhaus-, Eutrophierungs- und Versauerungspotenzial sowie Abfall und Öko- bzw. Humantoxizität, die in der Ökobilanzierung berücksichtigt werden beinhalten. Darüber hinaus müssten weitere Kriterien und Indikatoren (u.a. soziale Risiken) entwickelt werden, die für eine ganzheitliche Bewertung unter Nachhaltigkeitsgesichts-punkten benötigt werden.

## 5 Zusammenarbeit in der Operationellen Gruppe (OG)

### 5.1 Gestaltung der Zusammenarbeit

Die Mitglieder und assoziierten Partner der OG CAREFUL kamen aus der Landwirtschaft, Wissenschaft, Ökonomie sowie dem Energie- und Dienstleistungssektor. Im Rahmen der OG entstand eine enge Zusammenarbeit zwischen den wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen der Universität Kassel und den Landwirt:innen. Gemeinsam wurden Einstellungs-, Umstellungs-, und Schlachtermine sowie Betriebsbesuche und KohleEinstreu koordiniert. Außerdem gab es Reflexionsgespräche über den aktuellen Ergebnisstand des Projekts und den Gesundheitszustand der Herden, wie sie von den Landwirten wahrgenommen wurde, und die Diskussion möglicher Präventionsmaßnahmen. Zum Abschluss wurde ein OG Treffen zur gemeinsamen Diskussion der Projektergebnisse im Juli 2023 veranstaltet.

### 5.2 Mehrwert des Formats einer OG

Der Mehrwert des Formats einer vieldisziplinären OG für die Durchführung eines Forschungsvorhabens mit dem Fokus auf das Tierwohl kann aus einer akademischen, universitären Perspektive klar formuliert werden. Im Zusammenhang mit dem Ziel eine nachhaltige Landwirtschaft zu etablieren, so auch Tierhaltungssysteme zu entwickeln, die den Bedürfnissen der Tiere gerecht wird, ist die problemlösungsorientierte transdisziplinäre Forschung besonders wichtig. Wie transdisziplinäre Forschung definiert wird, ist nach wie vor eine stark diskutierte Frage. Es besteht jedoch ein breiter Konsens darüber, dass das Wissen von „nichtakademischen“ Akteuren von der Forschungslandschaft geschätzt und in sie integriert werden soll. Dies impliziert Prozesse des gegenseitigen Lernens zwischen Wissenschaft und Praxisakteuren, was eine Aufgabe der Wissenschaft mit den Akteuren und nicht für die Akteure darstellt. Dabei stützt sie sich auf etablierte Methoden, um zuverlässiges Wissen zu produzieren, geht aber darüber hinaus, um gesellschaftlich tragfähiges Wissen zu erzeugen. Diese doppelte Verantwortung macht transdisziplinäre Forschung sowohl spannend als auch sehr herausfordernd. Sowohl unsere akademischen als auch nicht-akademischen Akteure hatten sehr unterschiedliche Vorstellungen davon, was eine Zusammenarbeit erfordert und bietet. Die Klärung dieser Erwartungen, das Aushandeln von Meinungsverschiedenheiten und der Aufbau von Vertrauen waren entscheidend für den Aufbau einer erfolgreichen Zusammenarbeit. Somit bot das OG-Kooperationsformat Akteuren aus unterschiedlichen Lebens- und Arbeitsbereichen, jedoch insbesondere den universitären Partnern, eine gute Gelegenheit, ihre Kompetenzen bei der Planung und Durchführung von transdisziplinären Projekten zu erweitern und zu stärken. Andererseits, durch die gemeinsame Entwicklung von nachhaltigen Strategieoptionen und innovativen Technologien/Praktiken für die Gestaltung einer tierwohladressierenden Landwirtschaft, können solche FuE-Aktivitäten, wie diese mit der OG CAREFUL stattfanden, die Wettbewerbsfähigkeit von OG-Praxispartnern maßgeblich stärken.

### 5.3 Weitere Zusammenarbeit

Im Rahmen der Untersuchungen zu landwirtschaftlichen Restbiomassen und deren Inwertsetzung, bspw. durch die Umwandlung zu Aktivkohlen, kamen Mitarbeiter des Fachgebiets für Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe mit unserem OG Partner Markus Roth ins Gespräch, welcher ebenso Inhaber eines Geflügelschlachtbetriebs ist. Hierbei ging es um möglich Verwertungsstrategien der Schlachtabfälle. Kohle aus

Knochen, sog. bone char, und ihre Anwendungsmöglichkeiten ist natürlich von großem wissenschaftlichen, aber auch wirtschaftlichen Interesse. Weltweit fallen in der Fleischindustrie jährlich Millionen von Tonnen Knochenabfälle an. Nach Angaben der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, der OECD, wird erwartet, dass die Fleischproduktion in den nächsten zehn Jahren um 40 Millionen Tonnen ansteigen wird, mit dem Hauptanteil bei Rind und folgend 13 % bei Geflügel, 10 % bei Schweinefleisch und > 21 % bei Schaffleisch. Infolgedessen werden die weltweit anfallenden Fleisch- und Knochenmehlabfälle erheblich zunehmen.

Insbesondere in der Trinkwasseraufbereitung erfährt Knochenkohle ein erneutes Interesse, bspw. für die Adsorption von Fluorid. Studien konnten zeigen, dass Fluorid durch Adsorption an Knochenkohle wirksam aus Wasserlösungen entfernt werden konnte. Der Mechanismus der Fluoridadsorption an Knochenkohle ist jedoch noch nicht vollständig geklärt. Dieses Verfahren der Trinkwasseraufbereitung von Fluorid mittels Knochenkohle ist nicht neu. Die Sorption an Knochenkohle, die durch die Pyrolyse von zerkleinerten Rinderknochen hergestellt wird, wurde seit 1953 in gewissem Umfang zur Defluoridierung von Trinkwasser eingesetzt. Dieses Verfahren wurde jedoch aufgrund der Kosten für das Adsorptionsmittel und im Zusammenhang mit dem schlechten Geschmack des behandelten Wassers sowie der Verfügbarkeit und der Qualität dieses Adsorptionsmittels nicht auf breiter Basis eingesetzt. Heutzutage wird Knochenkohle als potenzielles Adsorptionsmittel für die Defluoridierung von Trinkwasser wieder in Betracht gezogen, da Knochenkohle in ausreichender Menge und Qualität hergestellt werden kann und die Pyrolysetechnologie maßgeblich weiterentwickelt wurde.

Ebenso interessant wäre in diesem Zusammenhang eine für den kleinen Schlachtbetrieb konzipierte Aufbereitung des Schlachtabwassers, eventuell mittels eines Abwasserfiltersystems mit Pflanzenaktivkohle als Hauptkomponente. Somit ist das Fachgebiet für Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe an einer weiteren Zusammenarbeit mit u.a. Herrn Markus Roth sehr interessiert. Ein Forschungsvorhaben in Form einer Doktorarbeit ist in Planung, d.h. eine Projektskizze wird geschrieben und geeignete Fördermöglichkeiten werden derzeit gesucht.

Ebenso sind weitere Zusammenarbeiten mit den Landwirt:innen der OG in zukünftigen Forschungsvorhaben des Fachgebietes Nutztierethologie und Tierhaltung sehr wahrscheinlich. Jedoch sind aktuell keine weitere Zusammenarbeit der OG in Gänze geplant. Einzelne Mitglieder der OG arbeiten allerdings schon jetzt wieder in weiteren Projekten zusammen.

## 6 Verwendung der Zuwendung

Zuordnung der Ausgabe nach Richtlinie IZ Teil II A.		Gesamt-Ausgaben €	Förderfähige Ausgaben €	Zuwendung lt. Bewilligungs-/Änderungsbescheid €
<b>Arbeitspaket 1: Laufende Ausgaben der Zusammenarbeit der OG</b>				
Laufende Personalkosten der Zusammenarbeit der OG	5.2.1 a)	126,409.30	122,358.40	142,276.74
Allgemeine Geschäftsausgaben	5.2.1 c)	18,961.40	18,417.51	21,405.00
Alle anderen laufenden Ausgaben der Zusammenarbeit einer OG	5.2.1 b) + d) bis f)	1,517.41	1,457.54	19,008.00
<i>Zwischensumme</i>		<i>146,888.11</i>	<i>142,233.45</i>	<i>182,689.74</i>
<b>Arbeitspakete 2 ff.: Ausgaben des Vorhabens ohne Investitionsausgaben</b>				
Arbeitspaket 2	5.2.2 a) bis f)	38,576.79	26,309.76	31,400.00
Arbeitspaket 3	5.2.2 a) bis f)	29,983.13	24,691.53	53,100.00
Arbeitspaket 4	5.2.2 a) bis f)	89,409.16	71,303.74	113,311.02
Arbeitspaket 5	5.2.2 a) bis f)	0.00	0.00	19,424.00
<i>Zwischensumme</i>		<i>159,199.08</i>	<i>122,305.03</i>	<i>217,235.02</i>
<b>Summe</b>		<b>306,087.19</b>	<b>264,538.48</b>	<b>399,924.76</b>

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Praxiseinsatz konnte kein positiver Effekt der Pflanzenkohle als Einstreuzusatz auf die tierwohlbezogenen Indikatoren, insbesondere auf die Prävalenzen von Fußballenveränderungen, gefunden werden. Obwohl in den Laborversuchen ein Effekt der Kohle auf die Wasserhaltekapazitäten der Einstreusubstrate deutlich wurde, zeigte sich in der Praxis keine Verringerung der Einstreufeuchte und der Ammoniakkonzentrationen im Stall. Zudem nahm die Kohle unter Praxisbedingungen bei der Lagerung viel Feuchtigkeit auf. Schlussfolgernd kann der Einsatz dieses Produkt zur Verbesserung des Tierwohls in der Praxis nicht empfohlen werden.

Gleichzeitig wurden die Herausforderungen in der ökologischen Masthühnerhaltung in der kalten Jahreszeit für die Prävention von Fußballenveränderungen deutlich. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, wie das Auftreten dieser Tierwohlbeeinträchtigung unter den Bedingungen einer ökologischen Fütterung, in Freilandhaltung und eher kleinen, wenig gedämmten Ställen wirksam vermindert werden kann. Die zentrale Rolle der Einstreufeuchte konnte erneut belegt werden, so dass mit verschiedenen Maßnahmen darauf abgezielt werden sollte, die Einstreu möglichst trocken zu halten.

Der generierte Datensatz wird darüber hinaus für Analysen zu weiteren Tierwohlproblemen, insbesondere zu Fersenhöckeränderungen und deren Zusammenhang mit anderen Tierwohlindikatoren, genutzt. Die Ergebnisse sollen wissenschaftlich publiziert werden, um die Wissensgrundlage für Empfehlungen zur Verbesserung der Tiergerechtigkeit der (ökologischen) Masthühnerhaltung zu erweitern.

Rückblickend mussten wir jedoch feststellen, dass der thematische Aufbau unseres Vorhabens zur Klärung unserer Forschungsfrage zu interdisziplinär für die Bearbeitung im Rahmen einer Qualifikationsstelle, namentlich einer Promotionsstelle, war. So hatten Verzögerungen in einem Arbeitspaket einen erheblichen Einfluss auf die Folgearbeiten eines anderen Arbeitspaketes. Zudem zeigte sich, dass der holistische Ansatz, welchen wir im Rahmen dieses EIP-Agri Vorhabens verfolgten, eine Herausforderung für die wissenschaftliche Mitarbeiterstelle darstellte, welche vorrangig von jungen Absolventinnen besetzt wurde. Interdisziplinäre Forschungsfragen zu bearbeiten, verlangt ein umfassendes Verständnis für die gesamte Thematik, eine Kompetenz, welche jahrelange Erfahrungen in der universitären Forschung voraussetzt. Dennoch konnte aufgrund eines hohen Engagements der Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen der beteiligten Fachgebiete erfolgreich für jedes Arbeitspaket, mit Ausnahme des AP5, ein umfangreicher und wissenschaftlich verwertbarer Datensatz generiert werden.

## 8 Literaturverzeichnis

- Abdel-Rahman, M. A.; Hassan, S. E.-D.; Roushdy, M. M.; Azab, M. S. & Gaber, M. A. (2019) Free-nutrient supply and thermo-alkaline conditions for direct lactic acid production from mixed lignocellulosic and food waste materials. *Bioresource Technology Reports* 7, 100256. DOI: 10.1016/j.biteb.2019.100256.
- Albiker, D. & Zweifel, R. (2019) Wirkung von Pflanzenkohle im Futter oder in der Einstreu auf den Stickstoffgehalt in der Einstreu bei Broilern. [https://orgprints.org/id/eprint/36064/1/Beitrag\\_131\\_final\\_a.pdf](https://orgprints.org/id/eprint/36064/1/Beitrag_131_final_a.pdf) (Zuletzt besucht 10.08.2023).
- Alt, K.; Benstöm, F.; Biebersdorf, N.; Böhler, M.; Bornemann, C.; Hiller, C.; Jedele, K.; Jekel, M.; Lyko, S.; Metzger, S.; Nahrstedt, A.; Remy, C. & Wintgens, T. (2016) Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung: Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6 "Aktivkohleeinsatz auf Kläranlagen". *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall* 12, 1062–1067. DOI: 10.3242/kae2016.12.002.
- Anderson, D. P.; Beard, C. W. & Hanson, R. P. (1964) The Adverse Effects of Ammonia on Chickens Including Resistance to Infection with Newcastle Disease Virus, *Avian Diseases*, 8(3), S. 369–379. [https://www.jstor.org/stable/pdf/1587967.pdf?refreqid=excelsior%3Afc4cb225aa2ab39290dd59ff7f65b560&ab\\_segments=&origin=&initiator=&acceptTC=1](https://www.jstor.org/stable/pdf/1587967.pdf?refreqid=excelsior%3Afc4cb225aa2ab39290dd59ff7f65b560&ab_segments=&origin=&initiator=&acceptTC=1) (Zuletzt besucht 04.08.2023).
- Atallah Al-Asad, H.; Parniske, J.; Qian, J.; Alex, J.; Ramaswami, S.; Kaetzel, K. & Morck, T. (2022) Development and application of a predictive model for advanced wastewater treatment by adsorption onto powdered activated carbon. *Water research* 217, 118427. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118427
- 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. (2011) Agro-industrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives. *Food Research International* 44, 1866–1874.
- Beck-O'Brien, M.; Egenolf, V.; Winter, S.; Zahnen, J. & Griesshammer, N. (2022) Alles aus Holz – Rohstoff der Zukunft oder kommende Krise; Ansätze zu einer ausgewogenen Bioökonomie. WWF Deutschland.
- Berg, C. C. (1998) *Foot-pad dermatitis in broilers and turkeys—Prevalence, risk factors and prevention*. PhD Diss. Swedish Univ. Agric. Sci., Uppsala, Sweden.
- Bergna, D.; Hu, T.; Prokkola, H.; Romar, H & Lassi, U. (2020) *Effect of Some Process Parameters on the Main Properties of Activated Carbon Produced from Peat in a Lab-Scale Process*, Waste and Biomass Valorization, Vol. 11, Springer, New York.
- BGK (2006), *Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate*. BGK e.V. (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.), Köln.
- Bilgili, S. F., Hess, J. B., Blake, J. P., Macklin, K. S., Saenmahayak, B. & Sibley, J. L. (2009) Influence of bedding material on footpad dermatitis in broiler chickens. *Journal of Applied Poultry Research* 18(3), 583–589. DOI: 10.3382/japr.2009-00023.
- Blumenstein, B.; Bühle, L.; Wachendorf, M. & Möller, D. (2012) Economic assessment of the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass (IFBB) in comparison to different energy recovery, animal-based and non-refining management systems. *Bioresource technology* 119, 312–323. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.05.077
- Brendel, U. & Dohmann, M. (Eds.) (1997) *Einsatz von Aktivkohle in der kommunalen Abwasserreinigung, Gewässerschutz, Wasser, Abwasser* Vol. 167. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1997. Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen
- Brosowski, A.; Adler, P.; Erdmann, G.; Stinner, W.; Thrän, D.; Mantau, U.; Blanke, C.; Mahro, B.; Hering, T. & Reinholdt, G. (2015) Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen—Status Quo in Deutschland. *Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe* 36, 56.
- Brosowski, A.; Krause, T.; Mantau, U.; Mahro, B.; Noke, A.; Richter, F.; Raussen, T.; Bischof, R.; Hering, T.; Blanke, C.; Müller, P. & Thrän, D. (2019) How to measure the impact of biogenic residues, wastes and by-products: Development of a national resource monitoring based on the example of Germany. *Biomass and Bioenergy* 127, 105275. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105275.
- Bühle, L.; Hensgen, F.; Donnison, I.; Heinsoo, K. & Wachendorf, M. (2012) Life cycle assessment of the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass (IFBB) in comparison to different energy recovery, animal-based and non-refining management systems. *Bioresource technology* 111, 230–239. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.02.072.
- Büscher, W.; Henseler-Paßmann, J. & Schmithausen, A. (2012) *Feinstaubbelastungen in Tierställen - Situationsbewertung und Minderungsmaßnahmen*, Institut für Landtechnik. [https://bonndoc.ulb.uni-bonn.de/xmlui/bitstream/handle/20.500.11811/1264/USL\\_Forschungsbericht\\_169.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://bonndoc.ulb.uni-bonn.de/xmlui/bitstream/handle/20.500.11811/1264/USL_Forschungsbericht_169.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (Zuletzt besucht 14.09.2023).
- CEFIC (1986) *Testmethoden für Aktivkohlen*, European Council of Chemical Manufacturers Federations.
- Cengiz, Ö.; Hess, J. B. & Bilgili, S. F. (2011) Effect of bedding type and transient wetness on footpad dermatitis in broiler chickens. *Journal of Applied Poultry Research* 20(4), 554–560. DOI: 10.3382/japr.2011-00368.
- Collett, S. R. (2012) Nutrition and wet litter problems in poultry. *Animal Feed Science and Technology* 173(1-2), 65–75. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2011.12.013.

- DLG- Ausschuss Geflügel (2021) *DLG Merkblatt Haltung von Masthühnern: Haltungsansprüche- Fütterung-Tiergesundheit*. <https://www.dlg.org/de/landwirtschaft/themen/tierhaltung/gefluegel/dlg-merkblatt-406> (Zuletzt besucht 11.08.2023).
- Dunlop, M. W.; Blackall, P. J. & Stuetz, R. M. (2015) Water addition, evaporation and water holding capacity of poultry litter. *The Science of the total environment* 538, 979–985. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.092.
- Dunlop, M. W.; Moss, A. F.; Groves, P. J.; Wilkinson, S. J.; Stuetz, R. M. & Selle, P. H. (2016) The multidimensional causal factors of 'wet litter' in chicken-meat production. *Science of the Total Environment* 562, 766–776, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.147
- EU-Öko-VO (2020) Durchführungsverordnung (EU) 2020/464 der Kommission vom 26. März 2020 mit Durchführungsbestimmungen zur Verordnung (EU) 2018/848 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der für die rückwirkende Anerkennung von Umstellungszeiträumen erforderlichen Dokumente, der Herstellung ökologischer/biologischer Erzeugnisse und der von den Mitgliedstaaten bereitzustellenden Informationen (ABl. EG Nr. L 98 vom 31.03.2020, S. 2).
- Ekstrand, C. & Algers, B. (1997) Rearing Conditions and Foot-Pad Dermatitis in Swedish Turkey Poult *Acta Veterinaria Scandinavica* 38, 167–174.
- Ekstrand, C., Carpenter, T. E., Andersson, I., & Algers, B. (1998). Prevalence and control of foot-pad dermatitis in broilers in Sweden. *British poultry science*, 39(3), 318-324.
- El-Wahab, A. A.; Visscher, C. & Kamphues, J. (2018) Impact of different dietary protein sources on performance, litter quality and foot pad dermatitis in broilers. *Journal of Animal and Feed Sciences* 27(2), 148–154. DOI: 10.22358/jafs/90696/2018.
- El-Wahab, A. A.; Visscher, C. F.; Beineke, A.; Beyerbach, M. & Kamphues, J. (2012) Experimental studies on the effects of different litter moisture contents and exposure time to wet litter on development and severity of foot pad dermatitis in young fattening turkeys. *Archiv für Geflügelkunde* 76, 55–62.
- Gerlach, H., & Schmidt, H. P. (2012) Pflanzenkohle in der Geflügelhaltung. *Ithaka Journal*, 26-28.
- Giroto, F.; Alibardi, L. & Cossu, R. (2015) Food waste generation and industrial uses: A review. *Waste management* 45, 32–41.
- Graß, R.; Reulein, J.; Scheffer, K.; Stülpnagel, R. & Wachendorf, M. (2009) Die integrierte Biogas- und Festbrennstoffherstellung aus Ganzpflanzensilagen. *Berichte über Landwirtschaft* 87 (1), 43-64.
- Hahn, J.-U. & Möhlmann, C. (2011) Neuer A-Staub Grenzwert - Aspekte für dessen Anwendung. *Gefahrstoffe-Reinhalte der Luft* 71(10), 429–432.
- Hartmann, H.; Hofbauer, H., & Kaltschmitt, M. (Eds.) (2016) *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Vieweg.
- Haslam, S. M.; Knowles, T. G.; Brown, S. N.; Wilkins, L. J.; Kestin, S. C.; Warriss, P. D. & Nicol, C. J. (2007) Factors affecting the prevalence of foot pad dermatitis, hock burn and breast burn in broiler chicken. *British poultry science* 48(3), 264–275. DOI: 10.1080/00071660701371341.
- Hensgen, F.; Bühle, L.; Donnison, I.; Frasier, M.; Vale, J.; Corton, J.; Heinsoo, K.; Melts, I. & Wachendorf, M. (2012) Mineral concentrations in solid fuels from European semi-natural grasslands after hydrothermal conditioning and subsequent mechanical dehydration. *Bioresource technology* 118, 332–342. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.05.035.
- Hensgen, F.; Bühle, L.; Donnison, I.; Heinsoo, K. & Wachendorf, M. (2014) Energetic conversion of European semi-natural grassland silages through the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass: energy yields and the fate of organic compounds. *Bioresource technology* 154, 192–200. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.12.042.
- Hensgen, F.; Bühle, L. & Wachendorf, M. (2016) The effect of harvest, mulching and low-dose fertilization of liquid digestate on above ground biomass yield and diversity of lower mountain semi-natural grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 216, 283–292. DOI: 10.1016/j.agee.2015.10.009.
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) (2010) *Biomassepotenzialstudie Hessen – Stand und Perspektiven der energetischen Biomassennutzung in Hessen: Materialband*, Wiesbaden, Deutschland.
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) (2020) *Waldzustandsbericht 2020*, Kassel, Deutschland.
- Hinz, K.; Stracke, J.; Schättler, J. K.; Spindler, B. & Kemper, N. (2019) Foot pad health and growth performance in broiler chickens as affected by supplemental charcoal and fermented herb extract (FKE): an on-farm study. *European Poultry Science* 83. DOI: 10.1399/eps.2019.266.
- Ippolito, J. A.; Cui, L.; Kammann, C.; Wrage-Mönnig, N.; Estavillo, J. M. & Fuertes-Mendizabal, T. (2020) Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar* 2, 421–38. DOI: 10.1007/s42773-020-00067-x
- Joseph, B.; Kaetzl, K.; Hensgen, F.; Schäfer, B. & Wachendorf, M. (2020) Sustainability assessment of activated carbon from residual biomass used for micropollutant removal at a full-scale wastewater treatment plant. *Environmental Research Letter* 15 (6), 64023. DOI: 10.1088/1748-9326/ab8330.

- Junna, S.; He, F.; Pan, Y. & Zhang, Z. (2016) Effects of Pyrolysis Temperature and residence time on physiochemical properties of different Biochar Types, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B, Soil and Plant Science* Vol. 67, Taylor and Francis Group, Oxfordshire.
- Kalus, K.; Konkol, D.; Korczyński, M.; Koziel, J. A. & Opaliński, S. (2020) Effect of Biochar Diet Supplementation on Chicken Broilers Performance, NH<sub>3</sub> and Odor Emissions and Meat Consumer Acceptance. *Animals* 10(9). DOI: 10.3390/ani10091539.
- Kana, J. R.; Teguaia, A.; Mungfu, B. M. & Tchoumboue, J. (2011) 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* 43(1), 51–56. DOI: 10.1007/s11250-010-9653-8.
- Keppler, C. & Knierim, U. (2010) Wehe Füße, krumme Beine. *Bioland* 02/2010, 22.
- Kjeldahl, J. (1883) Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. *Zeitschrift für Analytische Chemie* 22, 366–382.
- Knierim, U.; Gieseke, D.; Michaelis, S.; Keppler, C.; Spindler, B.; Rauch, E.; Petermann, S.; Andersson, R.; Schultheiß, U. & Zapf, R. (Hg.) (2020) *Tierschutzindikatoren: Leitfaden für die Praxis - Geflügel: Vorschläge für die Produktionsrichtungen Jung- und Legehennen, Masthuhn, Mastpute*, 2. Aufl., Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
- Kuleile, N.; Metsing, I.; Tjala, C. & Jobo, T. (2019) The effects of different litter material on broiler performance and feet health. *Online Journal of Animal and Feed Research* 9(5), 206–211.
- Länderarbeitsgruppe Stallklima (2006) *Stallklimaprüfung in der landwirtschaftlichen Tierhaltung: Empfehlungen der Länderarbeitsgruppe Stallklima*. [https://www.laves.niedersachsen.de/download/96058/Stallklimaueberpruefung\\_in\\_landwirtschaftlichen\\_Tierhaltungen.pdf](https://www.laves.niedersachsen.de/download/96058/Stallklimaueberpruefung_in_landwirtschaftlichen_Tierhaltungen.pdf) (Zuletzt besucht 14.09.2023).
- Lehmann, J. & Joseph, S. (Eds.) (2015) *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. Routledge, London, UK.
- Linhoss, J. E.; Purswell, J. L.; Street, J. T. & Rowland, M. R. (2019) Evaluation of Biochar as a Litter Amendment for Commercial Broiler Production. *Journal of Applied Poultry Research* 28(4), 1089–1098. DOI: 10.3382/japr/pfz071.
- Mayne, R. K.; Else, R. W. & Hocking, P. M. (2007) High litter moisture alone is sufficient to cause footpad dermatitis in growing turkeys. *British poultry science* 48(5), 538–545. DOI: 10.1080/00071660701573045.
- McGahan, E.; Bielefeld, N.; Wiedemann, S. & Keane, O. (2014) *National Environmental Management System for the Meat Chicken Industry*. Version 2. Rural Industries Research and Development Corporation. <https://vcgc.org.au/wp-content/uploads/14-100.pdf> (Zuletzt besucht 13.09.2023).
- Meluzzi, A.; Fabbri, C.; Folegatti, E. & Sirri, F. (2008) Survey of chicken rearing conditions in Italy: effects of litter quality and stocking density on productivity, foot dermatitis and carcass injuries. *British poultry science* 49(3), 257–264. DOI: 10.1080/00071660802094156.
- Meteku, B. (2014) Evaluation of the Correlation between selected Quality indices of activated carbon: a Review. *Asian Journal of Applied Science and Engineering* Vol. 3.
- Miles, D. M.; Rowe, D. E. & Cathcart, T. C. (2011) Litter ammonia generation: moisture content and organic versus inorganic bedding materials. *Poultry science* 90(6), 1162–1169. DOI: 10.3382/ps.2010-01113.
- Mota-Rojas, D.; Titto, C. G.; Mira Geraldo, A. De; Martínez-Burnes, J.; Gómez, J.; Hernández-Ávalos, I.; Casas, A.; Domínguez, A.; José, N.; Bertoni, A.; Reyes, B. & Pereira, A. M. F. (2021) Efficacy and Function of Feathers, Hair, and Glabrous Skin in the Thermoregulation Strategies of Domestic Animals. *Animals* 11(12). DOI: 10.3390/ani11123472.
- Mutz, D.; Remy, C.; Miehe, U.; Sperlich, A. (2017) Einfluss von Ozonung oder Aktivkohleadsorption zur weitergehenden Entfernung organischer Spurenstoffe auf den Energieaufwand und CO<sub>2</sub>. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 64 (4), 310–318.
- Nóvoa-Muñoz, J.C.; Simal-Gándara, J.; Fernández-Calviño, D.; López-Periago, E. & Arias-Estévez, M. (2008) Changes in soil properties and in the growth of *Lolium multiflorum* in an acid soil amended with a solid waste from wineries. *Bioresource technology* 99, 6771–6779.
- Obernberger, I.; Brunner, T. & Barnthaler, G. (2006) Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy* 30 (11), 973–982. DOI: 10.1016/j.biombioe.2006.06.011.
- Olszewska-Widdrat, A.; Alexandri, M.; López-Gómez, J. P.; Schneider, R.; Mandl, M. & Venus, J. (2019) Production and Purification of L-lactic Acid in Lab and Pilot Scales Using Sweet Sorghum Juice. *Fermentation* 5 (2), 36. DOI: 10.3390/fermentation5020036.
- Olszewska-Widdrat, A.; Alexandri, M.; López-Gómez, J. P.; Schneider, R. & Venus, J. (2020) Batch and Continuous Lactic Acid Fermentation Based on A Multi-Substrate Approach. *Microorganisms* 8.
- OpenGeoEdu, Geo-Informationssysteme, CC BY-SA 4.0. *Biomassepotenzial, Beispiel Getreidestroh* (Zuletzt besucht Januar 2021).
- Pepper, C.-M. & Dunlop, M. W. (2021) Review of litter turning during a grow-out as a litter management practice to achieve dry and friable litter in poultry production. *Poultry science* 100(6), 101071. DOI: 10.1016/j.psj.2021.101071.

- Petek, M.; Üstüner, H. & Yesilbag, D. (2014) Effects of Stocking Density and Litter Type on Litter Quality and Growth Performance of Broiler Chicken. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*. DOI: 10.9775/kvfd.2014.11016.
- Pleissner, D.; Dietz, D.; van Duuren, J. B. J. H.; Wittmann, C.; Yang, X.; Lin, C. S. K. & Venus, J. (2017) Biotechnological Production of Organic Acids from Renewable Resources. In *Biorefineries*; Springer, Cham, 373–410. DOI: 10.1007/10\_2016\_73.
- Poschlod, P.; Bakker, J. P. & Kahmen, S. (2005) Changing land use and its impact on biodiversity. *Basic and Applied Ecology* 6 (2), 93–98. DOI: 10.1016/j.baae.2004.12.001.
- Pude, R. (2021) *Aktuelle Informationen aus der Miscanthus-Forschung*. www.miscanthus.de (Zuletzt besucht Januar 2021).
- Rafiq, M.; Bachmann, R.; Rafiq, M.T.; Shang, Z.; Joseph, S. & Long, R. (2016) Influence of Pyrolysis Temperature on physiochemical Properties of Corn Stover (*Zea mays* L.) Biochar and Feasibility for Carbon Capture and Energy Balance. *Plos ONE* 11(6).
- Rattanawut, J. (2014) Effects of Dietary Bamboo Charcoal Powder Including Bamboo Vinegar Liquid Supplementation on Growth Performance, Fecal Microflora Population and Intestinal Morphology in Betong Chickens. *Japan Poultry Science Association* 51, 165–171. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jpsa/51/2/51\\_0130109/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jpsa/51/2/51_0130109/_pdf) (Zuletzt besucht 14.09.2023).
- Richter, F.; Graß, R.; Fricke, T.; Zerr, W. & Wachendorf, M. (2009) Utilization of semi-natural grassland through integrated generation of solid fuel and biogas from biomass. II. Effects of hydrothermal conditioning and mechanical dehydration on anaerobic digestion of press fluids. *Grass and Forage Science* 64 (4), 354–363. DOI: 10.1111/j.1365-2494.2009.00700.x.
- Ronsse, F.; van Hecke, S.; Dickinson, D. & Prins, W. (2013) Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *GCB Bioenergy* 5 (2), 104–115. DOI: 10.1111/gcbb.12018.
- Schmidt, E.; Bellof, G. & Carrasco Alarcon, L. S. (2010) *Pododermatitis bei Masthähnchen im ökologischen Landbau*. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Schlussbericht zum Teilprojekt. <https://orgprints.org/id/eprint/18609/1/18609-06OE151-hswt-schmidt-2010-pododermatitis.pdf> (Zuletzt besucht 10.08.2023).
- Seedorf, J. (2013) Wirkung von atmosphärischem Ammoniak auf Nutztiere – eine Kurzübersicht. *Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift* 126(3/4), 96–103. <http://vetline.de/zeitschriften/bmtw/openaccess.htm>.
- Shepherd, E. M. & Fairchild, B. D. (2010) Footpad dermatitis in poultry. *Poultry science* 89(10), 2043–2051. DOI: 10.3382/ps.2010-00770.
- Singh, B.; Camps-Arbestain, M. & Lehmann, J. (Ed.) (2017) *Biochar – A Guide to Analytical Methods*. CRC Press/Taylor and Francis Group LLC, Boca Raton.
- Sirri, F.; Minelli, G.; Folegatti, E.; Lolli, S. & Meluzzi, A. (2007) Foot dermatitis and productive traits in broiler chickens kept with different stocking densities, litter types and light regimen. *Italian Journal of Animal Science* 6(sup1), 734–736. DOI: 10.4081/ijas.2007.1s.734.
- Stenchly, K.; Hensgen, F.; Kaetzl, K. & Wachendorf, M. (2021) Grünschnitt mit Lupine als potenzielle Energiequelle. *Anliegen Natur* 99–102.
- Strašifák, J. & Juhás, P. (2023) The effect of a bedding materials on performance, welfare and behavior of broiler chickens: A review. *Journal of Central European Agriculture* 24(2), 311–321. DOI: 10.5513/JCEA01/24.2.3780.
- Umbach, F. (2021) *Entwicklung einer Apparatur zur Bestimmung der Wasserkapazität von Substraten für den Nahbereich von Legehennenställen*. Masterarbeit, Universität Kassel.
- TierSchNutzTV (2006) *Verordnung zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere bei ihrer Haltung (Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung - TierSchNutzTV)*.
- Wachendorf, M.; Richter, F. & Fricke, T. (2009): Utilization of semi-natural grassland through integrated generation of solid fuel and biogas from biomass. I. Effects of hydrothermal conditioning and mechanical dehydration on mass flows of organic and mineral plant compounds, and nutrient balances. *Grass and Forage Science* 64, 132–143.
- Wang, K.; Shen, D.; Dai, P. & Li, C. (2023) Particulate matter in poultry house on poultry respiratory disease: a systematic review. *Poultry science* 102(4), S. 102556. DOI: 10.1016/j.psj.2023.102556.
- Welfare Quality® (2009) *Welfare Quality® Assessment protocol for poultry (broilers, laying hens)*. Welfare Quality® consortium, Lelystad, The Netherlands. <https://edepot.wur.nl/233471> (Zuletzt besucht 07.09.2023).
- Youssef, I. M. I.; Beineke, A.; Rohn, K. & Kamphues, J. (2011) Effects of litter quality (moisture, ammonia, uric acid) on development and severity of foot pad dermatitis in growing turkeys. *Avian Diseases* 55(1), 51–58. DOI: 10.1637/9495-081010-Reg.1.

## 9 Annex

Annex I: Einstufung der im Rahmen stattgefundenen Praxisversuche als Nicht-Tierversuch im Sinne der Tierschutz-Versuchstierverordnung (E-Mail-Korrespondenz)

---

**Von:** [fuRPKsveterinaer@rpks.hessen.de](mailto:fuRPKsveterinaer@rpks.hessen.de) <[fuRPKsveterinaer@rpks.hessen.de](mailto:fuRPKsveterinaer@rpks.hessen.de)>  
**Gesendet:** Montag, 2. August 2021 10:35:05  
**An:** Habel, Jonas  
**Cc:** [Anke.Reisse@rpks.hessen.de](mailto:Anke.Reisse@rpks.hessen.de)  
**Betreff:** AW: Tierversuch? Projekt CAREFUL

RPKS - 23-19 c 16/15-2018/5

### Tierschutz

Anfrage zur Einstufung eines von Ihnen geplanten Forschungsprojektes als Tierversuch im Sinne des Tierschutzgesetzes bzw. der Tierschutz Versuchstierverordnung (TierSchVersV)

Sehr geehrter Herr Habel,

vielen Dank für die Zusendung Ihrer Ausführungen und der Unterlagen zu dem von Ihnen geplanten Forschungsprojektes.

Auf Grundlage dieser Informationen erachte ich das von Ihnen geplante Forschungsprojekt nicht als Tierversuch im Sinne des Tierschutzgesetzes bzw. der Tierschutz Versuchstierverordnung (TierSchVersV).

Mit freundlichen Grüßen  
Im Auftrag

**Sabine Eisfelder-Finis** i. V.

Dezernat  
Veterinärwesen und Verbraucherschutz



Regierungspräsidium Kassel  
Am Alten Stadtschloss 1  
34117 Kassel

Tel.: +49 (561) 106 2526  
Fax: +49 (611) 327641638  
Web: [www.rp-kassel.hessen.de](http://www.rp-kassel.hessen.de)  
E-Mail: [veterinaer@rpks.hessen.de](mailto:veterinaer@rpks.hessen.de)

---

Annex II: Finales Boniturschema zur Erfassung des Tierwohls der Masthühner

**FUSSBALLENVERÄNDERUNGEN (2., 7./8., 11. LW im Stall):**

Bonitur-note	Beschreibung	Beispielfotos		
0	<p><b>Keine Fußballenveränderungen:</b></p> <p>Maximal leichte Verfärbungen der Schuppen oder zwischen den Schuppen.</p>			FNT, Universität Kassel
1	<p><b>Leichte Fußballenveränderungen:</b></p> <p>Bis erbsengroße (&lt; 0,5 cm im längsten Durchmesser) dunkle Verfärbung oder Zerstörung der oberen Hautschicht.</p>			E. Rauch
2	<p><b>Schwere Fußballenveränderungen:</b></p> <p>Mindestens erbsengroße (≥ 0,5 cm im längsten Durchmesser) dunkle Verfärbung oder Zerstörung der oberen Hautschicht.</p>			E. Rauch

Methode adaptiert nach: KTBL-Leitfaden für Geflügel, 2020

**FERSENHÖCKERVERÄNDERUNGEN (2., 7./8., 11. LW im Stall):**

Bonitur-note	Beschreibung	Beispielfotos	
0	<p><b>Keine Fersenhöckeränderungen:</b></p> <p>Maximal Rötung der Haut am Fersenhöcker.</p>		
1	<p><b>Leichte Fersenhöckeränderungen:</b></p> <p>Bis erbsengroße (&lt; 0,5 cm im längsten Durchmesser) dunkle Verfärbung oder Zerstörung der oberen Hautschicht.</p>		
2	<p><b>Schwere Fersenhöckeränderungen:</b></p> <p>Mindestens erbsengroße (≥ 0,5 cm im längsten Durchmesser) dunkle Verfärbung oder Zerstörung der oberen Hautschicht.</p>		

Methode adaptiert nach: KTBL-Leitfaden für Geflügel, 2020

**GEFIEDERVERSCHMUTZUNG – FLÄCHE (2., 7./8., 11. LW im Stall):**

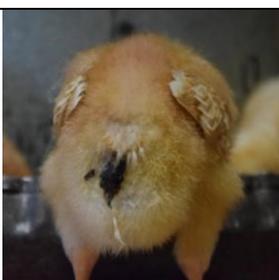
Bonitur-note	Beschreibung	Beispielfotos			
0	<p><b>Keine Verschmutzung:</b></p> <p>Saubere Federn in der Brust-Bauch- Region, sowie an den Flügeln und Beinen maximal einzelne oder mehrere abgegrenzte Verschmutzungen &lt; 0,5 cm längster Durchmesser (von vorne gesehen)</p>		Welfare Quality		FNT, Universität Kassel
1	<p><b>Leichte Verschmutzung:</b></p> <p>Verschmutzte Federn in der Brust-Bauch-Region ab ≥ 0,5 cm längster Durchmesser (von vorne gesehen)</p>		Welfare Quality		FNT, Universität Kassel
2	<p><b>Schwere Verschmutzung:</b></p> <p>Verschmutzte Federn in der Brust-Bauch-Region sowie an den Flügeln oder den Beinen ab ≥ 0,5 cm längster Durchmesser (von vorne gesehen)</p>		Welfare Quality		FNT, Universität Kassel

**GEFIEDERVERSCHMUTZUNG – STRUKTUR (2., 7./8., 11. LW im Stall):**

Bonitur-note	Beschreibung	Beispielfotos			
0	<p><b>Keine Verklebungen:</b></p> <p>Maximal zwei miteinander verklebte Federn in der Brust-Bauch-Region, an den Flügeln oder an den Beinen</p>		Welfare Quality		FNT, Universität Kassel
1	<p><b>Verklebungen:</b></p> <p>Mindestens drei miteinander verklebte Federn in der Brust-Bauch-Region, an den Flügeln oder an den Beinen</p>		Welfare Quality		FNT, Universität Kassel

**Methode adaptiert nach:** Saraiva et al., 2016: Feather conditions and clinical scores as indicators of broilers welfare at the slaughterhouse (Adaptiert nach Welfare Quality)

**KLOAKENVERSCHMUTZUNG (2., 7./8., 11. LW im Stall):**

Bonitur-note	Beschreibung	Beispielfotos			
0	<p><b>Keine Verschmutzung:</b></p> <p>Maximal zwei miteinander verklebte Federn in der Kloakenregion (Korridor unterhalb Kloake; Höhe = Kloakenbreite x 3) ohne Verkrustungen bzw. Verklebungen</p>		FNT, Universität Kassel		FNT, Universität Kassel
1	<p><b>Verschmutzung:</b></p> <p>Mindestens drei miteinander verklebte Federn (Korridor unterhalb Kloake; Höhe = Kloakenbreite x 3) mit Verkrustungen bzw. Verklebungen</p>		FNT, Universität Kassel		FNT, Universität Kassel

**DURCHFALL (Wiederholte Erhebungen im Stall):**

Bonitur - note	Beschreibung	Beispielfotos	
0	<b>Feste Kotkonsistenz:</b>  Fester, geformter Kot		
1	<b>Weiche Kotkonsistenz:</b>  Weich-pastöser, nur wenig geformter Kot		
2	<b>Flüssige Kotkonsistenz:</b>  Flüssiger, ungeformter Kot		

**Methode adaptiert nach:** Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, 2020

Annex III: Beurteilerübereinstimmungen

Die Beurteilerübereinstimmungen wurden jeweils mit einem Silberstandard bezüglich der tierbezogenen Tierwohlindikatoren verglichen (n = Anzahl Beurteilungen).

Parameter	Beurteiler:in A				Beurteiler:in B				Beurteiler:in C			
	MW	Min	Max	n	MW	Min	Max	n	MW	Min	Max	n
Fußballen- veränderungen	0.75	0.42	0.93	111	0.77	0.54	1.00	231	0.84	0.75	0.95	120
Fersenhöcker- veränderungen	0.88	0.83	0.93	111	0.87	0.65	1.00	231	0.89	0.85	0.95	120
Gefiederver- schmutzung - Fläche	1.00	1.00	1.00	40	0.85	0.65	0.95	160	0.79	0.60	1.00	120
Gefiederver- schmutzung - Struktur	1.00	1.00	1.00	40	0.88	0.67	1.00	160	0.82	0.67	1.00	120
Kloaken- verschmutzung	0.98	0.96	1.00	111	0.79	0.47	1.00	191	0.58	0.33	0.80	120
Kotkonsistenz	0.83	0.83	0.83	26	0.88	0.80	0.95	116	0.87	0.80	0.90	60

Parameter	Beurteiler:in D				Beurteiler:in E			
	MW	Min	Max	n	MW	Min	Max	n
Fußballen- veränderungen	0.74	0.64	0.82	212	0.68	0.61	0.76	200
Fersenhöcker- veränderungen	0.69	0.38	0.85	212	0.73	0.67	0.79	200
Gefiederver- schmutzung - Fläche	0.58	0.46	0.79	212	0.59	0.56	0.60	200
Gefiederver- schmutzung - Struktur	0.54	0.33	0.72	212	0.67	0.52	0.88	200
Kloaken- verschmutzung	0.82	0.67	0.88	212	0.84	0.79	0.91	200
Kotkonsistenz	0.69	0.67	0.70	200	0.79	0.61	0.94	200

<b>PABAK</b>	0.61-1	0.41-0.60	0.00-0.40
<b>Bewertung*</b>	gut	akzeptabel	schlecht

\* in Anlehnung an die Einordnung von Kappawerten durch Landis und Koch (1977)

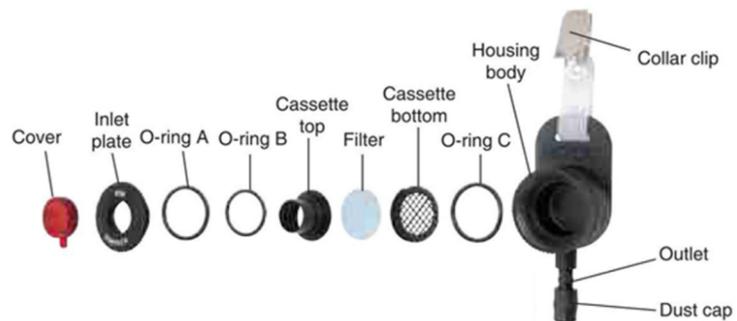
## Annex IV: Methodik der Staubmessung

Die gravimetrische Bestimmung der Staubgehalte der Stallluft basiert auf der Sammlung von Staub aus einem definierten Luftvolumen mithilfe eines an eine Pumpe angeschlossenen Filters und der anschließenden Wägung des staubbeladenen Filters zur Ermittlung der Staubmenge. Zur Staubsammlung kamen zwei Universalpumpen zur Luftprobenahme („AIRCHEK SAMPLER“ Model 224-PCXRR8 des Herstellers SKC Inc., USA) und sechs Filterköpfe desselben Herstellers („IOM Inhalable Sampler“) zum Einsatz (Abbildung A1 und Abbildung A2). Bei den eingesetzten Filterköpfen handelte es sich um Glasfaserfilter mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Porengröße von 1.6 µm (Modell „Whatman™ GF/A“ CAT No. 1820-025 des Herstellers GE Healthcare Life Sciences, UK). Die Wägung von Filter und Staub erfolgte mit der Präzisionswaage „Quintix“ von Sartorius (Göttingen, DE).

In Vorbereitung auf die Messungen wurden Filter und Filterträger („Cassette bottom“) eingewogen und das entsprechende Gewicht notiert. Anschließend wurde der zusammengesetzte Filterkopf über 24 h bei gleichbleibender Raumtemperatur von ca. 20°C gelagert, wobei die Abdeckungen auf Luftzu- und -abfuhr („Dust cap“ und „Cover“) aufgesetzt waren.



**Abbildung A1** Pumpe zur Luftprobenahme „AIRCHEK SAMPLER“, SKC Inc., USA, Quelle: [www.skcltd.com](http://www.skcltd.com)



**Abbildung A2** Aufbau und Bestandteile des verwendeten Filterkopfes, Quelle: [www.skcltd.com](http://www.skcltd.com)

Am Einsatzort wurden die Abdeckungen entfernt und die Filterköpfe über einen Schlauch (Innendurchmesser 7 mm) mit der Pumpe verbunden. Die Einstellung der Pumpe auf einen Durchfluss von 2 Liter Luft/Minute erfolgte unter Zuhilfenahme eines externen Rotameters (Modell „2510“ von Brooks Instrument, USA). Während der Staubsammlung wurden die Pumpen in einem Schutzkasten (Abbildung A4) an zentraler Stelle an der Zwischenwand im Stall untergebracht, um sie vor Verschmutzung und Beschädigung bzw. Veränderung der Einstellungen durch die Tiere zu schützen. Der PVC-Schlauch mit dem Filterkopf wurde auf Kopfhöhe der Masthüher (10-35 cm) nach außen geführt. Nach Beendigung der Staubsammlung wurden die Filterköpfe vom Schlauch entfernt, die Abdeckungen wieder aufgesetzt und die Filterköpfe anschließend erneut 24 h bei gleichbleibender Raumtemperatur gelagert, jedoch mit geöffneter Abdeckung zur Luftweiterleitung, um ein Entweichen eventueller Feuchte zu ermöglichen (Abbildung A5). Anschließend erfolgte die Rückwaage von Filter und Filterträger und die entsprechende Berechnung der gesammelten Staubmengen aus der Differenz zwischen Ein- und Rückwaage. Die Filterköpfe wurden abschließend mit 70

%iger Isopropanol-Lösung gereinigt, getrocknet und für den nächsten Messdurchgang vorbereitet.



**Abbildung A3** Hühnertypisches Erkundungsverhalten bei der Installation der Staubmessgeräte im Stall (Bildautor: Umbach).

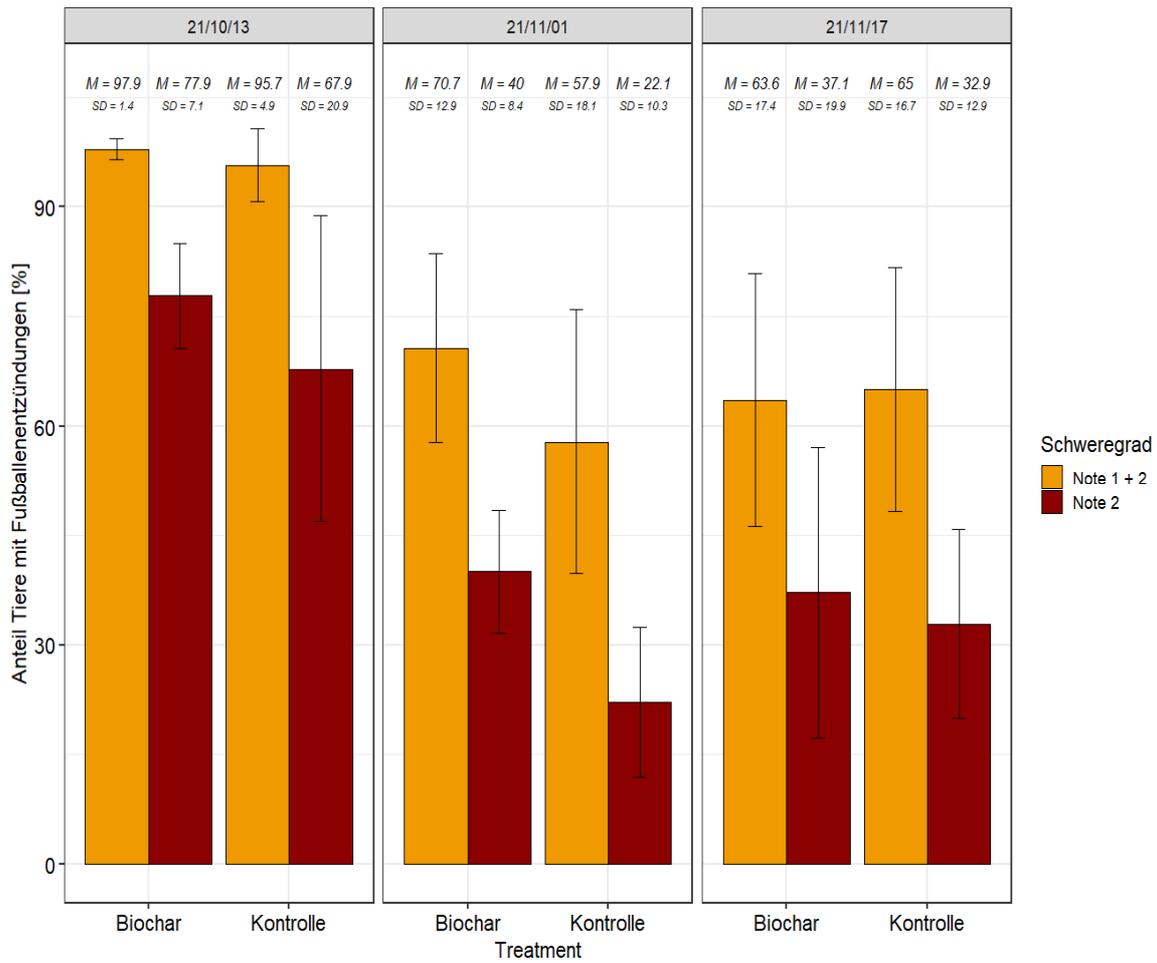


**Abbildung A4** Anbringung eines Schutzkastens für die Pumpe im Stall (Bildautor: Umbach).



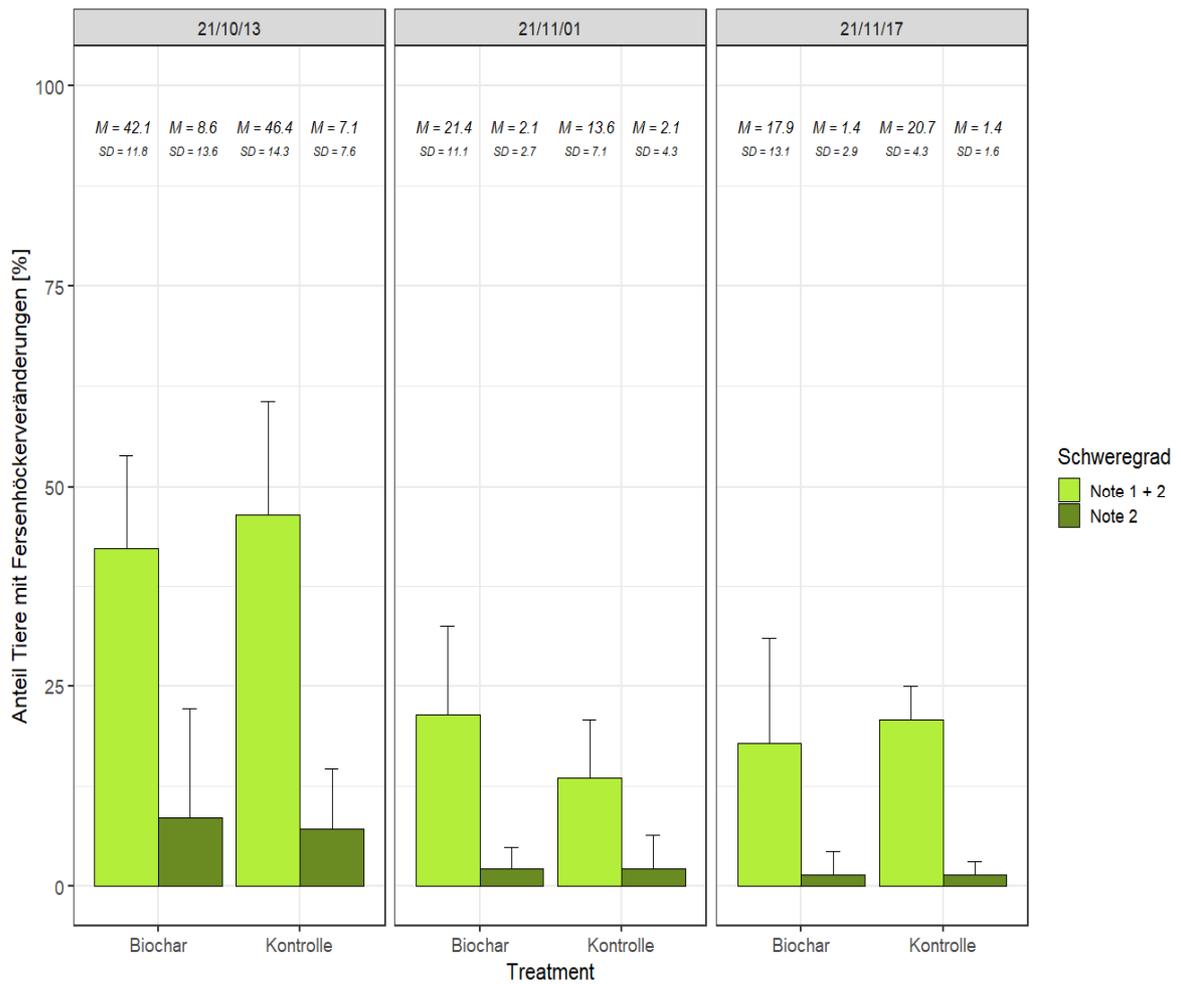
**Abbildung A5** Entnommene staubbeladene Filter nach einer Messdauer von 24 h auf Filterträgern (Bildautor: Umbach).

Annex V: Ergebnisse der ersten Versuchsphase



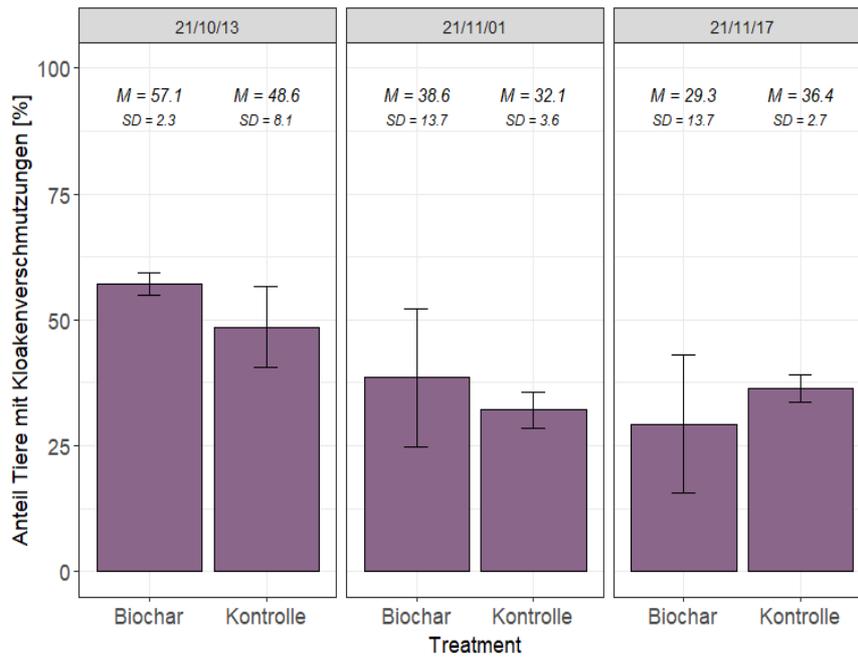
**Abbildung A6** Fußballentzündungen

Anteil aller Tiere mit Fußballentzündungen (Gelbe Balken) und Anteil der Tiere mit schweren Fußballentzündungen (rote Balken) an den drei Boniturterminen (13.10.: 9. Lebenswoche, 01.11.: 11. Lebenswoche, 17.11.2021: 14. Lebenswoche) in den Pflanzenkohle- und -kontrollgruppen; Angabe der Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) über den entsprechenden Balken.



**Abbildung A7** Fersenhöckerveränderungen

Anteil aller Tiere mit Fersenhöckerveränderungen (Hellgrüne Balken) und Anteil der Tiere mit schweren Fersenhöckerveränderungen (dunkelgrüne Balken) an den drei Boniturterminen (13.10.: 9. Lebenswoche, 01.11.: 11. Lebenswoche, 17.11.2021: 14. Lebenswoche) in den Pflanzenkohle- und -kontrollgruppen; Angabe der Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) über den entsprechenden Balken.



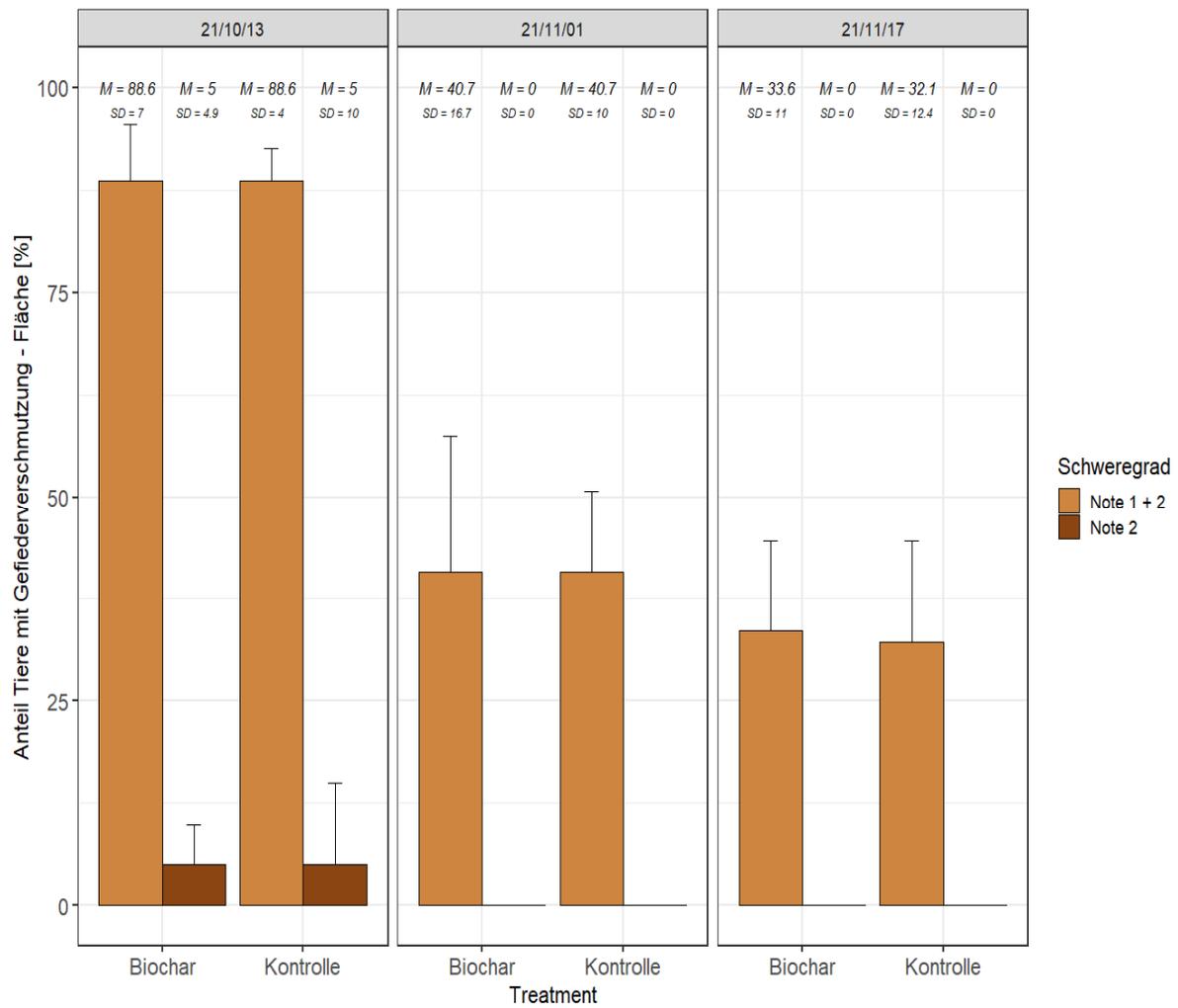
**Abbildung A8** Kloakenverschmutzungen

Anteil der Tiere an den drei Boniturterminen (13.10.: 9. Lebenswoche, 01.11.: 11. Lebenswoche, 17.11.2021: 14. Lebenswoche) in den Pflanzenkohle- und -kontrollgruppen; Angabe der Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) über den entsprechenden Balken. mit Gefiederverschmutzung (Fläche).

Die Beurteilung der **Kotkonsistenz** wurde in den Versuchsställen im Anschluss an die zweite und dritte Bonitur vorgenommen. Flüssiger Kot der Boniturnote 2 wurde nicht nachgewiesen, weicher Kot (Note 1) machte einen geringen Anteil aus (Tabelle A1).

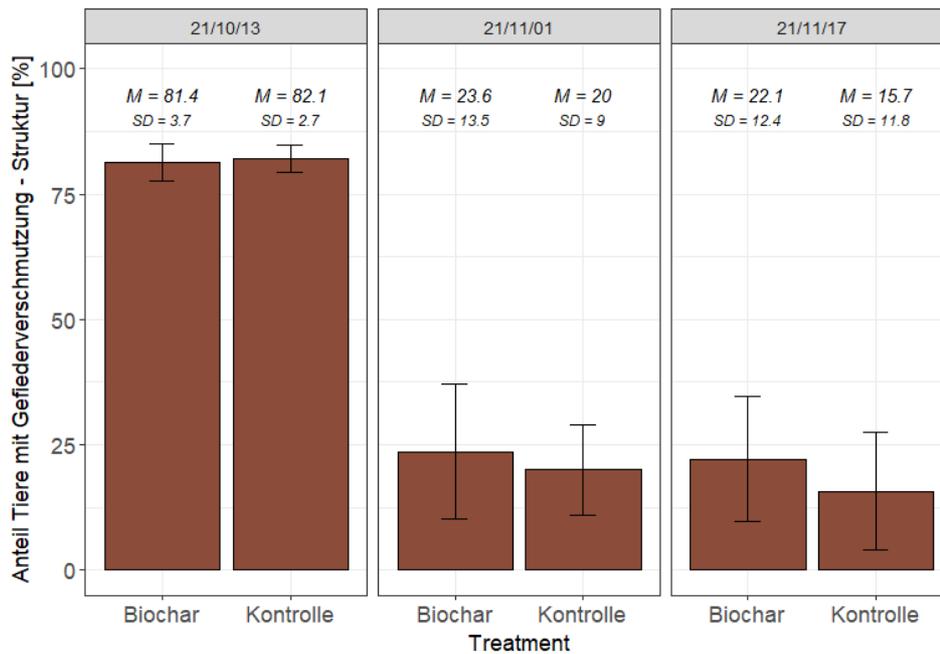
**Tabelle A1** Anteil von Kot der Note 1 [in %] an zwei Boniturzeitpunkten in den Pflanzenkohle- und Kontrollgruppen (angegeben ist jeweils der Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung).

	Boniturzeitpunkt	
	11. Lebenswoche	14. Lebenswoche
<b>Ohne Pflanzenkohle</b>	2.3 $\pm$ 3.3	0.7 $\pm$ 1.5
<b>Mit Pflanzenkohle</b>	3.6 $\pm$ 1.4	2.9 $\pm$ 2.3



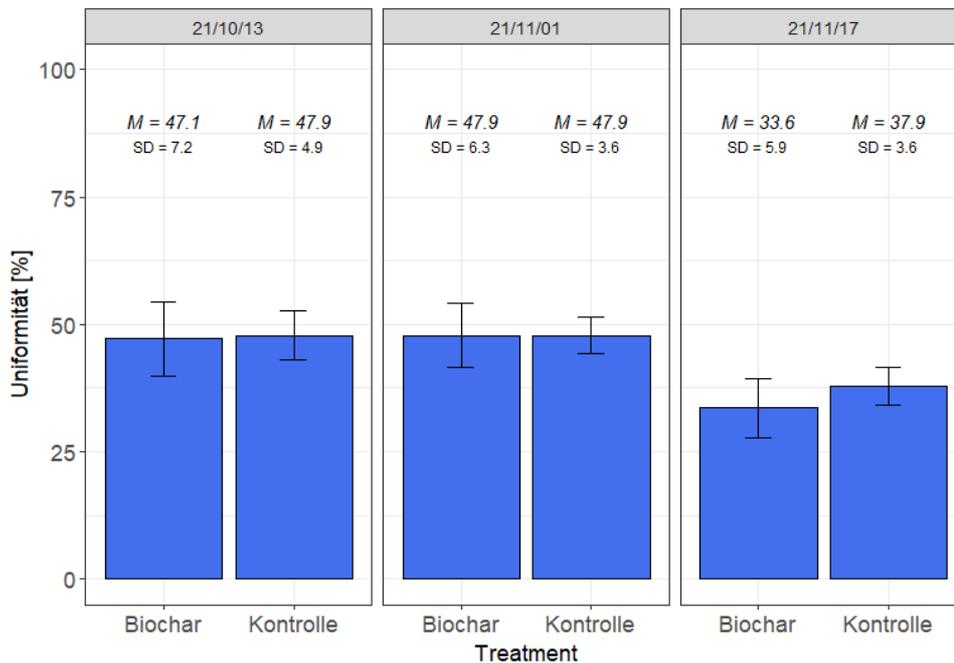
**Abbildung A9** Gefiederverschmutzung (Fläche)

Anteil aller Tiere mit Gefiederverschmutzung (Hellbraune Balken) und Anteil der Tiere mit starken Gefiederverschmutzungen (dunkelbraune Balken) an den drei Boniturterminen (13.10.: 9. Lebenswoche, 01.11.: 11. Lebenswoche, 17.11.2021: 14. Lebenswoche) in den Pflanzenkohle- und -kontrollgruppen; Angabe der Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) über den entsprechenden Balken.



**Abbildung A10** Gefiederverklebungen (Struktur)

Anteil der Tiere mit an den drei Boniturterminen (13.10.: 9. Lebenswoche, 01.11.: 11. Lebenswoche, 17.11.2021: 14. Lebenswoche) in den Pflanzenkohle- und -kontrollgruppen; Angabe der Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) über den entsprechenden Balken.



**Abbildung A11** Uniformität der Tiere

Hier [in %] an den drei Boniturterminen (13.10., 01.11., 17.11.2021) in den Pflanzenkohle- und -kontrollgruppen; Angabe der Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) über den entsprechenden Balken.

**Tabelle A2** Gemessene Staubmengen in mg/m<sup>3</sup> in Gruppen mit und ohne Kohleeinsatz in der Einstreu (n=4).

	<b>Staubmenge in mg/ m<sup>3</sup></b>		
	Mittelwert ± SD	Minimum	Maximum
Erste Messkampagne (Alter der Masthühner: 11 Wochen)			
Ohne Pflanzenkohle	1.58 ± 0.67	0.60	2.10
Mit Pflanzenkohle	1.55 ± 0.37	1.00	1.80
Zweite Messkampagne (Alter der Masthühner: 13 Wochen)			
Ohne Pflanzenkohle	1.93 ± 0.46	1.40	2.20
Mit Pflanzenkohle	1.90 ± 0.56	1.10	2.40

**Tabelle A3** Gemessene NH<sub>3</sub>-Konzentration in ppm in der Einstreu in unterschiedlichen Bereichen des Stalls unter Berücksichtigung des Kohlezusatzes in der Einstreu (n=4).

Gruppe	<b>Ammoniakkonzentration in ppm</b>	
	<b>Tränkebereich</b> Mittelwert ± SD	<b>Ruhebereich</b> Mittelwert ± SD
Kohle	49.5 ± 6.5	42.5 ± 47.1
Kontrolle	55.1 ± 22.9	52.4 ± 13.6

## OG CAREFUL

Annex VI: Erstelltes Factsheet zum CAREFUL-Projekt, welches zum Download in der REVEAL Lehr- und Lern-App für die Öffentlichkeit bereitgestellt wird

# eip-agri OG CAREFUL



Research Project

Fact Sheet

## eip-agri OG CAREFUL

Residual biomasses to (activated) carbon:  
Prevention of footpad lesions in poultry husbandry



Project Lead  
Prof. Dr. Ute Knierim  
Farm Animal Behaviour  
and Animal Husbandry  
[knierim@uni-kassel.de](mailto:knierim@uni-kassel.de)

Prof. Dr. M. Wachendorf  
& Dr.-Ing. Korbinian Kaetzl  
Grassland Science and  
Renewable Plant  
Resources  
[mwach@uni-kassel.de](mailto:mwach@uni-kassel.de)

Project Coordination  
Dr. habil. Kathrin Stenchly  
[stenchly@uni-kassel.de](mailto:stenchly@uni-kassel.de)  
Dr. Anna Olschewsky  
[olschewsky@uni-kassel.de](mailto:olschewsky@uni-kassel.de)

Project Aim

- Testing the applicability of biochar as a litter additive in broiler farming to improve animal welfare through prevention or reduction of footpad lesions and reduction of ammonia emissions
- Biochar is made from residual biomass of the North Hesse region
- The use of previously unused biomass is further intended to close regional material cycles and establish sustainable value chains

Financially supported by:



Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums: Hier investiert Europa in die ländlichen Gebiete.



Project Region & Partner

Representatives from agriculture, business, science and consulting in North Hesse, *i.a.*



PowerWave Projects  
Rüddenklau Bioenergie GbR  
*Associated Partner:*  
Bioland Hessen e.V.  
Geflügelwirtschaftsverband  
Hessen e.V.

Project Duration: March 2020 – June 2023

UNI KASSEL | ORGANIC  
VERSITÄT | AGRICULTURAL  
SCIENCES



Annex VII: Kurzstudie zur Quantifizierung des Restbiomassepotenzials in Nordhessen

# 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



U N I K A S S E L  
V E R S I T Ä T  
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

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

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1</b> 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
<b>Tabelle 2</b> Geschätztes technisches Biomassepotential von Produkten aus der Forstwirtschaft Nordhessens im Jahr 2020 und 2030, Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu). .....	4
<b>Tabelle 3</b> Geschätztes technisches Restbiomassepotential von Produkten aus der Forstwirtschaft (Waldrestholz) Nordhessens im Jahr 2020 und 2030, Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu). .....	5
<b>Tabelle 4</b> Geschätztes technisches Restbiomassepotential von Baumstümpfen als forstwirtschaftliches Produkt (Waldrestholz) in Nordhessen im Jahr 2020 und 2030, Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu). .....	5
<b>Tabelle 5</b> Geschätztes technisches Biomassepotenzial von <i>Miscanthus x giganteus</i> in Nordhessen im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu). .....	7
<b>Tabelle 6</b> Geschätztes technisches Biomassepotenzial ausgewählter landwirtschaftlicher Restbiomassen im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu). .....	8
<b>Tabelle 7</b> Geschätztes technisches Restbiomassepotenzial von Straßenbegleitgrün im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu). .....	10
<b>Tabelle 8</b> Geschätztes technisches Potenzial von Restbiomassen aus Sägewerken im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu). .....	11
<b>Tabelle 9</b> 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
<b>Tabelle 10</b> Geschätztes technisches Potenzial von Getreidekleie im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu). .....	13
<b>Tabelle 11</b> Geschätztes technisches Potenzial von biologisch abbaubaren kommunalen Abfällen im Regierungsbezirk Kassel im Jahr 2020 und 2030. Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; www.s2biom.eu). .....	14
<b>Tabelle 12</b> 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 (NH<sub>3</sub>) 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.

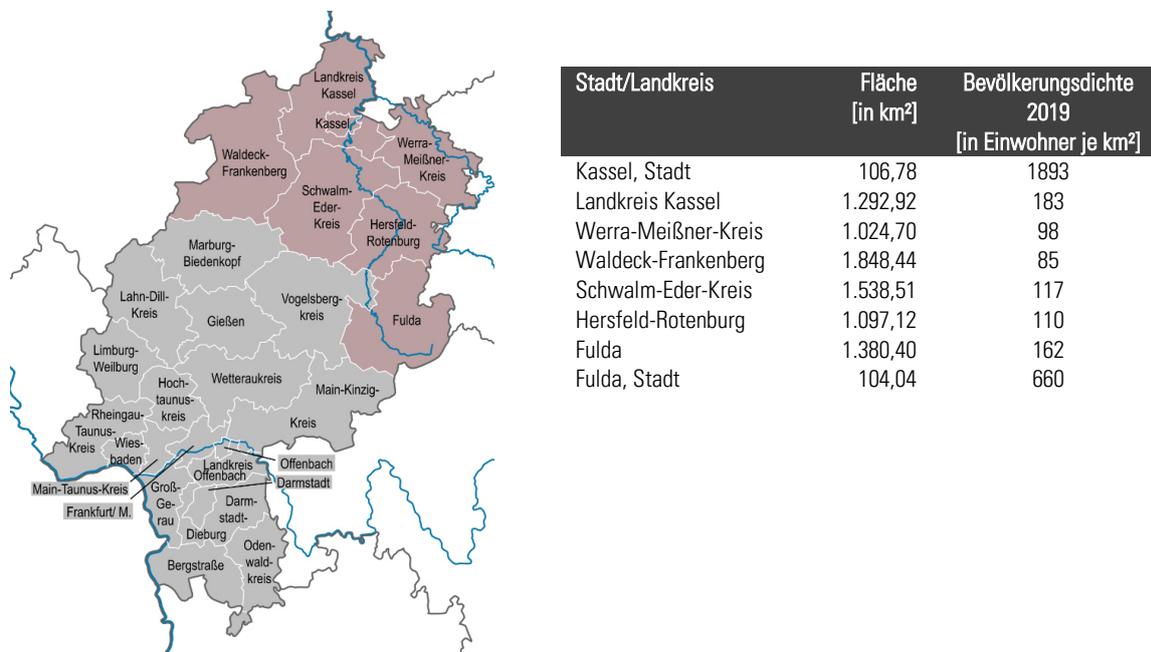
### ***Restbiomassen und Ermittlung des Biomassepotenzials***

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](http://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 <sub>TM</sub> /km <sup>2</sup> ]				Biomassen von Nadelbäumen aus [in t <sub>TM</sub> /km <sup>2</sup> ]			
	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](http://www.s2biom.eu)).

Stadt/Landkreis	Restbiomassen von Laubbäumen aus [in t <sub>TM</sub> /km <sup>2</sup> ]				Restbiomassen von Nadelbäumen aus [in t <sub>TM</sub> /km <sup>2</sup> ]			
	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

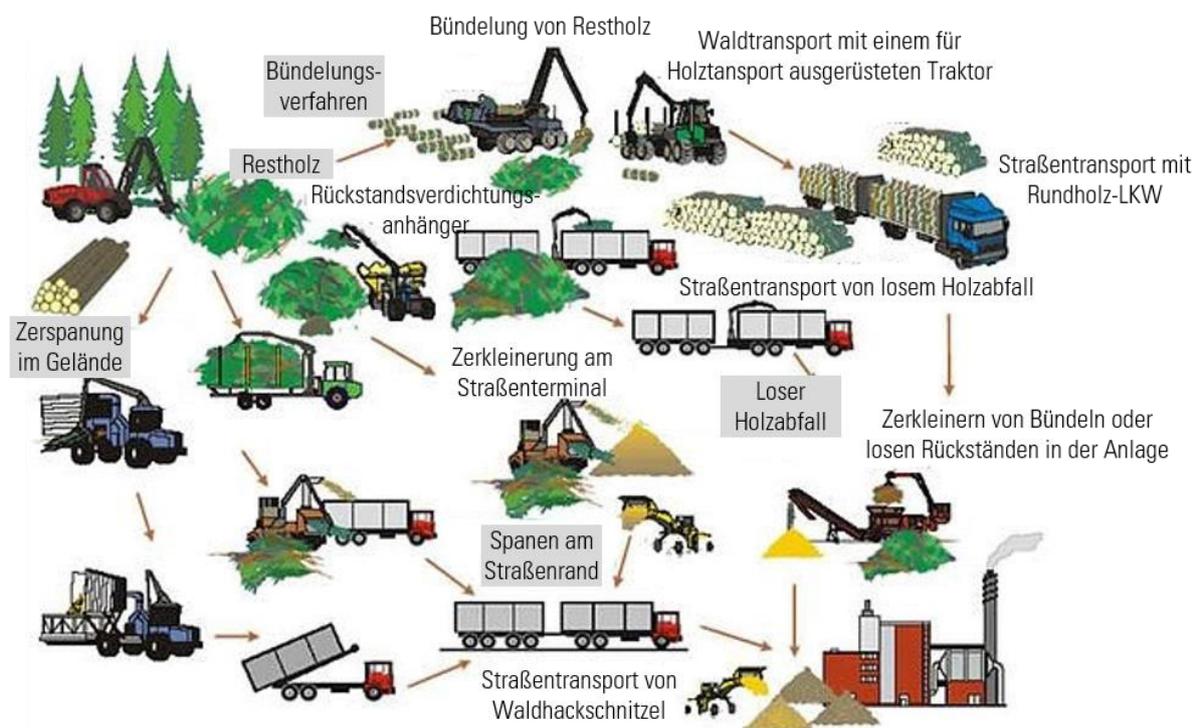
**Tabelle 4** Geschätztes technisches Restbiomassepotential von Baumstümpfen als forstwirtschaftliches Produkt (Waldrestholz) in Nordhessen im Jahr 2020 und 2030, Datenquelle: S2Biom Datenbank (FNR; [www.s2biom.eu](http://www.s2biom.eu)).

Stadt/Landkreis	Stümpfe von Endeinschlag [in t <sub>TM</sub> /km <sup>2</sup> ]			
	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 <sub>TM</sub> /km <sup>2</sup> ]	
	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](http://www.s2biom.eu)).

Stadt/Landkreis	Landwirtschaftliche Restbiomassen [in t <sub>TM</sub> /km <sup>2</sup> ]					
	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 km<sup>2</sup> 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<sub>TM</sub>/km<sup>2</sup> 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](http://www.s2biom.eu)).

Stadt/Landkreis	Straßenbegleitgrün [in t <sub>TM</sub> /km <sup>2</sup> ]	
	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 km<sup>2</sup> 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 <sub>TM</sub> /km <sup>2</sup> ]							
	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 <sub>TM</sub> /km <sup>2</sup> ]							
	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 Aufschlämmung 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](http://www.s2biom.eu)).

Stadt/Landkreis	Geschätzte Biomasse von Getreidekleie [in t <sub>TM</sub> /km <sup>2</sup> ]	
	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](http://www.s2biom.eu)).

Stadt/Landkreis	Geschätzte Biomasse von biologisch abbaubaren kommunalen Abfällen [in t <sub>TM</sub> /km <sup>2</sup> ]			
	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 <sub>M</sub> /km <sup>2</sup> ]			
	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.

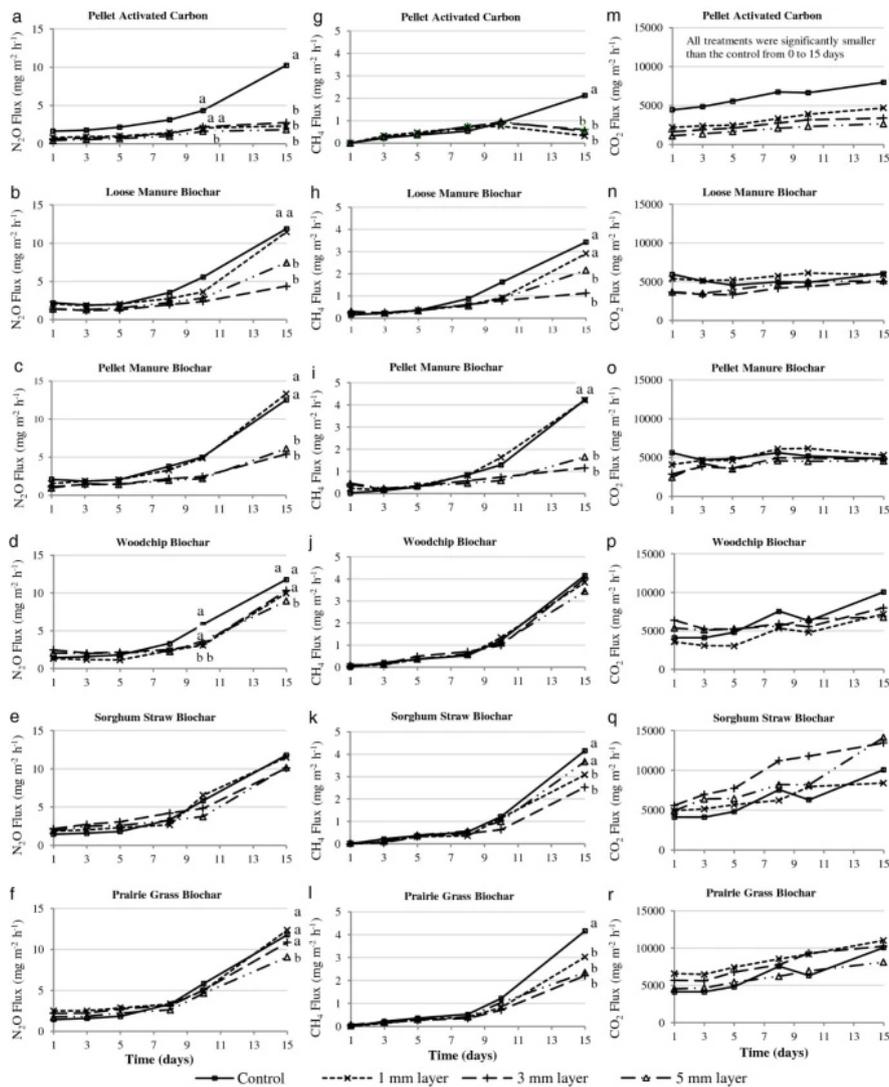


**Abbildung 9** Pflanzenkohle aus Getreidespelzen als Einstreuzusatz in der Tierhaltung.

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 ( $\text{N}_2\text{O}$ ), umgangssprachlich auch als Lachgas bezeichnet, Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlestoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) in Rindermastställen [51]. Die Ergebnisse zeigten, dass die topische Anwendung von organischen Rückständen und Kohle auf trockener Gülle eine signifikante Reduzierung der  $\text{N}_2\text{O}$ - und  $\text{CO}_2$ -Emissionen zeigte, aber keinen Einfluss auf die  $\text{CH}_4$ -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  $\text{N}_2\text{O}$ - (bis zu 63 %) und  $\text{CH}_4$ -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  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen aus Futtermittelgülle zu sein. Jedoch auch andere Mechanismen wie z.B. die  $\text{NH}_4^+$  - Immobilisierung,  $\text{NO}_3^-$  - Adsorption und  $\text{NH}_4^+$  - Adsorption spielen höchstwahrscheinlich bei der  $\text{N}_2\text{O}$ -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 Verdauungsbreies 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 m<sup>2</sup> Stallboden in einem Hähnchenstall ein. Es konnte festgestellt werden, dass die Einstreu scharrfähiger 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](http://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](http://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](http://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*, 2<sup>nd</sup> 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] Giroto, 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.; Edelmann, 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  $\beta$ -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*; Rüegger, **1987**.
- [30] Hekkert, M.P.; Joosten, L.A.J.; Worrell, E. Reduction of CO<sub>2</sub> 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 N<sub>2</sub>O 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](http://www.biomassehof.de), (rechts) [www.sonnenerde.at](http://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.