



Nationale Drehscheibe  
Ammoniak

# Einsatz von Pflanzenkohle in der Hofdünger- kaskade zur Reduktion von Ammoniakemissionen

Thomas Kupper

Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Zollikofen

04.02.2025

## ***Zusammenfassung***

Pflanzenkohle basierend auf der Pyrolyse von Biomasse wird oft eine Wirkung zur Reduktion von Ammoniakemissionen bei Verfütterung an Nutztiere, bei Zugabe zu Hofdüngern oder Ausbringung auf den Boden zugeschrieben. In der vorliegenden Literaturstudie wird der Stand des Wissens hinsichtlich Reduktion von Ammoniakemissionen durch Verwendung von Pflanzenkohle in der Hofdüngerkaskade dokumentiert.

Die Datenlage ist nicht einheitlich, wobei teilweise eine deutliche Minderung von Ammoniakemissionen gefunden wird. Ein eindeutiger Trend in Richtung Emissionsreduktion liegt jedoch nicht vor. Die Publikationen basieren überwiegend auf Untersuchungen im Labormassstab und müssen als «Proofs of concept» betrachtet werden. Weiter sind die Eigenschaften und die Anwendung von Pflanzenkohle im Hinblick auf eine Reduktion von Ammoniakemissionen unklar bzw. nicht definiert. Der Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierproduktion sollte gemäss aktuellem Kenntnisstand nicht als Technik zur Minderung von Ammoniakemissionen in der Hofdüngerkaskade (Weide, Stall/Laufhof, Hofdüngerlagerung/-ausbringung) betrachtet werden. Obwohl die vorliegende Studie aufgrund der Fülle an Literatur zu diesem Thema keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat, kann diese Schlussfolgerung als gültig betrachtet werden<sup>1</sup>. Jedoch sollten neue Studien laufend gesichtet und die vorliegende Bewertung darauf basierend überprüft werden.

---

<sup>1</sup> Die vorliegende Literaturstudie hat gezeigt, dass kaum Studien vorliegen, welche für Praxisbedingungen repräsentativ sind, bzw. welche nach dem aktuellen Stand des Wissens für den Wirkungsnachweis einer Technik zur Reduktion von Ammoniakemissionen erforderlich sind.

# 1 Einleitung

Pflanzkohle wird durch Pyrolyse von Biomasse gewonnen. Dabei wird eine schnelle Oxidation des in der Biomasse vorliegenden Kohlestoffs zu CO<sub>2</sub> verhindert (Schmidt et al., 2021). Ihre Verwendung in der Landwirtschaft umfasst die Tierfütterung, die Zugabe zu Hofdüngern (z.B. zur Einstreu, zu Lagerung oder aerober Kompostierung) oder zur direkten Ausbringung auf den Boden. Herstellung und Anwendung von Pflanzkohle tragen zur Sequestrierung von Kohlenstoff und zur Minderung des Treibhauseffekts bei. Im Rahmen einer Auswertung von 26 Meta-Analysen, welche die Auswirkungen der Anwendung von Pflanzkohle auf Bodeneigenschaften und agronomische Parameter untersucht haben (z.B. Auswirkungen auf Ertrag, Wurzelbiomasse, Wassernutzungseffizienz, mikrobielle Aktivität, Treibhausgasemissionen), fanden Schmidt et al. (2021) insgesamt eine positive Wirkung von Pflanzkohle auf die untersuchten Parameter.

Über diese positiven Wirkungen hinaus stellt sich oft die Frage, ob der Einsatz von Pflanzkohle in der Landwirtschaft eine Reduktion von Ammoniakemissionen in der Hofdüngerkaskade (Weide, Stall/Laufhof, Hofdüngerlagerung/-ausbringung) bewirkt. Effekte hinsichtlich Emissionsminderung werden der Sorption von Ammonium, Harnstoff oder Harnsäure als Ausgangssubstanzen von Ammoniak (NH<sub>3</sub>) an die Oberfläche von Pflanzkohle zugeschrieben (Clough, Condron, 2010; Clough et al., 2013; Kalus et al., 2019; Steiner et al., 2010; Yin et al., 2021) oder der Förderung von mikrobiellen Prozessen, welche die Immobilisierung von Stickstoff erhöhen (Hung et al., 2022; Yin et al., 2021). Kizito et al. (2016) und Ye et al. (2022) konnten beispielsweise die Sorption von Ammonium in Gärgülle an Pflanzkohle nachweisen.

Die Frage der Wirksamkeit von Pflanzkohle zur Reduktion von Ammoniakemissionen wird im vorliegenden Bericht untersucht. Dabei ist zu unterscheiden, ob Pflanzkohle via Futtermittel an die Tiere verabreicht, ob sie direkt in den Stall, in den Laufhof oder auf landwirtschaftliche Böden ausgebracht wird oder Hofdüngern während der Lagerung oder der Aufbereitung zugegeben wird. Weiter ist zu differenzieren, ob eine Emissionsreduktion auf der Weide, im Stall oder Laufhof und/oder während der Lagerung oder der Ausbringung der Hofdünger erfolgt bzw. angerechnet werden soll.

## 2 Methodisches Vorgehen

Im Rahmen einer Literaturrecherche mittels Web of Science wurde nach den folgenden Stichworten zum Thema Pflanzkohle gesucht:

Zugabe zu Futtermitteln:

livestock or cattle or cow\* or pig\* or sow\* or hog\* or poultry or broiler\* or hen\* (All Fields) and biochar\* (All Fields) and ammonia (All Fields) and emission\* (All Fields) and feed\* (All Fields)

Ausbringung im Stall oder Laufhof:

livestock or cattle or cow\* or pig\* or sow\* or hog\* or poultry or broiler\* or hen\* (All Fields) and biochar\* (All Fields) and ammonia (All Fields) and emission\* (All Fields) and litter\* (All Fields)

livestock or cattle or cow\* or pig\* or sow\* or hog\* or poultry or broiler\* or hen\* (All Fields) and biochar\* (All Fields) and ammonia (All Fields) and emission\* (All Fields) and hous\* or barn\* (All Fields)

Zugabe zu Hofdüngern/Ausbringung Hofdünger:

livestock or cattle or cow\* or pig\* or sow\* or hog\* or poultry or broiler\* or hen\* (All Fields) and biochar\* (All Fields) and ammonia (All Fields) and emission\* (All Fields) and slurry or solid manure (All Fields)

Meist resultierten in der Suche keine oder wenige Treffer. Mittels Suche nach Artikeln, die in vorhandenen Studien zitiert waren, liessen sich jedoch etliche Artikel mit Informationen zu Pflanzenkohle und Ammoniakemissionen identifizieren.

Nicht berücksichtigt wurde der Effekt von Pflanzenkohle, beim Einsatz dieser als Abdeckung von Güllelagern, da in der Schweiz nur dauerhaft wirksame Abdeckungen (feste Konstruktionen oder Schwimmfolien; BAFU, BLW, 2011) als emissionsmindernde Massnahme zugelassen sind<sup>2</sup>. Weiter wurden Studien zu den Bereichen Reisanbau, der Rekultivierung von Bauxit Abraumhalden oder dem Einsatz bei der Klärschlammbehandlung wegen mangelnder Relevanz für die Schweizer Landwirtschaft weggelassen. Weiter wurden Studien weggelassen, welche grundlegende Anforderungen hinsichtlich Emissionsmessungen nicht erfüllen (z.B. ausschliesslich Messung von Ammoniakkonzentrationen; vgl. Anhang).

Die Resultate sind in der Folge zusammenfassend dargestellt. Die Eigenschaften der Pflanzenkohlen wie Ausgangsmaterial oder Pyrolysetemperatur dürften für einen Effekt hinsichtlich Emissionsreduktion wichtig sein. Da derzeit aber keine Informationen vorliegen, welche Eigenschaften im Hinblick auf eine Reduktion von Ammoniakemissionen von Bedeutung sind, wurden diese hier nicht dokumentiert. Wenn die verwendeten Pflanzenkohlen zusätzlich gezielt behandelt wurden (z.B. mittels Säure), um ihre Eigenschaften zu beeinflussen, wird dies im Sinne der Vollständigkeit erwähnt.

### 3 Resultate und Diskussion

#### 3.1 Weide

Messdaten von Emissionen von Weiden, die unter Praxisbedingungen erhoben wurden, sind nicht verfügbar. In einer Laborstudie beobachteten Clough et al. (2010) eine Zunahme der Ammoniakemissionen um 21 % bei Zugabe von Rinderharn kombiniert mit Pflanzenkohle auf einen Weideboden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Resultate von Studien zur Reduktion von Ammoniakemissionen mit Verwendung von Pflanzenkohle, welche die Bedingungen auf einer Weide simulieren. Angegeben sind folgende Versuchsparameter: die Menge ausgebrachte Pflanzenkohle (in t pro ha), die Bodenmenge im Versuch in kg sowie die Dauer der Emissionsmessung in Tagen.

Substrate	Menge Pflanzenkohle	Menge in kg	Emissionsmessung in Tagen	Emissionsreduktion		Quelle
Rinderharn	20 t/ha	0.12	17	nein	-	Clough et al. (2010)

#### 3.2 Stall oder Laufhof

Pereira et al. (2024) untersuchten die Zugabe von Pflanzenkohle zur Einstreu von Mastpoulets (Hobelspäne als Einstreu; Anteil Pflanzenkohle in der Einstreu: 10% Gewichtsanteil; Versuchsabteile mit 20 Mastpoulets; 0.090 m<sup>2</sup> pro Tier). Sie beobachteten eine Emissionsreduktion für NH<sub>3</sub> von 58% basierend auf Emissionsmessungen im Rahmen einer Fall-Kontroll-Studie in einem Emissionsversuchsstall. Sperber et al. (2022) untersuchten die N-Verluste mit Ausbringung von Pflanzenkohle auf die Oberfläche eines Feedlots für Mastrinder während je rund 150 Tagen im Sommer und im Winter (Ausbringmengen: 1.40 kg pro m<sup>2</sup>) im Praxismasstab. Die N-Verluste wurden mittels Wägung, Analysen der Futtermittel und der Ausscheidungen sowie Analysen des Bodens des Feedlots und

<sup>2</sup> Beim Einsatz von Pflanzenkohle zur Abdeckung von Güllelagern wird der Luftaustausch zwischen emittierender Oberfläche und Umgebung vermindert. Dieser Effekt wurde auch für feste Abdeckungen bzw. andere Materialien Stroh nachgewiesen (Kupper et al., 2020, Vanderzaag et al., 2008; vgl. Anhang).

anschliessender Bilanzrechnung bestimmt. Dabei resultierten keine Unterschiede zwischen dem Verfahren mit Pflanzenkohle und der Referenz.

### 3.3 Lagerung

Sämtliche aufgeführten Studien wurden im Labormassstab durchgeführt, in welchen eine kleine Menge von Gülle oder Mist (wenige Liter oder weniger) mit und ohne Zugabe von Pflanzenkohle in einer Kammer exponiert wurde. Der Gewichtsanteil Pflanzenkohle in den Hofdüngern lag bei 1 bis 5%. Die Luft in der Kammer oder die durchströmende Luft wurde beprobt und deren Ammoniakkonzentration gemessen. Soweit der Luftdurchfluss erfasst wurde, erfolgte eine Bestimmung des Ammoniakflusses. Dieser Ansatz entspricht zwar nicht exakt einer Emissionsmessung aus einem Hofdüngerlager, ist aber am ehesten damit vergleichbar.

Bei etwa der Hälfte der Studien liegt eine Emissionsreduktion von meist ca. 20 bis 50% vor (Tabelle 2). Ein Zusammenhang zwischen der Aufwandmenge Pflanzenkohle und Emissionsreduktion schien nicht vorzuliegen. Häni et al. (2012) fanden bei einer unbehandelten Pflanzenkohle keine Emissionsreduktion. Bei Behandlung mit Phosphorsäure (Einlegen der Pflanzenkohle in Säure während 5 Tagen) erfolgte eine sehr starke Reduktion der Emissionen, die unter anderem auch durch Vorliegen frei verfügbarer Säure verursacht worden sein könnte.

Pflanzenkohle schwimmt nach dem Einbringen in die Gülle im Laufe der Lagerung zumindest teilweise auf der Oberfläche der Gülle auf. Dies wirkt ähnlich wie eine Abdeckung, d.h. bewirkt eine Verminderung des Luftaustauschs zwischen emittierender Oberfläche und Umgebung. Dieser Einfluss ist schwierig von den spezifischen der Pflanzenkohle zugeschriebenen Effekten (z.B. Sorption von Ammonium, Veränderung pH-Wert) zu unterscheiden. In der Studie von Holly et al (2017) war beispielsweise der grösste Teil der beobachteten Emissionsreduktion auf Verminderung des Luftaustauschs an der Oberfläche zurückzuführen.

Tabelle 2: Resultate von Studien zur Reduktion von Ammoniakemissionen während der Lagerung von Hofdüngern mit Verwendung von Pflanzenkohle. Angegeben sind folgende Versuchsparameter: der Anteil Pflanzenkohle im Hofdünger (in Gewichtsprozent Frischgewicht), die Hofdüngermenge im Versuch in Liter sowie die Dauer der Emissionsmessung in Tagen.

Substrate	Anteil Pflanzenkohle*	Menge in Liter	Emissionsmessung in Tagen	Emissionsreduktion		Quelle
				ja	nein	
Rindviehgülle vergoren	5%	0.1	2	ja	52%**	Covali et al. (2021)
Geflügelmist	5%	0.01	6	nein	-	Gronwald et al. (2018)
Rindviehgülle	1%	0.01	6	nein	-	
Rindviehgülle	4%***	5	20	nein	-	Häni et al. (2012)
Rindviehgülle	4%#	5	20	ja	97%	
Rindviehgülle vergoren	2.5-3.8%	16	42	ja	53-84%###	Holly et al. (2017a)
Schweinegülle	5%	60	68	nein	-	Liu et al. (2021)
Rindviehgülle	2%	20	98	nein	-	Owusu-Twum et al. (2024)
Rindviehgülle	2%	660	77	nein	-	
Schweinegülle	2.5%	6	85	ja	22%	Pereira et al. (2020)
Schweinegülle	5%	6	30	ja	20%	Pereira et al. (2022)
Geflügelmist	10%	12	90	nein <sup>5</sup>	-	Pereira et al. (2024)

Geflügelmist <sup>ss</sup>	1-4%	0.04	78	nein	-	Prasai et al. (2018)
Rindviehgülle	1%	5.98	7	ja	12%	Viaene et al. (2023)
Rindviehgülle	5%	5.98	16 <sup>sss</sup>	ja	20%	Viaene et al. (2023)

kA: keine Angabe; - Emissionsreduktion nicht quantifiziert

\* Gewichtsanteil bezogen auf das Frischgewicht von Gülle oder Mist

\*\*Behandlung der Pflanzenkohle mit Säuren oder Wasserstoffperoxid verminderte die Emissionsreduktion der Pflanzenkohle.

\*\*\*unbehandelte Pflanzenkohle

# mit Phosphorsäure behandelte Pflanzenkohle

##keine Messung von Verfahren und Kontrolle parallel

<sup>s</sup> Zugabe der Pflanzenkohle zur Einstreu bestehend aus Hobelspänen zu Beginn des Mastumtriebs 10 Gewichtsprozent relative zur Einstreu zu Beginn des Mastumtriebs (vgl. Versuchsbeschreibung Pereira et al. 2024 in Kap. 3.2). Leicht höherer Gehalt von Ammonium im Mist mit Pflanzenkohle im Vergleich zur Kontrolle ohne Pflanzenkohle. Trotzdem keine Mehremissionen mit Pflanzenkohle.

<sup>ss</sup> Zugabe der Pflanzenkohle via Fütterung

<sup>sss</sup>Nach 7 Tagen Lagerung: Zugabe von zusätzlich 40 g Pflanzenkohle pro Liter (Totale Menge: 50 g Pflanzenkohle pro Liter). Messung der Emissionen von Tag 33 bis 48 der Lagerung.

### 3.4 Kompostierung

Die im Rahmen der vorliegenden Literaturrecherche gesichteten Studien sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die Untersuchungen erfolgten meist im Labor- oder Pilotmasstab mit Mengen zwischen rund 5 und 165 Liter Hofdünger. Eine Untersuchung (Ottani et al., 2023) wurde im Rahmen einer Pilotstudie (ca. 0.85 m<sup>3</sup> Material, Versuchsdurchführung im Freien auf einer Kompostieranlage) durchgeführt. Die Aufwandmengen von Pflanzenkohle liegen mit 3 bis 33% Gewichtsanteil höher als bei der Lagerung von Hofdüngern. Mit einer Ausnahme zeigten alle Untersuchungen eine Emissionsreduktion (Bereich: ca. 30-60%). Bei der Studie im halbtechnischen Masstab mit rund 1 m<sup>3</sup> Material, 3% Anteil Pflanzenkohle und der längsten Messdauer aller Studien (63 Tage) wurde keine Emissionsreduktion gefunden.

Tabelle 3: Resultate von Studien zur Reduktion von Ammoniakemissionen während der Kompostierung von Hofdüngern mit Verwendung von Pflanzenkohle (unvollständige Listung). Angegeben sind folgende Versuchsparameter: der Anteil Pflanzenkohle im Hofdünger (in Gewichtsprozent Frischgewicht), die Hofdüngermenge in Liter sowie die Dauer der Emissionsmessung in Tagen.

Substrate	Anteil Pflanzenkohle*	Menge in Liter	Emissionsmessung in Tagen	Emissionsreduktion		Quelle
				ja	nein	
Geflügelmist, Stroh von Zuckerrohr	10%	165	53	ja	50-60%	Agyarko-Mintah et al. (2017)
Geflügelmist, Sägemehl	Ca. 10%	ca. 20	28	ja	35-41%**	Cao et al. (2024)
Feststoffe von fest-flüssig Separierung Gärgut	16-33%	ca. 5	28	ja	-	Chowdhury et al. (2014a)
Geflügelmist, Stroh	ca. 27%	ca. 5	31	ja	ca. 30-40%	Chowdhury et al. (2014b)
Geflügelmist, Sägemehl	3-10%	100	kA	ja	-	Chung et al. (2021)
Geflügelmist/Stroh (1:0.4)	5%, 10%	ca. 100	42	ja	30-44%	Janczak et al (2017)
Geflügelmist	5%, 20%	ca. 40	42	ja	58%***	Steiner et al (2010)
Organische Abfälle****	3%	ca. 850	63	nein	-	Ottani et al. (2023)
Feststoffe von fest-flüssig Separierung von Gärgut#	5%	10	14	ja	##	Vieira Firmino et al. (2024)

kA: keine Angabe; - Emissionsreduktion nicht quantifiziert

\* Gewichtsanteil bezogen auf das Frischgewicht

\*\* ca. 35% Reduktion für unbehandelte Pflanzenkohle, 41% Reduktion für Pflanzenkohle behandelt mit 15% Natronlauge (NaOH) im Verhältnis 15:1 (Kohle: NaOH) während 48h.

\*\*\*nur Konzentrationsmessung

\*\*\*\*Organische Abfälle aus der getrennten Sammlung von Haushaltsabfällen sowie Holz als Strukturmaterial

# Gärgut aus organischen Abfällen aus der getrennten Sammlung von Haushaltsabfällen

## Emissionsreduktion von 10 bis 76% für mittels Salpetersäure angesäuerte Pflanzenkohle. Keine Emissionsreduktion oder Emissionszunahme bei unbehandelter Pflanzenkohle.

### 3.5 Ausbringung

Wie bei der Lagerung erfolgten die Studien zur Ausbringung im Labormassstab in sehr kleinen Behältern (Bodenmenge in der Grössenordnung 100 g). Die Aufwandmengen von Pflanzenkohle betragen 1 bis 50 Gewichtsprozent in Bezug auf den ausgebrachten Hofdünger oder auf die Bodenmenge. In rund der Hälfte der Studien konnte eine Emissionsreduktion festgestellt werden (Tabelle 4). Wie bei der Lagerung und bei der Kompostierung zeigte sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Menge Pflanzenkohle und der festgestellten Emissionsreduktion.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit der HAFL erfolgte eine Studie im Pilotmassstab. Dabei wurde ein Futter mit Pflanzenkohle als Zusatz bei Mastpoulets mit 2% Anteil in der Ration und bei Absetzferkeln mit 3% Anteil in der Ration mit einem Standardfutter ohne Pflanzenkohle verglichen (Fischlin, 2014; Kupper et al., 2015). Die Ausscheidungen wurden während 3 bis 4 Tagen in Windtunneln exponiert. Dabei wurde je nach Versuchsanordnung 1 Liter Ferkelgülle in Schalen exponiert oder auf 1 m<sup>2</sup> einer Grünfläche 3 Liter Gülle ausgebracht. Pouletmist wurde in einer Menge von 300 g pro m<sup>2</sup> ausgebracht und die Emissionen während 10 Tagen gemessen. Zur Bestimmung der Konzentrationen wurden Impinger<sup>3</sup> verwendet. Der Luftaustausch wurde regelmässig mittels Anemometer gemessen. In allen Versuchen liessen sich keine Unterschiede zwischen den Hofdüngern mit oder ohne Verfütterung von Pflanzenkohle feststellen.

Tabelle 4: Resultate von Studien zur Reduktion von Ammoniakemissionen bei der Ausbringung von Hofdüngern mit Verwendung von Pflanzenkohle (Laborstudien). Angegeben sind folgende Versuchsparameter: der Anteil Pflanzenkohle im Hofdünger oder im Boden (in Gewichtsprozent Frischgewicht), die Dauer der Emissionsmessung in Tagen, die Bodenoberfläche (cm<sup>2</sup>) oder die im Versuch verwendete Menge an Boden (g Frischgewicht).

Substrate	Anteil Pflanzenkohle*	Emissionsmessung in Tagen	Bodenoberfläche in cm <sup>2</sup>	Bodenmenge in g	Emissionsreduktion		Quelle
					ja	nein	
Rindviehgülle	3.6%**	7	3140	-	ja	77%	Brennan et al. (2015)
Geflügelmist	50%***	21	55	65	ja	56-63%	Doydora et al. (2011)
Geflügelmist	5%	6	88	-	nein	-	Gronwald et al. (2018)
Rindviehgülle	1%	6	88****	-	nein	-	
Flüssiges Gärgut aus Wasserhyazinthen	0.25%	3	-	60 g	ja	18-ca. 35%	Kohira et al. (2024)
	1%	3	-	60 g	ja	Ca.38-55%	
Geflügelmist	5%#	21	-	100	ja	ca. 50-70%	Mandal et al. (2016)

<sup>3</sup> Mit einer sauren Absorptionslösung gefüllte Waschflasche, in der Ammoniak gebunden wird.



Geflügelmist	5%#	21	-	100	ja	ca. 50-60%	
Gärgülle	10%##	28	-	300	nein	-	Plaimart et al. (2021)
Schweinegülle	23%	1	707	-	nein	###	Schimmelpfennig et al. (2014)
Rindviehgülle	0.25%	2	437	-	nein	####	Schmidhalter (2024)
Schweinegülle							
Gärgülle							
Schweinegülle	3%	2	-	-	nein	###	Subedi et al. (2015)
Mist Pferde, Schafe, Rindvieh, Geflügel	1%	51	-	250	ja	32%	Thangarajan et al. (2018)

kA: keine Angabe; - Emissionsreduktion nicht quantifiziert

\* Gewichtsanteil bezogen auf das Frischgewicht

\*\* Herleitung des Anteils Pflanzenkohle: Anwendungen von 3.96 m<sup>3</sup> Pflanzenkohle auf 33 m<sup>3</sup> Gülle gemäss Angaben von Brennan et al. (2015); Annahme: 300 kg m<sup>-3</sup> Volumengewicht Pflanzenkohle (Quelle: <https://carbuna.com/pages/pflanzenkohle-nach-gewicht-oder-volumen-kaufen>)

\*\*\* 1:1 Gewichtsanteil Mist-Pflanzenkohle; Verwendung von angesäuerter Pflanzenkohle

\*\*\*\* Ausbringung Gülle streifenförmig

# 5% Anteil Boden bzw. 25 t Pflanzenkohle pro ha bei einer Einarbeitungstiefe von 5 cm; die beiden Zeilen zeigen Werte für unterschiedliche Bodentypen (sauer, alkalisch)

## 90% Boden und 10% Pflanzenkohle gemischt

### Zunahme der Emissionen

#### Emissionen bestimmt mittels <sup>15</sup>N Massenbilanz

In einer Feldstudie (Kleinparzellenversuch 10 m<sup>2</sup>) wurde eine Menge entsprechend 50 t Pflanzenkohle pro ha ausgebracht und 20 cm tief eingearbeitet (Tan et al., 2018). Die Pflanzenkohle hatte keinen Einfluss auf die Emissionen von dem auf die Oberfläche des Bodens ausgebrachten Geflügelmist.

Viaene et al. (2024) setzten 5 Gewichtsprozent % bzw. 6.4 und 6.8 Gewichtsprozent % von zwei verschiedenen Typen von Pflanzenkohle während der Vergärung bzw. nach der Vergärung zur Lagerung des Gärguts ein (Gärgut bestehend aus organischen Abfällen pflanzlicher Herkunft plus Geflügelmist). Der Versuch erfolgte im Labormassstab. Der Gehalt an Ammoniak im Biogas wurde durch die Zugabe von Pflanzenkohle reduziert und Ammonium adsorbierte an Pflanzenkohle. Nach Ausbringung des Gärguts wurde keine erhöhte Emission von Ammoniak beobachtet.

## 4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Hinsichtlich Wirksamkeit zur Reduktion von Ammoniakemissionen fanden Schmidt et al. (2023) sowie Zhang et al. (2024) in ihren Meta-Analysen keinen signifikanten Effekt von Pflanzenkohle. Bretscher et al. (2023) empfehlen den Einsatz von Pflanzenkohle zur Reduktion von Nährstoffverlusten wegen teilweise bestehenden wissenschaftlichen Unsicherheiten nur bedingt.

Yin et al. (2021) geben aufgrund einer Metanalyse eine Reduktion der Ammoniakemissionen aus der Kompostierung von 58-65% bei einem Anteil von 8-18% Pflanzenkohle an. Die Kompostierung schliesst hier nicht nur Hofdünger, sondern auch andere organische Abfälle ein. Zhang et al. (2021) postulieren aufgrund einer Metaanalyse eine Reduktion der Ammoniakemissionen für die Kompostierung von Schweinemist. Cao et al. (2019) geben bei der Kompostierung von Festmist, wenn Pflanzenkohle eingesetzt wird, eine Emissionsreduktion von ca. 50% an. Die Skala der Studien (Labor-, Pilot- oder

Praxismassstab) wird in diesen Metanalysen nicht angegeben (Ausnahme: Cao et al., 2019: Studien im Labor- und Pilotmassstab). Vermutlich handelt es sich überwiegend um Laborstudien. Kalus et al. (2019) wiesen in ihrem Review auf positive Effekte durch den Einsatz von Pflanzenkohle bei der Kompostierung sowie teilweise auf eine Reduktion von Ammoniakemissionen hin.

Yin et al. (2021) empfehlen zur Reduktion von Ammoniakemissionen einen Anteil von 10% Pflanzenkohle in der Kompostierung und eine Pyrolysetemperatur von 200–500 °C. Sie erwähnten weiter, dass die Anwendung gemahlener Pflanzenkohle anstelle von stückigen oder pelletierten Produkten vorteilhaft ist. Yin et al. (2021) geben die folgenden Mechanismen für die Emissionsreduktion an: Sorption von  $\text{NH}_3$  und  $\text{NH}_4^+$  (Ammonium) auf der Oberfläche von Pflanzenkohle, Förderung von nitrifizierenden Bakterien in der Kompostierung, Förderung der Aktivität von Cellulase und damit Erhöhung der Verfügbarkeit von gelöstem organischem Kohlenstoff, der die Aufnahme von  $\text{NH}_4^+$  durch Mikroorganismen erhöht.

Sha et al. (2019) stellten im Rahmen einer Metaanalyse (41 publizierte Artikel, 144 Beobachtungen) im Mittel keinen Effekt der Verwendung von Pflanzenkohle nach der Ausbringung von Hofdüngern fest, wobei die Variabilität der Resultate der verschiedenen Studien gross war. Das heisst, eine deutliche Emissionsminderung kam ebenso vor wie eine starke Zunahme der Emissionen.

Diese Befunde stimmen mit der vorliegenden Literaturrecherche überein, welche keine eindeutige Wirkung von Pflanzenkohle hinsichtlich Reduktion von Ammoniakemissionen gefunden hat. Einzig beim Einsatz in der Kompostierung zeigen die Daten mehrheitlich in Richtung Emissionsreduktion. Allerdings führt die Kompostierung von festen Hofdüngern zu einer Erhöhung von Ammoniakemissionen im Vergleich zur anaeroben Lagerung (Bittman et al., 2014; Pardo et al., 2015). Der Einsatz von Pflanzenkohle dürfte hier demzufolge überwiegend zu einer Kompensation der Mehremissionen aufgrund der Kompostierung führen.

Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, dass Inkubationsexperimente mit mineralischem Stickstoff (z.B. Harnstoff) als N-Quelle oft einen deutlichen Effekt hinsichtlich Emissionsreduktion von Ammoniak zeigten (z.B. Mandal et al., 2018, 2019). In einem Feldexperiment (Kleinparzelle) mit Erdnüssen als Kultur wurde mit mineralischer N-Düngung ebenfalls eine Emissionsreduktion von rund 30-40% mit Zugabe von Pflanzenkohle zum Boden (10 t pro ha) erzielt (Wang et al., 2022). Auch bezüglich des Ertrags liess sich teilweise ein positiver Effekt feststellen (z.B. Mandal et al., 2019).

Die Studien mit Hofdüngern fanden fast ausschliesslich im Labormassstab statt und liefern demnach Resultate im Sinne eines «Proofs of concept». Die Wirkung von Pflanzenkohle auf Ammoniakemissionen müsste mindestens im Pilotmassstab für die Lagerung oder in Kleinparzellenversuchen für die Ausbringung untersucht werden. Wie bei anderen Techniken zur Emissionsminderung ist ein Nachweis einer Emissionsreduktion nach aktuellem Kenntnisstand entsprechend einem Fall-Kontroll-Ansatz erforderlich (Kupper et al., 2024). Dies bedeutet für den Nachweis einer Emissionsreduktion auf der Stufe Stall eine Messung in einem Emissionsversuchsstall (Mohn et al., 2018; VERA Secretariat, 2018a; Winkel et al., 2024). Für eine Untersuchung auf der Stufe Lagerung ist für Gülle ein Volumen von mindestens 4 m<sup>3</sup> erforderlich und für Festmist ein Lager der Grösse von mindestens 2 m x 2 m x 1.5 m (VERA Secretariat, 2018b). Möglich sind auch Studien im Praxismassstab (Beispiele für Gülle bzw. Festmist: Kupper et al., 2021, Lemes et al., 2023). Für die Ausbringung von Hofdüngern sind mindestens vergleichende Messungen mittels Windtunneln (z.B. Pedersen et al., 2024) oder die Verwendung mikrometeorologischer Methoden (z.B. Häni et al., 2016) notwendig.



Solange keine solchen Daten vorliegen, muss die Wirkung zur Ammoniakemissionsreduktion als nicht gesichert betrachtet werden<sup>4</sup>. Infolgedessen ist eine Anrechnung einer Emissionsreduktion im Praxismassstab nicht zu empfehlen.

Eine weitere Schwierigkeit der Beurteilung der Wirkung von Pflanzenkohle besteht darin, dass sich diese in ihren Eigenschaften je nach Ausgangsmaterial, Temperatur bei der Pyrolyse und Nachbehandlung stark unterscheiden. In den vorliegenden Untersuchungen wurden teilweise kommerziell erhältliche Produkte eingesetzt (z.B. Owusu-Twum et al., 2024). Einige Studien schlagen die Verwendung von angesäuerter Pflanzenkohle zur Reduktion von Ammoniakemissionen vor (Schimmelpfennig et al. 2014; Sha et al., 2019). Für eine allfällige Anrechnung einer Emissionsreduktion müssten Untersuchungen, wie oben aufgeführt, für einen bestimmten Typ von Pflanzenkohle und die Technik der Einbringung in den Hofdünger durchgeführt werden. Dabei ist eine klare Definition des Verfahrens zur Produktion der Pflanzenkohle und deren Eigenschaften erforderlich. Der festgelegte Standard müsste bei der späteren Umsetzung des Verfahrens sichergestellt werden. Weiter wäre die Anwendung (z.B. bezüglich Ort, Menge, Häufigkeit und Form der Anwendung) festzulegen. Diese Anforderungen werden aktuell nicht erfüllt. Zu beachten sind weiter die Vorgaben und Empfehlungen des Faktenblatts von BAFU, BLW und AGIR (2023). Im Sinne der Vorsorge wird vom breiten Einsatz von Pflanzenkohle vorläufig abgeraten, solange schädliche Auswirkungen nicht ausgeschlossen werden können, z.B. auf Bodenlebewesen. Vorgaben zum Umgang mit Pflanzenkohle und Anwendungsempfehlungen für deren Einsatz in der Landwirtschaft sind gemäss diesem Faktenblatt zu berücksichtigen.

Obwohl die vorliegende Literaturstudie nicht als abschliessend betrachtet werden kann, hat sie eindeutig gezeigt, dass kaum Studien vorliegen, welche für Praxisbedingungen repräsentativ sind, bzw. welche nach dem aktuellen Stand des Wissens für den Nachweis einer emissionsmindernden Technik erforderlich sind. Daher sollte gemäss aktuellem Kenntnisstand der Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierproduktion nicht als Technik zur Minderung von Ammoniakemissionen in der Hofdüngerkaskade betrachtet werden. Derzeit werden jedoch laufend neue Studien zum Thema Pflanzenkohle und Reduktion von Ammoniakemissionen publiziert. Diese sollten periodisch gesichtet und die vorliegende Bewertung darauf basierend überprüft werden. Dies insbesondere dann, wenn Studien verfügbar sind, welche den Anforderungen hinsichtlich Nachweis einer Emissionsreduktion nach wissenschaftlichen Standards entsprechen (Kupper et al., 2024; VERA Secretariat, 2018a,b; Pedersen et al. 2024; Häni et al., 2016).

---

<sup>4</sup> Dies steht im Gegensatz zu Beobachtungen in der Praxis, welche eine Verminderung der Geruchsbelastung durch Ausbringung von Pflanzenkohle z.B. im Laufhof häufig als Indiz einer Reduktion von Ammoniakemissionen betrachtet wird. Grundsätzlich ist jedoch Geruch nicht mit Ammoniak gleichzusetzen.

## 5 Literaturverzeichnis

- Agyarko-Mintah, E., Cowie, A., Van Zwieten, L., Singh, B.P., Smillie, R., Harden, S., Fornasier, F. 2017. Biochar lowers ammonia emission and improves nitrogen retention in poultry litter composting. *Waste Manage.* 61: 129-137.
- BAFU, BLW. 2011. Baulicher Umweltschutz in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Teilrevidierte Ausgabe 2023. Umwelt-Vollzug. Bundesamt für Umwelt, BAFU, Bundesamt für Landwirtschaft, BLW, Bern.
- BAFU, BLW, AGIR. 2023. Faktenblatt Pflanzenkohle in der Schweizer Landwirtschaft. Risiken und Chancen für Boden und Klima. Bern: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Arbeitsgruppe Interventionswerte und Risikobeurteilung (AGIR) des Cercle Sol.
- Bittman, S., Dedina, M., Howard, C.M., Oenema, O., Sutton, M.A. 2014. Options for ammonia mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh, UK.
- Braam, C.R., Smits, M.C.J., Gunnink, H., Swierstra, D. 1997. Ammonia emission from a double-sloped solid floor in a cubicle house for dairy cows. *J. Agr. Eng. Res.* 68(4): 375-386.
- Brennan, R.B., Healy, M.G., Fenton, O., Lanigan, G.J. 2015. The effect of chemical amendments used for phosphorus abatement on greenhouse gas and ammonia emissions from dairy cattle slurry: synergies and pollution. *PLOS ONE* 10(6).
- Bretscher, D., Hagemann, N., Keel, S.G., Leifeld, J. 2023. Pflanzenkohle. *Agroscope Merkblatt* | Nr. 191, Version 1.
- Cao, Y.B., Wang, X., Bai, Z.H., Chadwick, D., Misselbrook, T., Sommer, S.G., Qin, W., Ma, L. 2019. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions during solid waste composting with different additives: A meta-analysis. *J. Clean Prod.* 235: 626-635.
- Cao, Z., Zhu, R., Li, Y., Kakade, A., Zhang, S., Yuan, Y., Wu, Y., Mi, J. 2024. Mitigation of ammonia and hydrogen sulfide emissions during aerobic composting of laying hen waste through NaOH-modified biochar. *J. Environ. Manage.* 365: 121634.
- Chowdhury, M.A., de Neergaard, A., Jensen, L.S. 2014a. Composting of solids separated from anaerobically digested animal manure: Effect of different bulking agents and mixing ratios on emissions of greenhouse gases and ammonia. *Biosyst. Eng.* 124: 63-77.
- Chowdhury, M.A., de Neergaard, A., Jensen, L.S. 2014b. Potential of aeration flow rate and bio-char addition to reduce greenhouse gas and ammonia emissions during manure composting. *Chemosphere* 97: 16-25.
- Chung, W.J., Chang, S.W., Chaudhary, D.K., Shin, J., Kim, H., Karmegam, N., Govarathanan, M., Chandrasekaran, M., Ravindran, B. 2021. Effect of biochar amendment on compost quality, gaseous emissions and pathogen reduction during in-vessel composting of chicken manure. *Chemosphere* 283: 8.
- Clough, T.J., Bertram, J.E., Ray, J.L., Condon, L.M., O'Callaghan, M., Sherlock, R.R., Wells, N.S. 2010. Unweathered wood biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine-urine-amended pasture soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74(3): 852-860.

- Clough, T.J., Condon, L.M. 2010. Biochar and the nitrogen cycle: introduction. *J. Environ. Qual.* 39(4): 1218-1223.
- Clough, T.J., Condon, L.M., Kammann, C., Müller, C. 2013. A review of biochar and soil nitrogen dynamics. *Agronomy* 3: 275-293.
- Covali, P., Raave, H., Escuer-Gatius, J., Kaasik, A., Tõnutare, T., Astover, A. 2021. The effect of untreated and acidified biochar on NH<sub>3</sub>-N emissions from slurry digestate. *Sustainability* 13(2).
- Doydora, S.A., Cabrera, M.L., Das, K.C., Gaskin, J.W., Sonon, L.S., Miller, W.P. 2011. Release of nitrogen and phosphorus from poultry litter amended with acidified biochar. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 8(5): 1491-1502.
- Fischlin, I. 2014. Einsatz von Pflanzenkohle in der Fütterung zur Minderung von Ammoniakemissionen bei Absetzferkeln und Mastpoulets. Bachelorarbeit Studienjahr 2013/14. Zollikofen, Switzerland: Berner Fachhochschule Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL.
- Gronwald, M., Helfrich, M., Don, A., Fuss, R., Well, R., Flessa, H. 2018. Application of hydrochar and pyrochar to manure is not effective for mitigation of ammonia emissions from cattle slurry and poultry manure. *Biol. Fertil. Soils* 54(4): 451-465.
- Häni, C., Kupper, T., Jocher, M., Neftel, A., Sintermann, J. 2012. Amendment of biochar to slurry: a possibility to mitigate ammonia emissions. In: Hassouna, M., Guingand, N., (eds.). International symposium on Emission of gas and dust from Livestock (EMILI 2012). June 10-13, 2012; Saint-Malo, France. p 126-129.
- Häni, C., Sintermann, J., Kupper, T., Jocher, M., Neftel, A. 2016. Ammonia emission after slurry application to grassland. *Atmos. Environ.* 125: 92-99.
- Holly, M.A., Larson, R.A. 2017. Thermochemical conversion of biomass storage covers to reduce ammonia emissions from dairy manure. *Water Air Soil Pollut.* 228(11).
- Hung, C.Y., Hussain, N., Husk, B.R., Whalen, J.K. 2022. Ammonia volatilization from manure mixed with biochar. *Can. J. Soil Sci.* 102(1): 177-186.
- Janczak, D., Malinska, K., Czekala, W., Caceres, R., Lewicki, A., Dach, J. 2017. Biochar to reduce ammonia emissions in gaseous and liquid phase during composting of poultry manure with wheat straw. *Waste Manage.* 66: 36-45.
- Kalus, K., Koziel, J.A., Opaliński, S. 2019. A review of biochar properties and their utilization in crop agriculture and livestock production. *Appl. Sci.* 9(17).
- Kizito, S., Wu, S.B., Wandera, S.M., Guo, L.C., Dong, R.J. 2016. Evaluation of ammonium adsorption in biochar-fixed beds for treatment of anaerobically digested swine slurry: Experimental optimization and modeling. *Sci. Total Environ.* 563: 1095-1104.
- Kohira, Y., Fentie, D., Lewoyehu, M., Wutisirirattanachai, T., Gezahegn, A., Addisu, S., Sato, S. 2024. Mitigation of ammonia volatilization from organic and inorganic nitrogen sources applied to soil using water hyacinth biochars. *Chemosphere* 363: 142872.
- Kupper, T., Fischlin, I., Häni, C., Spring, P. 2015. Use of a feed additive based on biochar for mitigation of ammonia emissions from weaned piglets and broilers. 16th RAMIRAN International Conference. 8-10 September 2015, Hamburg Germany.
- Kupper, T., Fischlin, I., Häni, C., Spring, P. 2015. Use of a feed additive based on biochar for mitigation of ammonia emissions from weaned piglets and broilers. 16th RAMIRAN International Conference. 8-10 September 2015, Hamburg Germany.

- Kupper, T., Häni, C., Neftel, A., Kincaid, C., Bühler, M., Amon, B., VanderZaag, A.C. 2020. Ammonia and greenhouse gas emissions from slurry storage - a review. *Agr. Ecosyst. Environ.* 300(106963): 1-18.
- Kupper, T., Eugster, R., Sintermann, J., Neftel, A., Häni, C. 2021. A novel approach to estimate the abatement of ammonia emissions from mitigation techniques at farm-scale slurry stores exemplified by a semifloating cover. *J. Environ. Qual.* 50(5): 1074-1083.
- Kupper, T., Zähler, M., Bucheli, M., Appert, K., Paradis, E., Burren, P., Fischler, M., Steiner, B., Uebersax, A. 2024. Anforderungen an Verfahren zum Nachweis einer Reduktion von Ammoniakemissionen aus Nutztierställen – Bewertung von emissionsmindernden Techniken. Faktenblatt der nationalen Drehscheibe Ammoniak. [www.ammoniak.ch](http://www.ammoniak.ch).
- Lemes, Y.M., Nyord, T., Feilberg, A., Kamp, J.N. 2023. Effect of covering deep litter stockpiles on methane and ammonia emissions analyzed by an inverse dispersion method. *ACS Agricult. Sci. Technol.*
- Liu, M.L., Liu, C.J., Liao, W.H., Xie, J.Z., Zhang, X.X., Gao, Z.L. 2021. Impact of biochar application on gas emissions from liquid pig manure storage. *Sci. Total Environ.* 771: 10.
- Malinska, K., Zabochnicka-Swiatek, M., Dach, J. 2014. Effects of biochar amendment on ammonia emission during composting of sewage sludge. *Ecol. Eng.* 71: 474-478.
- Mandal, S., Thangarajan, R., Bolan, N.S., Sarkar, B., Khan, N., Ok, Y.S., Naidu, R. 2016. Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat. *Chemosphere* 142: 120-127.
- Mandal, S., Donner, E., Vasileiadis, S., Skinner, W., Smith, E., Lombi, E. 2018. The effect of biochar feedstock, pyrolysis temperature, and application rate on the reduction of ammonia volatilisation from biochar-amended soil. *Sci. Total Environ.* 627: 942-950.
- Mandal, S., Donner, E., Smith, E., Sarkar, B., Lombi, E. 2019. Biochar with near-neutral pH reduces ammonia volatilization and improves plant growth in a soil-plant system: A closed chamber experiment. *Sci. Total Environ.* 697: 8.
- Mohn, J., Zeyer, K., Keck, M., Keller, M., Zähler, M., Poteko, J., Emmenegger, L., Schrade, S. 2018. A dual tracer ratio method for comparative emission measurements in an experimental dairy housing. *Atmos. Environ.* 179: 12-22.
- Ottani, F., Parenti, M., Santunione, G., Moscatelli, G., Kahn, R., Pedrazzi, S., Allesina, G. 2023. Effects of different gasification biochar grain size on greenhouse gases and ammonia emissions in municipal aerated composting processes. *J. Environ. Manage.* 331: 13.
- Owusu-Twum, M.Y., Kelleghan, D., Gleasure, G., Connolly, S., Forrestal, P., Lanigan, G.J., Richards, K.G., Krol, D.J. 2024. Mitigation of ammonia and methane emissions with manure amendments during storage of cattle slurry. *Waste Manage. Res.*: 1-12 (online version).
- Pardo, G., Moral, R., Aguilera, E., del Prado, A. 2015. Gaseous emissions from management of solid waste: a systematic review. *Glob. Change Biol.* 21(3): 1313-1327.
- Pedersen, J., Hafner, S.D., Pacholski, A., Karlsson, V.I., Rong, L., Labouriau, R., Kamp, J.N. 2024. Evaluation of optimized flux chamber design for measurement of ammonia emission after field application of slurry with full-scale farm machinery. *Atmos. Meas. Tech.* 17(14): 4493-4505.

- Pereira, J.L.S., Figueiredo, V., Pinto, A., Silva, M.E.F., Bras, I., Perdigão, A., Wessel, D.E. 2020. Effects of biochar and clinoptilolite on composition and gaseous emissions during the storage of separated liquid fraction of pig slurry. *Appl. Sci.* 10(16): 14.
- Pereira, J.L.S., Martins, F., Bonifácio, G., Garcia, C., Teixeira, J., Trindade, H. 2024. Biochar as an alternative litter additive to mitigate gaseous emissions from broiler housing and subsequent storage. *Agronomy* 14(7).
- Pereira, J.L.S., Perdigão, A., Marques, F., Wessel, D.F., Trindade, H., Fangueiro, D. 2022. Mitigating ammonia and greenhouse gas emissions from stored pig slurry using chemical additives and biochars. *Agronomy* 12(11).
- Plaimart, J., Acharya, K., Mroziak, W., Davenport, R.J., Vinitnantharat, S., Werner, D. 2021. Coconut husk biochar amendment enhances nutrient retention by suppressing nitrification in agricultural soil following anaerobic digestate application. *Environ. Pollut.* 268: 9.
- Prasai, T.P., Walsh, K.B., Midmore, D.J., Jones, B.E.H., Bhattarai, S.P. 2018. Manure from biochar, bentonite and zeolite feed supplemented poultry: moisture retention and granulation properties. *J. Environ. Manage.* 216: 82-88.
- Schimmelpfennig, S., Müller, C., Grünhage, L., Koch, C., Kammann, C. 2014. Biochar, hydrochar and uncarbonized feedstock application to permanent grassland-Effects on greenhouse gas emissions and plant growth. *Agric. Ecosyst. Environ.* 191: 39-52.
- Schmidhalter, U. 2024. 15N mass balance technique for measuring ammonia losses from soil surface-applied slurries containing various additives. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 187: 443-453.
- Schmidt, H.-P., Kammann, C., Hagemann, N., Leifeld, J., Bucheli, T.D., Sánchez Monedero, M.A., Cayuela, M.L. 2021. Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy* 13(11): 1708-1730.
- Sha, Z., Li, Q., Lv, T., Misselbrook, T., Liu, X. 2019. Response of ammonia volatilization to biochar addition: A meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 655: 1387-1396.
- Sperber, J.L., Erickson, G.E., Watson, A.K. 2022. Evaluation of the effects of wood-sourced biochar as a feedlot pen surface amendment on manure nutrient capture. *Transl. Anim. Sci.* 6(4): 10.
- Steiner, C., Das, K.C., Melear, N., Lakly, D. 2010. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. *J. Environ. Qual.* 39(4): 1236-1242.
- Subedi, R., Kammann, C., Pelissetti, S., Taupe, N., Bertora, C., Monaco, S., Grignani, C. 2015. Does soil amended with biochar and hydrochar reduce ammonia emissions following the application of pig slurry? *Eur. J. Soil Sci.* 66(6): 1044-1053.
- Szymula, A., Wlazło, Ł., Sasáková, N., Wnuk, W., Nowakowicz-Dębek, B. 2021. The use of natural sorbents to reduce ammonia emissions from cattle faeces. *Agronomy* 11(12).
- Tan, G.C., Wang, H.Y., Xu, N., Liu, H.B., Zhai, L.M. 2018. Biochar amendment with fertilizers increases peanut N uptake, alleviates soil N<sub>2</sub>O emissions without affecting NH<sub>3</sub> volatilization in field experiments. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25(9): 8817-8826.
- Thangarajan, R., Bolan, N.S., Kunhikrishnan, A., Wijesekara, H., Xu, Y.L., Tsang, D.C.W., Song, H., Ok, Y.S., Hou, D.Y. 2018. The potential value of biochar in the mitigation of gaseous emission of nitrogen. *Sci. Total Environ.* 612: 257-268.

- VanderZaag, A.C., Gordon, R.J., Glass, V.M., Jamieson, R.C. 2008. Floating covers to reduce gas emissions from liquid manure storages: a review. *Appl. Eng. Agric.* 24(5): 657-671.
- VERA Secretariat. 2018a. VERA Test Protocol for Livestock Housing and Management Systems. Version 3:2018-09. 2920 Charlottenlund, DK: The International VERA Secretariat.
- VERA Secretariat. 2018b. VERA Test Protocol for Covers and other Mitigation Technologies for Reduction of Gaseous Emissions from Stored Manure. Version 3:2018-07. 2920 Charlottenlund, DK: The International VERA Secretariat.
- Viaene, J., Peiren, N., Vandamme, D., Lataf, A., Cuypers, A., Jozefczak, M., Vandecasteele, B. 2023. Biochar amendment to cattle slurry reduces NH<sub>3</sub> emissions during storage without risk of higher NH<sub>3</sub> emissions after soil application of the solid fraction. *Waste Manage.* 167: 39-45.
- Viaene, J., Peiren, N., Vandamme, D., Lataf, A., Cuypers, A., Debeer, L., Vandecasteele, B. 2024. Application of biochar to anaerobic digestion versus digestate: Effects on N emissions and C stability. *Sci. Total Environ.* 915.
- Vieira Firmino, M., Trémier, A., Couvert, A., Szymczyk, A. 2024. New insights into biochar ammoniacal nitrogen adsorption and its correlation to aerobic degradation ammonia emissions. *Waste Manage.* 178: 257-266.
- Voglmeier, K., Jocher, M., Häni, C., Ammann, C. 2018. Ammonia emission measurements of an intensively grazed pasture. *Biogeosciences* 15(14): 4593-4608.
- Wang, S.J., Xia, G.M., Zheng, J.L., Wang, Y.J., Chen, T.T., Chi, D.C., Bolan, N.S., Chang, S.X., Wang, T.L., Ok, Y.S. 2022. Mulched drip irrigation and biochar application reduce gaseous nitrogen emissions, but increase nitrogen uptake and peanut yield. *Sci. Total Environ.* 830: 10.
- Winkel, A., Brusselman, E., Hensen, A., Otten, G., Vonk, J., Laanen, L., Verfaillie, A., van Dinther, D., Mosquera, J., Ogink, N. 2024. Richtlijnen voor het bepalen van emissies uit veestallen. Rapport 1470. Wageningen: Wageningen Livestock Research.
- Ye, Q.Q., Li, Q.H., Li, X. 2022. High concentration of nitrogen recovery from anaerobic digested slurry (ADS) using biochars: adsorption and improvement. *Water Sci. Technol.* 86(6): 1565-1577.
- Yin, Y.A., Yang, C., Li, M.T., Zheng, Y.C., Ge, C.J., Gu, J., Li, H.C., Duan, M.L., Wang, X.C., Chen, R. 2021. Research progress and prospects for using biochar to mitigate greenhouse gas emissions during composting: A review. *Sci. Total Environ.* 798.
- Zhang, X.Y., Gu, L.P., Gui, D.Y., Xu, B., Li, R., Chen, X., Sha, Z.P., Pan, X.J. 2024. Suitable biochar application practices simultaneously alleviate N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> emissions from arable soils: A meta-analysis study. *Environ. Res.* 242: 11.
- Zhang, Z., Liu, D.H., Qiao, Y., Li, S.L., Chen, Y.F., Hu, C. 2021. Mitigation of carbon and nitrogen losses during pig manure composting: A meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 783: 11.



## Anhang: Liste nicht berücksichtigter Studien

Begründung: Effekt von Pflanzenkohle untersucht bei Aufbringung auf eine Gülleoberfläche als Abdeckung.

Baral, K.R., McIlroy, J., Lyons, G., Johnston, C. 2023. The effect of biochar and acid activated biochar on ammonia emissions during manure storage. *Environ. Pollut.* 317: 120815.

Holly, M.A., Larson, R.A. 2017a. Effects of manure storage additives on manure composition and greenhouse gas and ammonia emissions. *Trans. ASABE* 60(2): 449-456.

Maurer, D.L., Koziel, J.A., Kalus, K., Andersen, D.S., Opalinski, S. 2017. Pilot-scale testing of non-activated biochar for swine manure treatment and mitigation of ammonia, hydrogen sulfide, odorous volatile organic compounds (VOCs), and greenhouse gas emissions. *Sustainability* 9(6).

Meiirkhanuly, Z., Koziel, J.A., Chen, B.T., Bialowiec, A., Lee, M., Wi, J., Banik, C., Brown, R.C., Bakshi, S. 2020. Mitigation of Gaseous Emissions from Swine Manure with the Surficial Application of Biochars. *Atmosphere* 11(11): 17.

Begründung: Anforderungen an Emissionsmessungen zur Ermittlung einer Emissionsreduktion nicht erfüllt (ausschliesslich Messung von Konzentrationen im Labor oder Praxismasstab; vgl. Kupper et al., 2024). Mit Ausnahme Hung et al. (2022) geben alle Studien eine Emissionsreduktion an.

Kalus, K., Konkol, D., Korczynski, M., Koziel, J.A., Opalinski, S. 2020a. Effect of biochar diet supplementation on chicken broilers performance, NH<sub>3</sub> and odor emissions and meat consumer acceptance. *Animals* 10(9).

Kalus, K., Konkol, D., Korczynski, M., Koziel, J.A., Opalinski, S. 2020b. Hens biochar diet supplementation-effect on performance, excreta N content, NH<sub>3</sub> and VOCs emissions, egg traits and egg consumers acceptance. *Agriculture* 10(6): 15.

Hung, C.Y., Hussain, N., Husk, B.R., Whalen, J.K. 2022. Ammonia volatilization from manure mixed with biochar. *Can. J. Soil Sci.* 102(1): 177-186.

Seitler, E., Meier, M. 2022. Pflanzenkohle im Stall Wirkung auf die Ammoniak-Emissionen. Messbericht. Rapperswil: FUB – Forschungsstelle für Umweltbeobachtung.

Begründung: Kompostierung von Klärschlamm (Studie im Labormasstab über 16 Tage. Emissionsreduktion festgestellt in den ersten 8 Tagen, keine Emissionsreduktion zwischen Tag 9 bis 16).

Malinska, K., Zabochnicka-Swiatek, M., Dach, J. 2014. Effects of biochar amendment on ammonia emission during composting of sewage sludge. *Ecol. Eng.* 71: 474-478.

Begründung: Einsatz von Pflanzenkohle im Reisanbau oder bei der Rekultivierung von Bauxit Abraumhalden.

Esfandbod, M., Phillips, I.R., Miller, B., Rashti, M.R., Lan, Z.M., Srivastava, P., Singh, B., Chen, C.R. 2017. Aged acidic biochar increases nitrogen retention and decreases ammonia volatilization in alkaline bauxite residue sand. *Ecol. Eng.* 98: 157-165.

Wang, S.W., Shan, J., Xia, Y.Q., Tang, Q., Xia, L.L., Lin, J.H., Yan, X.Y. 2017. Different effects of biochar and a nitrification inhibitor application on paddy soil denitrification: A field experiment over two consecutive rice-growing seasons. *Sci. Total Environ.* 593: 347-356.