

## Der Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierfütterung

Hans-Peter Schmidt<sup>1\*</sup>, Claudia Kammann<sup>2</sup>, Achim Gerlach, Henning Gerlach<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ithaka Institute, Ancienne Eglise 9, CH-1974 Arbaz, Switzerland

<sup>2</sup> Hochschule Geisenheim University, AG Klimafolgenforschung für Spezialkulturen, Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung, Von-Lade-Str. 1, 65366 Geisenheim, Germany

<sup>3</sup> Tierarztpraxis Gerlach, Waldstrasse 78, D-25712 Burg (Dithmarschen), Germany

### Article Info

Vorabdruck des gleichnamigen Kapitels aus dem Buch *Biokohle*, herausgegeben von Peter Quicker und Kathrin Weber, Springer Verlag 2016

Eingereicht am 22. Februar 2016, veröffentlicht am 19. März 2016

Korrespondierender Autor: schmidt@ithaka-institut.org

### Zitierweise:

Schmidt HP, Kammann C, Gerlach A, Gerlach H: Der Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierfütterung, Ithaka-Journal 2016, Arbaz, Switzerland, ISSN 1663-0521, pp. 364-394, [www.ithaka-journal.net/95](http://www.ithaka-journal.net/95)

## 1. Einleitung

### Kaskadennutzung von Pflanzenkohle in der Tierhaltung

Pflanzenkohle ist zu wertvoll und zu kostspielig, um sie nur einmal zu nutzen. Es gibt mehr als 55 Anwendungsmöglichkeiten von Pflanzenkohle, die von der Nutzung als Baumaterial und der Anwendung in Textil- und Papierindustrie bis zur Konservierung von Nahrungsmitteln, der Abschirmung elektromagnetischer Felder in Elektrobauteilen und der Abwasserbehandlung sowie der Herstellung von Batterien reichen (Conte et al., 2015; Schmidt, 2012). Bei nahezu all diesen Anwendungen kann die verwendete Pflanzenkohle am Ende ihres ursprünglichen Nutzungszyklus in verschiedenen anderen Bereichen nutzbringend weiterverwendet werden. Am Ende dieser Nutzungskaskaden kann die Pflanzenkohle dann, je nach Reinheits- und Anreicherungsgrad mit Nährstoffen entweder als Bodenverbesserungsmittel aufbereitet oder der energetischen Nutzung zugeführt werden.

Die momentan vielversprechendste Möglichkeit, Pflanzenkohle vor ihrer letzten Anwendung als Bodenverbesserer wirtschaftlich und ökologisch nutzbringend einzusetzen, ist die Kaskadennutzung in der Tierhaltung. Pflanzenkohle kann dabei als Siliermittel, als Futtermittel,

in der Einstreu, zur Güllebehandlung und als Kompostzusatz eingesetzt werden. In all diesen Anwendungsbereichen soll Pflanzenkohle nicht nur die Qualität des Endprodukts verbessern, sei es die Qualität der Silage, die Tiergesundheit oder die Düngeeigenschaften der Gülle und des Kompostes, sondern nach Möglichkeit auch die klima- und umweltschädlichen Verluste von Nährstoffen reduzieren. Vermutlich reichert sich die Pflanzenkohle von Nutzungsstufe zu Nutzungsstufe mit mehr organischen Nährstoffen an und würde so zu einem wertvolleren organischen Düngemittel für die Landwirtschaft (Schmidt et Shackley, 2016; Schmidt et al., 2015).

Durch den Einsatz in der Tierhaltung modifizieren sich die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Pflanzenkohle. Ebenso wie in der Kompostierung durchläuft die Pflanzenkohle wahrscheinlich auch im Verdauungsprozess einen beschleunigten Alterungsprozess, bei dem sich vermehrt funktionelle Gruppen an den verzweigten Oberflächen der Pflanzenkohle herausbilden können (Joseph et al., 2015b) und die Redoxaktivität erhöht wird (Joseph et al., 2015a; Kluepfel et al., 2014). Es wird vermutet, dass sich durch die Beladung der Pflanzenkohle mit flüssigen organischen Nährstoffen, sei es im Verdauungstrakt, in der Einstreu oder in der Güllegrube, die inneren Oberflächen der porenreichen Kohle

mit einer organischen Schicht überziet, welche sowohl die Wasserspeicherfähigkeit als auch die Nährstoffaustauschkapazität erhöhen (Conte et al., 2013; Kammann et al., 2015; Schmidt et al., 2015). Praxiserfahrungen und neueste Versuchsergebnisse weisen darauf hin, dass die beladene Pflanzenkohle am Ende der Nutzungskaskade in der Tierhaltung zu einem wertvollen organischen Dünger werden könnte, welcher chemische NPK-Dünger ersetzen kann (Schmidt et al. 2016 in prep.) und damit die Möglichkeit bietet, aus den Abfallstoffen der Tierhaltung Düngemittel mit hoher Wertschöpfung zu generieren (Schmidt et al., 2015).

Die Nutzung von Pflanzenkohle in der Tierhaltung wurde erst vor wenigen Jahren wiederentdeckt und seitdem verstärkt genutzt (Gerlach et Schmidt, 2012). Abgesehen von einer Reihe tierärztlicher Veröffentlichungen aus dem letzten Jahrhundert wurden erst seit 2010 wieder wissenschaftlich Untersuchungen über die Fütterung von Pflanzenkohle und deren Einfluss auf die Gesundheit verschiedener Tierarten, auf die Futtereffizienz und den Pathogenbefall sowie auf die Emissionen von Treibhausgasen in der Tierhaltung veröffentlicht. Noch weisen die wissenschaftlichen Grundlagen eine Reihe systematischer Lücken auf, und es ist nach wie vor unklar, weshalb Pflanzenkohle als Futterzusatz die allgemein beobachteten positiven oder neutralen Wirkungen entfaltet.

Für viele Landwirte sind die wissenschaftlichen Erklärungsmodelle allerdings eher unerheblich, solange (1) sichergestellt ist, dass keine negativen Auswirkungen auf die Tiergesundheit und auf die Umwelt zu befürchten sind, und dass (2) die positiven Wirkungen auf Tiergesundheit und Produktivität die Mehrkosten und den Aufwand überwiegen. Da die eigenen Ergebnisse und Beobachtungen bei der Fütterung von Pflanzenkohle offenbar überzeugend sind, nimmt jedes Jahr die Anzahl der Pflanzenkohle fütternden Landwirte zu, so dass derzeit über 80 % der durch die Europäische Pflanzenkohle Stiftung (EBC) zertifizierten Pflanzenkohlen in die Tierhaltung verkauft werden (Schmidt et Shackley, 2016). Zudem versetzen mittlerweile auch Futtermittelhersteller immer häufiger ihre Mischfuttermittel mit Pflanzenkohle, ohne dies allerdings als besonderes Argument in der Werbung zu verwenden. Da schadstofffreie, entsprechend kontrollierte Pflanzenkohle nach der EU-Verordnung als Futtermittel zugelassen ist (EU-Commission, 2011), steht dem auch nichts im Wege.

Im Folgenden soll eine Zusammenfassung des derzeitigen Wissensstandes für die Anwendung von Pflanzenkohle als Futtermittel gegeben werden. Nach einem historischen Überblick wird auf die Funktionsweise von Pflanzenkohle in der Fütterung von Tieren eingegangen. Im dritten Teil geht es um die Adsorption von Schadstoffen und Pathogenen, im vierten Teil um die Auswirkung der Fütterung auf die Produktivität und das Wohl verschiedener

Nutztierarten. In den abschließenden Teilen geht es um etwaige Nebenwirkungen, die Art der Verabreichung, um Treibhausgas- und Ammoniak-Emissionen, sowie um die Zulassungspraxis und die Qualitätskontrolle.

## **2. Historischer Überblick zum Einsatz von Pflanzenkohle als Futtermittel bzw. als Futterzusatz**

Holzkohle ist eines der ältesten Hausmittel gegen Verdauungsstörungen sowohl bei Menschen als auch bei Haustieren (Cato, §70, 1935). Neben Kräutern und Tonerde wurde Holzkohle von Tierhaltern fast aller Kulturen für die Behandlung sämtlicher innerer und einiger äußerer Krankheiten ihrer Tieren verwendet. Es hat offenbar nie geschadet, aber meistens genützt (Derlet et Albertson, 1986). Während die Kohle für einige Tierarten wie Hühner und Schweine pur verabreicht wurde, gab man sie anderen Tieren gemischt mit Butter (Rinder), Eiern (Hunde) oder mit Fleisch (Katzen) (O'Toole et al., 2016).

In einem 1906 erschienenen Lehrbuch über Tierhaltung wurde angemerkt: „Schweine scheinen geradezu süchtig nach ‚unnatürlichen Substanzen‘“. Dies trifft insbesondere auf Sauen zu, die in engen Ställen gehalten werden. Sie fressen geradezu gierig solche Dinge wie Holzkohle, Asche, Braunkohle, fauliges Holz, usw. Wahrscheinlich sind einige dieser Substanzen nicht sonderlich gut für Schweine, aber es besteht kein Zweifel, dass Holzkohle und Holzasche positive Wirkungen zeigten und zur Beruhigung der Schweine beitrugen“ (Day, 1906).

Fachzeitschriften für Landwirtschaft und Tierhaltung aus dem späten 19ten und frühe 20ten Jahrhundert diskutierten ausgiebig sogenannte „tonische Mittel“ für Kühe. Diese bestanden hauptsächlich aus Holzkohle und enthielten zudem Gewürze wie Pfeffer oder bittere Enzianwurzel. Die Hersteller dieser tonischen Mittel behaupteten, sie würden Verdauungsstörungen beheben, den Appetit verbessern und die Milchproduktion erhöhen (Pennsylvania State College, 1905).

In den USA wurde Holzkohle damals offenbar als vorzüglicher Futterzusatz zur Erhöhung des Butterfettgehaltes von Milch angesehen. Anfang des 20ten Jahrhunderts hielt man dort Wettkämpfe für den Buttermilchgehalt von Kuhmilch ab, und die Landwirte legten entsprechend viel Sorgfalt auf die Zusammenstellung der Futterrationen: „Die Getreidemischung, die während der Versuchsphase gefüttert wurde, bestand aus 50 kg getrocknetem Gärgetreide, 25 kg Weizenbran, 50 kg gemahlener Hafer, 50 kg Maisbrei, 50 kg Baumwollsaatmehl... Holzkohle fehlt, wenn überhaupt, so nur selten in den Mischungen der Kuhzüchter“ (Savage, 1917). Später berichteten Totusek und Beeson (1953), dass Pflanzenkohle-Produkte spätestens seit 1880 in der Schweinezucht und seit 1940 in der Hühnerhaltung als Futtermittel eingesetzt wurden,

und zitieren eine Vielzahl von Veröffentlichungen aus der ersten Hälfte des 20ten Jahrhunderts. Etwa zur gleichen Zeit schrieben Steinegger und Menzi (1955): „Es ist in der Schweiz allgemein üblich, Holzkohle zum Hühnerfutter und zum Legehennen-Mehl zu mischen, um Verdauungsproblemen vorzubeugen und überhaupt die Verdauung zu regulieren“.

## 2.1 Holzkohle und Wildtiere

Auf den ersten Blick mag es unnatürlich erscheinen, Tiere mit Pflanzenkohle zu füttern, doch sogar Wildtiere knobbern gelegentlich an Holzkohle, sofern sie frei verfügbar ist. Tatsächlich ist Holz und Pflanzenkohle ja keineswegs eine unnatürliche Substanz, sondern sie entsteht in

### **Holzkohle, Pflanzenkohle, Biokohle, Aktivkohle**

Grundsätzlich sind alle Holzkohlen und Aktivkohlen auch Pflanzenkohlen. Während Pflanzenkohlen aus einer Vielzahl verschiedener, nicht kontaminierter pflanzlicher Biomassen hergestellt werden können, wird Holzkohle nur aus Holz und nicht aus anderen Biomassen hergestellt. Nach dem European Biochar Certificate (EBC) müssen Pflanzenkohlen einen Kohlenstoffgehalt von über 50 % aufweisen, was eine Reihe von sekundären Biomassen wie Viehmist, Klärschlamm, Knochen usw. als Ausgangsmaterial ausschließt. Durch die hohe Kohlenstoffdichte bereits im Ausgangsmaterial Holz (ca. 50 %) weisen Holzkohlen in der Regel höhere Kohlenstoffgehalte ( $C > 80\%$ ) auf als Pflanzenkohlen, die z.B. aus Grünschnitt, Trester, Miscanthus-Gräsern, Stroh oder Getreidespelzen hergestellt wurden; hier liegt der C-Gehalt meist über 60 %, aber unter 80 %. Pflanzenkohlen aus Nussschalen oder Bambus weisen jedoch ebenfalls sehr hohe Kohlenstoffgehalte von teils über 80% auf.

Der Begriff Biokohle wurde früher als Synonym für Pflanzenkohle gebraucht, in Deutschland leider teilweise noch immer. Biokohle wird landläufig als unspezifischer und umgangssprachlicher Sammelbegriff für verschiedene Herstellungsverfahren verwendet (vgl. Kohlesystematik Kapitel Kammann et al., Kasten 1). Biokohlen werden hauptsächlich mit der energetischen Verwertung assoziiert, wobei auch andere Verkohlungsprozesse wie Torrefizierung, Vergasung oder Hydrothermale Karbonisierung (HTC) zum Einsatz kommen.

In der Definition von Pflanzenkohle laut EBC heißt es: „Pflanzenkohle ist ein heterogenes Material, das durch Pyrolyse aus nachhaltig gewonnenen Biomassen hergestellt wird und vorwiegend aus polyaromatischen Kohlenstoffen und Asche besteht. Die Anwendung von Pflanzenkohle führt zu Kohlenstoffsenken, ihre Verbrennung zur Energiegewinnung wird ausgeschlossen“ (EBC, 2012).

Aktivkohlen können aus jedweden Pflanzenkohlen hergestellt werden, wobei im Anschluss an die Pyrolyse ein Aktivierungsprozess nachgeschaltet wird. Wir bezeichnen diese im Folgenden als aktivierte Pflanzenkohlen. Im Aktivierungsprozess wird die Pflanzenkohle bei hohen Temperaturen mit Säuren, Basen, Metallen oder über 800°C heißem Wasserdampf behandelt, wodurch sich die spezifischen Oberflächen der Pflanzenkohlen auf über 1000 m<sup>2</sup>/g erhöhen lassen, und die Adsorptionskapazität ansteigt. Um zudem den Kohlenstoffgehalt von Aktivkohle zu maximieren und den Aschegehalt zu senken, wird Aktivkohle in der Regel mit Säuren gewaschen. So wird zum Beispiel für die Zulassung des Nahrungsergänzungsmittels E153 (Pflanzenkohle) ein Kohlenstoffgehalt von 95 % vorgeschrieben, was sich nur durch eine solche Nachbehandlung mit Säuren erreichen lässt.

Der überwiegende Anteil der in Europa vermarkteten Aktivkohle wird unter mangelhaften Umweltauflagen und mit lückenhafter Qualitätskontrolle in Südostasien hergestellt. Als Ausgangsmaterial dient hier meist Braunkohle, wobei die bei der Aktivierung verwendeten Schwermetalle (vor allem Zink) zu bedenklichen Umweltbilanzen führen. Die derzeit in Europa geltenden Qualitätskontrollen für Aktivkohle sind äußerst mangelhaft. Anders als für EBC zertifizierte Pflanzenkohle sind für Aktivkohlen, die zum Beispiel zur Filtrierung von Trinkwasser eingesetzt werden, bisher keine umfassenden Charakterisierungen vorgeschrieben, sondern lediglich Grenzwerte für ausgewählte wasserextrahierbare Schwermetalle und den wasserlöslichen Anteil weniger PAKs (DIN EN 12903).

In der Regel haben aktivierte Pflanzenkohlen und nicht aktivierte Pflanzenkohle die gleichen Adsorptionseigenschaften, wobei aktivierte Pflanzenkohle effizienter sind und entsprechend geringere Mengen bereits die gewünschte Wirkung erreichen.

relevanten Mengen bei durchaus regelmäßig sich ereignenden Wildfeuern. Noch viele Jahre nach Waldbränden können Wildtiere allenthalben Holzkohlestücke finden. Es wurde mehrfach beobachtet, wie Rotwild und Elche Holzkohle von verkohlten Baumstämpfen im Yellowstone National Park fressen; selbst Haushunde bedienen sich an Holzkohlestücken (Struhsaker et al., 1997). Berühmt in dieser Hinsicht ist der Zanzibar Red Colobus (*Procolobus kirkii*), ein kleiner Affe auf der Insel Zanzibar, der regelmäßig Holzkohle frisst, um so frische Mango- (*Mangifera indica*) und Mandelblätter (*Terminalia catappa*) mit ihren eigentlich für sie toxischen Phenolen zu verdauen (Cooney und Struhsaker, 1997). Struhsaker und Kollegen (1997) beobachteten, dass jene Colobus-Affen täglich 0,25 – 2,5 g Holzkohle pro kg Körpergewicht fressen. Adsorptionstests, die von Cooney und Struhsaker (1997) durchgeführt wurden, zeigten, dass insbesondere die afrikanischen Waldmeilerkohlen, von welchen die Affen ebenfalls fraßen, ausgezeichnete Ergebnisse bei der Aufnahme von heißextrahierten phenolischen Substanzen der oben erwähnten Baumblätter aufwiesen. Die Autoren schlossen aus ihren Untersuchungen, dass das tägliche Fressen von Holzkohle ein vermutlich selbsterlerntes Verhalten der Affen sei, um die Verdaulichkeit ihrer typischen Blattkost zu verbessern. Tatsächlich stellte sich bei Zählungen auf der afrikanischen Insel heraus, dass die Holzkohle fressenden Colobus-Affen die höchste Populationsdichte aller Affenarten der Welt aufwiesen. Somit scheint ihnen der tägliche Verzehr von (nicht zertifizierter) Holzkohle auch langfristig offenbar nicht zu schaden.

### 3. Funktionsweise von (aktivierter) Pflanzenkohle in der Fütterung

#### 3.1. Adsorption

Bevor Pflanzenkohle Anfang der 2000er Jahre als Futtermittel untersucht und eingesetzt wurde, galt aktivierte Pflanzenkohle insbesondere als Tierarznei bei Verdauungsstörungen und Vergiftungen. Auch Holzkohle ist seit vielen Jahrhunderten als Notfallbehandlung bei Vergiftungen von Tieren (und Menschen) bekannt (Decker et Corby, 1971).

Pflanzenkohle bzw. Aktivkohle wurde und wird hierbei aufgrund ihrer hohen Adsorptionskapazität für eine Vielzahl verschiedener Toxine eingesetzt. Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen waren hier insbesondere die Adsorption von Mykotoxinen, Pflanzentoxinen, Pestiziden sowie toxischen Stoffwechselprodukten von Pathogenen. Die sogenannte Adsorptionstherapie, wobei aktivierte Pflanzenkohle als nicht verdauliches Trägermittel eingesetzt wird, gilt als eine der wichtigsten Methoden zur Verhinderung gesundheitsschädigender oder tödlicher Wirkungen von oral aufgenommenen Toxinen

(McKenzie, 1991; McLennan et Amos, 1989).

Aus Sicht der Toxikologie basiert die Wirkung der Pflanzenkohle dabei auf den folgenden Mechanismen: Adsorption, Koadsorption, Konkurrenz, Chemosorption, Adsorption mit nachfolgender chemischer Reaktion, und Desorption (Gerlach und Schmidt, 2012). Allerdings sind hier die zeitabhängigen Vorgänge der Adsorption, Verteilung, Biotransformation und der Ausscheidung der zu betrachtenden toxischen Substanzen im Verdauungstrakt der Tiere zu unterscheiden und einzuordnen.

In seiner 1984 veröffentlichten Dissertation: „Aktivkohle und ihre Wirkung auf Bakterien und deren Toxine“ beschreibt Ulf Schirrmann (1984) die Aktivkohle in ihrer Wirkung auf Bakterien und deren Toxine im Gastrointestinaltrakt:

- Adsorption von Proteinen, Aminen, Aminosäuren
- Adsorption von Enzymen des Verdauungstraktes sowie Konzentrierung bakterieller Exoenzyme an der Aktivkohle
- Adsorption mobiler, über spezielle Anheftungsmechanismen verfügbarer Keime durch Chemotaxis.
- Spezifische Besiedlung der Pflanzenkohle mit gram-negativen Keimen mit erhöhter Stoffwechsellleistung, was einerseits zu geringerer Produktion zu resorbierender Endotoxine und andererseits zu rascherer Adsorption dieser Toxine an die Kohle führt.

Ein weiterer großer Vorteil in der Anwendung von Pflanzenkohle liegt in der Fähigkeit zur „Enteralen Dialyse“. Dies heißt, bereits absorbierte lipophile Toxine können durch die Kohle aus dem Blutplasma entfernt werden, wobei die große Adsorptionskraft der Kohle mit den günstigen Permeabilitätseigenschaften des Darmes interagieren (Schirrmann, 1984). Die Geschwindigkeit der Adsorption hängt vermutlich von der Porengröße der Aktivkohle ab (Gerlach et Schmidt, 2012).

Susan Pond (1986) erläutert in ihrer frühen medizinischen Studie verschiedene Mechanismen, aufgrund derer die Pflanzenkohle Toxine aus dem Körper eliminieren kann. Pflanzenkohle kann erstens den enterohepatischen Kreislauf unterbrechen und verhindern, dass Verbindungen wie Östrogene und Progestagene, Digitoxin, organische Quecksilber- und Arsenverbindungen sowie Indomethacin von der Galle aufgenommen werden. Zweitens betrifft dies Verbindungen wie Digoxin, die aktiv in den Darm ausgeschüttet werden. Drittens werden Verbindungen wie Pethidine adsorbiert, die passiv in den Darm diffundieren. Viertens kann die Pflanzenkohle Verbindungen aufnehmen, welche entlang eines Konzentrationsgradienten zwischen Darmblut und Primärharn diffundieren.

### 3.2 Redoxpotential, Elektronenvermittlung und mikrobielles Milieu

Während die Adsorptionskapazität der am häufigsten untersuchte und bekannteste Wirkungsmechanismus von Pflanzenkohle ist, kann die ausschließliche Beschränkung auf diese Funktion nicht sämtliche beobachteten Phänomene erklären. Erst seit kurzem wird eine weitere, womöglich entscheidende Funktion der Pflanzenkohle, nämlich ihre elektro-biochemische Interaktion in biologisch aktiven Systemen diskutiert. Pflanzenkohle, die bei Temperaturen von über 550°C hergestellt wurde, ist nicht nur ein guter elektrischer Leiter (Mochidzuki et al., 2003; Yu et al., 2015), sondern kann in chemischen und mikrobiellen Redoxreaktionen als Elektronen-Vermittler (electron mediator) sowohl Elektronen aufnehmen als auch abgeben (Husson, 2012; Joseph et al., 2015a; Kluepfel et al., 2014; Liu et al., 2012; Van der Zee et Cervantes, 2009; Yu et al., 2015). Die elektrische Leitfähigkeit von Pflanzenkohle beruht dabei nicht auf einem kontinuierlichen Elektronentransfer wie z.B. bei einem Kupferdraht, sondern auf einem diskontinuierlichen Elektronen-Hopping (Kastening et al., 1997), was von entscheidender Bedeutung für die Funktion der Elektronen-Vermittlung ist.

Beim mikrobiellen Abbau organischer Substanzen im Verdauungstrakt und insbesondere im anaeroben Pansen sind Bakterien darauf angewiesen, Elektronen, die beim Abbau organischer Substanz überzählig werden, abzugeben. Dies geschieht in komplexen Redoxreaktionen, durch die Moleküle oder Atome Elektronen abgegeben (donnate) und von anderen Molekülen oder Atomen aufgenommen (accept) werden. Damit diese Verdauungsreaktionen stattfinden können, müssen diese Redoxreaktionen, bei denen es zum Austausch von Elektronen kommt, in der Regel in unmittelbarer Nähe voneinander stattfinden, denn Elektronen können nicht frei im Verdauungssaft schwimmen, sondern sind immer durch Atome bzw. Moleküle gebunden und können immer nur von einem Atom (Bindungszustand) zu einem anderen übergehen.

Die direkte Kopplung der Elektronen abgebenden und aufnehmenden Reaktionen (Redoxreaktion) kann allerdings durch einen sogenannten Elektronenvermittler (electron mediator) überbrückt werden, indem er an der einen Stelle Elektronen eines chemisch reagierenden Moleküls oder Atoms aufnimmt und sie an anderer Stelle wieder an ein anderes Atom oder Molekül abgibt. Es gibt zahlreiche solche elektronenvermittelnden Substanzen, wie z.B. Thionin, Tannine, Methylblau oder Quinon, doch besonders große und effiziente natürliche Elektronenvermittler sind Huminsäuren, Holzessig und Pflanzenkohle (Bhatta et al., 2012; Kluepfel et al., 2014; Kluepfel et al., 2014; Liu et al., 2012; van der Zee et al., 2003).

Zwar sind in einer ausgewogenen Tierernährung natürlicherweise zahlreiche elektronenvermittelnde Substanzen

enthalten, doch gerade bei intensiver, energiereicher Fütterung sind diese häufig nicht ausreichend (Sophal et al., 2013). Werden inerte oder sonstige nicht-toxische Elektronenvermittler wie z.B. Pflanzenkohle, Holzessig oder Huminsäuren dem Futter zugesetzt, können offenbar vielfältige Redoxreaktionen effizienter ablaufen, was wahrscheinlich die Energieausbeute und damit die Futteffizienz erhöht (Leng et al., 2013a; Liu et al., 2012).

Im Verdauungstrakt verschiedener Tiere werden quasi alle Futter abbauenden Reaktionen von Mikroorganismen (v.a. Bakterien, Archaeen, Ciliaten) ausgeführt bzw. vermittelt. Hierbei agieren die mikrobiellen Zellen ihrerseits häufig auch als Elektronenvermittler, da sie nur eine bestimmte Menge an Elektronen in innerzellularen Verbindungen aufnehmen können und überzählige Ladungen abgeben müssen. Diese Ladungsverteilung und -vermittlung geschieht häufig über den Biofilm, mit dem die zu verdauenden Futterpartikel überzogen werden. Allerdings sind bakterielle Biofilme keine sonderlich guten elektrischen Leiter, so dass sich mikrobielle Redoxreaktionen durch andere Elektronen vermittelnde Substanzen wie Huminsäuren oder eben Pflanzenkohle optimieren lassen. Tatsächlich ist die elektrische Leitfähigkeit von aktivierten Pflanzenkohlen um das 100 bis 1000fache höher als die von bakteriellen Aggregaten (Liu et al., 2012).

Auch wenn die Leitfähigkeit von nicht aktivierten Pflanzenkohlen deutlich niedriger ist, konnten (Chen et al., 2014) nachweisen, dass Pflanzenkohle Elektronen zwischen Bakterienzellen transportieren kann (im Englischen wird hierfür der Begriff „electron shuttling“ verwendet). Dank der Elektronenvermittlung über die Pflanzenkohle kann ein Bakterium z.B. an einer Seite eines Pflanzenkohlepartikels ein Elektron abgeben und ein anderes Bakterium an einer anderen Stelle des gleichen Partikels ein anderes Elektron wieder aufnehmen. Die Pflanzenkohle fungiert hier quasi wie eine Batterie, die je nach Bedarf der Reaktionszentren aufgeladen oder entladen wird (Liu et al., 2012). Pflanzenkohle erleichtert somit den direkten Elektronentransfer zwischen verschiedenen mikrobiellen Arten (der englische Fachbegriff lautet: direct interspecies electron transfer (DIET)) oder Konsortien (d.h. funktionellen mikrobiellen Gemeinschaften verschiedener Arten) (Chen et al., 2014). Es ist zu vermuten, dass sich dadurch die Effizienz des biologischen Abbaus der Futterstoffe verbessert, und sich somit die Energieeffizienz der Verdauung und schließlich die Futternutzungseffizienz erhöht. Ron A. Leng et al. (2012) vermuten zudem, dass dies auch ein Grund für die von ihnen festgestellte Reduktion von Methanemissionen bei Rindern durch Fütterung von Pflanzenkohle sein könnte (siehe Abschnitt 6 unten).

Es ist darüber hinaus sehr wahrscheinlich, dass Pflanzenkohle im Verdauungstrakt auch direkt als Redoxrad (redox wheel) fungiert und ähnlich wie ein FeIII-FII-Re-

doxrad als variabler Elektronenakzeptor und Elektronendonator verschiedenste Redoxreaktionen koppelt (Davidson et al., 2003; Joseph et al., 2015a; Quin et al., 2015). Pflanzenkohle enthält neben dem eigentlichen polyaromatischen Gerüst eine Vielzahl volatiler und/oder auswaschbarer organischer Kohlenstoffverbindungen (VOCs, DOCs) (Graber et al., 2014; Spokas et al., 2011), die teils selbst starke Elektronenakzeptoren sind oder, wie beispielsweise Quinone, selbst als Redoxrad fungieren können (van der Zee et al., 2003). (Yu et al., 2015) bezeichnet diese als redox-aktive funktionale Gruppen (RAMs). Es kann vermutet werden, dass an einem Pflanzenkohlestück im Verdauungstrakt eine Vielzahl verschiedener RAMs oder Redoxräder simultan mit unterschiedlichen Mikroorganismen interagieren. Die Pflanzenkohle kann somit in unmittelbarer Umgebung ihrer Oberflächen das Redoxpotential puffern und für verschiedene Mikroorganismen stabile Mikrohabitate mit verschiedenen Redox-pH-Milieus bieten (Yu et al., 2015). Hinzu kommt, dass Pflanzenkohle andere, natürlich im Futter vorhandene oder durch den Stoffwechsel entstehende Substanzen wie Tannine, Phenole oder Thionin adsorbiert, welche ebenfalls Elektronenakzeptoren sind und somit möglicherweise die Elektronenpufferung der Pflanzenkohle während der Verdauung noch weiter verbessern. Die Pflanzenkohle macht daher nicht nur Toxine durch Adsorption unschädlich, sondern nutzt vermutlich sogar deren Redoxpotential und verbessert die eigene „Batterieleistung“.

Ebenso wie Huminsäuren und der bei der Pyrolyse entstehende Holzessig wirkt Pflanzenkohle als Redoxpuffer (Husson, 2012; Kluepfel et al., 2014), was nicht zuletzt erklärt, weshalb die Fütterung mit Huminsäuren, Holzessig und Pflanzenkohle jeweils ähnliche Wirkungen zeitigt, und weshalb die gemischte Verabreichung zusammen mit Pflanzenkohle die einzelnen Effekte offenbar noch verstärkt (Gerlach et al., 2014b; Watarai et al., 2008).

Pflanzenkohle bietet im Gegensatz zu flüssigen Zusätzen ein stabiles, oberflächenreiches Gerüst, über das sich die organischen Flüssigkeiten auf geringstem Raum mit maximaler Oberfläche entfalten können (organic coating), um v.a. im Makroporenbereich mikrobiell besiedelt zu werden. Dank der Redoxpuffer-Wirkung werden die für Bakterien besonders schädlichen Schwankungen des Redoxpotentials im Verdauungstrakt verringert, was wiederum die Aktivität jener Mikroorganismen fördert, die in den jeweiligen Bereichen ihr Optimum finden (Cord-Ruwisch et al., 1988; Kalachniuk et al., 1978). Gerade im Umkreis von selbst kleinsten Pflanzenkohlepartikeln können sich so mikrobielle Hotspots und stabilere Redoxreaktionszentren ausbilden. Es ist zudem zu vermuten, dass sowohl die Pufferung des Redoxpotentials als auch der Effekt der Elektronenvermittlung zwischen verschiedenen mikrobiellen Arten ein selektives, milieu-

bildendes Kriterium ist, das die Ausbildung funktionaler Konsortien oder bestimmter Artenspektren beschleunigt oder begünstigt (Kalachniuk et al., 1978). Dies könnte erklären, weshalb in mehreren Studien z.B. eine starke Zunahme von Laktobazillen oder eine Abnahme von gram-negative Bakterien festgestellt wurde (Choi et al., 2009; Naka et al., 2001).

Noch steht die Wissenschaft hinsichtlich der elektrochemischen Beeinflussung der Verdauung durch bestimmte Futtermittelzusätze relativ am Anfang, aber basierend auf den bereits vorhandenen Erkenntnissen aus der technischen Elektrochemie (Gregory et al., 2004; Konso-lakis et al., 2015; Nevin et al., 2010) lässt sich mit einiger Sicherheit die Hypothese aufstellen, dass Pflanzenkohle einen direkten elektrochemischen Einfluss auf die Verdauungsreaktionen ausübt und dass dies auch ein Grund, wenn nicht der Hauptgrund, für die unterschiedliche Wirkung unterschiedlicher Pflanzenkohlen ist. Elektrische Leitfähigkeit, Redoxpotential, Elektronenpufferung und Elektronenvermittlung einer bestimmten Pflanzenkohle variieren je nach der für sie verwendeten Biomasse, Pyrolysetemperatur und Pyrolysebedingungen erheblich (Yu et al., 2015). Je höher die Temperatur und je geringer der Kondensat-Anteil, desto besser ist die Leitfähigkeit und Elektronenpufferung (Joseph et al., 2015a), wobei auch der Mineralgehalt eine entscheidende Rolle spielt. Es schränkt daher zukünftige Anwendungsoptionen sehr stark und unnötig ein, wenn, wie derzeit vom Gesetzgeber vorgegeben, nur aschearme Pflanzenkohle als empfehlenswert betrachtet wird.

Im folgenden Abschnitt wird nun zunächst die Funktion von Pflanzenkohle als Adsorbent von Schadstoffen beschrieben. Der darauffolgende Abschnitt betrachtet die Wirkungen regelmäßiger Fütterung von Pflanzenkohle zur Verbesserung von Leistung und Wohl verschiedener Tierarten.

## **4. Adsorption von Schadstoffen**

### **4.1 Adsorption von Mycotoxinen**

Die Belastung von Tierfutter mit Mycotoxinen ist ein weltweites Problem. Laut Mézes et al. (2010) sind bis zu 25 % der weltweiten Futtermittelproduktion mit Mycotoxinen belastet. Die Toxine stammen hauptsächlich von Schimmelpilzen, deren Bildung auf frischen und gelagerten Futtermitteln insbesondere in feuchten Klimaten nur schwer zu verhindern ist. Mycotoxin-belastetes Futter kann schwerwiegende Erkrankungen von Nutztieren zur Folge haben. Zum Schutz der Tiere werden dem Futter meist Adsorptionsmittel beigemischt, um so die Mycotoxine rechtzeitig zu binden. Neben den häufig eingesetzten Alumosilikaten werden vermehrt Aktivkohle und auch spezielle Polymere eingesetzt (Huwig et al., 2001).

Als eines der am meisten verbreiteten Mycotoxine gilt Aflatoxin, das daher auch in zahlreichen Studien als Modellschubstanz zur Untersuchung des Adsorptionsverhaltens von Pflanzenkohle herangezogen wird. Durch den Einsatz von Pflanzenkohle soll die chemische Einbindung des Toxins (Komplexierung) gefördert werden, wodurch die Körperaufnahme im Verdauungstrakt reduziert und der Übergang in Blut und Milch verringert wird (Galvano et al., 1996b). Galvano und seine Mitarbeiter (1996b) konnten bei einer Zugabe von 2 % Aktivkohle in pelletiertes mit Aflatoxin versetztes Futter von Milchkühen die Aflatoxinkonzentration im Futter um bis zu 74 % und die Konzentration in Milch bis zu 45 % senken. Der nicht systematische Vergleich verschiedener Aktivkohlen zeigte allerdings, dass hinsichtlich der Adsorptionseffizienz erheblich Unterschiede zwischen verschiedenen Qualitäten von Pflanzenkohlen bestehen.

Diaz et al. (2003) konnten bei einer Untersuchung in-vitro zeigen, dass vier verschiedene Aktivkohlen 99 % Aflatoxin B aus einer 0,5 %igen Aflatoxin-B-Lösung adsorbierten. Als Diaz jedoch ein Jahr später bei in-vivo Tests 0,25 % Aktivkohle zu Aflatoxin-B kontaminierten Futter von Milchkühen gab, konnte er keine signifikante Reduktion der Aflatoxin-B-Gehalte in der Milch nachweisen (Diaz et al., 2004). Allerdings wurde bei dem in-vivo Test nur eine ungenügend charakterisierte Aktivkohle in der sehr geringen Gesamtfutterkonzentration von 0,25 % gefüttert, während in den meisten in-vivo Untersuchungen die Futterzugaben von Pflanzenkohlen eher 1 – 3 % betragen.

Galvano (1996a) untersuchte ebenfalls in-vitro die Adsorptionskapazität zahlreicher verschiedener Aktivkohlen für die beiden Mycotoxine Ochratoxin A (OA) und Deoxynivalenol (DON) und konnte feststellen, dass die Aktivkohlen 0,80 bis 99,86 % des OA und 1,83 bis 98,93 % des DON adsorbierten, womit deutlich bestätigt wurde, wie wichtig eine systematische Charakterisierung und Klassifizierung der Pflanzenkohle-Eigenschaften und -Wirkungsweisen beim Einsatz in der Tierfütterung ist. Galvano und seine Kollegen schlussfolgerten, dass weder die klassische zur Aktivkohlecharakterisierung verwendete Jodnummer noch die spezifische BET-Oberfläche Voraussagen hinsichtlich der Adsorptionskapazität für diese Mycotoxine zuließen, der Methylen Blue Index jedoch zuverlässigere Resultate lieferte. Galvano und Kollegen forderten zudem, die Dosierung von Pflanzenkohle und die Langzeitwirkungen auf die Adsorption essentieller Nährstoffe zu untersuchen.

Di Natale et al. (2009) verglichen verschiedene natürliche und synthetische adsorbierende Futterzusätze für Milchkühe zur Reduktion des Aflatoxin-Gehaltes in der Milch. Aktivierte Pflanzenkohle wies die höchste Toxinreduktion auf (> 90 % Aflatoxinreduktion in Milch bei 0,5 g Afla-

toxin pro kg Futter). Analytische Untersuchungen der Milch zeigten zudem leichte, als positiv zu bewertende Auswirkungen auf die Zusammensetzung von organischen Säuren, Laktose, Chloriden, auf den Proteingehalt und den pH-Wert. Di Natale und seine Koautoren erklären die hohe Adsorptionskapazität durch die hohe spezifische Oberfläche in Verbindung mit günstiger Mikroporengrößenverteilung der Pflanzenkohle und die hohe Affinität von Aflatoxin zur polyaromatischen Oberfläche der Pflanzenkohle. Im Vergleich zur Pflanzenkohle hatte das ebenfalls eingesetzte Bentonit eine leicht reduzierte Adsorptionskapazität bei gleichzeitig geringerer Beeinflussung der analytischen Milchwerte (Di Natale et al., 2009).

Bueno et al. (2005) untersuchten die Adsorptionskapazität verschiedener Dosierungen von aktivierter Pflanzenkohle (0,1, 0,25, 0,5, 1 %) für Zearalenone (ZEA), einem gefährlichen östrogenen Metaboliten der Schimmelpilzart *Fusarium*, für das bisher keine Behandlungsmittel gefunden worden waren. In-vitro konnte bei jeder der vier Dosierungen von Pflanzenkohle sämtliches ZEA gebunden werden. Auch wenn in-vivo, wo verschiedenste Mycotoxine und zahlreiche andere organische Moleküle in Konkurrenz um die freien Adsorptionsflächen der Pflanzenkohle stehen, kaum so hohe Adsorptionsraten für einzelne Moleküle zu erreichen sein werden, so bestätigen die in-vitro Tests eine hohe Affinität von Mycotoxinen und Pflanzenkohle, was die Assimilation zahlreicher Mycotoxine im Verdauungstrakt von Tieren als sehr wahrscheinlich erscheinen lässt.

In einer von Peter Erickson geleiteten Studie mit Holsteiner Milchkühen (Erickson et al., 2011) wurde untersucht, inwiefern die negativen Effekte pilzkontaminierter Futtersilage durch eine Zugabe von aktivierter Pflanzenkohle (0, 20 oder 40 g zur Tagesration) reduziert werden können. Kühe, denen zu der kontaminierten Silage Pflanzenkohle verabreicht wurde, wiesen eine höhere Futteraufnahme und bessere Verdaulichkeit von NDF (Neutrale Detergentien Faser), Hemizellulose und Rohprotein auf, hatten einen höheren Milchfettgehalt und einen besseren allgemeinen Gesundheitszustand. Wurde die gleiche Menge an Pflanzenkohle zu unkontaminierter Qualitätssilage verabreicht, konnten keine Veränderungen am Verdauungsverhalten, der Milchqualität oder irgendeiner sonstigen Auswirkung auf die Milchkühe festgestellt werden. Die Autoren schließen mit dem Hinweis, dass bei guter Futterqualität eine Zufütterung von Pflanzenkohle nicht notwendig sei, aber auch nicht schade.

Während Piva et al. (2005) bei einer 1 %igen Zugabe von Pflanzenkohle zum Futter von Ferkeln keinen Schutz vor den schädigenden Auswirkung von Fumonisin feststellen konnten, zeigten Nageswara Rao und Chopra (2001), dass die 1 %ige Zugabe von Pflanzenkohle zum Futter

von Ziegen die Übertragung von zugefüttertem Aflatoxin B1 (100 ppb) in die Milch (als Aflatoxin M1) um 76 % reduzierte. Die Effizienz von aktivierter Pflanzenkohle war signifikant höher als die von Bentonit (65,2 %). Beide Adsorptionsmittel beeinflussten weder die Zusammensetzung der Ziegenmilch noch die durchschnittliche Höhe der Milchproduktion.

Während in-vitro Studien mit Verdauungsflüssigkeiten von Schweinen hohe Adsorptionsraten für Fusarium-Toxine wie *Deoxynivalenol* (67 %) und *Zeralenone* (100 %) sowie *Deoxynivalenol* (51 %) und *Nivalenol* (21 %) durch aktivierte Pflanzenkohle zeigten (Avantaggiato et al., 2005; Döll et al., 2007), konnten Jarczyk et al. (2008) bei in-vivo Tests mit 10 % aktivierter Pflanzenkohle (TM) pro kg Futtermittel keine signifikanten Auswirkungen nachweisen. Weder im Blutserum noch in den Nieren, der Leber oder im Muskelgewebe konnte die Ochratoxin-Konzentrationen durch geringe Zufütterung mit nicht charakterisierter industrieller Pflanzenkohle reduziert werden (Jarczyk et al., 2008). Es wurden jedoch auch keine negativen Wirkungen festgestellt.

Neuvonen und Olkkola (1988) äußerten in ihrer einflussreichen Veröffentlichung „Oral Activated Charcoal in the Treatment of Intoxications“, dass in-vitro Studien nur schwer auf die klinische Praxis übertragbar seien: „Die antidotale Wirkung von aktivierter Pflanzenkohle beim Menschen muss durch direkte Untersuchungen am menschlichen Patienten untersucht und nachgewiesen werden.“ Dieser Aussage kann auch aus veterinärmedizinischer Sicht nur beigeprüft werden. Wie seit langem bekannt, beeinträchtigt der gastrointestinale Inhalt die Adsorption bestimmter Toxine durch die verabreichte Pflanzenkohle wesentlich (Andersen, 1948).

Mycotoxine verursachen bei Geflügel häufig schwerwiegende Leberschäden. Aus diesem Grund untersuchten bereits in den 1980er Jahren A. Ademoyero und R. Dalvi (1983) den Einfluss der Zufütterung von aktivierter Pflanzenkohle (täglich 0,02 % vom Körpergewicht). In mehreren Studien konnten die beiden Autoren nachweisen, dass die Aktivität entscheidender Leberenzyme durch die verabreichte Pflanzenkohle signifikant erhöht wurde (Ademoyero et Dalvi, 1983a, b; Dalvi et Ademoyero, 1984). Während Aflatoxin (10 ppm) die Futteraufnahme und Gewichtszunahme von Masthühnern senkte, konnte durch die Zugabe von 0,1 % Pflanzenkohle (w/w) der negative Trend umgekehrt werden (Dalvi et McGowan, 1984).

Zwei Studien von 1990 und 2006, die die Wirkung von aktivierter Pflanzenkohle mit einem Tonerdeprodukt (hydratisiertes Natrium Kalzium Aluminosilikat) verglichen, fanden beide, dass das Tonerdeprodukt die Leber- und Blutwerte der mit Aflatoxin B (0, 40, 80 µg AFB1 pro kg Futter) zugefütterten Masthühner signifikant verbes-

serte, nicht aber 0,25 % bzw. 0,5 % aktivierte Pflanzenkohle (Denli et Okan, 2007; KUBENA et al., 1990). Im Widerspruch dazu fanden Edrington et al. (1996), dass aktivierte Pflanzenkohle die Aflatoxin B Konzentration im Kot von Masthühner reduzierte, allerdings nur, wenn die Pflanzenkohle getrennt vom Futter verabreicht wurde. Toth et Dou (2015) dokumentieren in ihrem Review-Artikel weitere widersprüchliche Studien, in denen die Fütterung von Pflanzenkohle die Auswirkungen von Mycotoxin-Vergiftungen linderten oder auch nicht. Allen diesen meist frühen Studien ist gemein, dass lediglich handelsübliche Aktivkohlen verwendet wurden, ohne diese vorab zu charakterisieren und zu klassifizieren. Ein solches Vorgehen ist bei fachübergreifender, akademischer Forschung leider nur allzu häufig und lässt eine Systematisierung der so gewonnenen Resultate nur beschränkt zu. Zudem ist all diesen Studien gemein, dass in-vitro Untersuchungen von adsorbierenden Futtermitteln wie Pflanzenkohle nur sehr bedingt auf in-vivo Testergebnisse übertragbar waren. Hier besteht großer Forschungsbedarf im Hinblick auf die systematische Charakterisierung der verwendeten.

#### 4.2. Adsorption von Pathogenen (Bakterien, Parasiten, Viren) und deren Stoffwechselprodukten

Die Anwendung von aktivierten und nicht aktivierten Holzkohlen zur Verbesserung der Tiergesundheit wurde schon zu Beginn des 20ten Jahrhunderts von deutschen Tierärzten empfohlen und untersucht. Bereits seit 1914 wurde die adsorbierende Wirkung von Holzkohle für verschiedene Toxine im Verdauungstrakt beschrieben (Skutetzky et Starkenstein, 1914), wobei erste Versuche mit bakteriellen Toxinen wie *Clostridium tetani* und *Clostridium botulinum* oder auch mit Diphtherie-Toxin durchgeführt wurden (Jacoby, 1919). Insbesondere L. Wiechowski leistete hier bahnbrechende Arbeit und machte schon damals darauf aufmerksam, wie wichtig die Qualität der Kohle sei, und wie unterschiedlich die Wirkung unterschiedlicher Kohlen auf die Toxinadsorption sein kann (Wiechowski, 1914). Mangold (1936) stellte die Wirkung der Holzkohle in der Tierfütterung umfassend dar und schlussfolgerte: "Die prophylaktische und therapeutische Wirkung der Holzkohle gegen infektiöse oder durch die Art der Fütterung bedingte Durchfallerscheinungen steht fest, und in diesem Sinne erscheint auch die Holzkohlebeigabe an Jungtiere als Vorbeugungsmittel zweckmäßig". Volkmann (1935) beschreibt eine effiziente Reduktion der Oozystenausscheidung (Oozysten sind Sporen von Parasiten) durch Holzkohlezufütterung bei Kokzidiose und Kokzidieninfektionen von Haustieren.

Gerlach et al. (2014) konnten nachweisen, dass die tägliche Zufütterung von 400 g nicht aktivierter Pflanzenkohle nach vierwöchigem Einsatz bei Rinder die Antikörperkonzentration gegen den Botox-produzierenden Erreger

*Clostridium botulinum* im Blut signifikant gegenüber dem Ausgangswert verringerte. Sie schlussfolgerten daraus, dass im Magen-Darm-Trakt der Tiere die Neurotoxinkonzentration durch die Pflanzenkohle reduziert worden war. Die Zufütterung von lediglich 200 g Pflanzenkohle pro Tag zeigte nicht die gleiche Wirksamkeit. Wenn diese geringere Dosierung jedoch mit 500 ml Sauerkrautsaft vermischt wurde, konnte eine ähnlich signifikante Reduktion der *C. botulinum* Antikörper im Blut gemessen werden.

Knutson et al. (2006) verabreichten Schafen, die mit *Escherichia coli* und *Salmonella typhimurium* infiziert wurden, 77 g aktivierte Pflanzenkohle pro Tier und Tag. Obwohl Naka et al. (2001) durch in-vitro Untersuchungen gezeigt hatten, dass *E. coli* O157:H7 (EHEC) -Zellzahlen von  $5.33 \times 10^6$  durch 5 mg/ml aktivierter Pflanzenkohle auf unter 800 reduziert wurde, ergab der in-vivo Test von Knutson und Kollegen keine Bindung weder von *E. coli* noch von *Salmonella typhimurium* im Gastrointestinaltrakt der Schafe. Die Autoren vermuteten, dass entweder die Bindungsstellen der Pflanzenkohle durch konkurrierende Substanzen oder Bakterien im Verdauungstrakt besetzt wurden, oder dass der Zeitpunkt zwischen der Infektion mit den Erregern und der Verabreichung der Pflanzenkohle zu lang war.

Schirrmann (1984) zeigte bereits früh, dass Pflanzenkohle offenbar besonders anziehend auf gram-negative Bakterien (z.B. *E. coli*) mit hoher Stoffwechselaktivität wirkt (siehe dazu mehr unten in Abschnitt 8: Nebenwirkungen von Pflanzenkohle).

Rindergülle enthält häufig *E. coli* O157:H7 (EHEC) Bakterien, welche Wasser und Boden kontaminieren und in die menschliche Nahrungskette eindringen können (Diez-Gonzalez et al., 1998). Pflanzenkohle hat nicht nur das Potential, *E. coli* und deren toxische Stoffwechselprodukte bereits im Verdauungstrakt zu adsorbieren, sondern auch durch Zugabe in Gülle die Verbreitung der Bakterienstämme im Wasser und Boden zu reduzieren. Gurtler et al. (2014) untersuchten die Wirkung verschiedener Pflanzenkohlen auf die Inaktivierung von *E. coli* O157:H7 (EHEC) in Böden. Alle Pflanzenkohlen, die entweder mit Fast oder mit Slow Pyrolyse-Anlagen aus Rutenhirse, Pferdemist oder Hartholz hergestellt wurden, konnten die EHEC-Konzentrationen signifikant reduzieren, wobei Fast Pyrolysis Pflanzenkohlen aus Rutenhirse und aus Eichenholz die besten Resultate in den kontaminierten Bodenmischungen ergaben und EHEC nach 4 Wochen unauffindbar werden ließen (Gurtler et al., 2014).

Abit et al. (2012) untersuchten, wie sich *E. coli* O157:H7 und *Salmonella enterica* in mit Wasser gesättigten Bodensäulen aus Feinsand und sandigem Lehm im Boden verteilen, wenn die Bodensäulen mit 2 % Pflanzenkohle versetzt wurden; die Pflanzenkohlen waren wiederum aus

verschiedenen Biomassen und bei verschiedenen Temperaturen hergestellt. Während bei 350°C hergestellte Pflanzenkohle aus Hühnermist die Bindung beider Bakterien nicht verbesserte, konnte die Zugabe von bei 750° hergestellter Pflanzenkohle sowohl aus Kiefernholz als auch aus Hühnermist signifikant die Verbreitung der Bakterien minimieren. In einer späteren Studie zeigten die Autoren erhebliche Unterschiede der Immobilisierung zwischen den beiden untersuchten Bakterienstämmen und äußerten die Vermutung, dass die Oberflächeneigenschaften der Bakterien eine wesentliche Rolle bei der Bindung der Bakterien an die Pflanzenkohle spielen (Abit et al., 2014).

Da *E. coli* Infektionen sich innerhalb von Rinderherden vermutlich durch Trogwasser verbreiten, sollte die prophylaktische Zugabe von Pflanzenkohle zu Trogwasser näher untersucht werden.

In einer japanischen Studie (Watarai et Tana, 2005) konnte durch die Mischung des Futters mit 1 bzw. 1,5 % Bambuskohle und Bambusessig die Konzentration von *E. coli* und Salmonellen im Hühnerkot leicht, aber signifikant gesenkt werden. Ein patentiertes Holzkohle-Holzessig-Produkt, Nekka-Rich (Besnier, 2014), dessen Zusammensetzung allerdings nicht vollständig nachvollziehbar ist, zeigte eine hochsignifikante Reduktion von Salmonellen im Kot von Hühnern. Es wurde in der Studie zudem festgestellt, dass das Holzkohle-Holzessig-Produkt die toxischen gram-negativen *Salmonella enterica* Bakterien reduzierte, nicht aber die in der Darmflora allgegenwärtigen, nicht toxischen, gram-positiven *Enterococcus faecium* Bakterien (Watarai et Tana, 2005).

0,3 % Bambus-Pflanzenkohle unterdrückte bei Schweinen die fäkale Exkretion von gram-negativen coliformen Bakterien und von ebenfalls gram-negativen Salmonellen um das 20- bzw. 1100-fache im Vergleich zur Kontrolle ohne Pflanzenkohle (Choi et al., 2009). Die Wirkung der Pflanzenkohle auf die Unterdrückung beider Bakterienarten war in der gleiche Größenordnung wie die von Antibiotika. Im Vergleich zur Behandlung mit Antibiotika führte die Fütterung mit Pflanzenkohle zu einer 190-fach höheren Anzahl nützlicher Darmbakterien und 48-fach höhere Anzahl an Laktobazillen (Choi et al., 2009).

Clark et al. (1998) fanden bei in-vitro Untersuchungen, dass Pflanzenkohle ebenso wie Tonerdeprodukte sehr effizient Rota- und Coronaviren von Rindern binden kann (79 – 99,99 %). Da der Durchmesser der viralen Partikel größer als die Porendurchmesser der Pflanzenkohle waren, vermuten die Autoren, dass die Bindung durch virale Oberflächenproteine an die Pflanzenkohle erfolgte.

In-vitro und in-vivo Versuche mit Rinderkälbern ergaben, dass Pflanzenkohle insbesondere in Kombination mit Holzessig die Infektion mit dem parasitischen Protozoon *Cryptosporidium parvum* kontrollieren und innerhalb von einem Tag die Diarrhoe der Kälber stoppen konnte.

Die Zahl der Oozysten im Kot ging bereits nach einem Tag deutlich zurück und nach 5 Tagen konnten keine Oozysten mehr im Kot der Kälber gefunden werden. Ähnlich Ergebnisse berichten Paraud et al. (2011) von der Anwendung eines kommerziellen Pflanzenkohle-Holzesig-Produktes (*Obionekk*<sup>®</sup>, Obione, Charentay, France) bei Jungziegen. Die zwei- bzw. dreimal täglich verabreichte Mischung reduzierte die klinischen Anzeichen von Diarrhoe vom ersten Tag an, und die Oozystenanzahl im Kot verringerte sich signifikant. Über den Zeitraum der Studie lag die Sterblichkeit der Jungziegen in der Kontrollgruppe bei 20 % und in der dreimal täglich mit *Obionekk*<sup>®</sup> behandelten Gruppe nur bei 6,7 %.

Van et al. (2006a) beobachtete, dass die Zufütterung mit Pflanzenkohle bei Ziegen das Auftreten von Zestoden-Bandwürmern und *Coccidia*-Oozysten verringerte.

### 4.3 Adsorption von Pharmaka

In den 1980er Jahren wurden zahlreiche humanmedizinische Studien zum Einsatz von Aktivkohle bei Vergiftungen veröffentlicht, aus denen sich wesentliche Rückschlüsse auf den Einsatz von Pflanzenkohle als Futtermittel ziehen lassen (Erb et al., 1989). Die adsorbierende Wirkung von Aktivkohle kann zur Verhinderung der gastrointestinalen Aufnahme der meisten Medikamente und zahlreicher Toxine eingesetzt werden (Neuvonen et Olkkola, 1988), wobei die Behandlung mit Pflanzenkohle in der Regel wirksamer als das Auspumpen des Mageninhaltes ist. Die wiederholte Einnahme von aktivierter Pflanzenkohle verbessert die Eliminierung toxischer hochwirksamer Stoffe wie Aspirin, *Carbamazepin*, *Dapsone*, *Dextropropoxyphen*, Herzglykoside wie *Digoxin* und *Digitoxin*, *Meprobamat* (ein Vorläufer-Beruhigungsmittel der heute gebräuchlicheren *Benzodiazepine*), *Phenobarbital* (auch *Phenobarbital*), *Phenytoin* (die letzten drei Substanzen sind Bestandteil von Beruhigungs- und Schlafmitteln bzw. Medikamenten gegen Epilepsie) und *Theophyllin* (ein *Methylxanthin* aus der Gruppe der Antiasthmatica). Zudem beschleunigt es die Eliminierung vieler Industrie- und Umweltgifte. Bei akuten Vergiftungen werden bei Erwachsenen 50 bis 100 g aktivierter Pflanzenkohle und bei Kindern etwa 1 g pro kg Körpergewicht verabreicht (Neuvonen et Olkkola, 1988). Die Autoren machen zudem darauf aufmerksam, dass keine ernstesten Nebenwirkungen bei versehentlicher Einnahme bekannt sind. Die finnischen Ärzte empfehlen die wiederholte Einnahme von Pflanzenkohle, um das Risiko zu vermindern, dass Toxine während der Passage durch den Verdauungstrakt vom Pflanzenkohle-Toxin-Komplex wieder desorbiert werden (Olkkola et Neuvonen, 1989). Im Allgemeinen gilt, dass wiederholte Verabreichung von Pflanzenkohle die Wirksamkeit erhöht (Crome et al., 1977; Dawling et al., 1978).

### 4.4 Pestizide und Umwelttoxine

Die hervorragenden Adsorptionseigenschaften von Pflanzenkohle in Bezug auf zahlreiche Pestizide und Herbizide (z.B. Graber et al., 2012; Mesa und Spokas, 2010; Wang et al., 2010), deren Spuren sich häufig in Tierfutter finden (Shehata et al., 2012), ist ein immer wichtigerer Grund für den Einsatz von Pflanzenkohle im Tierfutter. Von besonderer Bedeutung ist hier die Adsorption von Glyphosat, einem Herbizid, das derzeit die meisten aus Südamerika importierten Futtermittel aus genmodifizierten Mais, Raps und Soja kontaminiert. Ein weiterer Grund ist die seit Mai 2014 in Deutschland verbotene, aber in einigen Ländern noch immer zugelassene Sikkation mit Herbiziden kurz vor der Getreideernte (Brändli und Reinacher, 2012). Neben der Immobilisierung von Magnesium und Zink weist Glyphosat eine stark antibiotische Wirkung auf (US-Patent 7,771,736, EP0001017636, erteilt 2010) und steht unter Verdacht, chronischen Botulismus zu verursachen oder zu begünstigen (Gerlach und Schmidt, 2012; Shehata et al., 2012). Wie Herath et al. (2016) zeigten, weisen aktivierte Pflanzenkohlen, die bei Temperaturen von über 700°C hergestellt wurden, sehr gute Adsorptionseigenschaften für Glyphosat im sauren Milieu auf. Bei einem pH-Wert von 4 konnten 82% des in Wasser gelösten Glyphosats durch die Pflanzenkohle adsorbiert werden.

Gerlach et al. (2014a) untersuchten bei 380 Milchkühen, wie sich durch Zufütterung von Pflanzenkohle, Huminsäuren und Sauerkrautsaft die toxischen Effekte des über das Futter aufgenommenen Herbizids Glyphosat minimieren lassen. Sie konnten zeigen, dass Huminsäuren (120g/d) und die tägliche Fütterung mit einer Kombination von 200 g Pflanzenkohle und 500 g Sauerkrautsaft über 4 Wochen die Glyphosatkonzentration im Urin signifikant senkte. Die Fütterung mit Huminsäuren und Pflanzenkohle beeinflusste die Enzymaktivität und die Blutwerte. Es konnte eine allgemeine Verbesserung der Tiergesundheit und Immunreaktion sowie reduzierte Antikörpertiter auf dem Niveau unverdächtigter Tiere gegen *Clostridium botulinum* beobachtet werden. Die Möglichkeit durch Pflanzenkohle bestimmte Herbizide aus kontaminiertem Futter zu adsorbieren, sollte freilich nicht als Ausrede für Futtermittelhersteller und Landwirte herhalten, weiterhin kontaminiertes Futter zu vermarkten und zu verabreichen.

Erste Untersuchungen zur Pestizid-Adsorption durch Pflanzenkohle wurden bereits in den 1970er Jahren durchgeführt (Humphreys und Ironside, 1980). Ablagerungen des systemischen Organophosphor-Insektizides, Runnel, in der Magenschleimhaut von Schafen wurde deutlich durch die Zufütterung von 50 g aktivierter Pflanzenkohle pro kg Futter reduziert (Smalley et al., 1971). Wilson und Cook (1970) berichteten, dass aktivierte Pflanzenkohle erfolgreich zur Adsorption von Pestiziden

im Verdauungstrakt von Rindern, Schafen und Ziegen eingesetzt wurde und die Pestizide sodann über die Exkremente ausgeschieden wurden. Ähnliche Versuche bei Hühner konnten jedoch keine signifikanten Effekte auf die Rückstandswerte in Eiern und Gewebe zeigen (Foster et al. (1972)). Die Fütterung von Pflanzenkohle mit durch Dieldrin kontaminiertem Futter erbrachte bei Schweinen eine sehr deutliche Reduktion der Dieldrin-Konzentration im Fett der Tiere (Dobson et al., 1971). Fries et al. (1970) konnten bei vierzehntägiger Fütterung von 1 kg aktivierter Pflanzenkohle pro Rind und Tag keine Reduktion der Konzentrationen von Dieldrin, DDD und DDT im Milchfett feststellen. Hingegen konnten (Wilson et al., 1971) zeigen, dass bei Mischung von Dieldrin- und DDT-kontaminiertem Futter mit aktivierter Pflanzenkohle (900 g pro Tier und Tag) die Dieldrinaufnahme um 43% und die DDT-Aufnahme um 24% reduziert werden konnte, nicht aber wenn wie bei (Fries et al., 1970) das kontaminierte Futter und die Pflanzenkohle getrennt verabreicht wurden. Offenbar wurden sowohl Dieldrin als auch DDT bereits von den Mundschleimhäuten aufgenommen und nicht erst im Verdauungstrakt. Aktivierte Pflanzenkohle zeigte in-vitro zudem sehr gute Adsorptionseigenschaften für das in der EU seit 2007 verbotene, doch in den USA und sonstigen Ländern zugelassene Herbizid Paraquat (Gaudreault et al., 1985; Okonek et al., 1982).

Da fettlösliche Organochlorverbindungen wie *Dibenzo-p-dioxin* (PCDDs), *Dibenzofuran* (PCDFs) und dioxinähnliche PCBs allgegenwärtige Umweltgifte sind, die häufig im Tierfutter nachweisen lassen, und sich im Fettgewebe von Tieren und Menschen anreichern, wurden insbesondere in Japan schon früh Versuche mit aktivierter Pflanzenkohle zur Adsorption dieser Stoffe durchgeführt (Kamimura et al., 2009; Takekoshi et al., 2005; Takenaka et al., 1991; Yoshimura et al., 1986). In allen Versuchen wurde die starke Affinität der Organochlorverbindungen für aktivierte Pflanzenkohle deutlich (Iwakiri et al., 2007). Fujita et al. (2012) führte ein umfangreiches Experiment mit 24 Legehennen durch, deren Futter die oben erwähnten Organochlorverbindungen enthielt und das entweder mit oder ohne 0,5 % Pflanzenkohle über einen Zeitraum von 30 Wochen gefüttert wurde. Des Weiteren gab es eine Kontrolle mit dem gleichen Futter ohne Organochlorverbindungen, ebenfalls mit und ohne Pflanzenkohle. Während keinerlei negative Nebenwirkungen durch die Verabreichung der Pflanzenkohle identifiziert werden konnten (siehe mehr im Abschnitt 8: Nebenwirkungen von Pflanzenkohle), wurden die Organochlorverbindungen in den Muskeln, im abdominalen Fett und im Ei deutlich und signifikant durch die Fütterung mit Pflanzenkohle gesenkt. Abhängig von der Struktur und Aromatizität der Organochlorverbindungen konnten die Konzentrationen der PCDDs/PCDFs, non-ortho-PCBs und Mono-ortho-PCBs

im Gewebe und den Eiern der Legehennen um mehr als 90 %, 80 %, respektive 50 % reduziert werden (Fujita et al., 2012). Dass verschiedene Organochlorverbindungen unterschiedlich stark durch Pflanzenkohle gebunden werden, wurde bereits zuvor durch Untersuchungen an kontaminiertem Fischöl gezeigt (Kawashima et al., 2009). Im Allgemeinen gilt: Je höher die Aromatizität der zu adsorbierenden Aromate, desto stärker ist die Affinität für Pflanzenkohle und folglich die Adsorptivität; dies gilt für PCDDs und PCBs ebenso wie für PAKs.

Die regelmäßige Einnahme von Pflanzenkohle kann laut Olkkola et Neuvonen (1989) sehr hilfreich zur Eliminierung von Industrie- und Umweltgiften wie Dioxine, PCB sowie einiger Schwermetalle einschließlich ihrer radioaktiven Isotope sein.

#### 4.5 Entgiftung von pflanzlichen Toxinen

Ein weiterer Nutzen der regelmäßigen Einnahme von Pflanzenkohle ist die Linderung negativer Wirkungen von sekundären pflanzlichen Inhaltsstoffen wie Tanninen, die in vielen Futtermitteln enthalten sind (Struhsaker et al., 1997). Tannine sind komplexe und außerordentlich vielfältige Verbindungen, die teils von Nutzen, teils aber auch schädlich für Wiederkäuer sind. Tannine neigen dazu, im Pansen Proteine zu binden, was sich positiv auf die Gewichtszunahme auswirken kann, da an Tannine gebundene Proteine so in den Dickdarm gelangen, wo sie mehr Nährwert-Nutzen für die Tiere haben. Allerdings haben nicht alle Tannine diese Wirkung. Oft sind Tannine in proteinreichen Futtermitteln wie Leguminosen enthalten und der kräftige Geschmack stößt die Tiere ab, was die Gewichtszunahme reduziert (Naumann et al., 2013). Mehrere Studien haben untersucht, wie die Fütterung von Pflanzenkohle die Wirkung der Tannine verändert. Van et al. (2006) fand, dass bei Ziegen die Zufütterung von 50 bis 100 g Bambus-Pflanzenkohle pro kg einer tanninreichen Akazienblattdiät bei gleicher Futtermenge die tägliche Gewichtszunahme von 44 g auf 53 g steigerte. Die Autoren konnten feststellen, dass die Verdauung von Rohproteinen und die Stickstoffumsetzung signifikant verbessert wurde. Offenbar gab es eine optimale Dosis: Während 50 und 100 g Bambus-Pflanzenkohle Zugaben ähnliche Gewichtszunahmen der Ziegen zur Folge hatten, zeigt die Zufütterung mit 150 g der gleichen Pflanzenkohle pro kg Futter keine Verbesserung im Vergleich zur Kontrolle. Stuhsaker et al. (1997) fanden, wie bereits beschrieben, dass Holzkohleverzehr von Zanzibar red colobus Affen die Nahrungseffizienz von tanninreichen Indischen Mandel- und Mango-Blättern erhöhte. Banner et al. (2000) fanden, dass die Mischung von 10 – 25 g aktivierter Pflanzenkohle pro Tag und Lamm gemischt mit Roggen die Aufnahme von tannin- und terpenreichen Salbeisträuchern signifikant erhöhte. Ähnliche Resultate für Salbei

und andere terpen- und tanninreiche Büsche wurden von Rogosic et al. (2006, 2009) berichtet, wohingegen Villalba et al. (2002) nicht beobachten konnte, dass die Lämmer signifikant mehr Salbei gefressen hätten.

Im Winter, wenn kaum frische Weidepflanzen verfügbar sind, fressen Schafe auch Bitterwurz, das allerdings toxische Sesquiterpenlaktone enthält. Poage et al. (2006) führten eine Reihe von Bitterwurz-Fütterungsversuchen mit 0 - 0,5 bis 1 - 1,5 g Pflanzenkohle pro Lamm und Tag durch. Während die Lämmer das Bitterwurz enthaltende Futter ohne Pflanzenkohle zurückwiesen, fraßen sie gern und ohne Anzeichen von Toxikose das mit Pflanzenkohle versetzte und bis zu 26,4 % Bitterwurz enthaltende Futter.

Verschiedene Studien konnten nachweisen, dass sich Vergiftungen sowohl von Weiderindern als auch von Schafen mit dem leberschädigenden Wandelröschen (*Lantana camara*) wirksam mit 5 g Pflanzenkohle pro kg Körpergewicht behandeln lassen (McLennan et Amos, 1989; Pass et Stewart, 1984). Während fünf von sechs Kälbern sich nach der Behandlung mit aktivierter Pflanzenkohle von der Wandelröschen-Vergiftung erholten, verstarben fünf von sechs Kälbern, die nicht mit Pflanzenkohle behandelt wurden. Die Behandlung mit Bentonit erreichte ähnlich hohe Heilungsraten, jedoch dauerte die vollständige Heilung etwa doppelt so lang (McKenzie, 1991). Ähnlich signifikante Ergebnisse liegen für Goldblatt (*Moraea pallida*) – Vergiftungen von Rindern (Snyman et al., 2009) und Oleander-Vergiftungen von Schafen (Ozmaie, 2011; Tiwary et al., 2009) vor.

## 5. Regelmäßige Pflanzenkohlefütterung zur Verbesserung von Leistung und Tierwohl

Während die therapeutische Verabreichung von Pflanzenkohle als historisch bewährte Praxis gilt und seit über 50 Jahren wissenschaftlich untersucht und für zahlreiche Symptome und Krankheitsbilder empfohlen wird, ist die regelmäßige Fütterung zur Verbesserung der Leistung, der Wirtschaftlichkeit, der Nährstoffausnutzung des Futters und des Wohls intensiv gehaltener Tiere erst seit etwa 2010 wieder vermehrt in der Diskussion. Während sich die Fütterung von Nutztieren mit Pflanzenkohle und Pflanzenkohle-Produkten aufgrund der offenbar guten Erfahrungen der Landwirte insbesondere in Deutschland, Schweiz, Österreich und Australien rasch in der Praxis ausbreitet und in den genannten Ländern zum Hauptabsatzmarkt für Pflanzenkohle geworden ist, sind systematische, wissenschaftliche Untersuchungen regelmäßiger Fütterungen verschiedenster Pflanzenkohlen noch vergleichsweise rar. Ein Grund hierfür ist nicht zuletzt, dass mit Veterinärmedizin und Pflanzenkohleforschung zwei Fachgebiete aufeinanderstoßen, die unterschiedlicher kaum sein können und deren Methoden und Vokabular

wenig Gemeinsamkeiten aufweisen. Letzteres erklärt auch, weshalb immer wieder kaum bis gar nicht charakterisierte Pflanzenkohlen für Fütterungsversuche eingesetzt werden, ganz so, als würde es sich nur aufgrund des generischen Namens um ein jeweils gleiches (schwarzes) Produkt handeln. Hier sind weitere Arbeiten mit gründlich charakterisierten, verschiedenartigen Pflanzenkohlen und ihrer Verabreichungsmenge und -form dringend zu empfehlen.

- Bei aller Vielfalt der Eigenschaften von Pflanzenkohle ähneln sich offenbar dennoch einige zentrale Eigenschaften dieses heterogenen Materials. In Abwesenheit jeglicher negativer Wirkungen konnten neben häufig neutralen Effekten in verschiedenen Studien und Praxisberichten, folgende positive Wirkungen der Fütterung von Pflanzenkohle festgestellt werden:
- Zunahme der Futteraufnahme
- Gewichtszunahme
- Erhöhung der Futtereffizienz
- Zunahme der Eierproduktion und Eierqualität bei Geflügel
- Stärkung des Immunsystems
- Verbesserung der Fleischqualität
- Verbesserung der Stallhygiene und der Geruchsbelastung
- Verringerung der Klauen- und Fußballenkrankheiten
- Verringerung der Tierarztkosten

Geordnet nach Tierarten werden in den folgenden Unterabschnitten die wissenschaftliche Literatur und Erfahrung zur mittel- bis langfristigen Fütterung von Pflanzenkohle mit dem Ziel der Verbesserung von Tiergesundheit, Tierwohl und Tierleistung in den jeweiligen Tierhaltungssystemen zusammengefasst.

### 5.1. Rinder

Der norddeutsche Tierarzt Achim Gerlach lässt seit 2011 bei zahlreichen Rinderherden täglich 100 bis 400 g Pflanzenkohle pro Rind zufüttern, ohne je negative Nebenwirkungen festgestellt zu haben (Gerlach, mündliche Mitteilung, 2015). In einer 2012 durchgeführten Umfrage bei 21 von Achim Gerlach betreuten Landwirten mit je mindestens 150 Rindern gaben die Landwirte an, dass sich der allgemeine Gesundheitszustand und die Vitalität seit der Fütterung mit Pflanzenkohle verbessert haben. Die Zellzahl der Milch verringerte sich deutlich, Milchprotein und Milchfettgehalt nahmen zu. Eine Unterbrechung der Fütterung mit Pflanzenkohle führte schnell wieder zu erhöhten Zellzahlen und einem allgemeinen Leistungsabfall der Tiere. Weiterhin wurde festgestellt,

dass sich Klauenprobleme verbesserten und sich die nachgeburtliche Gesundheit stabilisierte. Innerhalb von 1-2 Tagen nach Beginn der Fütterung mit Pflanzenkohle nahmen Diarrhoe-Symptome ab und der Kot wurde fester. Die Mortalitätsrate sank ebenso wie die Tierarztkosten. Die Gülleviskosität verbesserte sich deutlich und die Geruchsbelastung nahm ab (Gerlach et Schmidt, 2012). Ein Indiz für die als nützlich angesehene Zufütterung von Pflanzenkohle ist, dass Landwirte bereits über längere Zeiträume die nicht unerheblichen Kosten von ca. 1000 Euro pro Monat für die Zufütterung eines Bestandes von 150 Kühen aufbringen.

Leng et al. (2013b) fütterten über 98 Tage je vier Rinder mit bzw. ohne 0,6 % (bezogen auf die Futter-Trockenmasse) aus Reishülsen hergestellter Pflanzenkohle. Die Pflanzenkohlefütterung führte zu einer 25 % höheren Gewichtszunahme verglichen mit den Kontrolltieren. Kim et Kim (2005) hingegen fanden bei der Verabreichung von 2 % einer undefinierten Pflanzenkohle keine signifikante Auswirkung auf Gewichtszunahme und Blutwerte bei Hanwoo-Stieren.

Calvelo Pereira et al. (2014a) untersuchten die Zugabe verschiedener Mengen (0 – 21 – 42 – 81 – 186 g je kg Gras bzw. Silage) und Arten (Kiefernholz und Maisstroh jeweils bei 350°C und 550°C pyrolysiert) von Pflanzenkohle zu Heusilage, sowie in-vitro zu Rinderpansensaft. Die Zugabe der verschiedenen Pflanzenkohlen und -mengen zur Silage zeigte weder einen signifikanten Einfluss auf die untersuchten Parameter der Silagequalität, noch zeigten sich negative Auswirkungen bei in-vitro Inkubationen mit Pansensaft. Die Autoren schlussfolgerten, dass unter Ausschluss negativer Auswirkungen die Fütterung von Pflanzenkohle eine effiziente Methode zur Versorgung von Weiden mit Pflanzenkohle wäre. Bereits 2010 verwies Marc McHenry auf die Möglichkeit, Pflanzenkohle über die Fütterung einzusetzen, um einerseits die Futteffizienz zu erhöhen und andererseits die Nährstoffverfügbarkeit im Boden zu erhöhen, Grund- und Oberflächenwasser zu schützen und Kohlenstoff im Boden zu sequestrieren (McHenry, 2010). Dieser systematische Ansatz, durch Fütterung von Pflanzenkohle nicht nur die Tierleistung und das Tierwohl, sondern zugleich verschiedene Ökosystemdienstleistungen zu verbessern, wurde in den letzten Jahren von verschiedenen Autoren in die Diskussion gebracht und untersucht (O'Toole et al., 2016; Schmidt et Shackley, 2016; Schmidt, 2012; Shackley, 2014). Eine weitreichende Untersuchung dieser Nutzungskaskaden haben Stephen Joseph und Kollegen in Australien durchgeführt (Joseph et al., 2015b): Seit 2011 werden auf einer australischen Farm 60 Weiderinder mit täglich 330 g Pflanzenkohle aus Jarrah-Holz gemischt mit 100 g Melasse gefüttert. Von 2011 bis 2015 nahmen im Boden der Weide der Humusgehalt, der pH-Wert (CaCl<sub>2</sub>), Colwell-P, Colwell-K, die elektrische Leitfähigkeit und der

Gehalt sämtlicher austauschbaren Kationen zu (Joseph et al., 2015b). Untersuchungen der Pflanzenkohle im Kot der Rinder konnten unzweifelhaft zeigen, dass die Pflanzenkohle eine Vielzahl von Pflanzennährstoffen im Verdauungstrakt der Rinder adsorbiert hatten. Diese Nährstoffe (vor allem Stickstoff und Phosphor) blieben in der porösen Struktur der Pflanzenkohle bis zur Einarbeitung in den Boden gebunden und pflanzenverfügbar. Die Autoren schlussfolgern, dass sich durch die Retention der verdauten Nährstoffe in der Pflanzenkohle die Düngewirkung des Rinderkotes so erhöht, dass auf zusätzliche Anwendung von Düngemitteln in der Weidewirtschaft verzichtet werden kann und ein deutlicher wirtschaftlicher Vorteil erwächst, selbst wenn die Pflanzenkohle keine zusätzlich positiven Auswirkungen auf Tierleistung und -wohlbefinden hätte.

Seit 2012 setzen deutsche und schweizerische Landwirte Pflanzenkohle in der Herstellung von Futtersilage ein, um die Milchsäuregärung zu stabilisieren und Fehlgärungen zu verhindern. Das Risiko von Pilzbefall und Bildung von Mycotoxinen könnte dadurch reduziert werden. Niedrige Konzentrationen an Essigsäure und vor allem an Buttersäure werden erhofft, um so das Risiko von Clostridien-Befall zu minimieren. Die hohe Wasserhaltekapazität der Pflanzenkohle scheint die Gärqualität zu verbessern, insbesondere, wenn die zu silierende Biomasse zu frisch oder zu feucht eingebracht wird. Insgesamt scheint die Lagerfähigkeit durch diese Feuchtigkeitspufferung verbessert und die Bildung etwaiger Fermentationsflüssigkeiten geringer zu sein (O'Toole et al., 2016).

Obwohl in der landwirtschaftlichen Praxis Pflanzenkohle vor allem in der Rinderhaltung eingesetzt wird, und daher mit Rindern von allen Tierarten die meisten Praxiserfahrungen vorliegen, gibt es bisher nur sehr wenige wissenschaftliche Studien mit lebenden Rindern. Die offensichtlichen Gründe sind die Schwierigkeit und die Kosten der Arbeit mit Großvieh. Auch bei Pferden gibt es nach Aussage der Hersteller von Pflanzenkohle und Pflanzenkohleprodukten bereits viel praktische Erfahrungen verschiedener schweizerischer und deutscher Pferdezüchter und -halter, jedoch bisher keine einzige uns bekannte wissenschaftliche Untersuchung.

## 5.2 Ziegen und Schafe

In einem über 12 Wochen durchgeführten Experiment mit 42 Jungziegen stellten (Van et al., 2006b) bei Zufütterung von 1 g Bambus-Pflanzenkohle pro kg Körpergewicht eine signifikant höhere Rohproteinaufnahme fest, auch war der verdaute Gesamtstickstoff deutlich höher und entsprechend niedriger dessen Konzentration im Urin und im Kot der Tiere. Das Körpergewicht der 21 mit 1 g Bambus-Pflanzenkohle pro kg Körpergewicht gefüt-

terten Ziegen (ca. 10 g pro Jungtier) nahm im Schnitt 53 g pro Tag zu, wohingegen die Tiere in der Kontrollgruppe ohne Kohlefütterung im Schnitt nur 44 g pro Tag an Gewicht zulegten; ein statistisch signifikanter Unterschied von 20 %. Die Grundfütterung der Ziegen bestand zu einem großen Anteil an tanninreichen Akkazienblättern.

Bei einem Versuch in Nepal haben Schmidt und Pandit (2016, eingereicht) vier Mutterziegen und deren vier Junge über 10 Wochen 15 g Pflanzenkohle pro Tag zu ihrem gewöhnlichen Futter gemischt und deren Gewichtsentwicklung mit einer gleichgroßen Kontrollgruppe verglichen. Nach dem Ende der Laktationsperiode verloren die Muttertiere anfangs leicht an Körpergewicht, doch während in der mit Pflanzenkohle gefütterten Muttertiergruppe das Körpergewicht nach 8 Wochen sogar um 2 % im Vergleich zum Versuchsbeginn zulegte, verlor die Kontrollgruppe um gut 6 % an Gewicht. Beeindruckender und aussagekräftiger sind die Daten für die Jungtiere. Das Gewicht der mit Pflanzenkohle gefütterten Jungtiere nahm in den 8 Wochen des Versuches um 266 % zu, in der Kontrollgruppe bei gleichem Futter, aber ohne Pflanzenkohle, nahm das Gewicht nur um 185 % zu. Insgesamt war die relative Gewichtszunahme in der mit Pflanzenkohle gefütterten Jungtiergruppe signifikant um 80 % höher als in der nicht mit Pflanzenkohle gefütterten Gruppe.

### 5.3 Schweine

Der Südkoreaner Gyo Moon Chu und seine Kollegen haben 2013 mehrere fundamentale Studien zur Fütterung von Schweinen mit Bambus-Pflanzenkohle veröffentlicht. Knapp 5 Monate alte Schweine (N=12) wurden 42 Tage lang zu ihrem normalen Mastfutter (Mais, Weizen, Sojamehl) mit täglich 30 bzw. 60 g Pflanzenkohle pro kg Futter gefüttert. Die durchschnittliche Gewichtszunahme während des Versuchszeitraums betrug 750 g pro Tag in der Kontrolle ohne Pflanzenkohle und 877 g pro Tag in der Variante mit 0,3 % Pflanzenkohle; dies entspricht einer signifikanten Futtereffizienzsteigerung von 17,5 %. Zwischen der Zufütterung von 0,3 % und 0,6 % gab es keine statistisch signifikanten Unterschiede. Während Leukozyten, Erythrozyten, Hämoglobin, Hämatokrit und Blutplättchen sich zwischen den Versuchsgruppen nicht signifikant unterschieden, zeigte die Pflanzenkohle-Gruppe signifikant positive Auswirkungen auf den Gesamtgehalt an Protein, Albumin, Cholesterin, HDL-Cholesterin und LDL-Cholesterin im Blutplasma. Zudem war der Cortisolgehalt deutlich geringer, was auf eine verringerte Stressanfälligkeit hinweist (Chu et al., 2013c). In einer weiteren Studie zeigten die Autoren, dass die Fütterung mit 0,3 % und 0,6 % Bambus-Pflanzenkohle die Schlachtqualität und Zusammensetzung der Fettsäu-

ren von Mastschweinen verbesserten, wobei der Gehalt an ungesättigten Fettsäuren zunahm und der an gesättigten Fettsäuren abnahm (Chu et al., 2013b). In einer dritten Studie untersuchten die Autoren, inwiefern die Fütterung von Pflanzenkohle die regelmäßige, in vielen Ländern noch zugelassene Zufütterung von Antibiotika zur Wachstumsförderung ersetzen kann. In einer außerordentlich umfassenden Studie (Chu et al., 2013a) kamen sie zu dem Ergebnis, dass die Fütterung mit 0,3 % Bambus-Pflanzenkohle den gleichen Wachstumszuwachs bei Mastschweinen ergab wie die standardmäßig eingesetzte Menge an Antibiotika, ohne freilich die gleichen negativen Nebenwirkungen zu verursachen.

Ebenfalls aus Südkorea stammt die Studie von Choi et al. (2012), in der zum gewöhnlichen Futter von 420 Mastschweinen verschiedene Konzentrationen an Pflanzenkohle und Stevia gemischt wurden. Während weder 30 g Pflanzenkohle noch 30 g Stevia pro kg Futter jeweils allein signifikante Wirkungen zeigten, wiesen 30 g Pflanzenkohle plus 30 g Stevia höhere tägliche Gewichtszunahme, Futtereffizienz und Immunreaktionen sowie deutlich höhere Fleischqualität und Lagerkapazität der Fleischerzeugnisse auf (Choi et al., 2012; Lee et al., 2011).

In einer japanischen Studie von Mekbungwan et al. (2004) wurden Ferkel mit wachsenden Konzentrationen einer 4:1-Mischung von Pflanzenkohle und Holzessig gefüttert. Bei Fütterung mit 0, 1, 3 und 5 % dieser Mischung pro kg Futter konnten keine statistisch signifikanten Auswirkungen auf Körpergewicht und Futtereffizienz im Vergleich zur Kontrolle festgestellt werden. Tendenziell waren die Ergebnisse für 1 % und 3 % jedoch besser, was auch durch Untersuchung der Darmzotten bestätigt werden konnte. Der gleiche Autor zeigte vier Jahre später mit der gleichen Pflanzenkohle-Holzessigmischung und 1 % bzw. 3 % Fütterungszugabe, dass die Pflanzenkohle die negativen Effekte der Schweinemast mit proteinreichen Straucherbsen verhindern konnte. Die Pflanzenkohle-gefütterten Tiere wiesen bei allen untersuchten Parametern bessere Werte als in der Kontrollgruppen auf.

### 5.4 Geflügel

Die meisten Veröffentlichungen über den leistungssteigernden Einsatz von Pflanzenkohle existieren zweifellos für Geflügel, was nicht zuletzt daran liegt, dass wissenschaftlich publizierbare Untersuchungen an den kleineren Hühnern einfacher und kostengünstiger durchzuführen sind. Eine der häufig zitierten Studien ist von Jean Raphael Kana und Kollegen, die systematisch zwei verschiedene Pflanzenkohlen, die eine aus Maiskolbenachsen und die andere aus Canarium-Baum Samen, in verschiedenen Fütterungskonzentrationen von 0 bis 1 % pro kg Futtermittel an Masthähnchen verfütterten Kana et al. (2010).

Leider wird die traditionelle Herstellung der Pflanzenkohle nicht genauer beschrieben, doch die hohen Aschegehalte von 47 % bzw. 25 % deuten darauf hin, dass ein wesentlicher Teil der Ausgangsbiomasse statt zu pyrolysieren verbrannte. Trotzdem zeigt sich ein bereits häufiger beobachtetes Bild: Fütterungszugaben beider Pflanzenkohlen bis 0,6 % führten zu größerer, meist signifikanter Gewichtszunahme, während die höheren Dosierungen zu keinen weiteren signifikanten Gewichtszunahmen, aber auch nicht zu Gewichtsabnahmen im Vergleich zur Kontrolle führten. Weder Lebergewicht und abdominales Fett noch Darmlänge und Darmgewicht wurden durch die Pflanzenkohlefütterung beeinflusst. Die Studie ist nicht zuletzt ein wichtiges Indiz dafür, dass auch Pflanzenkohlen aus nicht-holzigen Biomassen und mit höherem Aschegehalt für die Fütterung geeignet sein können. In einer späteren Studie mit den gleichen beiden Pflanzenkohlen wurde untersucht, ob Hühner durch die Zugabe von Pflanzenkohle mit 20 % proteinreichen, für Hühner im Allgemeinen schwer verdaulichen Kuherbsen gefüttert werden können. Erstaunlicherweise konnten bei Zugabe der aschereichen Pflanzenkohle aus Maiskolben die Kuherbsen gekocht gefüttert werden, und ergaben gleiche Gewichtszunahmen der Masthähnchen wie die Kontrolle ohne Kuherbsen. Die ascheärmere Pflanzenkohle aus den Baumsaaten zeigte hier nicht die gleiche Wirkung (Kana et al., 2012).

Bakr (2007) verwendete traditionell hergestellte Holzkohle aus Zitrusholz, die auf dem lokalen Markt in Nablus erworben wurde, und setzte sie in sehr hohen Dosierungen von 0, 2, 4 und 8 % der gewohnten Fütterung von Masthähnchen zu. Bei 2 % konnten in den ersten drei Wochen signifikante Effekte auf Körpergewicht, Futteraufnahme und Futtereffizienz im Vergleich zur Kontrolle sowie den höheren Futtergaben gemessen werden, danach glichen sich alle Varianten an. Besonders bemerkenswert an dieser Studie ist, dass selbst die sehr hohen Fütterungsdosierungen von 8 % einer zumindest als zweifelhaft zu bezeichnenden Pflanzenkohlequalität keine negativen Wirkungen hervorrief. Kutlu et al. (2001) setzten ebenfalls sehr hohe Dosierungen aktivierter Pflanzenkohle von bis zu 10 % des Basisfutters ein und fanden, dass alle Dosierungen in den ersten 28 Tagen die Futteraufnahme, Gewichtszunahme und Futtereffizienz sowohl von Masthähnchen als auch von Legehennen hoch signifikant steigerten, danach aber keinen signifikant höheren Zuwächse mehr brachten.

Die polnische Arbeitsgruppe um Teresa Majewska hat zwischen 2000 und 2012 mehrere Studien zur Fütterung von Masthähnchen und Truthähnen durchgeführt und durchweg positive Resultate bei Dosierungen von 0,3 % einer Hartholz-Pflanzenkohle erzielt (Majewska et Pudzysak, 2011; Majewska et al., 2009, 2002). So fanden sie nicht nur höhere Gewichtszunahmen und bessere Futtereffizienz, sondern auch höheren Proteingehalte in den

Brustmuskeln und vor allem eine signifikant geringere Sterblichkeit im Vergleich zur Kontrolle. Majewska und ihre Kollegen erklärten diese Verbesserungen durch (1) die Detoxikation von Futterkomponenten, (2) die Verringerung der Oberflächenspannung des Verdauungsbreis und (3) die Verbesserung des Fettabbaus in der Leber.

Mehrere Forschergruppen konnten nachweisen, dass sich durch die Fütterung von Pflanzenkohle die Fleischqualität von Hühnern signifikant verbessern lässt (Cai et al., 2011; Kim et al., 2011; Yamauchi et al., 2010, 2014). So fanden Jiya et al. (2013, 2014), dass bei Fütterung mit 0,5 % aktivierter Pflanzenkohle aus Kokosnussschalen zwar keine signifikante Gewichtszunahme verzeichnet wurde, aber dass SGOT (*Serum Glutamin, Oxaloacetic Transaminase*), SGPT (*Serum Glutamin Phosphat Transaminase*), Albumin, Cholesterin und Triglyzeride ebenso wie die sensorische Evaluierung und das Gewicht von abdominalem Fett, Herz und Milz signifikant verbesserten und den Cholesterolgehalt senkten. Andere Versuche mit 2 % Pflanzenkohle oder einer Mischung aus Bambus-Pflanzenkohle und Holzessig ergaben keine signifikanten Unterschiede der Fleischqualität im Vergleich zur Kontrolle (Fanchiotti et al., 2010; Rattanawut, 2014; Sung et al., 2006). Park et Kim (2001) fanden, dass die Fütterung von Brathähnchen mit aktivierter Pflanzenkohle die nützliche Fettsäure, Oleinsäure, und den Gesamtmineralgehalt des Fleisches signifikant erhöhte. Sowohl Kutlu et al. (2001) als auch Ayanwale et al. (2006) und Kim et al. (2006) stellten fest, dass sich die Festigkeit von Eischalen durch die Fütterung mit Pflanzenkohle verbessern lässt; und Yamauchi et al. (2010) fanden eine Steigerung der Eierproduktion von knapp 5 % bei Fütterung mit einer Mischung aus Bambus-Pflanzenkohle und Holzessig. Yamauchi et al. (2013) konnten mit einer 1 %-igen Fütterung der gleichen Pflanzenkohle-Holzessigmischung zeigen, dass der Kollagengehalt der Eier um hochsignifikante 33 % zunahm, was nicht nur die Lagerfähigkeit der Eier erhöht, sondern auch interessant ist für die Gewinnung von Kollagen für Arzneimittel und Kosmetika.

Zwar fanden Ruttanavut et al. (2009) bei einem Versuch mit sieben Tage alten Enten kein statistisch signifikant höheres Wachstum durch 1 % Pflanzenkohle-Holzessig, doch konnten sie zeigen, dass die Größe der Darmzotten, die Zelloberfläche und die Zellteilungsrate im Darm signifikant zunahm, was ähnliche Resultate von Rattanawut (2014) und Samanya et Yamauchi (2001) bestätigt. Islam et al. (2014) zeigten in einem südkoreanischen Versuch mit 150 Jungenten, dass die Zufütterung mit 1 % einer 1:1 Mischung von Pflanzenkohle und Seetang als Alternative zum Einsatz von Antibiotika in der Aufzucht von Enten empfohlen werden kann.

## 5.5 Aquakultur

Moe Thu und seine Kollegen von der Universität Kagoshima in Japan fütterten japanische Flundern mit

von 0 auf 4 % wachsenden Gewichtsgehalten an Bambus-Pflanzenkohle im Fischfutter (Thu et al., 2010). Während alle Zufütterungen mit Pflanzkohle zu deutlich höheren Gewichtszunahmen der Flundern führten, war die Variabilität der individuellen Resultate so hoch, dass nur die Fütterung mit 0,5 % statistisch signifikant höhere Gewichtszuwachsraten von 18 % ergaben. Bemerkenswert war zudem, dass alle Pflanzenkohle-Fütterungsraten zu deutlich geringeren Stickstoff-Ausscheidungen der Fische führten und den Nitratgehalt im Fischwasser signifikant um teils mehr als die Hälfte senkten. Letzteres könnte ein zusätzlicher gesundheits- und wachstumsförderlicher Effekt in der Aquakultur gewesen sein.

In einem südkoreanischen Versuch ebenfalls mit Flundern wurden von 0 bis 2 % steigende Gewichtsgehalte eines Gemischs aus Pflanzenkohle und Holzessig gefüttert. Bei der 1 %-igen Fütterung stieg die Futtereffizienz signifikant um 10 %, und auch die Gesamtgewichtszunahme der Fische war in der 1 %-igen Fütterung signifikant am höchsten. Alle anderen untersuchten Parameter ergaben stets bessere Werte in den Pflanzenkohle-Varianten, waren jedoch statistisch nicht signifikant. Die Autoren schlussfolgerten, dass Fütterungsraten zwischen 0,5 und 1 % im Futter maximale Gewichtszunahme und Futtereffizienz versprechen.

Zahlreiche Praktiker setzen Pflanzenkohle in Aquaponic-Systemen ein und berichten von guten Erfolgen sowohl mit Pflanzenkohle im Fischwasser als auch mit mehr oder weniger großen Anteilen Pflanzenkohle an den Pflanzsubstraten, durch welches das Fischwasser gefiltert wird. Allerdings sind keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen oder einigermaßen quantifizierbare Resultate im Vergleich zu einer Kontrolle ohne Pflanzenkohle bekannt.

## 6. Reduktion der Methanemissionen von Wiederkäuern

Mit dem Wachsen des Bewusstseins, dass die Tierhaltung zu den wesentlichen Verursachern des Klimawandels gehört, wächst auch das Interesse an Futterergänzungsmitteln, die nicht nur die Futtereffizienz steigern, sondern insbesondere die bei der tierischen Verdauung entstehenden Methanemissionen reduzieren. Während bei Hühnern, Schweinen, Fischen und sonstigen Allesfressern die meisten Treibhausgasemissionen (vor allem Methan, Lachgas, Ammoniak) durch die festen und flüssigen Ausscheidungen entstehen, wenn sich diese unter Sauerstoffabschluss zersetzen (Methan), sind es bei Wiederkäuern vor allem die direkten gasförmigen Ausscheidungen durch Flatulenzen und Rülpsen (Eruktion). Letzteres betrifft vor allem Rinder, die täglich 500 bis 600 Liter Gas auf diese Weise ausstoßen, mit einem Methananteil von 6 – 8 %.

Methan entsteht im Rinderpansen durch den mikrobiellen Abbau der im Gras enthaltenen Fasern, wobei u.a. Wasserstoff und Acetat als Reaktionsprodukt entsteht. Wasserstoff dient als Elektronendonator für die Reduktion von CO<sub>2</sub> oder Formiat, wobei Methan entsteht. Für das Tier bedeutet diese Reaktion einen erheblichen Energieverlust, da das energiereiche Methan nicht weiter verdaut werden kann und hauptsächlich über Ruktus (Rülpsen) und teils über Flatulenzen aus dem Verdauungstrakt eliminiert werden muss. Da Methan ein 28-34-mal wirksameres Klimagas als CO<sub>2</sub> über 100 Jahre ist (global warming potential mit und ohne climate-carbon feedbacks, (Myrhe et al., 2013, Kap. 8)), wird vermehrt versucht, durch Optimierung des bakteriellen Faserabbaus die Methanemissionen zu reduzieren.

In zahlreichen Studien wurde angestrebt, andere Elektronenakzeptoren zu finden, um überzählige Elektronen anderweitig zu binden. Doch bis vor kurzem hat man außer der Zufütterung von Stickstoff in Form von Nitrat und Schwefel, woraus die für die Tiere in höheren Konzentrationen toxisch wirkenden Verbindungen Ammoniak und Schwefelwasserstoff entstehen, keine signifikant wirkenden Alternativen gefunden.

Der erste Nachweis, dass Pflanzenkohle hier eine neue Hoffnung sein könnte, kam 2012 aus Vietnam von (Leng et al., 2012). Bei in-vitro Studien hatten Ron Leng und seine Kollegen festgestellt, dass Pflanzenkohlezugaben von 0,5 und 1 % die Methanproduktion signifikant um 10 bzw. 12,7 % minderte. Höhere Pflanzenkohlegaben konnten die Methanbildung nicht weiter reduzieren. Sobald jedoch zusätzlich zu Pflanzenkohle auch Nitrat zur proteinarmen Nahrung gegeben wurde, verminderte sich die Methanproduktion um bis zu 49 %. Nitrat wirkt in der anaeroben Verdauung im Pansen als starker Elektronen-Akzeptor, hält dadurch den Wasserstoffpotentialdruck niedrig, und ersetzt damit gewissermaßen die Funktion Methan bildender Mikroorganismen. Phanthavong et al. (2015) fanden ebenfalls bei in-vitro Tests mit 1 % Pflanzenkohle bei der Fütterung mit Maniokwurzelbrei einen signifikanten Rückgang der Methanemissionen über einen Zeitraum von 24 Stunden, allerdings betrug dieser nur etwa 7 %.

Bei anschließenden in-vitro Versuchen zeigten Leng et al. (2013b), dass die Bildung von Methan bei Rindern um 20 % reduziert werden konnte, wenn 0,6 % Pflanzenkohle zum gewöhnlichen Mischfutter gegeben wurde. Wenn die gleiche Menge Pflanzenkohle mit 6 % Kaliumnitrat kombiniert wurde, konnten die Methanemissionen sogar um 40 % vermindert werden. Zusätzlich zur Reduktion der Methanemissionen wurde in den Versuchen eine hoch signifikante Gewichtszunahme der Rinder (+25%) beobachtet (Leng et al., 2013b), was auf eine Steigerung der Futtereffizienz schließen lässt. Die gefütterte Pflanzenkohle wurde bei sehr hohen Temperaturen aus siliziumrei-

chen Reishülsen hergestellt, was für eine hohe elektrische Leitfähigkeit und Elektronenpufferkapazität spricht (Yu et al., 2015), und somit eine elektrochemische Beeinflussung der Verdauungsreaktionen als wahrscheinlich erscheinen lässt.

Leng et al. (2013a) hatten schon zuvor gezeigt, dass verschiedene Pflanzenkohlen unterschiedliche Wirkungen auf die Methanemissionen hatten. Ein naheliegender Grund dafür sind die je nach Biomasse und Pyrolysetemperatur unterschiedliche elektrische Leitfähigkeit und Elektronenpufferung (Yu et al., 2015), welche die Eigenschaft der Pflanzenkohle bestimmen, Elektronen zwischen verschiedenen Bakterienarten zu transportieren (DIET) und so eine größere Effizienz futterabbauender Redoxreaktionen zu bewirken.

Ron A. Leng und sein Kollegen hatten ursprünglich die Hypothese, dass Pflanzenkohle in anaeroben Systemen wie dem Pansen von Rindern die Vermehrung von methanotrophen Bakterien fördern würde. Diese Vermutung gründet auf der Beobachtung, dass Pflanzenkohle, die in Reisfeldern eingearbeitet worden war, Methanemissionen verminderte, indem sie das Wachstum von methanotrophen, also Methan abbauenden, Bakteriencluster förderte (Feng et al., 2012). Da methanotrophe Bakterien jedoch ohne Sauerstoff nicht lebensfähig sind, muss diese Hypothese weitestgehend ausgeschlossen werden. Im Pansen befinden sich methanotrophe Bakterien höchstens an den Epithelien des Pansens, doch um effizient Methan einzufangen und abzubauen, müssten sie gleichmäßig an den Stellen der eigentlichen Methanentstehung verteilt sein, also an den Biofilmen, die sich um die Nahrungspartikel bilden, dort aber finden sie nicht den für sie nötigen Sauerstoff, den sicher auch nicht die wenige in den Poren der Pflanzenkohle befindliche Luft liefern kann.

Schließlich untersuchten Leng und Kollegen auch die Pansenflüssigkeiten von Rindern, die mit und ohne Pflanzenkohle gefüttert wurden. Sie fanden dabei heraus, dass Pansenflüssigkeit von Rindern, die zuvor mit Pflanzenkohle gefüttert worden waren, weniger Methan produzierte als Pansenflüssigkeit von nicht mit Pflanzenkohle gefütterten Rindern. Dies lässt vermuten, dass die an Pflanzenkohle gewöhnten Tiere eine andere mikrobielle Gemeinschaft im Pansen aufwiesen.

Ein dänisches Forscherteam um Hanne Hansen publizierte 2012 die Resultate eines in vitro Versuches mit verschiedenen, allerdings nicht charakterisierten Pflanzenkohlen und deren Wirkung auf die Methanentwicklung von Pansenflüssigkeiten (Hansen et al., 2012). Alle getesteten Pflanzenkohlen reduzierten tendenziell ( $p=0,09$ ) die Methanemissionen um 11 % bis 17 %, wobei die aktivierte Pflanzenkohle die höchste Reduktionsrate aufwies. Die enorm hohe Zugabe von 9 % kann jedoch nicht als praxisrelevant angesehen werden.

Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse von Leng und Kollegen haben verschiedene Forschergruppen in-vitro Versuche durchgeführt, ohne signifikante Resultate zu erzielen, weshalb leider auch von der Veröffentlichung der Resultate abgesehen wurde (persönliche Mitteilungen aus Belgien, USA und Deutschland). Dies könnte insbesondere daran liegen, dass Leng et al. für ihre Versuche eine Pflanzenkohle verwendeten, die mit Vergaser-Technik aus Reishülsen hergestellt wurde. Die Pyrolysetemperaturen sind bei dieser Technologie in der Regel über 900°C, was zu besonderen elektrochemischen Eigenschaften der Pflanzenkohle führt (Yu et al., 2015). Insofern nicht zuletzt im Reisanbau mit seinen durch die Schwemmung der Felder oft anaeroben Böden eine deutliche Reduktion der Methanemissionen durch Pflanzenkohle festgestellt wurde (Feng et al., 2012; Liu et al., 2011; Zhang et al., 2012, 2010), ist es nicht auszuschließen, dass man in Zukunft mit speziell dafür hergestellten Pflanzenkohlen auch die Methanemissionen von Wiederkäuern verringern kann. Doch zur Zeit ist dies nicht viel mehr als eine gut begründete Aussicht, die weiterer Forschungsarbeit bedarf.

Doch selbst wenn Pflanzenkohle die methanhaltigen Flatulenzen und Eruktationen nicht verringern sollte, so kann die Fütterung von Pflanzenkohle doch die Reduktion von Methan- und Ammoniak-Emissionen der tierischen Ausscheidungen nach Verlassen des Tierkörpers bewirken (Chu et al., 2013c; Joseph et al., 2015b; Zwieter et al., 2015).

## 7. Klimabilanz

Die Berechnung einer umfassenden Klimabilanz für den Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierfütterung ist bei der derzeitigen Datenlage nur schwierig und lückenhaft möglich. Relativ einfach zu berechnen ist der sequestrierbare Kohlenstoff der gefütterten Pflanzenkohle selbst. Geht man davon aus, dass der Kohlenstoffgehalt der gefütterten Kohle mindestens 80% beträgt und die Futterkohle wie empfohlen bei Temperaturen über 600°C hergestellt wird und damit H/Corg-Verhältnisse unter 0,4 aufweist, kann nach (Camps-Arbestain et al., 2015) damit gerechnet werden, dass mindestens 55% des Trockengewichts der Pflanzenkohle nach der Verdauung und nachfolgender Ausscheidung oder Ausbringung über dem Boden über 100 Jahre in stabiler Form im Boden verbleiben.

Würde man rein hypothetisch die Fütterung von 1 % der täglichen Futtermenge für den Tierbestand Deutschlands hochrechnen, so würden die 13 Million Rinder (650.000 t Pflanzenkohle), 1,1 Millionen Pferde (24.000 t Pflanzenkohle), die 27 Million Schweine (780.000 t Pflanzenkohle), die 2,4 Million Schafe (43.000 t Pflanzenkohle), 130 Million Geflügel (260.000 t Pflanzenkohle) insgesamt etwa 1,8 Millionen Tonnen Pflanzenkohle pro Jahr kon-

sumieren, was einem Sequestrierungspotential von 0,8 Millionen Tonnen Kohlenstoff bzw. 2,9 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>eq entspräche. Dies entspricht in einem hochindustrialisierten, bevölkerungsreichen Land wie Deutschland lediglich 0,32 % des derzeitigen CO<sub>2</sub>eq-Verbrauchs. Für besonders tierreiche und menschenarme Länder wie Irland würde die gleiche Potentialrechnung aber immerhin 15 % der jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen ausmachen. Es geht bei dieser Rechnung allerdings nur darum, eine Vorstellung für die Größenordnung zu gewinnen. Bei dem derzeitigen Stand der Forschung kann es natürlich noch nicht empfohlen werden, dies auch in dieser Größenordnung umzusetzen.

Das Potential der Methanreduktion von Wiederkäuern, was theoretisch deutlich höher wäre, lässt sich wie oben dargestellt auf Basis der derzeitigen Datenlage noch nicht sinnvoll einbeziehen. Erste Resultate gibt es hingegen dafür, dass Pflanzenkohle in der Gülle, im Mist bzw. während der Kompostierung des Mistes Methan-, Ammoniak-, Lachgas und auch CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren kann (Borchard et al., 2014; Kammann et al., 2016; Sonoki et al., 2013; Steiner et al., 2010; Wang et al., 2013). Bei einer Fütterung mit 1 % Pflanzenkohle werden im kompostierten Mist rund 10 Volumenprozent Pflanzenkohle enthalten sein, was in etwa der empfohlenen Zugabe für Kompost entspricht (Kammann et al., 2016). Sehr wahrscheinlich ist hingegen, dass durch die Pflanzenkohle im Mist und schließlich im Boden die Nitrat auswaschung ins Grundwasser und in Oberflächengewässer reduziert werden kann (Kammann et al., 2016; Knowles et al., 2011; Ventura et al., 2013). Ghezzehei et al. (2014) schätzten ab, dass beim Einsatz von Pflanzenkohle zur Güllebehandlung allein in Kalifornien jährlich bis zu 57.000 t Ammonium und 4.600 t Phosphat eingespart werden könnten.

Wie hoch die durch die Fütterung von Pflanzenkohle insgesamt vermeidbaren Treibhausgasemissionen sind, hängt von vielen Faktoren ab, wie die Art der Stallanlagen, Einstreu, Gülle- oder Festmistlagerung, Kompostierung, Ausbringung etc. und bedarf einer spezifischen life cycle analysis (LCA). Je mehr Emissionen ein Tierhaltungssystem verursacht, desto mehr lässt sich durch den Einsatz von Pflanzenkohle und andere Maßnahmen reduzieren. In bereits optimierten Systemen werden die Emissionen von Beginn an geringer sein. Nach vorsichtigen Schätzungen könnten die Treibhausgasemissionen durch Pflanzenkohle um mehr als 25 % reduziert werden. Doch unabhängig davon, wie hoch das tatsächliche Potential verteilt über alle Tierhaltungssysteme hinweg ist, es ist auf jeden Fall hoch genug, um Forschung und Entwicklung für eine weitere Optimierung lohnenswert zu machen. Hierzu gehört in jedem Fall eine systematische Charakterisierung der eingesetzten Pflanzenkohlen, und ebenso eine systematische Kombination mit weiteren Wegen und Ansätzen zur Emissionsminderung (Nitratfütterung, Einsatz von Milchsäurebakterien, Kompoststall usw.).

## 8. Mögliche Nebenwirkungen von Pflanzenkohle

Unseres Wissens wurde von keiner der bisher in wissenschaftlichen Studien als Futter- oder Arzneimittel verwendeten aktivierten und nicht aktivierten Pflanzenkohlen toxische Wirkungen auf Tier oder Mensch festgestellt. Weder bei kurzfristiger noch bei langfristiger Verabreichung wurden negative Nebenwirkungen registriert. Bei massiver Überdosierung kann es zu Erbrechen und in seltenen Fällen zu Obstipation (Verstopfung) führen (Olkkola et Neuvonen, 1989). Bei paralleler Verabreichung von Arzneimitteln ist zu beachten, dass diese in hohem Maße von Pflanzenkohle im Verdauungstrakt absorbiert werden und entsprechen in ihrer Wirksamkeit beeinträchtigt werden. Park (1986) schlussfolgert in seinem Review, dass Pflanzenkohle eine sichere, wirksame und kostengünstige Alternative zu allen anderen bekannten Behandlung und Eingriffen bei Vergiftungen und Medikamentenüberdosierung bei Menschen ist.

Yatzidis (1972) berichtete, dass die Verabreichung von 20 bis 50 g aktivierter Pflanzenkohle pro Tag bei Urämiepatienten über einen Zeitraum von 4 bis 20 Monaten zu keinen merklichen Nebeneffekten führte. Olkkola und Neuvonen (1989) halten dreimal täglich verabreichte Dosierungen von 10 bis 20 g über einen Zeitraum von mehreren Monaten bei menschlichen Patienten für unproblematisch und ohne Risiko negativer Nebenwirkungen.

Kommerzielle medizinische Pflanzenkohleprodukte werden mitunter mit Sorbitol oder Natriumbikarbonat vorbehandelt, was bei häufiger Verabreichung zu Bluthochdruck und Elektrolytungleichgewichten führen kann. Es ist darauf zu achten, dass Pflanzenkohle ohne derartige Zusatzstoffe angewendet wird (Goldberg et al., 1987).

Selbst sehr hohe Dosierungen von Pflanzenkohle in wässriger Suspension führen offenbar beim Menschen nicht zu Verstopfungen (Neuvonen et Olkkola, 1988), was auch bei der Fütterung von Pflanzenkohle bei Tieren bisher nicht beobachtet wurde.

Naka et al. (2001) untersuchte anhand der gram-positiven *Enterococcus faecium*, *Bifidobacterium thermophilum* und *Lactobacillus acidophilus* die Adsorptionskapazität von aktivierter Pflanzenkohle für die normale bakterielle Flora im Verdauungstrakt von Milchkühen. Auch wenn aktivierte Pflanzenkohle durchaus Stämme der normalen, gesunden bakteriellen Flora adsorbierte, so war die Bindung anders als im Fall der gefährlichen gram-negativen *E. coli* O157:H7 Stämme nicht vollständig und in der Gesamtbilanz deutlich geringer. Pflanzenkohle scheint folglich das Verhältnis der normalen bakteriellen Flora zur pathogenen Flora positiv zu beeinflussen, allerdings muss dies systematisch und für eine viel größere Zahl verdauungsfördernder und pathogener Bakterienstämme untersucht werden.

Die möglicherweise teilelektive Wirkung der Pflanzen-

kohle auf verschiedene Bakteriengattungen eröffnet die Möglichkeit, die Pflanzenkohle gemeinsam mit eubiotischen Bakterien wie z.B. die ohnehin von Pflanzenkohle geförderten und weniger adsorbierten gram-positiven Laktobazillen zu verabreichen, um die Darmflora zu lenken (Naka et al., 2001). Die Ergebnisse u.a. von Gerlach et al. (2014a) mit der Fütterung von Pflanzenkohle in Kombination mit Sauerkrautsaft scheinen dies ebenso zu bestätigen wie Praxiserfahrungen zahlreicher Landwirte mit verschiedenen pflanzenkohlehaltigen Futtermitteln (z.B. von EM-Schweiz AG oder EM-Chiemgau GmbH), die durch Milchsäuregärung hergestellt werden und hochkonzentrierte Mischungen von Milchsäurebakterien enthalten. Laktobazillen und Bifidobakterien können den Stoffwechsel und die Verdauungseffizienz und somit die Nährstoffaufnahme verbessern (Gabriel et al., 2006).

Verschiedene Autorengruppen fanden, dass Pathogene im Allgemeinen stärker als die native Darmflora durch Pflanzenkohle im Verdauungstrakt gebunden werden. Die vorgebrachten Hypothesen nennen eine möglicherweise günstigere Porengrößenverteilung für die Adsorption komplexer (gram negativer) Pathogene, sowie die Beobachtung der (unspezifischen) Förderung nützlicher Mikroorganismen wie Laktobazillen. Diese Kombination könnte das Verdauungsmilieu positiv lenken und Pathogene unterdrücken (Choi et al., 2009; Chu et al., 2013a; K Naka et al., 2001; Watarai et al., 2008).

Hiroyuki Fujita und Kollegen führten 2011 eine umfassende Untersuchung zur Adsorption verschiedener PCBs durch Verabreichung von PCBs und Pflanzenkohle bei Legehennen durch. Neben dem Verhalten hinsichtlich der Bindung von PCBs (siehe oben im Abschnitt 4: Pestizide und Umwelttoxine) untersuchten die Autoren auch den Einfluss der zugefütterten Pflanzenkohle auf den Gesundheitszustand und die Eierproduktion der Hennen. Eierproduktion, Eiergewicht, Fettgehalt und Legerate zeigten ebenso wenig Unterschiede wie die biochemische Analyse des Blutplasmas. Anschließende histopathologische Untersuchungen zeigten keinerlei Veränderungen weder im Verdauungstrakt noch in der Leber. Untersuchungen des Eidotters ergaben, dass für die fettlöslichen Vitamine A und D3 ein statistisch nicht signifikanter Trend zu niedrigeren Konzentrationen festgestellt wurde, dass aber der Vitamin E – Gehalt in den Eiern bei täglicher Fütterung mit 0,5 Gewichtsprozent Pflanzenkohle um rund 40% abnahm (Fujita et al., 2012). Auch wenn alle andere Qualitätsparameter wie Fettsäuren, oxidative Stabilität und Mineralstoffgehalt in den Eiern nicht von der Fütterung mit Pflanzenkohle beeinflusst waren und damit Untersuchungen von Kawashima et al. (2009) und von Usydu et al. (2009) an Fischöl bestätigen, ist dies ein deutliches Zeichen, dass bei langfristiger Verabreichung bestimmte Vitamine möglicherweise durch einen Futterzusatz kompensiert werden sollten.

Das Ithaka Institut empfiehlt seit 2012, dass bei regelmäßiger, über Monate und Jahre andauernder Fütterung von Pflanzenkohle diese alle zehn Tage für drei Tage ausgesetzt werden sollte, um auszuschließen, dass auf Dauer durch unspezifische Adsorption eine Mangelsituation essentieller Nährstoffe auftreten kann. Die Praxiserfahrung allerdings zeigt, dass die meisten Landwirte die Fütterung nicht regelmäßig aussetzen. Mittlerweile liegen in der Tierarztpraxis von Achim Gerlach auch Erfahrungen mit täglicher Pflanzenkohlefütterung von Rindern über einen Zeitraum von vier Jahren ohne sichtliche Nebenwirkungen vor. Gerlach et al. (2014a) konnten in ihren Untersuchungen belegen, dass es zu keiner Bindung von Spuren- oder Mengenelementen durch Pflanzenkohlefütterung kam. Ähnliche Langzeiterfahrungen liegen aus der Schweiz und aus Australien vor (Joseph et al., 2015b). Das Vorsorgeprinzip lässt es trotzdem angeraten erscheinen, die Fütterung von Pflanzenkohle regelmäßig für einige Tage auszusetzen.

## 9. Verabreichung

Pflanzenkohle sollte nie ohne Vorliegen einer kompletten Pflanzenkohle-Analytik und Kontrolle der Einhaltung sämtlicher Futtermittelgrenzwerte in die Fütterung gelangen! Die Analytik sollte zwingend durch ein akkreditiertes, auf Pflanzenkohle-Analytik spezialisiertes Labor durchgeführt werden. Wie durch das EBC vorgeschrieben, sollte Pflanzenkohle zudem stets feucht verarbeitet und verabreicht werden (Handhabung und sachgemäßer Umgang, (EBC, 2012). Wird dies beachtet, kann sie in allen gebräuchlichen Futtermischanlagen zugegeben werden und ist in der Regel gut mit allen üblichen Futtermitteln mischbar. Pflanzenkohle kann auch dem Trinkwasser zugegeben werden. Im Falle akuter Vergiftungen sollte aktivierte Pflanzenkohle in wässriger Suspension verabreicht werden (Neuvonen et Olkkola, 1988). Je nach Tierart kann die Pflanzenkohle den Tieren auch direkt zur freien Verfügung auf der Weide oder im Stall angeboten werden. Oft wird die Kohle auch mit beliebten Ergänzungsmitteln wie Melasse (Joseph et al., 2015b) oder Aromastoffen wie Saccharin, Sorbital u.ä. (Cooney et Roach, 1979) gemischt.

Einige deutsche und schweizerische Landwirte injizieren über automatische Anlagen 1 % (vol) Pflanzenkohle in Silagetürme oder auch in Silageballen (O'Toole et al., 2016). Die dabei erzielten Ergebnisse scheinen den Aufwand und die Zusatzkosten zu rechtfertigen, da die Anwender offenbar unvermindert Pflanzenkohle nachbestellen (mündl. Mitteilung mehrerer Hersteller). Wissenschaftliche Untersuchungen zur Auswirkung der Pflanzenkohle auf die Futterqualität der Silage sind bisher allerdings kaum bekannt (Calvelo Pereira et al., 2014b).

In zahlreichen hier zitierten Versuchen wurde Pflanzenkohle nicht einzeln, sondern in Mischung mit anderen funktionalen Futterergänzungsmitteln wie Huminsäure, Holzessig, Sauerkrautsaft, eubiotischen Flüssigkeiten, Stevia, Nitrat oder Tanninen verabreicht, wobei die Wirkung der Mischung häufig größer war als bei getrennter Fütterung der einzelnen Komponenten. Tatsächlich besteht für solche Kombinationen von Pflanzenkohle mit verschiedenen anderen Futterergänzungsmitteln besonderer Forschungsbedarf und die begründete Aussicht, dass sich so geeignete Futtermittel für spezielle Zwecke und Tierarten entwickeln lassen. Die Pflanzenkohle könnte hier insbesondere als Trägermittel aktiver Substanzen eingesetzt werden.

## 10. Pflanzenkohlequalität

Die Adsorptionskapazität von Pflanzenkohle hängt insbesondere von der spezifischen Oberfläche und der Porengrößenverteilung ab. Durch die Aktivierung von Pflanzenkohle wird zwar die spezifische Oberfläche deutlich erhöht (von ca. 300 m<sup>2</sup> auf > 900 m<sup>2</sup>), doch ist die Erhöhung der Oberfläche insbesondere der Öffnung von Mikroporen (< 2 nm) zu verdanken. Diese Mikroporen jedoch sind in der Regel zu klein, um die für die Tierverdauung relevanten, meist höhermolekularen Stoffe oder bakteriellen Pathogene aufzunehmen. Insofern bringt die Aktivierung von Pflanzenkohle unter Umständen keine deutliche Erhöhung der spezifischen Adsorptionskapazität bestimmter Zielstoffe oder Organismen.

Allerdings werden durch die Aktivierung auch Nano- und Mesoporen vergrößert und deren Zugänglichkeit verbessert, so dass weniger die Erhöhung der gesamten spezifischen Oberfläche, sondern eher die Erhöhung der Oberflächen von gut zugänglichen Mesoporen entscheidend für die Adsorptionskapazität bestimmter Zielkomponenten in der Tierhaltung sein könnte. Um eine Pflanzenkohle mit besonders hohem Gehalt an zugänglichen Mesoporen herzustellen, ist eine nachgeschaltete Aktivierung nicht unbedingt nötig, sondern sie kann bereits durch die entsprechende Einstellung der Parameter bei der Pyrolyse erreicht werden. Grundsätzlich gilt, dass bei Pyrolysetemperaturen über 600°C eine höhere Mesoporosität erreicht wird. Zur Minimierung von Kondensaten wie z.B. PAKs ist es ohnehin nötig, im Pyrolyseprozess für eine ausreichende aktive Ausgasung der entstehenden und schließlich abkühlenden Pflanzenkohlen zu sorgen, beispielsweise durch Verwendung von Inertgas oder durch ausreichende Gegenstromlüftung beim Austrag (Bucheli et al., 2015).

In den meisten Versuchen zum Einsatz von Pflanzenkohle in der Fütterung wurden aktivierte Pflanzenkohlen verwendet. Hauptgrund dafür war, dass es sich hierbei um Standardmaterialien handelte, die bereits in vielen

anderen Versuchen eingesetzt wurden und somit eine gewisse Vergleichbarkeit gewährleisten. Grundsätzlich gilt für fast alle der hier zitierten Studien, dass die verwendeten Pflanzenkohlen schlecht oder gar nicht spezifisch charakterisiert waren, und keinerlei Informationen über die Herstellung oder den verwendeten Aktivierungsprozess gegeben wurden. Häufig wurde der Begriff „activated charcoal“ (aktivierte Pflanzenkohle) auch einfach nur als Synonym für Pflanzenkohle benutzt, da offensichtlich gar kein Aktivierungsprozess stattgefunden hatte (z.B.: (Ayanwale et al., 2006; Chu et al., 2013c). Nur selten wurden verschiedene Pflanzenkohlen hinsichtlich ihrer Wirkung verglichen. Galvano et al. (1996a) stellte fest, dass Pflanzenkohle mit dominierender Mikroporosität (< 2 nm) geringere Adsorptionskapazitäten für Mycotoxine aufwies, da die Diffusion dieser Toxine in die Poren der Pflanzenkohle zu langsam ist. Grundsätzlich gilt dies auch für die anderen in Betracht gezogenen Toxinverbindungen, Pestizide, PCB, Dioxine oder Pathogene. So stellten u.a. Edrington et al. (1997) fest, dass hoch aktivierte Pflanzenkohle die toxischen Wirkungen von Aflatoxin in Hähnchen nicht stärker minderte als weniger stark aktivierte Pflanzenkohle.

Aktivierte Pflanzenkohlen werden nach der Aktivierung in der Regel mit Säuren gewaschen, um den Mineralgehalt der Pflanzenkohle zu verringern. Allerdings gibt es keinerlei Grund anzunehmen, dass die Mineralstoffe in der Pflanzenkohle in irgendeiner Weise schädlich für die Tiere sein könnten, sofern die üblichen Grenzwerte für einzelne Mineralien und Metalle eingehalten werden (EBC, 2012), schließlich sind es die gleichen Mineralstoffe wie sie in jeder Pflanze vorkommen.

Pflanzenkohlen, die in den verschiedenen Studien eingesetzt wurden, sind hauptsächlich aus Holz, aber auch aus Kokosnussschalen (Jiya et al., 2013), Reishülsen (Leng et al., 2013b), Sheabuttertrester (Ayanwale et al., 2006), Bambus (Chu et al., 2013a; Van et al., 2006b), Maisstroh (Calvelo Pereira et al., 2014a) und Maiskolben (Kana et al., 2011) hergestellt worden. Nach derzeitigen Erkenntnissen gibt es keinen Anhaltspunkt, der es erlaubte eine Ausgangsbiomasse einer anderen vorzuziehen. Solange wichtige Grenzwerte wie die für das H/Corg-Verhältnis (=Karbonisierungsgrad), Kohlenstoff- und Schwermetallgehalte oder organische Schadstoffe eingehalten werden, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit die Fütterung auch von nicht aus Holz hergestellten Pflanzenkohlen unbedenklich.

## 11. Zulassung

Der Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierfütterung ist von der Europäischen Gemeinschaft (EG) in der Verordnung (EG) Nr. 68/2013 der Europäischen Kommission vom 16. Januar 2013 geregelt (Verordnung (EG) Nr.

68/2013). Im dortigen Verzeichnis der Einzelfuttermittel ist Pflanzenkohle unter 7.13.1 als Pflanzliche Kohle [Holzkohle] geführt und als "Erzeugnis, das durch Verkohlung von Pflanzenmasse gewonnen wird" definiert. Die strikten Qualitätsrichtlinien für Futter sind in der EG Verordnung 178/2002 geregelt (Verordnung (EG) Nr. 178/2002, 2002), besonderes Augenmerk wird hier auf die Einhaltung strenger Grenzwerte für Schwermetalle, Dioxine und Furane gelegt.

Sofern die für Futtermittel vorgeschriebenen Grenzwerte eingehalten werden, ist damit der Einsatz von Pflanzenkohle als Futtermittel in Deutschland grundsätzlich zulässig. Das European Biochar Certificate (EBC) kontrolliert und zertifiziert als freiwilliger Industriestandard seit Januar 2016 auch die Qualität von Pflanzenkohle für den speziellen Einsatz in der Tierfütterung. Die Nutzung des EBC-Futter-Zertifikats garantiert einerseits die Einhaltung aller von der EG Verordnung vorgeschriebenen Grenzwerte für Futtermittel und zertifiziert darüber hinaus die nachhaltige Herstellung und Anwendung sowie weitere Pflanzenkohle relevante Kriterien (EBC, 2012). Mit Genehmigung der European Biochar Foundation, der Herausgeberin des EBC-Zertifikates, wird der Wortlaut der Richtlinien zur EBC-Futter-Zertifizierung im Anhang wiedergegeben.

In der Schweiz wurde Pflanzenkohle der Firma Verora, die nach EBC-Futter zertifiziert wurde, 2016 auf die FIBL-Betriebsmittelliste (FIBL = Forschungsinstitut für biologischen Landbau) gesetzt und ist unter dem Namen „Futterkohle“ in der biologischen Tierhaltung zugelassen (Speiser et al., 2016).

In Deutschland sind die meisten Viehhaltungsbetriebe QS, GMP+ oder Bio zertifiziert. Während das GMP+ Label Pflanzenkohle auf seiner Futtermittelliste führt, ist dies weder bei QS, noch bei den verschiedenen Biozertifizierungen bisher der Fall. Um eine QS-Zertifizierung von Pflanzenkohle zu ermöglichen, müsste Pflanzenkohle zunächst als Einzelfuttermittel in die Positivliste bei der Normenkommission Einzelfuttermittel des Zentralausschusses der Deutschen Landwirtschaft ([http://www.dlg.org/positivliste\\_antrag.html](http://www.dlg.org/positivliste_antrag.html)) aufgenommen werden. Hierfür ist die Antragstellung einer oder mehrere Hersteller nötig, wobei die Antragsteller die Wirksamkeit und Sicherheit des Futtermittels nachweisen müssen. Für die Zulassung in der biologischen Tierhaltung müssten die Hersteller von Pflanzenkohle oder Pflanzenkohleprodukten entsprechend beantragen, diese auf die FIBL-Betriebsmittelliste Deutschland bzw. Österreich zu setzen.

## 12. Zusammenfassung

Der Einsatz von Pflanzenkohle als Futtermittel hat das Potential, die Tiergesundheit, die Futtereffizienz und

das Stallklima zu verbessern, Nährstoffverluste und die Emission von Klimagasen zu reduzieren sowie den Humusgehalt und somit die Bodenfruchtbarkeit zu erhöhen. In Kombination mit anderen Maßnahmen guter fachlicher Praxis könnte Pflanzenkohle die Nachhaltigkeit der Tierhaltung verbessern. Die Auswertung von über 150 wissenschaftlichen Fachartikeln zur Fütterung von Pflanzenkohle hat aufgezeigt, dass in den meisten Studien und für alle untersuchten Nutztierarten positive Auswirkungen auf unterschiedliche Parameter wie Toxinadsorption, Verdauung, Blutwerte, Futtereffizienz, Fleischqualität und/oder Emissionen gefunden werden konnten. In vielen Studien konnten bei meist positiven Tendenzen keine statistisch signifikanten Resultate gefunden werden. Signifikant negative Auswirkungen wurden jedoch in keiner der ausgewerteten Veröffentlichungen gefunden.

Es ist unzweifelhaft, dass trotz der inzwischen großen Zahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen nach wie vor großer Forschungsbedarf besteht. Die bisherige Forschung war häufig stark empirisch orientiert, so dass zwar vieles probiert und die Wirkungen genau gemessen wurden, aber die eigentlichen Mechanismen der Wirkung unerkannt blieben. Dies gilt insbesondere für die in der Fütterung eingesetzten Pflanzenkohlen, die in der Regel schlecht oder gar nicht charakterisiert und bisher nicht systematisch vergleichbar gemacht wurden. Hier wäre ein Zusammenrücken der Forschungsfelder agronomisch genutzter Pflanzenkohle (in Böden und Komposten), wo eine umfangreiche Charakterisierung der Pflanzenkohlen bereits Standard ist, sowie Tierproduktion und Veterinärmedizin dringend erforderlich. Derzeit eilt die praktische Anwendung den Erkenntnissen aus der Forschung eindeutig voraus.

Trotzdem kann auf Basis sowohl der bisher erschienenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen als auch der jahrhundertelangen praktischen Erfahrungen geschlossen werden, dass (1.) eine allgemeine Wirksamkeit der Pflanzenkohle als Futtermittel und (2.) die Harmlosigkeit der Fütterung von Pflanzenkohle gewährleistet und nachgewiesen sind.

Während die Wirksamkeit in der Fütterung hinsichtlich der Adsorption von Mycotoxinen, die in über 25 % der weltweiten Futtermittel enthalten sind, ebenso unzweifelhaft feststeht wie die Adsorption einer Vielzahl allgegenwärtiger Pestizide, Umweltgifte und pflanzlicher Toxine im Verdauungstrakt, sowie die Linderung bei Befall verschiedenster bakterieller und viraler Pathogene, konnte eine Zunahme der Futtereffizienz und Produktqualität zwar in vielen, aber bei weitem nicht in allen Fällen nachgewiesen werden. Grundsätzlich gilt: Je besser und ausgewogener das Futter und die Bedingungen der Tierhaltung bereits sind, desto geringer wird der Effekt der Fütterung von Pflanzenkohle sein. Sofern die grundlegen-

de Qualitätsparameter und Anwendungshinweise eingehalten werden (EBC, 2012), spricht allerdings aus Sicht der Autoren nichts gegen die Zulassung und den Einsatz von Pflanzenkohle als Futtermittel. Trotz dieser positiven Gesamtbeurteilung sollte eine regelmäßige Fütterung von Pflanzenkohle die Tierhalter, und vor allem Großtierhalter, nicht dazu verleiten, Abstriche bei der Qualität der Hauptfuttermittel und den Standards artgerechter Tierhaltung hinzunehmen.

### 13. Literatur

Abit, S.M., Bolster, C.H., Cai, P., Walker, S.L., 2012. Influence of feedstock and pyrolysis temperature of biochar amendments on transport of *Escherichia coli* in saturated and unsaturated soil. *Environ. Sci. Technol.* 46, 8097–105.

Abit, S.M., Bolster, C.H., Cantrell, K.B., Flores, J.Q., Walker, S.L., 2014. Transport of *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, and microspheres in biochar-amended soils with different textures. *J. Environ. Qual.* 43, 371–88.

Ademoyero, A.A., Dalvi, R.R., 1983. Efficacy of activated charcoal and other agents in the reduction of hepatotoxic effects of a single dose of aflatoxin b1 in chickens. *Toxicol. Lett.* 16, 153–157.

Andersen, A.H., 1948. Experimental Studies on the Pharmacology of Activated Charcoal. *Nord. Pharmacol. Soc.* iii.

Avantaggiato, G., Solfrizzo, M., Visconti, a, 2005. Recent advances on the use of adsorbent materials for detoxification of *Fusarium* mycotoxins. *Food Addit. Contam.* 22, 379–88.

Ayanwale, B.A., Lanko, A.G., Kudu, Y.S., 2006. Performance and egg quality characteristics of pullets fed activated sheabutter charcoal based diets. *Int. J. Poult. Sci.* 5, 927–931.

Bakr, B.E.A., 2007. The Effect of Using Citrus Wood Charcoal in Broiler Rations on the Performance of Broilers. *An-Najah Univ. J. Res.* 22, 17–24.

Banner, R.E., Whitehouse, N.L., Dunn, M.L., 2000. Supplemental barley and charcoal increase intake of sagebrush by lambs. *J. Range Manag.* 53, 415–420.

Besnier, P., 2014. Composition à base de Nekka-Rich pour la prévention de pathologies intestinales.

Bhatta, R., Saravanan, M., Baruah, L., Sampath, K.T., 2012. Nutrient content, in vitro ruminal fermentation characteristics and methane reduction potential of tropical tannin-containing leaves. *J. Sci. Food Agric.* 92, 2929–35.

Borchard, N., Spokas, K., Prost, K., Siemens, J., 2014. Greenhouse Gas Production in Mixtures of Soil with

Composted and Noncomposted Biochars Is Governed by Char-Associated Organic Compounds. *J. Environ. Qual.* 43, 971.

Brändli, D., Reinacher, S., 2012. Herbicides found in Human Urine. *Ithaka J.* 270–272.

Bucheli, T.D., Hilber, I., Schmidt, H.-P., 2015. Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated aromatic compounds in biochar, in: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management*. Routledge, London, pp. 595–624.

Bueno, D.J., di Marco, L., Oliver, G., Bardón, A., 2005. In Vitro Binding of Zearalenone to Different Adsorbents. *J. Food Prot.* 68, 613–615.

Cai, K.Z., Jiang, S.T., He, Y.J., 2011. Effects of Bamboo Charcoal Including Vinegar Liquid on Growth Performance and Meat Quality in Chinese Indigenous Breed During Fattening. *J. Anim. Vet. Adv.* 10, 2470–2473.

Calvelo Pereira, R., Muetzel, S., Camps Arbestain, M., Bishop, P., Hina, K., Hedley, M., 2014a. Assessment of the influence of biochar on rumen and silage fermentation: A laboratory-scale experiment. *Anim. Feed Sci. Technol.* 196, 22–31.

Calvelo Pereira, R., Muetzel, S., Camps Arbestain, M., Bishop, P., Hina, K., Hedley, M., 2014b. Assessment of the influence of biochar on rumen and silage fermentation: A laboratory-scale experiment. *Anim. Feed Sci. Technol.* 196, 22–31.

Camps-Arbestain, M., Amonette, J.E., Singh, B., Wang, T., Schmidt, H.-P., 2015. A biochar classification system and associated test methods, in: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management*. Routledge, London, pp. 165–194.

Cato, M.P., 1935. *On Agriculture*. London.

Chen, S., Rotaru, A.-E., Shrestha, P.M., Malvankar, N.S., Liu, F., Fan, W., Nevin, K.P., Lovley, D.R., 2014. Promoting interspecies electron transfer with biochar. *Sci. Rep.* 4, 5019.

Choi, J.-S., Jung, D.-S., Lee, J.-H., Choi, Y.-I., Lee, J.-J., 2012. Growth Performance, Immune Response and Carcass Characteristics of Finishing Pigs by Feeding Stevia and Charcoal. *Korean J. Food Sci. Anim. Resour.* 32, 228–233.

Choi, J.Y., Shinde, P.L., Kwon, I.K., Song, Y.H., Chae, B.J., 2009. Effect of Wood Vinegar on the Performance, Nutrient Digestibility and Intestinal Microflora in Weanling Pigs. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 22, 267–274.

Chu, G.M., Jung, C.K., Kim, H.Y., Ha, J.H., Kim, J.H., Jung, M.S., Lee, S.J., Song, Y., Ibrahim, R.I.H., Cho, J.H., Lee, S.S., Song, Y.M., 2013a. Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar as antibiotic alternatives on growth

- performance, immune responses and fecal microflora population in fattening pigs. *Anim. Sci. J.* 84, 113–20.
- Chu, G.M., Kim, J.H., Kang, S.N., Song, Y.M., 2013b. Effects of Dietary Bamboo Charcoal on the Carcass Characteristics and Meat Quality of Fattening Pigs. *Korean J. Food Sci. Anim. Resour.* 33, 348–355.
- Chu, G.M., Kim, J.H., Kim, H.Y., Ha, J.H., Jung, M.S., Song, Y., Cho, J.H., Lee, S.J., Ibrahim, R.I.H., Lee, S.S., Song, Y.M., 2013c. Effects of bamboo charcoal on the growth performance, blood characteristics and noxious gas emission in fattening pigs. *J. Appl. Anim. Res.* 41, 48–55.
- Clark, K., Sarr, A., Grant, P., Phillips, T., Woode, G., 1998. In vitro studies on the use of clay, clay minerals and charcoal to adsorb bovine rotavirus and bovine coronavirus. *Vet. Microbiol.* 63, 137–146.
- College, P.S., 1905. Annual Report of the Pennsylvania Agricultural Experiment Station, Pennsylvania. ed. Pennsylvania.
- Commission, T.H.E.E., 2011. Official Journal of the European Union L 159 / 25 COMMISSION REGULATION (EU) No 575 / 2011 of 16 June 2011 on the Catalogue of feed materials Having regard to the Treaty on the Functioning of the European Union, Having regard to Regulation (EC) No 76 25–65.
- Conte, P., Marsala, V., De Pasquale, C., Bubici, S., Valagusa, M., Pozzi, A., Alonzo, G., 2013. Nature of water-biochar interface interactions. *GCB Bioenergy* 5, 116–121.
- Conte, P., Schmidt, H., Cimò, G., 2015. Research and Application of Biochar in Europe of Biochar in Europe 55108, 1–20.
- Cooney, D.O., Roach, M., 1979. Sucrose as a sweetener for activated charcoal. *Am. J. Hosp. Pharm.* 36, 797–8.
- Cooney, D.O., Struhsaker, T.T., 1997. Adsorptive Capacity of Charcoals Eaten by Zanzibar Red Colobus Monkeys: Implications for Reducing Dietary Toxins 18.
- Cord-Ruwisch, R., Seitz, H.-J., Conrad, R., 1988. The capacity of hydrogenotrophic anaerobic bacteria to compete for traces of hydrogen depends on the redox potential of the terminal electron acceptor. *Arch. Microbiol.* 149, 350–357.
- Crome, P., Dawling, S., Braithwaite, R.A., Masters, J., Walkley, R., 1977. Effect of activated charcoal on absorption of nortriptyline. *Lancet* 310, 1203–1205.
- Dalvi, R.R., Ademoyero, A.A., 1984. Toxic effects of aflatoxin B1 in chickens given feed contaminated with *Aspergillus flavus* and reduction of the toxicity by activated charcoal and some chemical agents. *JSTOR. Avian Dis.* 28, 61–69.
- Dalvi, R.R., McGowan, C., 1984. Experimental induction of chronic aflatoxicosis in chickens by purified aflatoxin B1 and its reversal by activated charcoal, phenobarbital, and reduced glutathione. *Poult. Sci.* 63, 485–491.
- Davidson, E. a., Chorover, J., Dail, D.B., 2003. A mechanism of abiotic immobilization of nitrate in forest ecosystems: The ferrous wheel hypothesis. *Glob. Chang. Biol.* 9, 228–236.
- Dawling, S., Crome, P., Braithwaite, R., 1978. Effect of delayed administration of activated charcoal on nortriptyline absorption. *Eur. J. Clin. Pharmacol.* 14, 445–447.
- Day, G.E., 1906. Swine: A Book for Students and Farmers, Kenyon Pre. ed. Sherburne.
- Decker, W.J., Corby, D.G., 1971. Activated charcoal as a gastrointestinal decontaminant. Experiences with experimental animals and human subjects. *Bull. Envir. Contam. Toxicol* 6, 189–92.
- Denli, M., Okan, F., 2007. Efficacy of different adsorbents in reducing the toxic effects of aflatoxin B1 in broiler diets. *S. Afr. J. Anim. Sci.*
- Derlet, R.W., Albertson, T.E., 1986. Activated charcoal - Past, present and future. *West J Med* 145, 492–496.
- Di Natale, F., Gallo, M., Nigro, R., 2009. Adsorbents selection for aflatoxins removal in bovine milks. *J. Food Eng.* 95, 186–191.
- Diaz, D.E., Hagler Jr., W.M., Blackwelder, J.T., Eve, J.A., Hopkins, B.A., Anderson, K.L., Jones, F.T., Whitlow, L.W., 2004. Aflatoxin Binders II: Reduction of aflatoxin M1 in milk by sequestering agents of cows consuming aflatoxin in feed. *Mycopathologia* 157, 233–241.
- Diaz, D.E., Jr., W.M.H., Hopkins, B.A., Whitlow, L.W., 2003. Aflatoxin Binders I: In vitro binding assay for aflatoxin B1 by several potential sequestering agents. *Mycopathologia* 156, 223–226.
- Diez-Gonzalez, F., Callaway, T.R., Kizoulis, M.G., Russell, J.B., 1998. Grain Feeding and the Dissemination of Acid-Resistant *Escherichia coli* from Cattle. *Science* (80-). 281, 1666–1668.
- Dobson, R.C., Fahey, J.E., Ballea, D.L., Baugh, E.R., 1971. Reduction of chlorinated hydrocarbon residue in swine. *Bull. Envir. Contam. Toxicol* 6, 189–92.
- Döll, S., Dänicke, S., Valenta, H., Flachowsky, G., 2007. In vitro studies on the evaluation of mycotoxin detoxifying agents for their efficacy on deoxynivalenol and zearalenone. *Arch. Anim. Nutr.* 58, 311–324.
- EBC, 2012. European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. Version 7.1 of 22th December 2015 [WWW Document]. *Eur. Biochar Found.* URL <http://www.european-biochar.org/en/download>

(accessed 1.12.16).

Edrington, T., Kubena, L., Harvey, R., Rottinghaus, G., 1997. Influence of a superactivated charcoal on the toxic effects of aflatoxin or T-2 toxin in growing broilers. *Poult. Sci.* 76, 1205–1211.

Edrington, T.S., Sarr, A.B., Kubena, L.F., Harvey, R.B., Phillips, T.D., 1996. Hydrated sodium calcium aluminosilicate (HSCAS), acidic HSCAS, and activated charcoal reduce urinary excretion of aflatoxin M1 in turkey poults. Lack of effect by activated charcoal on aflatoxicosis. *Toxicol. Lett.* 89, 115–122.

Erb, F., Gairin, D., Leroux, N., 1989. Activated charcoals: properties-experimental studies. *J. Toxicol. Clin. expérimentale* 9, 235–48.

Erickson, P.S., Whitehouse, N.L., Dunn, M.L., 2011. Activated carbon supplementation of dairy cow diets : Effects on apparent total- tract nutrient digestibility and 27, 428–434.

Europ, D.I.E., Kommission, I., Folgende, H.A.T., Erlassen, V., Barroso, M., 2011. Amtsblatt der Europäischen Union L 159 / 25 VERORDNUNG ( EU ) Nr . 575 / 2011 DER KOMMISSION vom 16 . Juni 2011 zum Katalog der Einzelfuttermittel gestützt auf den Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union , gestützt auf die Verordnung ( EG ) N 25–65.

Fanchiotti, F.E., Moraes, G.H.K. de, Barbosa, A. de A., Albino, L.F.T., Cecon, P.R., Moura, A.M.A. de, 2010. Avaliação de óleos, carvão vegetal e vitamina E no desempenho e nas concentrações lipídicas do sangue e dos ovos de poedeiras. *Rev. Bras. Zootec.* 39, 2676–2682.

Feng, Y., Xu, Y., Yu, Y., Xie, Z., Lin, X., 2012. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils. *Soil Biol. Biochem.* 46, 80–88.

Foster, T.S., Morley, H.V., Purkayastha, R., Greenhalgh, R., Hunt, J.R., 1972. Residues in eggs and tissues of hens fed a ration containing low levels of pesticides with and without charcoal. *J. Econ.Entomol* 65, 932–8.

Fries, G.F., Marrow, G.S., Gordon, C.H., Dryden, L.P., Hartman, A.M., 1970. Effect of Activated Carbon on Elimination of Organochlorine Pesticides from Rats and Cows. *J. Dairy Sci.* 53, 1632–1637.

Fujita, H., Honda, K., Iwakiri, R., Guruge, K.S., Yamanaka, N., Tanimura, N., 2012. Suppressive effect of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans and dioxin-like polychlorinated biphenyls transfer from feed to eggs of laying hens by activated carbon as feed additive. *Chemosphere* 88, 820–7.

Gabriel, I., Lessire, M., Mallet, S., Guillot, J.F., 2006. Microflora of the digestive tract: critical factors and consequences for poultry. *Worlds. Poult. Sci. J.* 62, 499.

Galvano, F., Pietri, A., Bertuzzi, T., Bognanno, M., Chies, L., De Angelis, A., Galvano, M., 1996a. Activated Carbons: In Vitro Affinity for Fumonisin B1 and Relation of Adsorption Ability to Physicochemical Parameters. *J. Food Prot.* 59, 545–550.

Galvano, F., Pietri, A., Bertuzzi, T., Fusconi, G., Galvano, M., Piva, A., Piva, G., 1996b. Reduction of Carryover of Aflatoxin from Cow Feed to Milk by Addition of Activated Carbons. *J. Food Prot.* 59, 551–554.

Gaudreault, P., Friedman, P.A., Lovejoy, F.H., 1985. Efficacy of activated charcoal and magnesium citrate in the treatment of oral paraquat intoxication. *Ann. Emerg. Med.* 14, 123–125.

Gerlach, A., Schmidt, H.P., 2012. Pflanzenkohle in der Rinderhaltung. *Ithaka J.*

Gerlach, H., Gerlach, A., Schrödl, W., Haufe, S., Schottdorf, B., Shehata, A.A., Krüger, M., 2014a. Oral Application of Charcoal and Humic Acids Influence Selected Gastrointestinal Microbiota, Enzymes, Electrolytes, and Substrates in the Blood of Dairy Cows Challenged with Glyphosate in GMO Feeds. *J. Environ. Anal. Toxicol.* 05, 2–7.

Gerlach, H., Gerlach, A., Schrödl, W., Schottdorf, B., Haufe, S., Helm, H., Shehata, A., Krüger, M., 2014b. Oral Application of Charcoal and Humic acids to Dairy Cows Influences Clostridium botulinum Blood Serum Antibody Level and Glyphosate Excretion in Urine 4.

Ghezzehei, T. a., Sarkhot, D. V., Berhe, a. a., 2014. Biochar can be used to recapture essential nutrients from dairy wastewater and improve soil quality. *Solid Earth Discuss.* 6, 1101–1125.

Goldberg, M.J., Spector, R., Park, G.D., Johnson, G.F., Roberts, P., 1987. The effect of sorbitol and activated charcoal on serum theophylline concentrations after slow-release theophylline. *Clin. Pharmacol. Ther.* 41, 108–111.

Graber, E.R., Tsechansky, L., Gerstl, Z., Lew, B., 2012. High surface area biochar negatively impacts herbicide efficacy. *Plant Soil* 1–12.

Graber, E.R., Tsechansky, L., Lew, B., Cohen, E., 2014. Reducing capacity of water extracts of biochars and their solubilization of soil Mn and Fe. *Eur. J. Soil Sci.* 65, 162–172.

Gregory, K.B., Bond, D.R., Lovley, D.R., 2004. Graphite electrodes as electron donors for anaerobic respiration. *Environ. Microbiol.* 6, 596–604.

Gurtler, J.B., Boateng, A.A., Han, Y.H., Douds, D.D., 2014. Inactivation of E. coli O157:H7 in cultivable soil by fast and slow pyrolysis-generated biochar. *Foodborne Pathog. Dis.* 11, 215–23.

Hansen, H.H., Storm, I.M.L.D., Sell, a. M., 2012. Effect

- of biochar on in vitro rumen methane production. *Acta Agric. Scand. Sect. A - Anim. Sci.* 62, 305–309.
- Herath, I., Kumarathilaka, P., Al-Wabel, M.I., Abduljabbar, A., Ahmad, M., Usman, A.R.A., Vithanage, M., 2016. Mechanistic modeling of glyphosate interaction with rice husk derived engineered biochar. *Microporous Mesoporous Mater.*
- Humphreys, F.R., Ironside, G.E., 1980. *Charcoal from New South Wales*, 3rd editio. ed. Sidney.
- Husson, O., 2012. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant Soil* 362, 389–417.
- Huwig, A., Freimund, S., Käppeli, O., Dutler, H., 2001. Mycotoxin detoxication of animal feed by different adsorbents. *Toxicol. Lett.* 122, 179–188.
- Islam, M.M., Ahmed, S.T., Kim, Y.J., Mun, H.S., Yang, C.J., 2014. Effect of Sea Tangle (*Laminaria japonica*) and Charcoal Supplementation as Alternatives to Antibiotics on Growth Performance and Meat Quality of Ducks. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 27, 217–24.
- Iwakiri, R., Asano, R., Honda, K., 2007. Effects of carbonaceous adsorbent on accumulation and excretion of dioxins in rat. *Organohalogen Compd* 69, 2391–2394.
- Jacoby, M., 1919. *Einführung in die experimentelle Therapie*, Julius Spr. ed. Berlin.
- Jarczyk, A., Bancewicz, E., Jedryczko, R., 2008. An attempt at inactivation of ochratoxin A in pigs' feed with two feed-added adsorbents. *Anim. Sci. Pap. Reports* 26, 269–276.
- Jiya, E.Z., Ayanwale, B.A., Adeoye, A.B., Kolo, P.S., Tsado, D.N., Alabi, O.J., 2014. Carcass yield, organoleptic and serum biochemistry of broiler chickens fed activated charcoal. *J. Agric. Crop Res.* 2, 83–87.
- Jiya, E.Z., Ayanwale, B.A., Iljaiya, A.T., Ugochukwu, A., Tsado, D., 2013. Main content area Effect of Activated Coconut Shell Charcoal Meal on Growth Performance and Nutrient Digestibility of Broiler Chickens. *Br. J. Appl. Sci. Technol.* 3.2, 268–276.
- Joseph, S., Husson, O., Graber, E., van Zwieten, L., Taherymoosavi, S., Thomas, T., Nielsen, S., Ye, J., Pan, G., Chia, C., Munroe, P., Allen, J., Lin, Y., Fan, X., Donne, S., 2015a. The electrochemical properties of biochars and how they affect soil redox properties and processes. *Agronomy* 5, 322–340.
- Joseph, S., Pow, D., Dawson, K., Mitchell, D.R.G., Rawal, A., Hook, J., Taherymoosavi, S., Zwieten, L.V.A.N., Rust, J., Donne, S., Munroe, P., Pace, B., Graber, E., Thomas, T., Nielsen, S., Ye, J., Lin, Y., 2015b. Feeding Biochar to Cows : An Innovative Solution for Improving Soil Fertility and Farm Productivity 25, 666–679.
- Kalachniuk, H.I., Marounek, M., Kalachniuk, L.H., Savka, O.H., 1978. [Rumen bacterial metabolism as affected by extracellular redox potential]. *Ukr. biokhimičeskiĭ zhurnal* 66, 30–40.
- Kamimura, H., Koga, N., Oguri, K., Yoshimura, H., Honda, Y., Nakano, M., 2009. Enhanced faecal excretion of 2,3,4,7,8-pentachlorodibenzofuran in rats by a long-term treatment with activated charcoal beads. *Xenobiotica*.
- Kammann, C.I., Glaser, B., Schmidt, H.-P., 2016. Combining Biochar and Organic Amendments, in: Shackley, S., Ruysschaert, G., Zwart, K., Glaser, B. (Eds.), *Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practice*. London, p. accepted.
- Kammann, C.I., Schmidt, H.P., Messerschmidt, N., Linsel, S., Steffens, D., Müller, C., Koyro, H.-W., Conte, P., Joseph, S., 2015. Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Sci. Rep.* accepted.
- Kana, J.R., Teguaia, A., Fomekong, A., 2012. Effect of Substituting Soybean Meal with Cowpea (*Vigna unguiculata* WAL) Supplemented with Natural Plant Charcoals in Broiler Diet on Growth Performances and Carcass Characteristics. *Iran. J. Appl. Anim. Sci.* 2, 377–381.
- Kana, J.R., Teguaia, A., Mungfu, B.M., Tchoumboue, J., 2010. 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. *Trop. Anim. Health Prod.* 43, 51–56.
- 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. *Trop. Anim. Health Prod.* 43, 51–56.
- Kastening, B., Hahn, M., Rabanus, B., Heins, M., zum Felde, U., 1997. Electronic properties and double layer of activated carbon. *Electrochim. Acta* 42, 2789–2799.
- Kawashima, A., Watanabe, S., Iwakiri, R., Honda, K., 2009. Removal of dioxins and dioxin-like PCBs from fish oil by countercurrent supercritical CO<sub>2</sub> extraction and activated carbon treatment. *Chemosphere* 75, 788–94.
- Kim, B.K., Kim, Y.J., 2005. Effects of Feeding Charcoal Powder and Vitamin A on Growth Performance, Serum Profile and Carcass Characteristics of Fattening Hanwoo Steers. *J. Anim. Sci. Technol.* 47, 233–242.
- Kim, K.E., You, S.J., Ahn, B.K., Jo, T.S., Ahn, B.J., Choi, D.H., Kang, C.W., 2006. Effect of Dietary Activated Charcoal Mixed with Wood Vinegar on Quality and Chemical Composition of Egg in Laying Hens. *J. Anim. Sci. Technol.*
- Kim, S.-H., Lee, I.-C., Kang, S.-S., Moon, C.-J., Kim, S.-

- H., Shin, D.-H., Kim, H.-C., Yoo, J.-C., Kim, J.-C., 2011. Effects of Bamboo Charcoal and Bamboo Leaf Supplementation on Performance and Meat Quality in Chickens. *J. Life Sci.* 21, 805–810.
- Kluepfel, L., Keiluweit, M., Kleber, M., Sander, M., 2014. Redox properties of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environ. Sci. Technol.*
- Kluepfel, L., Piepenbrock, A., Kappler, A., Sander, M., 2014. Humic substances as fully regenerable electron acceptors in recurrently anoxic environments. *Nat. Geosci.* 7, 195–200.
- Knowles, O. a, Robinson, B.H., Contangelo, a, Clucas, L., 2011. Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids. *Sci. Total Environ.* 409, 3206–10.
- Knutson, H.J., Carr, M. a., Branham, L. a., Scott, C.B., Callaway, T.R., 2006. Effects of activated charcoal on binding *E. coli* O157:H7 and *Salmonella typhimurium* in sheep. *Small Rumin. Res.* 65, 101–105.
- Konsolakis, M., Kaklidis, N., Marnellos, G.E., Zaharaki, D., Komnitsas, K., 2015. Assessment of biochar as feedstock in a direct carbon solid oxide fuel cell. *RSC Adv.* 5, 73399–73409.
- Kubena, L.F., Harvey, R.B., Phillips, T.D., Corrier, D.E., Huff, W.E., 1990. Diminution of Aflatoxicosis in Growing Chickens by the Dietary Addition of a Hydrated, Sodium Calcium Aluminosilicate. *Poult. Sci.* 69, 727–735.
- Kutlu, H.R., Ünsal, I., Görgülü, M., 2001. Effects of providing dietary wood (oak) charcoal to broiler chicks and laying hens. *Anim. Feed Sci. Technol.* 90, 213–226.
- Lee, J.-J., Park, S.-H., Jung, D.-S., Choi, Y.-I., Choi, J.-S., 2011. Meat Quality and Storage Characteristics of Finishing Pigs by Feeding Stevia and Charcoal. *Korean J. Food Sci. Anim. Resour.* 31, 296–303.
- Leng, R.A., Inthapanya, S., Preston, T.R., 2012. Biochar lowers net methane production from rumen fluid in vitro. *Livest. Res. Rural Dev.* 24 (6).
- Leng, R.A., Inthapanya, S., Preston, T.R., 2013a. All biochars are not equal in lowering methane production in in vitro rumen incubations. *Livest. Res. Rural Dev.* 25.
- Leng, R.A., Preston, T.R., Inthapanya, S., 2012. Biochar reduces enteric methane and improves growth and feed ... Biochar reduces enteric methane and improves growth and feed conversion in local “ Yellow ” cattle fed cassava root chips and fresh cassava foliage Biochar reduces enteric methane and improv 24, 1–7.
- Leng, R.A., Preston, T.R., Inthapanya, S., 2013b. Biochar reduces enteric methane and improves growth and feed conversion in local “ Yellow ” cattle fed cassava root chips and fresh cassava foliage 24, 2–7.
- Liu, F., Rotaru, A.-E., Shrestha, P.M., Malvankar, N.S., Nevin, K.P., Lovley, D.R., 2012. Promoting direct interspecies electron transfer with activated carbon. *Energy Environ. Sci.* 5, 8982.
- Liu, Y., Yang, M., Wu, Y., Wang, H., Chen, Y., Wu, W., 2011. Reducing CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emissions from water-logged paddy soil with biochar. *J. Soils Sediments* 11, 930–939.
- Majewska, T., Mikulski, D., Siwik, T., 2009. Silica grit, charcoal and hardwood ash. *Turkey Nutrition* 14, 489–500.
- Majewska, T., Pudyszak, K., 2011. The effect of charcoal additions to diets for broilers on performance and carcass parameters. *PRODUKTYVUMUI IR SKERDENOS RODIKLIAMS* 55, 10–12.
- Majewska, T., Pyrek, D., Faruga, A., 2002. A note on the effect of charcoal supplementation on the performance of Big 6 heavy tom turkeys. *J. Anim. Feed Sci.* 11, 135–141.
- Mangold, E., 1936. Die Verdaulichkeit der Futtermittel in ihrer Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen. *Forschungsd. - Reichsarbeitsgemeinschaften d. Landwirtschaftswiss.* vol.1, 862–867.
- McHenry, M.P., 2010. Carbon-based stock feed additives: a research methodology that explores ecologically delivered C biosequestration, alongside live weights, feed use efficiency, soil nutrient retention, and perennial fodder plantations. *J. Sci. Food Agric.* 90, 183–7.
- McKenzie, R.A., 1991. Bentonite as therapy for Lantana camara poisoning of cattle. *Aust. Vet. J.* 68, 146–148.
- McLennan, M.W., Amos, M.L., 1989. Treatment of lantana poisoning in cattle. *Aust. Vet. J.* 66, 93–94.
- Mekbungwan, A., Yamauchi, K., Sakaida, T., 2004. Intestinal villus histological alterations in piglets fed dietary charcoal powder including wood vinegar compound liquid. *Anat. Histol. Embryol.* 33, 11–6.
- Mesa, A.C., Spokas, K.A., 2010. Impacts of Biochar ( Black Carbon ) Additions on the Sorption and Efficacy of Herbicides.
- Mézes, M., Balogh, K., Tóth, K., 2010. Preventive and therapeutic methods against the toxic effects of mycotoxins - a review. *Acta Vet. Hung.* 58, 1–17.
- Mochizuki, K., Soutric, F., Tadokoro, K., Antal, M.J., Tóth, M., Zelei, B., Várhegyi, G., 2003. Electrical and Physical Properties of Carbonized Charcoals. *Ind. Eng. Chem. Res.* 42, 5140–5151.
- Myrhe, G.D., Chindell, F.-M., Bréon, W., Collins, J., Fuglestvedt, J., Huang, D., Koch, J.-F., Lamarque, D., Lee, B., Mendoza, T., Nakajima, A., Robick, G., Stephens, T., Takemura, T., Zhang, H., 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, in: Stocker, T.F., Qin, D.,

- Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA.
- Nageswara Rao, S.B.N., Chopra, R.C., 2001. Influence of sodium bentonite and activated charcoal on aflatoxin M1 excretion in milk of goats. *Small Rumin. Res.* 41, 203–213.
- Naka, K., Watarai, S., Inoue, K., Kodama, Y., Oguma, K., Yasuda, T., Kodama, H., 2001. Adsorption Effect of Activated Charcoal on Enterohemorrhagic *Escherichia coli*. *J. Vet. Med. Sci.* 63, 281–285.
- Naka, K., Watarai, S., Tana, Inoue, K., Kodama, Y., Oguma, K., Yasuda, T., Kodama, H., 2001. Adsorption effect of activated charcoal on enterohemorrhagic *Escherichia coli*. *J. Vet. Med. Sci.* 63, 281–5.
- Naumann, H.D., Muir, J.P., Lambert, B.D., Tedeschi, L.O., Kothmann, M.M., 2013. Condensed Tannins In The Ruminant Environment : A Perspective On Biological Activity 1, 8–20.
- Neuvonen, P.J., Olkkola, K.T., 1988. Oral Activated Charcoal in the Treatment of Intoxications. *Med. Toxicol. Adverse Drug Exp.* 3, 33–58.
- Nevin, K.P., Woodard, T.L., Franks, A.E., Summers, Z.M., Lovley, D.R., 2010. Microbial Electrosynthesis: Feeding Microbes Electricity To Convert Carbon Dioxide and Water to Multicarbon Extracellular Organic Compounds. *MBio* 1, e00103–10–e00103–10.
- O’Toole, A., Andersson, D., Gerlach, A., Glaser, B., Kammann, C.I., Kern, J., Kuoppamäki, K., Mumme, J., Schmidt, Hans-Peter Schulze, M., Srocke, Franziska Stenrød, M., Stenström, J., 2016. Current and future applications for biochar, in: Shackley, S., Ruysschaert, G., Zwart, K., Glaser, B. (Eds.), *Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practice*. London, p. accepted.
- Okonek, S., Setyadharma, H., Borchert, A., Krienke, E.G., 1982. Activated charcoal is as effective as fuller’s earth or bentonite in paraquat poisoning. *Klin. Wochenschr.* 60, 207–210.
- Olkkola, K.T., Neuvonen, P.J., 1989. Treatment of intoxications using single and repeated doses of oral activated charcoal. *J. Toxicol. Clin. expérimentale* 9, 265–75.
- Ozmaie, S., 2011. Ozmaie, S. (2011). The effect of propranolol hydrochloride and activated charcoal in treatment of experimental oleander (*Nerium oleander*) poisoning in sheep. *Toxicol. Lett.* 205, 91.
- Paraud, C., Pors, I., Journal, J.P., Besnier, P., Reisdorffer, L., Chartier, C., 2011. Control of cryptosporidiosis in neonatal goat kids: efficacy of a product containing activated charcoal and wood vinegar liquid (Obioneck®) in field conditions. *Vet. Parasitol.* 180, 354–7.
- Park, C.I., Kim, Y.J., 2001. Effect of Additions of Supplemental Activated Carbon on the Fatty Acid, Meat Color and Minerals of Chicken Meat. *Korean J Food Sci Ani Resour.* 21, 285–291.
- Park, G.D., 1986. Expanded Role of Charcoal Therapy in the Poisoned and Overdosed Patient. *Arch. Intern. Med.* 146, 969.
- Pass, M.A., Stewart, C., 1984. Administration of activated charcoal for the treatment of lantana poisoning of sheep and cattle. *J. Appl. Toxicol.* 4, 267–269.
- Phanthavong, V., Viengsakoun, N., Sangkhom, I., Preston, T.R., 2015. Effect of biochar and leaves from sweet or bitter cassava on gas and methane production in an in vitro rumen incubation using cassava root pulp as source of energy. *Livest. Res. Rural Dev.* 27.
- Piva, a, Casadei, G., Pagliuca, G., Cabassi, E., Galvano, F., Solfrizzo, M., Riley, R.T., Diaz, D.E., 2005. Activated carbon does not prevent the toxicity of culture material containing fumonisin B1 when fed to weanling piglets. *J. Anim. Sci.* 83, 1939–47.
- Poage, G.W.I., Scott, C.B., Bisson, M.G., Hartmann, S.F., 2006. Activated charcoal attenuates bitterweed toxicosis in sheep. *J. Range Manag. Arch.*
- Pond, D.S.M., 1986. Role of Repeated Oral Doses of Activated Charcoal in Clinical Toxicology. *Med. Toxicol.* 1, 3–11.
- Positivliste für Einzelfuttermittel, Normenkommission für Einzelfuttermittel im Zentralaussschuss der Deutschen Landwirtschaft, 2014.
- Quin, P., Joseph, S., Husson, O., Donne, S., Mitchell, D., Munroe, P., Phelan, D., Cowie, A., Van Zwieten, L., 2015. Lowering N2O emissions from soils using eucalypt biochar: the importance of redox reactions. *Sci. Rep.* 5, 16773.
- Rattanawut, J., 2014. Effects of dietary bamboo charcoal powder including bamboo vinegar liquid supplementation on growth performance, fecal microflora population and intestinal morphology. *Betong Chickens.* 60
- Rogosic, J., Moe, S.R., Skobic, D., Knezovic, Z., Rozic, I., Zivkovic, M., Pavlicevic, J., 2009. Effect of supplementation with barley and activated charcoal on intake of biochemically diverse Mediterranean shrubs. *Small Rumin. Res.* 81, 79–84.
- Rogosic, J., Pfister, J. a., Provenza, F.D., Grbesa, D., 2006. The effect of activated charcoal and number of species offered on intake of Mediterranean shrubs by sheep and goats. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 101, 305–317.
- Ruttanavut, J., Yamauchi, K., Goto, H., Erikawa, T., 2009.

- Effects of dietary bamboo charcoal powder including vinegar liquid on growth performance and histological intestinal change in Aigamo ducks. *Int. J. Poult. Sci.* 8, 229–236.
- Samanya, M., Yamauchi, K., 2001. Morphological Changes of the Intestinal Villi in Chickens Fed the Dietary Charcoal Powder Including Wood Vinegar Compounds. *J. Poult. Sci.* 38, 289–301.
- Savage, E.S., 1917. *Feeding Dairy Cattle*. Holstein-Friesian World 1, 47.
- Schirrmann, U., 1984. Aktivkohle und ihre Wirkung auf Bakterien und deren Toxine im Gastrointestinaltrakt. TU München.
- Schmidt, H., Pandit, B., Martinsen, V., Cornelissen, G., Conte, P., Kammann, C., 2015. Fourfold Increase in Pumpkin Yield in Response to Low-Dosage Root Zone Application of Urine-Enhanced Biochar to a Fertile Tropical Soil. *Agriculture* 5, 723–741.
- Schmidt, H.-P., 2012. 55 uses of biochar. *Ithaka J.* 286–289.
- Schmidt, H.-P., Shackley, S., 2016. Biochar Horizon 2025, in: Shackley, S., Ruyschaert, G., Zwart, K., Glaser, B. (Eds.), *Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practice*. London, p. accepted.
- Shackley, S., 2014. Shifting chars? Aligning climate change, carbon abatement, agriculture, land use and food safety and security policies. *Carbon Manag.* 5, 119–121.
- Shehata, A.A., Schrödl, W., Aldin, A.A., Hafez, H.M., Krüger, M., 2012. The Effect of Glyphosate on Potential Pathogens and Beneficial Members of Poultry Microbiota In Vitro. *Curr. Microbiol.* 66, 350–358.
- Skutetzky, A., Starkenstein, E., 1914. *Die neueren Arzneimittel und die pharmakologischen Grundlagen ihrer Anwendung*, Julius Spr. ed. Berlin.
- Smalley, H.E., Crookshank, H.R., Radeff, R.D., 1971. Use of activated charcoal in preventing residues of ronnel in sheep. *J. Agr. Food Chem.* 19, 331–2.
- Snyman, L.D., Schultz, R.A., Botha, C.J., Labuschagne, L., Joubert, J.P.J., 2009. Evaluation of activated charcoal as treatment for Yellow tulp (*Moraea pallida*) poisoning in cattle. *J. S. Afr. Vet. Assoc.* 80, 274–5.
- Sonoki, T., Furukawa, T., Jindo, K., Suto, K., Aoyama, M., Sánchez-Monedero, M.Á., 2013. Influence of biochar addition on methane metabolism during thermophilic phase of composting. *J. Basic Microbiol.* 53, 617–621.
- Sophal, C., Khang, D.N., Preston, T.R., Leng, R.A., 2013. Nitrate replacing urea as a fermentable N source decreases enteric methane production and increases the efficiency of feed utilization in Yellow cattle. *Livest. Res. Rural Dev.* 25.
- Speiser, B., Tamm, L., Roggli, M., Berner, A., Bickel, R., Maurer, V., Schneider, Claudia Chevillat, V., 2016. *Betriebsmittelliste 2016 für die Schweiz - Hilfsstoffliste für den biologischen Landbau in der Schweiz*, FIBL. ed.
- Spokas, K.A., Novak, J.M., Stewart, C.E., Cantrell, K.B., Uchimiya, M., DuSaire, M.G., Ro, K.S., 2011. Qualitative analysis of volatile organic compounds on biochar. *Chemosphere* 85, 869–882.
- Steinegger, P., Menzi, M., 1955. Versuche über die Wirkung von Vitamin-Zusätzen nach Verfütterung von Adsorbentien an Mastpoulets. s.n. 165–176.
- Steiner, C., Das, K.C., Melear, N., Lakly, D., 2010. Reducing Nitrogen Loss during Poultry Litter Composting Using Biochar. *J. Environ. Qual.* 39, 1236.
- Struhsaker, T.T., Cooney, D.O., Siex, K.S., 1997. Charcoal Consumption by Zanzibar Red Colobus Monkeys: Its Function and Its Ecological and Demographic Consequences. *Int. J. Primatol.* 18, 61–72.
- Sung, E.I., You, S.J., Ahn, B.K., Jo, T.S., Ahn, B.J., Choi, D.H., Kang, C.W., 2006. Effects of Dietary Supplementation of Activated Charcoal Mixed with Wood Vinegar on Broiler Performance and Antibiotics Residue in Eggs. *Korean J. Poult. Sci.* 33, 283–293.
- Takekoshi, H., Suzuki, G., Chubachi, H., Nakano, M., 2005. Effect of *Chlorella pyrenoidosa* on fecal excretion and liver accumulation of polychlorinated dibenzo-p-dioxin in mice. *Chemosphere* 59, 297–304.
- Takenaka, S., Morita, K., Takahashi, K., 1991. [Stimulation of the fecal excretion of polychlorinated biphenyls (KC-600) by diets containing rice bran fiber and cholestyramine]. *Fukuoka Igaku Zasshi* 82, 310–6.
- Thu, M., Koshio, S., Ishikawa, M., Yokoyama, S., 2010. Effects of supplementation of dietary bamboo charcoal on growth performance and body composition of juvenile Japanese Flounder, *Paralichthys olivaceus*. *J. World Aquac. Soc.* 41, 255–262.
- Tiwary, A.K., Poppenga, R.H., Puschner, B., 2009. In vitro study of the effectiveness of three commercial adsorbents for binding oleander toxins. *Clin. Toxicol. (Phila.)* 47, 213–8.
- Toth, J.D., Dou, Z., 2015. Use and Impact of Biochar and Charcoal in Animal Production Systems, in Guo M, He Z, Uchimiya M (editors). *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*, SSSA Special Publication 63, Madison, WI 53711, USA, 1–26, doi:10.2136/sssaspecpub63.2014.0043.5.
- Totusek, R., Beeson, W.M., 1953. The Nutritive Value of Wood Charcoal for Pigs. *J. Anim. Sci.* 12, 271–281.

- Usydus, Z., Szlinder-Richert, J., Polak-Juszczak, L., Maleśa-Ciećwierz, M., Dobrzański, Z., 2009. Study on the raw fish oil purification from PCDD/F and dl-PCB-industrial tests. *Chemosphere* 74, 1495–501.
- Van, D.T.T., 2006. Some animal and feed factors affecting feed intake, behaviour and performance of small ruminants.
- Van, D.T.T., Mui, N.T., Ledin, I., 2006a. Effect of method of processing foliage of *Acacia mangium* and inclusion of bamboo charcoal in the diet on performance of growing goats. *Anim. Feed Sci. Technol.* 130, 242–256.
- Van, D.T.T., Mui, N.T., Ledin, I., 2006b. Effect of method of processing foliage of *Acacia mangium* and inclusion of bamboo charcoal in the diet on performance of growing goats. *Anim. Feed Sci. Technol.* 130, 242–256.
- van der Zee, F.P., Bisschops, I.A.E., Lettinga, G., Field, J.A., 2003. Activated Carbon as an Electron Acceptor and Redox Mediator during the Anaerobic Biotransformation of Azo Dyes. *Environ. Sci. Technol.* 37, 402–408.
- Van der Zee, F.P., Cervantes, F.J., 2009. Impact and application of electron shuttles on the redox (bio)transformation of contaminants: a review. *Biotechnol. Adv.* 27, 256–77.
- Ventura, M., Sorrenti, G., Panzacchi, P., George, E., Tonon, G., 2013. Biochar reduces short-term nitrate leaching from a horizon in an apple orchard. *J. Environ. Qual.* 42, 76–82.
- Verordnung (EG) Nr. 178/2002, 2002. des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2002 zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts, zur Errichtung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit und zur Festl.
- Verordnung (EU) Nr. 575/2011, 2011. der Kommission vom 16. Juni 2011 zum Katalog der Einzelfuttermittel.
- Villalba, J.J., Provenza, F.D., Banner, R.E., 2002. Influence of macronutrients and activated charcoal on intake of sagebrush by sheep and goats. *J. Anim. Sci.* 80, 2099–2109.
- Volkman, A., 1935. Behandlungsversuche der Kaninchen- bzw. Katzencoccidiose mit Viscojod and Carbo medicinalis, Edelman. ed. Leipzig.
- Wang, C., Lu, H., Dong, D., Deng, H., Strong, P.J., Wang, H., Wu, W., 2013. Insight into the effects of biochar on manure composting: evidence supporting the relationship between N<sub>2</sub>O emission and denitrifying community. *Environ. Sci. Technol.* 47, 7341–9.
- Wang, H., Lin, K., Hou, Z., Richardson, B., Gan, J., 2010. Sorption of the herbicide terbuthylazine in two New Zealand forest soils amended with biosolids and biochars. *J. Soils ...* 10, 283–289.
- Watarai, S., Tana, 2005. Eliminating the carriage of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis in domestic fowls by feeding activated charcoal from bark containing wood vinegar liquid (Nekka-Rich). *Poult. Sci.* 84, 515–521.
- Watarai, S., Tana, Koiwa, M., 2008. Feeding activated charcoal from bark containing wood vinegar liquid (nekka-rich) is effective as treatment for cryptosporidiosis in calves. *J. Dairy Sci.* 91, 1458–63.
- Wiechowski, L., 1914. Pharmakologische Grundlagen einer therapeutischen Verwendung von Kohle. *Dtsch. Medizinische Wochenschrift* 1, 988.
- Wilson, K.A., Cook, R.M., 1970. Metabolism of xenobiotics in ruminants. Use of activated carbon as an antidote for pesticide poisoning in ruminants. *J. Agr. Food Chem.* 18, 437–40.
- Wilson, L.L., Kurtz, D.A., Rugh, M.C., Chase, L.E., Ziegler, J.H., Varela-Alvarez, H., Borger, M.L., 1971. Effects of Feeding Activated Carbon on Growth Rate and Pesticide Concentrations in Adipose Tissues of Steers Fed Apple Waste. *J. Anim. Sci.* 33, 1361–1364.
- Yamauchi, K., Manabe, N., Matsumoto, Y., Takenoyama, S., Yamauchi, K., 2014. Increased collagen III in culled chicken meat after feeding dietary wood charcoal and vinegar contributes to palatability and tenderness. *Anim. Sci. J. = Nihon chikusan Gakkaiho* 85, 468–80.
- Yamauchi, K., Manabe, N., Matsumoto, Y., Yamauchi, K.-E., 2013. Increased collagen accumulation in eggshell membrane after feeding with dietary wood charcoal powder and vinegar. *Connect. Tissue Res.* 54, 416–25.
- Yamauchi, K., Ruttanavut, J., Takenoyama, S., 2010. Effects of dietary bamboo charcoal powder including vinegar liquid on chicken performance and histological alterations of intestine 257–268.
- Yatzidis, H., 1972. Activated charcoal rediscovered. *Br. Med. J.* 7.
- Yoshimura, H., Kamimura, H., Oguri, K., Honda, Y., Nakano, M., 1986. Stimulating effect of activated charcoal beads on fecal excretion of 2,3,4,7,8-pentachlorodibenzofuran in rats. *Chemosphere* 15, 219–227.
- Yu, L., Yuan, Y., Tang, J., Wang, Y., Zhou, S., 2015. Biochar as an electron shuttle for reductive dechlorination of pentachlorophenol by *Geobacter sulfurreducens*. *Nat. Publ. Gr.* 1–10.
- Zhang, A., Bian, R., Pan, G., Cui, L., Hussain, Q., Li, L., Zheng, J., Zheng, J., Zhang, X., Han, X., Yu, X., 2012. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. *F. Crop. Res.* 127, 153–160.
- Zhang, A., Cui, L., Pan, G., Li, L., Hussain, Q., Zhang, X.,

Zheng, J., Crowley, D., 2010. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 139, 469–475.

Zwieten, L. Van, Kammann, C., Cayuela, M., Singh, B.P., Joseph, S., Kimber, S., Donne, S., Clough, T., Spokas, K., 2015. Biochar effects on nitrous oxide and methane emissions from soil. In Lehmann J & Joseph S: *Biochar for environmental management: Science and technology.* earthscan, pp. 487–518.

## Danksagung

Die Autoren danken insbesondere John Toth und Zhenxia Dou, die mit ihrem Ende 2015 vorab erschienenen Buchkapitel: *Use and Impact of Biochar and Charcoal in Animal Production Systems* (Toth et al., 2015) äußerst wertvolle Vorarbeit geleistet haben.

## Anhang 1:

### §9 des EBC-Zertifikats, EBC-Futter:

#### **Pflanzkohle für den Einsatz in der Tierfütterung**

Pflanzkohle ist ein traditioneller Futterzusatzstoff, der häufig bei Verdauungsstörungen von Nutztieren eingesetzt wurde. Erst seit einigen Jahren wird Pflanzkohle vermehrt auch im täglichen Mischfutter eingesetzt. Der Einsatz von Pflanzkohle als Futtermittel ist nach der EU-Futtermittelverordnung (Europ et al., 2011) zugelassen. Die Listung als Einzelfuttermittel in der deutschen Positivliste steht noch aus ("Positivliste für Einzelfuttermittel," 2014). Entsprechend der Richtlinie 2002/32/EG vom 27.02.2015 gelten für den Einsatz von Pflanzkohle als Futtermittel andere bzw. zusätzliche Grenzwerte als für deren Einsatz als Bodenzusatz. Im Folgenden werden die zusätzlich zum EBC-Zertifikat zu erhebenden Parameter und Analysemethoden für die EBC-Zertifizierung von Pflanzkohle als Tierfuttermittel spezifiziert.

#### **9.1 Vorbedingung - EBC Premiumqualität**

Pflanzkohle kann nur dann als EBC-Futterkohle zertifiziert werden, sofern sämtliche Bedingungen für EBC Premiumqualität erfüllt sind und der Produktionsstandort entsprechend zertifiziert wurde.

#### **9.2 Biomasse – nur Pflanzkohle aus naturbelassenem Holz ist zugelassen**

Auch wenn mittlerweile ein Vielzahl wissenschaftlicher Studien positive Effekte auf die Tiergesundheit und -haltung nachweisen (Erickson et al., 2011; Gerlach and Schmidt, 2012; Gerlach et al., 2014b; Joseph et al., 2015b), gibt es bisher kaum Untersuchungen über spezifische Wirkungen verschiedenartiger Pflanzkohlen und insbesondere Pflanzkohlequalitäten auf die Verdauungsaktivitäten und das Tierwohl im Allgemeinen. Es liegen langjährige Erfahrungen beim Einsatz von Holzkohle und Aktivkohle vor, nicht aber von Pflanzkohlen aus anderen Biomassen mit höheren Aschegehalten wie z.B. Stroh, Trester oder Grünschnitt. Es kann zum heutigen Zeitpunkt daher nicht sicher ausgeschlossen werden, dass stärker aschehaltige Pflanzkohlen aus nicht holzartigen Biomassen bei langfristigem Einsatz negative Auswirkungen auf die Tiergesundheit haben, auch wenn dies als eher unwahrscheinlich zu betrachten ist. Auf Grundlage des Vorsorgeprinzips wird folglich momentan nur Pflanzkohle aus naturbelassenem, unbehandeltem Stammholz für den Einsatz als Tierfuttermittel zugelassen.

### 9.3 Kohlenstoffgehalt > 80% der Trockensubstanz

Der Kohlenstoffgehalt von Pflanzenkohle für den Einsatz als Futtermittel muss mindestens 80% der Trockensubstanz betragen.

Zulässige Prüfungsverfahren: DIN 51732

### 9.4 Schwermetalle

Nach der Futtermittelverordnung müssen die Gehalte der Schwermetalle Arsen, Blei, Cadmium und Quecksilber angegeben werden. Deren Grenzwerte unterscheiden sich für Futtermittel von denen für EBC-Premiumqualität. Für den Einsatz von Pflanzenkohle als Futtermittel gelten folgende Grenzwerte auf einer Basis von 88% des Trockenmassegehaltes der Pflanzenkohle: Arsen: 2 mg kg<sup>-1</sup>, Blei: 10 mg kg<sup>-1</sup>, Cadmium 1 mg kg<sup>-1</sup> und Quecksilber: 0.1 mg kg<sup>-1</sup>.

Zulässige Prüfungsverfahren: As, Pb, Cd: VDLUFA VII 2.2.1 (Aufschluss); VDLUFA III 17.2.2; DIN EN ISO17294-2 (E29); DIN EN ISO 11885(E22) (Messungen)

Hg: VDLUFA VII 2.2.1 (Aufschluss); VDLUFA III 17.4.3; DIN EN 13506; EN 12338 (Messung)

(Angabe für jede Charge)

### 9.5 Benzo-a-pyren < 25 µg/kg

Zusätzlich zu den PAK-Grenzwerten für EBC Premium-Qualität (4 mg PAK16 kg<sup>-1</sup>), gilt für Pflanzenkohle für die Tierfütterung der spezifische Referenz-Grenzwert für karzinogene PAKs von 25 µg/kg Benzo-a-pyren.

Zulässige Prüfungsverfahren: DIN ISO 13877; VDLUFA VII 3.3.3.2 (abweichend mit Toluolextraktion).

(Angabe für jede Charge)

### 9.6 Dioxine, Furane, Dioxin ähnliche PCB (WHO-PCB) und nicht Dioxin ähnliche PCB (DIN-PCB).

Die Futtermittelverordnung schreibt strenge Grenzwerte für polychlorierte-Dioxine, -Furane und PCB vor, die deutlich unterhalb der Grenzwerte der Bodenschutzverordnung liegen. Aus diesem Grund muss (1) jede Charge von Pflanzenkohlen für Futtermittel auf diese Stoffe analysiert werden, und (2) muss das zulässige Prüfverfahren eine niedrigere Nachweisgrenze aufweisen. Es gelten hier folglich spezielle Prüfverfahren und Grenzwerte für Pflanzenkohle zum Einsatz als Futtermittel.

Für PCDD/PCDF gilt ein Auslösewert von 0,5 ng TE kg<sup>-1</sup> bei 88%TS und ein Grenzwert von 0,75 ng TE kg<sup>-1</sup> bei 88%TS. Für dl-PCB gilt ein Auslösewert von 0,35 ng TE kg<sup>-1</sup> bei 88% TS. Für PCDD/PCDF + dl-PCB gilt der

Grenzwert 1,25 ng TE kg<sup>-1</sup> bei 88% TS. Für die Summe 6 der DIN PCB gilt ein Grenzwert von 10 µg TE kg<sup>-1</sup> bei 88%TS.

Zulässige Prüfungsverfahren: VDLUFA VII 3.3.2.4 (PCD-D+PCDF+ coplanare PCB; GC-HRMS), VDLUFA VII 3.3.2.2 (DIN-PCB; Heißextraktion, GC-MS)

(Angabe für jede Charge)

### 9.7 Fluor < 150 mg kg<sup>-1</sup> (88% TS)

Fluorsalze sind bei Pyrolysebedingungen in der Regel flüchtig und werden in Pflanzenkohlen kaum in nennenswerten Konzentrationen auftreten. Aufgrund der Futtermittelverordnung ist die Analyse jedoch standardmäßig vorgeschrieben.

Zulässige Prüfungsverfahren: VDLUFA VII 2.2.1

(Angabe für jede Charge)

### 9.8 Trockensubstanz, Rohasche, Salzsäureunlösliche Asche

Die Angabe von Trockensubstanz, Rohaschegehalt und HCl-unlöslicher Asche sind vorgeschriebene Standardwerte der Futtermittelverordnung und müssen auf dem Lieferschein angegeben werden. Der Gehalt der Aschen muss durch Verbrennung bei 550°C ermittelt und auf einer Basis von 88% Trockensubstanzgehalt angegeben werden.

Zulässige Prüfungsverfahren: Trockensubstanz: DIN 51718; VDLUFA III 3.1; Rohasche: analog DIN 51719, VDLUFA III 8.1; HCl-unlösliche Asche: VDLUFA III 8.2

(Angabe für jede Charge)

### 9.9 Rohprotein, Rohfaser, Rohfett

Die Angabe der Rohprotein-, Rohfaser- und Rohfettgehalte sind vorgeschriebene Standardwerte der Futtermittelverordnung. Rohprotein, Rohfaser und Rohfett werden im Verlauf der vollständigen Pyrolyse komplett zersetzt und sind folglich in Pflanzenkohle nicht mehr vorhanden. Eine Pflanzenkohle gilt als vollständig pyrolysiert, sofern das H/Corg < 0.7 ist. Ist das H/Corg-Verhältnis nach EBC-Premiumqualität kleiner als 0,7, erübrigt sich die Analyse von Rohprotein, Rohfaser und Rohfett, deren Gehalte dann per Definition als 0 g kg<sup>-1</sup> angegeben werden. Die Angaben sind verpflichtend und müssen dem Lieferschein beigelegt werden.

(Angabe für jede Charge)