



Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

BAND 98 | Ausgabe 2

Agrarwissenschaft
Forschung

Praxis

Sind Algen und Insekten das Proteinfuttermittel der Zukunft?

Ein Literaturüberblick zum Stand der Forschung

von Theresa von Jeinsen und Marie Diekmann

1 Einleitung

Das anhaltende Bevölkerungswachstum sowie die vor allem in Entwicklungsländern zunehmende Urbanisierung und steigende Kaufkraft in weiten Teilen der Bevölkerung lässt die Nachfrage nach Fleisch und tierischen Produkten auf globaler Ebene steigen (van Huis et al., 2013; Verbeke et al., 2015; FAO, 2017; Gasco et al., 2018). Die zur Deckung der veränderten Nachfrage notwendige Steigerung der Nutztierproduktion geht unweigerlich mit einem höheren Futtermittelbedarf einher, so dass die globale Nachfrage nach Futtermitteln und insbesondere nach hochwertigem Proteinfuttermitteln – der wichtigsten Futtermittelkomponente für hohe Nutztierleistungen – steigt (Trostle, 2008; Verbeke et al., 2015). Für den ohnehin unterversorgten Proteinmarkt in Europa stellt diese Entwicklung eine Belastungsprobe dar: bislang wird die bestehende Proteinelücke vornehmlich durch Sojaimporte aus Nord- und Südamerika gedeckt. Aufgrund seiner günstigen Aminosäurezusammensetzung, der hohen mengenmäßigen Verfügbarkeit sowie den relativ günstigen Produktionskosten ist Soja bzw. Sojaextraktionsschrot (SES) gegenwärtig das weltweit wichtigste und am häufigsten eingesetzte Proteinfuttermittel. Die Sojaproduktion wird jedoch mit hohen Externalitäten in den Produktionsländern verbunden. So stehen die sozialen und ökologischen Folgen der zunehmenden Sojaproduktion, die u.a. mit der Reduktion von Savannen- und Regenwaldflächen einhergeht, zunehmend in der gesellschaftlichen Kritik, die durch die anhaltenden Debatten um die Ursachen und Folgen des Klimawandels weiter verschärft wird (van Huis et al., 2013; Pistrich et al., 2014). Ein weiterer Kritikpunkt ist der mit dem Monokulturanbau einhergehende höhere Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, dessen Umweltauswirkungen als negativ eingeschätzt werden (Griep und Stalljohann, 2014). Zudem resultiert der hohe Marktanteil international agierender Unternehmen in den Anbauregionen in einer Verdrängung der regionalen, kleinbäuerlichen Betriebe (Bellof und Weindl, 2016). In den europäischen Importländern besteht darüber hinaus die Sorge vor dem Einsatz von möglicherweise gentechnisch veränderten Produkten

und starken Importabhängigkeiten von den Produktionsländern. Nachhaltige Produktionsweisen und der Verzicht auf gentechnisch veränderte Organismen stehen bei der Lebensmittelerzeugung seit einigen Jahren zunehmend im Fokus der europäischen Verbraucher und sind mit den hohen Sojaimporten kaum vereinbar (Thiel, 2013). Aus politischer Sicht wird die Anfälligkeit des europäischen Nutztiersektors gegenüber Preisschwankungen und Handelsverzerrungen gefürchtet. Auch die Bevorzugung der Abnehmerländer mit geringeren Produktionsansprüchen durch die Sojaexporteure stelle ein Risiko für die europäische Proteinversorgung dar. Nach China ist die EU der zweitgrößte Sojaimporteur. Die Anforderungen der EU hinsichtlich Umweltschutz, Gesundheit oder dem Einsatz von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) übertreffen jedoch jene des chinesischen Marktes (EP, 2011; Piestrich et al., 2014). Die Bundesregierung reagierte auf die Unterversorgung mit Proteinfuttermitteln mit der Eiweißpflanzenstrategie, die den Anbau von heimischen Eiweißfuttermitteln stärken soll (BMEL, 2019). Verglichen mit importiertem Soja ist die Produktion heimischer Eiweißpflanzen jedoch nicht wettbewerbsfähig (Martin, 2015).

Bedingt durch die vergleichsweise geringe Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Eiweißpflanzen und die zunehmende Kritik an Sojaimporten wird verstärkt nach alternativen Proteinquellen gesucht (Makkar et al., 2014). In wissenschaftlichen Studien wird in den vergangenen Jahren vermehrt auf die Eignung von Algen (Becker, 2007; Ahsan Bin Habib et al., 2008) und Insekten (Veldkamp et al., 2012; van Huis et al., 2013; Makkar et al., 2014; Verbeke et al. 2015) als alternative Proteinquelle verwiesen.

Der vorliegende Beitrag gibt, basierend auf einer Literaturanalyse, einen umfassenden Überblick über den wissenschaftlichen Stand der Forschung zum Einsatz von Algen und Insekten als alternative Proteinfuttermittel in der Tierhaltung. Dabei fokussiert der Beitrag vornehmlich auf die drei Insektenarten Schwarze Soldatenfliege (*Hermetia illucens*), Stubenfliege (*Musca domestica*) und Mehlkäfer (*Tenebrio molitor*), da diesen Arten das höchste Potenzial für eine intensive Haltung in wettbewerbsfähigen Größeneinheiten zugesprochen wird (Veldkamp et al., 2012; van Huis et al., 2013). Im Bereich der Algen konzentriert sich der Beitrag auf die Arten *Chlorella* und *Spirulina*, die weltweit das größte Produktionsvolumen aufweisen (Enzing et al., 2014). Weiterhin beschränkt sich der Beitrag auf die Nutzung der genannten Arten in der Fütterung von Monogastriern, da eine zukünftige Zulassung darstellbarer ist als bei Polygastriern (GD SANTÉ, 2017) und auch das bislang importierte SES vor allem in der Schweine- und Geflügelfütterung eingesetzt wird (BLE, 2018). Um das zukünftige Potenzial von Algen- und Insektenproteinen in der Geflügel- und Schweinefütterung abzuschätzen, zieht der Beitrag einen Vergleich zwischen den innovativen Proteinfuttermitteln und dem bisher eingesetzten SES.

Der Beitrag gibt zunächst einen Überblick über die Hintergründe der Suche nach alternativen Proteinquellen. Anschließend werden die rechtlichen Grundlagen für den Einsatz von Algen- und Insektenprotein in der Nutztierhaltung dargelegt, bevor geprüft wird, in wie weit Algen und Insekten an die ernährungsphysiologischen Eigenschaften von SES heranreichen. Schließlich werden die Kultivierungs- und Weiterverarbeitungsverfahren der Algen- und Insektenproduktion dargestellt, um abzuschätzen, unter welchen Voraussetzungen die für eine wirtschaftliche Produktion erfolgreichen Mengen realisierbar sind. Abschließend werden die Auswirkungen der alternativen Proteinquellen auf das Endprodukt betrachtet, bevor der Beitrag mit einer Zusammenfassung schließt.

2 Europas Proteinlücke

Rohprotein ist einer der wichtigsten Futtermittelkomponenten in der Tierernährung (Stangl, 2011). Um den Bedarf der Nutztierhaltung in der Europäischen Union (EU) zu decken, waren 2016/2017 rund 44,8 Mio. t Rohprotein erforderlich (FEFAC, 2017). Abbildung 1 veranschaulicht, dass 2016/2017 etwa 37 % der erforderlichen Rohproteinmenge durch heimische Ackerpflanzen, wie Weizen, Gerste oder Mais, gedeckt wurden (FEFAC, 2017). Da diese Pflanzen jedoch vergleichsweise eiweißarm sind, müssen sie durch eiweißreiche Futtermittel ergänzt werden (Griep und Stalljohann, 2014). Ein geringer Anteil des benötigten Rohproteins stammt aus Magermilchpulver und Fischmehl. Auch die Produkte der heimischen Eiweißpflanzen, wie Hülsenfrüchte, Ölsaaten, Sonnenblumenextraktionsschrot oder Rapsextraktionsschrot, tragen nur in einem begrenzten Umfang zur Deckung des Eiweißbedarfs bei (FEFAC, 2017). Dies begründet sich in der relativ geringen Anbaufläche heimischer Eiweißpflanzen in der EU (EP, 2011). Wengleich die Eiweißpflanzenstrategie der Bundesregierung die Ausdehnung des Eiweißpflanzenanbaus in Deutschland fördert, bleibt der Einsatz im Tierfuttermittel weitgehend gering. Ursächlich hierfür sind u.a. die relativ geringe Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu den bestehenden Alternativen sowie die im Vergleich zu SES geringen Proteinqualitäten und hohen Anteile antinutritiver Stoffe der heimischen Eiweißpflanzen, die die Fütterungseigenschaften herabsetzen (Griep und Stalljohann, 2014; Pistrich et al., 2014). Um die bestehende Differenz zwischen der europäischen Rohproteinproduktion und dem Bedarf für die Nutztierfütterung, die sogenannte „Proteinlücke“, zu decken, ist die EU auf den Import von Rohproteinfuttermitteln angewiesen (Stockinger und Schätzl, 2012). So wurden 2016/2017 etwa 39 % der in der EU verbrauchten Rohproteinmenge importiert (FEFAC, 2017). Über drei Viertel des Importbedarfes wird durch Sojabohnen und SES gedeckt (DVT, 2019). In der EU wurden 2016/17 rund 29 Mio. t SES an Nutztiere verfüttert, von denen 95 % importiert wurden (FEFAC, 2017). Der hohe Anteil des SES an der verfütterten Rohproteinmenge basiert u.a. auf der guten ernährungsphysiologischen Eignung, die auf einer günstigen Aminosäurezusammensetzung und -

verdaulichkeit sowie einer geringen Menge antinutritiver Stoffe beruht. Weiterhin zeichnet sich SES durch eine hohe mengenmäßige Verfügbarkeit und geringe Produktionskosten aus (Stockinger und Schätzl, 2012; Bellof und Weindl, 2016).

Die Bedeutung von SES in der Nutztierfütterung manifestiert sich weiterhin in den relativ hohen Anteilen an den Futtermitteln: So liegt der Sojaanteil in Futtermitteln von Masthähnchen bei bis zu 25 % (Kroes und Kuepper, 2015) und den Futtermitteln von Schweinen bei bis zu 22 % (Pistrich et al., 2014). SES wird in zwei unterschiedlichen Qualitäten gehandelt. Die Kategorie der Normalschrote umfasst die aufgrund ihres Proteingehalts von 38 % bis 44 % als 43er-Ware bezeichneten Schrote. Schrote, die aus zuvor geschälten Sojabohnen hergestellt werden, enthalten mit rund 48 % einen höheren Rohproteingehalt. Diese Schrote werden als „high protein“ (HP)-SES bezeichnet (LfL, 2010).

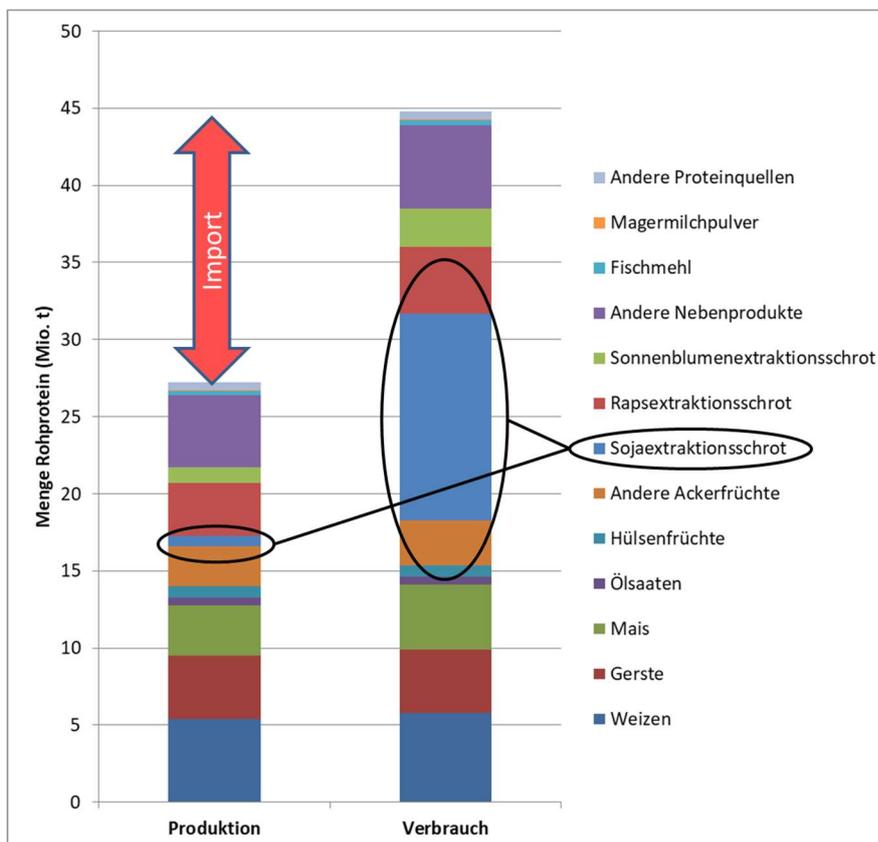


Abbildung 1: Produktion und Verbrauch von Proteinfuttermitteln in der EU in Mio. t Rohprotein in 2016/17

Quelle: Eigene Darstellung nach FEAC (2017): 52

3 Methodisches Vorgehen

Der Stand der Forschung zu Algen und Insekten als alternative Proteinquelle wird im Folgenden auf Grundlage der einschlägigen Fachliteratur, die auf nationaler und internationaler Ebene erschienen

ist, dargestellt. Im Rahmen der Literaturanalyse wurden die agrarökonomischen Fachzeitschriften in Anlehnung an das von Dabbert et al. (2009) erstellte GEWISOLA/ÖGA-Ranking systematisch auf einschlägige Artikel durchsucht. Ergänzend wurden Dissertationen, Tagungsbände von Fachkonferenzen, Sammelbände und ausgewählte Beiträge weiterer wissenschaftlicher Zeitschriften in der Literaturanalyse berücksichtigt. Die Literaturrecherche erfolgte mithilfe der Internetsuchmaschinen AgEcon Search, CAP Direct und Web of Knowledge. Um den Forschungsstand zu Algen und Insekten abzudecken, wurden die folgenden Begriffe in einer Volltextsuche eingesetzt: Alternative Proteinquellen, Algen, Insekten, Algenprotein, Insektenprotein, Schwarze Soldatenfliege, Stubenfliege, Mehlwurm, Spirulina, Chlorella, Gesetzeslage, Verordnung Verfütterung von Algen und Insekten, Algenproduktion, Insektenproduktion, Nährstoffgehalten von Algen/Insekten, Fleischqualität, Verbraucherakzeptanz, alternative protein sources, algae, insects, algae protein, insect protein, black soldier fly, housefly, mealworm, legal situation, legislation feeding algae and insects, algae production, insect production, nutrient content of algae/insects, meat quality, consumer acceptance, *Hermetia illucens*, *Musca domestica*, *Tenebrio molitor*. Die Literatursuche fokussiert dabei auf Beiträge, die sich mit dem Einsatz der betrachteten Algen- und Insektenarten als Tierfuttermittel sowie mit der Akzeptanz der so erzeugten tierischen Produkte durch die Verbraucher befassen. Außer Acht gelassen werden hingegen Beiträge, die Algen- und Insektenprodukte als alternative Proteinquelle für die menschliche Ernährung analysieren.

4 Stand der Forschung zu Insekten und Algen als alternative Proteinfuttermittel

4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen der Produktion

4.1.1 Insekten

Die gesetzlichen Vorgaben für Insekten als Futtermittel sind auf globaler Ebene sehr unterschiedlich (Sogari et al., 2019). Der vorliegende Beitrag fokussiert auf die Gesetzeslage in der EU und insbesondere in Deutschland. Die rechtliche Grundlage des Einsatzes von Insektenprotein in der EU wird maßgeblich durch die im Rahmen der BSE-Krise getroffenen Regelungen beeinflusst. Verarbeitete Insekten, beispielsweise zu dem hier betrachteten Larvenmehl, zählten bislang als „verarbeitetes tierisches Protein“ (engl. PAP= processed animal protein) zu den in der EU durch die Verordnung (EG) Nr. 999/2001 verbotenen Futtermitteln. Dieses Verbot geht zurück auf den BSE-Ausbruch im Jahr 2000/2001, woraufhin die Verfütterung tierischer Proteine an Nutztiere untersagt wurde. Ausgenommen hiervon war bereits in der Vergangenheit die Verfütterung von Insektenmehl an Heim- und Pelztiere (GD SANTÉ, 2017; Sogari et al., 2019). Die Verfütterung von lebenden oder hydrolysierten Insekten an Nutztiere war bereits in der Vergangenheit zulässig, wurde jedoch als

wenig praxistauglich eingestuft. Dementsprechend finden sich lebende oder hydrolysierte Insekten nicht in der in Deutschland eingesetzten „Positivliste Einzelfuttermittel“ wieder. Die Positivliste beruht auf einer freiwilligen Vereinbarung der beteiligten Akteure und weist Futtermittel auf, die nach verschiedenen Tests als geeignet angesehen werden (Zentralausschuss der Deutschen Landwirtschaft, 2019).

Der Grundstein für die Verfütterung von Insekten an Nutztiere wurde durch den in der Verordnung (EU) 2017/893 genehmigten Einsatz von Insektenprotein als Futtermittel in der Aquakultur gelegt. Die Bedeutung von Insekten als alternative Proteinquelle wurde zuletzt durch das in der Novel-Food-Verordnung geregelte, vereinfachte Zulassungsverfahren betont: Produkte, die eine Verwendungsgeschichte als sicheres Lebensmittel in einem Land außerhalb der EU haben, erfordern statt eines Zulassungsverfahrens lediglich eine Meldung bei der Europäischen Kommission, die – sofern keine begründeten Einwände erhoben werden – das Produkt in die Unionsliste für sichere Lebensmittel einträgt (Verordnung (EU) 2015/2283). Die Lockerung des Verfütterungsverbots basiert auf einem Gutachten der EFSA (2015), das sich mit den Risiken der Insektenproduktion und der Eignung von Insekten als Lebens- und Futtermittel beschäftigt. Hier werden Insekten hinsichtlich der Prionrisiken als gleich oder weniger risikoreich als die derzeit erlaubten PAP-Quellen bewertet, solange das Futtersubstrat der Insekten nicht aus Bestandteilen von Wiederkäuern oder menschlichen bzw. tierischen Fäkalien besteht. In die deutsche Positivliste Einzelfuttermittel haben Insekten bislang keinen Eingang gefunden (Zentralausschuss der Deutschen Landwirtschaft, 2019).

Da die zur Futtermittelherstellung gehaltenen Insekten zu den Nutztieren zählen (Verordnung (EG) Nr. 1069/2009), gelten für die Futtersubstrate die gleichen Auflagen wie für andere Nutztierarten. Das Verbot umfasst neben den bereits genannten Wiederkäuerbestandteilen und tierischen oder menschlichen Fäkalien weiterhin die Verfütterung von Abfällen aus der Gastronomie sowie fisch- oder fleischhaltige Speiseabfälle (Verordnung (EG) Nr. 767/2009; Verordnung (EG) Nr. 1069/2009, Verordnung EG (Nr.) 142/2011). Zu den zugelassenen Futtersubstraten zählt Material pflanzlichen sowie tierischen Ursprungs, sofern Letztere in den Anhängen der EU-Verordnungen 142/2011, 999/2001 und 853/2004 gelistet sind. Namentlich umfasst dies die Verfütterung von Milch, Eiern sowie deren Produkten, Honig und ausgeschmolzenes Fett. Außerdem können Blutprodukte, Gelatine, Kollagen und hydrolysierte Proteine von Nicht-Wiederkäuern eingesetzt werden. Von Wiederkäuern sind lediglich hydrolysierte Tierhäute als Futtersubstrat zugelassen. Die rechtliche Einschränkung der zugelassenen Futtersubstrate innerhalb der EU und die damit zusammenhängenden Mehrkosten wirken sich gegenwärtig als Wettbewerbsnachteil gegenüber der außereuropäischen Produktion aus. Dennoch setzten bereits mehrere Unternehmen innerhalb der

EU die Insektenhaltung zur Produktion von PAP um. Über die Verordnung (EU) 2017/893 wird diese bisher national kontrolliert und überwacht. Es wird damit gerechnet, dass sich der Umfang der europäischen Insektenproduktion durch die Marktöffnung für die Aquakultur vergrößern wird, weshalb Unionsvorschriften zur einheitlichen Kontrolle der Insektenproduktion geplant sind. Zudem wird nach der Zulassung von Insekten als Futtermittel in der Aquakultur im Strategiepapier der Generaldirektion Gesundheit und Lebensmittelsicherheit der Europäischen Kommission eine weitere Ausdehnung der zulässigen Einsatzgebiete auf die Verfütterung von Insekten an Geflügel und Schweine vorgeschlagen (GD SANTÉ, 2017), was den potenziellen Markt für Insektenmehle weiter vergrößern würde.

4.1.2 Algen

Die in der Verordnung (EU) Nr. 68/2013 erfolgte Zulassung der Algen als Einzelfuttermittel stellt die rechtliche Grundlage für die Nutzung von Algen als Proteinfuttermittel dar. Zugelassen sind in der Verordnung „Algen lebend oder verarbeitet, frisch, gekühlt oder tiefgefroren, Trockenalgen, Algen-Extraktionsschrot, Algenöl, Algenextrakt (Algenfraktion) und Seealgenmehl“. In die in Deutschland angewendete Positivliste der Einzelfuttermittel wurden neben dem Seealgenmehl die Algenarten *Spirulina*, *Chlorella* und *Schizochytrium lomainum* aufgenommen. Um den Anforderungen zu entsprechen, müssen die Algen unter kontrollierten Bedingungen erzeugt werden und es dürfen ihnen keine Stoffe außer Wasser entzogen worden sein (Zentralausschuss der Deutschen Landwirtschaft, 2019). Zudem sind bei den betrachteten Algenarten die Grenzwerte für Blei-, Cadmium- und Quecksilbergehalte sowie bei *Spirulina* zusätzlich die Grenzwerte für Microcystingehalte zu beachten. Die zulässigen Höchstgehalte sind in der Richtlinie 2002/32/EG für unerwünschte Stoffe in Futtermitteln festgelegt. Da Mikroalgen auch als Zusatzstoffe in der Tierernährung zum Emulgieren, Stabilisieren, Verdicken oder Gelieren eingesetzt werden, ist dieser Einsatz in der Verordnung (EG) Nr. 1831/2003 und mit der Richtlinie 70/524/EWG des Rates geregelt.

4.2 Kultivierung und Weiterverarbeitung

4.2.1 Insekten

In weiten Teilen Asiens, Afrikas und Lateinamerikas sind Insekten seit jeher als Nahrungs- und Futtermittel verbreitet und werden traditionell in der Wildnis gefangen und gesammelt (van Huis, 2019). In der groß angelegten, industriellen Produktion – auf globaler Ebene ein wachsender Wirtschaftsbereich – werden sie isoliert von ihren wilden Artgenossen und unter kontrollierten Bedingungen gehalten. Dies ermöglicht die Produktion unter bestmöglichen Rahmenbedingungen

und die Erzeugung gleichbleibend hoher Produktqualitäten (van Huis et al., 2013). Aufgrund der Anforderungen an die Produktion werden große, hochtechnisierte Unternehmen bislang als am geeignetsten für die Insektenproduktion angesehen. Hierzu zählen beispielsweise AgriProtein Technologies aus Südafrika, HaoCheng Mealworms Inc. aus China oder Enterra aus Kanada (Veldkamp et al., 2012; Stamer, 2015). In den europäischen Ländern wurde die Insektenproduktion bisher von kleineren Unternehmen betrieben, die Insekten hauptsächlich als Futtermittel für Tierhandlungen und Zoos produzierten (Veldkamp et al., 2012). Aktuelle Wachstumsprognosen für die Insektenproduktion als Lebens- und Futtermittel gehen von einer Steigerung des Marktvolumens von 30 Mio. € in 2015 auf fast 450 Mio. € in 2023 für den kombinierten Markt Belgien, Frankreich, UK, Niederlande, China, Thailand, Vietnam, USA, Brasilien und Mexiko aus. Begründet wird diese Prognose in den zunehmend verbesserten Marktchancen sowie der weiterhin zunehmenden Akzeptanz von Insekten als alternative Proteinquelle (Dobermann et al., 2017). Die Nebenprodukte der Insektenmehlproduktion bergen ebenfalls ein gewisses Marktpotenzial. Die getrockneten Reste der Insektenproduktion, maßgeblich Kot und Biomassereste, können zu organischem Dünger verarbeitet werden. Dieser Dünger wird bereits von einigen Unternehmen in den Niederlanden, China und den USA vermarktet (Halloran et al., 2016). Weiterhin erzielen die Abfallprodukte der Insektenproduktion bei einer Einspeisung in Biogasanlagen ebenso hohe Methanausbeuten wie andere Wirtschaftsdünger (Bulak et al., 2020).

Bislang liegen jedoch keine einheitlichen Standards für die Produktion und den Handel mit Insekten und Insektenprodukten vor (van Huis et al., 2015). Üblicherweise findet die Insektenproduktion in Lagerhallen statt (Sánchez-Muros et al., 2014) und umfasst die Zucht mit Eiablage, das Wachstum der Insekten sowie ihre Ernte. Die Insekten benötigen Wasser, ein Substrat zur Fütterung und artgerechte Umweltbedingungen (EFSA, 2015). Da Insekten wechselwarme Lebewesen sind, hängt ihre Körpertemperatur von der Umgebungstemperatur ab. Grundsätzlich bevorzugen sie warme Temperaturen (Halloran et al., 2016) und eine erhöhte Luftfeuchtigkeit (EFSA, 2015). Hilfsmittel und leistungssteigernde Stoffe, wie Antibiotika oder Hormone, werden bislang nicht eingesetzt. Lediglich zur Desinfektion der Produktionsanlagen werden Biozide genutzt. In Zukunft könnten Antibiotika in größeren Produktionen zum Einsatz kommen, um Krankheiten zu vermeiden (EFSA, 2015).

Bei der Auswahl der geeigneten Insektenart für die industrielle Kultivierung spielt deren Leistungsvermögen eine zentrale Rolle, wobei der Fokus auf hohen Wachstums- und Vermehrungsraten liegt. Um eine kurze Mastzeit und hohe Reproduktionsraten zu erzielen, werden Arten mit einer hohen Futtermittelverwertung und einer hohen Eiablage gewählt. Zudem sollten Insektenarten, um für die industrielle Produktion geeignet zu sein, eine möglichst geringe Anfälligkeit

gegenüber potenziellen Krankheitserregern zeigen (Vantomme et al., 2012). In der Verordnung (EU) 2017/893 werden sieben Insektenarten genannt, die sich zur Produktion in Europa eignen, da sie selbst weder als Pathogene noch als Erregervektoren eingestuft werden. Von dem Verzehr dieser sieben Arten werden darüber hinaus keine nachteiligen gesundheitlichen Auswirkungen auf Menschen oder Tiere erwartet. Diese Sicherheitsbedingungen erfüllen neben den drei in dieser Studie betrachteten Insektenarten ebenfalls der Getreideschimmelkäfer (*Alphitobius diaperinus*), das Heimchen (*Acheta domesticus*), die Kurzflügelgrille (*Gryllodes sigillatus*) und die Steppengrille (*Gryllus assimilis*).

Die drei in diesem Beitrag betrachteten Insektenarten – die Schwarze Soldatenfliege, die Stubenfliege und der Mehlwurm – werden im Larvenstadium geerntet (EFSA, 2015). In sogenannten Kulturbecken wachsen die Larven in einem Futtersubstrat heran (Veldkamp et al., 2012). Als Futtersubstrat ist Getreide ebenso geeignet wie organische Abfall- oder Nebenprodukte aus Schlachthäusern und Restaurants (Sánchez-Muros et al., 2014). Eine gute Qualität des Substrats ist entscheidend, da sie positiv mit der Wachstums- und Überlebensrate der Larven korreliert (Barragan-Fonseca et al., 2017). Am Ende des Larvenstadiums entledigen sich die Larven ihres Darminhalts und migrieren zur Verpuppung an einen trockenen Ort. Dieser Zeitpunkt wird in den Produktionsstätten zur Sortierung der Larven genutzt (Makkar et al., 2014). Die Wände der Kulturbecken dienen als Rampen, die die Larven kurz vor der Verpuppung erklimmen, um über eine Rinne in einen Container zu gelangen. Eine geringe Zahl der Larven wird zur Reproduktion zurückbehalten, die Mehrheit wird getötet und weiterverarbeitet (Veldkamp et al., 2012). Als Tötungsmethode geben Smetana et al. (2016), die in ihrer Studie eine Modellwertschöpfungskette einer industriellen Insektenproduktion darstellen, das Einfrieren der Insekten an. Andere Möglichkeiten sind das Töten durch hochtemperiertes Wasser oder Wasserdampf sowie durch Mikrowellen- oder Infrarotstrahlung (IPIFF, 2019a). Anschließend werden die Insekten getrocknet, gemahlen und teilentfettet (Jozefiak et al., 2016). Der Fettentzug der Insektenmehle führt zu einer Anreicherung der übrigen Inhaltsstoffe, was als vorteilhaft bewertet wird (Bellof, 2013). Er reduziert das Risiko von Oxidationsprozessen und mikrobiellen Veränderungen, was die Haltbarkeit erhöht und die Verarbeitungseigenschaften des Produkts verbessert (Jozefiak et al., 2016; Velten und Liebert, 2018).

Beispielhaft werden die optimalen Haltungs- und Produktionsbedingungen für die Larven der Schwarzen Soldatenfliege dargestellt: Die Schwarze Soldatenfliege kommt in warmen bis subtropischen Gegenden vor und ist 15 bis 20 mm groß. Die Larven wachsen sehr schnell, bis sie schließlich bei einer Länge von rund 27 mm ein Gewicht von 220 mg aufweisen (Makkar et al., 2014). Die Länge eines Lebenszyklus beträgt im Durchschnitt 41 Tage (Barragan-Fonseca et al., 2017). Der

Lebenszyklus kann sich jedoch verlängern, sofern die Produktionsanforderungen, wie beispielsweise die Qualität oder Menge des Futtersubstrats oder die Umgebungstemperatur, nicht den Haltungsanforderungen der Insekten genügen (Makkar et al., 2014). Als optimale Bedingungen gelten Temperaturen von etwa 27°C sowie eine relative Luftfeuchtigkeit von 60 bis 70 %. Das Futtermittel bzw. Substrat sollte eine Feuchtigkeit von 52 bis 70 % aufweisen (Barragan-Fonseca et al., 2017). Als Nahrung akzeptiert die Schwarze Soldatenfliege diverse Substrate, von zerfallenem organischem Material bis hin zu tierischen oder menschlichen Exkrementen (Makkar et al., 2014). Die zum Einsatz kommenden Futtersubstrate sind innerhalb der EU jedoch streng begrenzt, wie im vorausgegangenen Kapitel dargelegt wurde. Zugelassen sind jene Futtermittel, die auch in der übrigen Nutztierhaltung eingesetzt werden. Gegenwärtig nutzen Insektenproduzenten in Europa vornehmlich Hühnerfutter als Nährsubstrat (Dobermann et al., 2017). Fütterungsversuche von Gold et al. (2020) zeigen jedoch, dass die Verfütterung von Gemüseabfällen aus dem Gastronomiebetrieb an Insekten zu höheren Leistungen führt als das vorwiegend eingesetzte Hühnerfutter. Die Leistung von Insekten wird stark von dem zur Verfügung gestellten Nährsubstrat beeinflusst. Besonders gute Leistungen erzielt die Schwarze Soldatenfliege beispielsweise bei der Fütterung von Kartoffelschalen und Brauereiabfällen. Die Verfütterung von für die allgemeine Nutztierhaltung zugelassenen Produkten an Insekten wird zudem vom Standpunkt der nachhaltigen Gestaltung der Wertschöpfungsketten kritisch gesehen: Einen tatsächlichen, nachhaltigen Mehrwert können Insekten demnach nur erzielen, wenn sie Produkte, die anderenfalls aus der Nahrungskette ausscheiden, in hochwertige Eiweiße konvertieren (Ites et al., 2019).

Allgemein bevorzugen die Larven zur Weiterentwicklung ein Substrat mit einem hohen Fettanteil zum Aufbau des eigenen Körperfetts. Die Zeit des Larvenstadiums beträgt im Mittel 25 Tage (Barragan-Fonseca et al., 2017). Nach zwei Wochen der Verpuppung schlüpfen die adulten Tiere. Adulte Tiere benötigen kein weiteres Futter, sondern können von den Fettreserven aus dem Larvenstadium leben. Aus diesem Grund wird angenommen, dass die Schwarze Soldatenfliege nicht zur Übertragung von Krankheiten beiträgt (Makkar et al., 2014). Dennoch verlängert die Bereitstellung von Wasser und Zucker oder Honig die Lebensdauer der adulten Tiere (Barragan-Fonseca et al., 2017). Die Fliegen benötigen zur Paarung ganzjährig Licht, weshalb sich Gewächshäuser als Produktionsstätte eignen (Makkar et al., 2014). Lichtintensitäten von 135 bis 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ haben sich in der Fliegenhaltung als optimal erwiesen (Barragan-Fonseca et al., 2017). Zwei Tage nach der Paarung findet die Eiablage statt. Hierfür bevorzugen die Weibchen feuchte Spalten nahe potenzieller Nahrungsquellen (Makkar et al., 2014). Nach vier weiteren Tagen schlüpfen die Larven und werden im Substrat gemästet (Barragan-Fonseca et al., 2017). Insgesamt handelt es sich bei der Schwarzen Soldatenfliege um eine robuste Insektenart, die mit widrigen

Umweltbedingungen, wie beispielsweise Nahrungs- oder Sauerstoffmangel, umgehen kann (Makkar et al., 2014). Nichtsdestotrotz maximieren optimale Haltungsbedingungen die Produktionsleistung (EFSA, 2015).

Für die Etablierung des Insektenmehls als alternative Proteinquelle in der Futtermittelindustrie ist ein qualitativ hochwertiges homogenes Rohmaterial erforderlich. Die Entwicklung einheitlicher, standardisierter und somit zertifizierbarer Produktions- und Verarbeitungsprozesse wird als wichtige Voraussetzung hierfür angesehen (Jozefiak et al., 2016). Hinsichtlich der Entwicklung geeigneter Produktionsstandards sind allerdings weite Themengebiete noch unzureichend untersucht worden, so dass weitere Grundlagenforschung erforderlich ist. Um eine modulare Insektenproduktion in Deutschland zu etablieren, müssen zudem zunächst einige Grundvoraussetzungen getroffen werden. Beispielsweise existieren in Deutschland bislang keine Anbieter von Larven zur weiteren Aufzucht. Um eine wettbewerbsfähige Infrastruktur der Insektenproduktion aufzubauen, wird zunächst die Bereitstellung von geeignetem Larvenmaterial als notwendig angesehen. Zudem gilt es, ein Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP)-Konzept für die Insektenproduktion zu entwickeln, um ihre gesundheitliche Unbedenklichkeit für Mensch und Tier sicherzustellen. (Ites et al., 2019). Weiterer Forschungsbedarf besteht auch hinsichtlich des Einflusses unterschiedlicher Verarbeitungssysteme auf die Lebensmittelsicherheit oder die Qualität der Nährstoffe, die optimalen Produktionsbedingungen, beispielsweise die Dichte der Larven im Produktionsbehälter oder die spektrale Lichtzusammensetzung (Barragan-Fonseca et al., 2017; Dobermann et al., 2017; van Huis, 2019). Darüber hinaus ist eine Erweiterung der zugelassenen Nährsubstrate für die Insektenproduktion zu prüfen. Der Einsatz von Lebensmittelabfällen, beispielsweise aus der Gastronomie, könnte eine nachhaltigere und preiswerte Produktion des Insektenproteins ermöglichen (van Huis, 2019).

Um eine tatsächliche Alternative bzw. Ergänzung zu SES darstellen zu können, ist eine starke Ausdehnung der Produktionskapazitäten notwendig. Van Huis et al. (2013) bewerten die gegenwärtigen Produktionssysteme als zu konservativ und fordern einen bessern Einsatz innovativer Technik. Weiterhin beschreiben Dobermann et al. (2017), dass der Arbeitskraftbedarf beim Füttern, Sammeln, Säubern und Umsetzen der Insekten den Produktionsprozess verteuert. Sie fordern einen höheren Automatisierungsgrad, um das Endprodukt Insektenmehl günstiger und damit attraktiv für den Proteinfuttermittelmarkt werden zu lassen. Auch der durch den hohen Licht- und Wärmebedarf sehr hohe Energieverbrauch der bisherigen Produktionsanlagen stellt einen kostentreibenden Faktor dar. Produktionsstandorte in warmen Klimazonen sind daher bislang jenen in Europa vorzuziehen (Halloran et al., 2016).

4.2.2 Algen

Grundsätzlich werden Mikroalgenprodukte in zwei Kategorien unterschieden: In getrocknete Algen und in höherwertige Teilstoffe aus den Algen, wie beispielsweise Fettsäuren, Proteinisolate oder Pigmente (Lum et al., 2013; Vigani et al., 2015). Folglich können aus Algen unterschiedliche Produkte gewonnen werden, die im Lebens- und Futtermittelbereich ebenso ihre Verwendung finden wie in der Pharma- oder Kosmetikindustrie (Milledge, 2011). Für den Futtermittelmarkt stellen getrocknete Algen die wichtigste Produktgruppe dar, wobei höherwertige Nährstoffkomponenten als Zusatzstoffe genutzt werden können (Enzing et al., 2014). Die industrielle Mikroalgenproduktion hat sich in Asien, Australien, den USA und Europa angesiedelt. Aufgrund des natürlichen Standortvorteils – die Biomasseproduktion der Algen steigt mit zunehmender Wärme- und Lichtzufuhr – wird der überwiegende Anteil der weltweiten Mikroalgenerträge in den wärmeren Klimazonen erzeugt. Die europäischen Produzenten decken lediglich 5 % der weltweiten Mikroalgenproduktion ab (Vigani et al., 2015).

Die Produktionstechnologie ist jedoch – wenngleich die industrielle Produktion von Chlorella und Spirulina bereits seit den 60er bzw. 70er Jahren praktiziert wird und der Markt für Algenprodukte stetig wächst – ebenso wie die Produktionstechnologie für Insekten noch nicht ausgereift. Auch für die Produktion von Algenmehlen liegen bislang keine standardisierten Produktions- und Verarbeitungsverfahren vor. Aktuell wird zwischen offenen und geschlossenen Produktionsverfahren unterschieden. Offene Systeme sind runde Teiche mit einer Tiefe von ca. 30 cm oder sogenannte Raceway-Ponds, d.h. Teiche in der Form einer ovalen Rennbahn (Enzing et al., 2014). In wärmeren Ländern findet die industrielle Algenproduktion mehrheitlich in offenen Systemen statt (Klamczynska und Mooney, 2017). Geschlossene Systeme, auch Photobioreaktoren genannt, werden in Röhren- und Paneelensysteme unterschieden. Beide Formen gibt es in unterschiedlichen Ausführungen, wobei das Verhältnis von Oberfläche zum Volumen, also der Eintritt des Lichts und die Zirkulation, die erfolgsbestimmenden Faktoren sind. Röhrensysteme sind 50 bis 100 m lange, durchsichtige Plastikröhren, die miteinander verbunden sind. Eine Pumpe, die dafür sorgt, dass die Flüssigkeit mit den Mikroalgen in den Röhren zirkuliert (0,2 – 0,5 m/s) und ein Entgaser müssen vorhanden sein. Durch den Entgaser kann sowohl Erntegut als auch Sauerstoff entnommen und Wasser, Nährstoffe und Luft hinzugegeben werden. Paneelensysteme sind stets vertikal ausgerichtet und bestehen aus durchsichtigem Material. Sie sind 1 bis 10 cm tief und 0,5 bis 1 m hoch. Die Länge ist abhängig von der Stärke der Zirkulation und beträgt meistens mehrere Meter. Die Zirkulation entsteht durch Gaseinleitung am Boden der Paneele. Der Energiebedarf ist in den Paneelen durch die Gaseinleitung geringer als in den Röhrensystemen, wo ständig gepumpt werden muss (Enzing et al., 2014). Für die Algenproduktion in Europa bieten sich die geschlossenen Produktionssysteme an, die durch die

kontrollierbaren Umweltbedingungen und die somit konstante Biomasseerzeugung vorteilhaft in kühleren Klimazonen sind. Das Infektionsrisiko innerhalb der geschlossenen Systeme ist niedriger und der Platzbedarf gering. Jedoch sind die Investitions- und Betriebskosten der geschlossenen Systeme höher als die der offenen Systeme (Enzing et al., 2014; Vigani et al., 2016). Die Kultivierung in geschlossenen Systemen wird auch als besonders geeignet für die Herstellung höherwertigerer Algeninhaltsstoffe angesehen (Enzing et al., 2014; Vigani et al., 2016).

Die in dieser Arbeit betrachteten Mikroalgenarten *Spirulina* und *Chlorella* zählen zu den photoautotrophen Mikroalgen. Sie nutzen die Energie des Sonnenlichts, um in der Photosynthese mit Hilfe von Nährstoffen Kohlenstoffdioxid (CO_2) in zelleigene organische, energiereiche Stoffe umzuwandeln (Brennan und Owende, 2010). Generell sind für die Produktion von Mikroalgen das Algenmaterial, Wasser, Licht, CO_2 , Stickstoff und Phosphor nötig. Eine erfolgreiche und ertragreiche Kultivierung erfordert darüber hinaus eine optimale Ausgestaltung der Produktionsparameter, zu denen die Durchmischungsgeschwindigkeit, der pH-Wert und die Temperatur zählen (Enzing et al., 2014). Das Licht ist ein wesentlicher Parameter für das Wachstum, da variierende Lichtintensitäten zu schwankenden Wirkungsgraden in der Photosynthese und somit beim Algenwachstum führen (Steinbusch, 2015). Als Energiequelle dient in der Mikroalgenproduktion entweder künstlich erzeugtes Licht oder Sonneneinstrahlung (Behrens, 2005). Die Lichtintensität variiert in Abhängigkeit von der Wassertiefe und der Zellkonzentration im Kulturmedium. Bei größeren Volumina werden 5.000 bis 10.000 Lux empfohlen, wobei Photoinhibition und Überhitzung vermieden werden sollen. So kann sich beispielsweise eine zu hohe Lichtintensität während der Sommermonate hemmend auf das Algenwachstum auswirken. Als optimal werden eine Lichtintensität von 40-70 $\text{mmol/m}^2/\text{s}$ und Lichtphasen von mindestens 18 Stunden genannt (Enzing et al., 2014). Während des Mikroalgenwachstums wird CO_2 in Biomasse umgewandelt. Da die CO_2 -Konzentration der Luft mit etwa 400 ppmv zu gering für ein optimales Wachstum ist, wird CO_2 zugeführt. Die maximale CO_2 -Aufnahme von Algen beträgt rund 150.000 ppmv. Neben flüssigem Gas können grundsätzlich auch industrielle Abgase verwendet werden (Brennan und Owende, 2010). CO_2 puffert außerdem mögliche pH-Veränderungen des Wassers ab (FAO, 1996). Die Höhe des pH-Wertes beeinflusst die Verwertbarkeit des verfügbaren CO_2 : Je höher der pH-Wert ist, desto höher ist der CO_2 -Gradient und umso besser können Mikroalgen das verfügbare CO_2 in ihren Organismus einbauen. Aus Versuchen von Richmond und Grobbelaar (1986) ergab sich, dass der optimale pH-Wert für *Chlorella* und *Spirulina* zwischen 9,5 und 10,5 liegt. Bei höheren respektive geringeren pH-Werten sinkt die Produktivität der Algen (Vonshak et al., 1982; Gong et al., 2014). Weiterhin beeinflusst die Temperatur das Algenwachstum. Mit steigender Temperatur steigt die Aktivität der an der Photosynthese beteiligten Enzyme, wodurch die Reaktionsgeschwindigkeit und damit das

Biomassewachstum der Algen beschleunigt werden. Sehr hohe Temperaturen führen zu einer irreversiblen Denaturierung von Enzymen und anderen Proteinen, die zu einer Inaktivität führen. Mikroalgen können zwar Temperaturschwankungen durch Akklimatisierungsprozesse ausgleichen, dennoch sollte für eine wirtschaftlich erfolgreiche Kultivierung die Optimaltemperatur der jeweiligen Algenspezies angestrebt werden (Begon et al., 2017). Das Temperaturoptimum von *Spirulina* liegt beispielsweise bei 37 °C (Ahsan Bin Habib et al., 2008). Das Biomassewachstum von *Chlorella* ist bei 30 °C am höchsten (Daliry et al., 2017). Außerdem brauchen Algen Stickstoff, der in Form von Harnstoff zugeführt wird, sowie Silikon und Phosphor. Wenngleich der Phosphorbedarf der Algen gering ist, ist eine hohe Phosphorzufuhr notwendig, um eine ausreichende Bioverfügbarkeit sicherzustellen (Gouveia et al., 2008; Brennan und Owende, 2010). Die notwendige Durchmischung des Wassers erfolgt in offenen Systemen über Schaufelräder oder Zentralpaddel. In geschlossenen Systemen kommen Flüssigkeitspumpen oder Lufteinspeisegeräte zum Einsatz. Das Ziel der Wasserdurchmischung ist der Erhalt des Reaktionspotenzials der Photosynthese, indem CO₂ und Nährstoffe gleichmäßig verteilt werden, die einzelnen Algen mit Licht versorgt werden und der Sauerstoff entgasen kann. Weiterhin verhindert es die Sedimentation der Algen. In offenen Becken wird zudem eine Überhitzung vermieden (van der Hulst, 2012; Vonshak und Richmond, 1988).

Aktuell ist die Verfügbarkeit von Mikroalgen sehr begrenzt. Gleichzeitig sind die Produktionskosten im Vergleich zu anderen Proteinfuttermitteln sehr hoch, so dass der Einsatz von Algenproteinen in der Futtermittelindustrie (bislang) nicht wirtschaftlich darstellbar ist. Norsker et al. (2011) untersuchten die Kosten der Algenproduktion in drei verschiedenen Systemen und bezifferten sie auf eine Spanne von 5 bis 7 €/kg Trockenmasse. Als wichtige Kostenfaktoren identifizierten die Autoren den hohen Energiebedarf für die benötigte Lichtintensität, die Photosyntheseineffizienz der betrachteten Systeme, den notwendigen Kohlenstoffdioxideintrag sowie das Durchmischen der Algen. Anhand einer Sensitivitätsanalyse stellten die Autoren heraus, dass sich durch die Optimierung ebendieser Kostentreiber und der Hochskalierung der Produktion, Produktionskosten in Höhe von 0,70 €/kg Trockenmasse erzielen ließen, die eine Wettbewerbsfähigkeit der Mikroalgenproduktion gegenüber Sojaprodukten herstellen würden. Die anfallenden Kosten für die Trocknung und Weiterverarbeitung der Mikroalgen fanden in der Kalkulation jedoch keine Berücksichtigung. Ein weiterer Ansatz zur Reduktion der Produktionskosten und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit stellt die Produktion von Mikroalgen als Nebenprodukt einer höherwertigen und ausgereifteren Produktionskette, wie etwa der Produktion von Biokraftstoffen oder Pharmazieprodukten, dar (Yaakob et al., 2014).

4.3 Ernährungsphysiologische Eignung

4.3.1 Insekten

Weltweit existieren über 2.000 essbare Insektenarten, deren Nährstoffzusammensetzung sowohl zwischen den Arten als auch innerhalb einer Art in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium stark variieren kann. Auch die Aufzucht der Insekten, ihre Fütterung und die Verarbeitung beeinflusst die Nährstoffzusammensetzung der Insekten (van Huis et al., 2013). Dementsprechend ist eine gesonderte Darstellung der ernährungsphysiologischen Eigenschaften der drei betrachteten Insektenarten erforderlich. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die wertbestimmenden Inhaltsstoffe der teilentfetteten Larvenmehle der Schwarzen Soldatenfliege, der Stubenfliege und des Mehlkäfers. Um die Vergleichbarkeit mit SES zu ermöglichen, werden die durchschnittlichen Nährwertangaben von SES ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

Die drei Insektenarten weisen einen höheren Trockenmasseanteil als SES auf. Die Rohaschegehalte der Schwarzen Soldatenfliege und der Stubenfliege sind jedoch etwas höher als im SES, was den Anteil ihrer organischen Masse verringert. Von besonderem Interesse in dieser Betrachtung ist der Rohproteinanteil: Hier zeigt sich, dass alle drei Insektenarten bezogen auf die Frischmasse deutlich höhere Rohproteinwerte als SES aufweisen. Der energieliefernde Inhaltsstoff Rohfett ist auch nach der Teilentfettung in den Insektenlarvenmehlen höher als im SES. Besonders hohe Rohfettwerte weist der Mehlkäfer auf. Die Zusammensetzung der Nährstoffanteile in den Insektenlarven kann durch das gewählte Futtersubstrat beeinflusst werden. So kann beispielsweise der Anteil der Omega-3-Fettsäuren erhöht werden, wenn im Futtersubstrat hohe Anteile hiervon enthalten sind (Velten und Liebert, 2018). Die energetisch kaum zu verwertenden Rohfasergehalte der Insektenmehle ähneln denen des SES. SES weist jedoch deutlich höhere Anteile N-freier Extraktstoffe auf, zu denen u.a. lösliche Rohfaseranteile, Zucker und Stärke gehören.

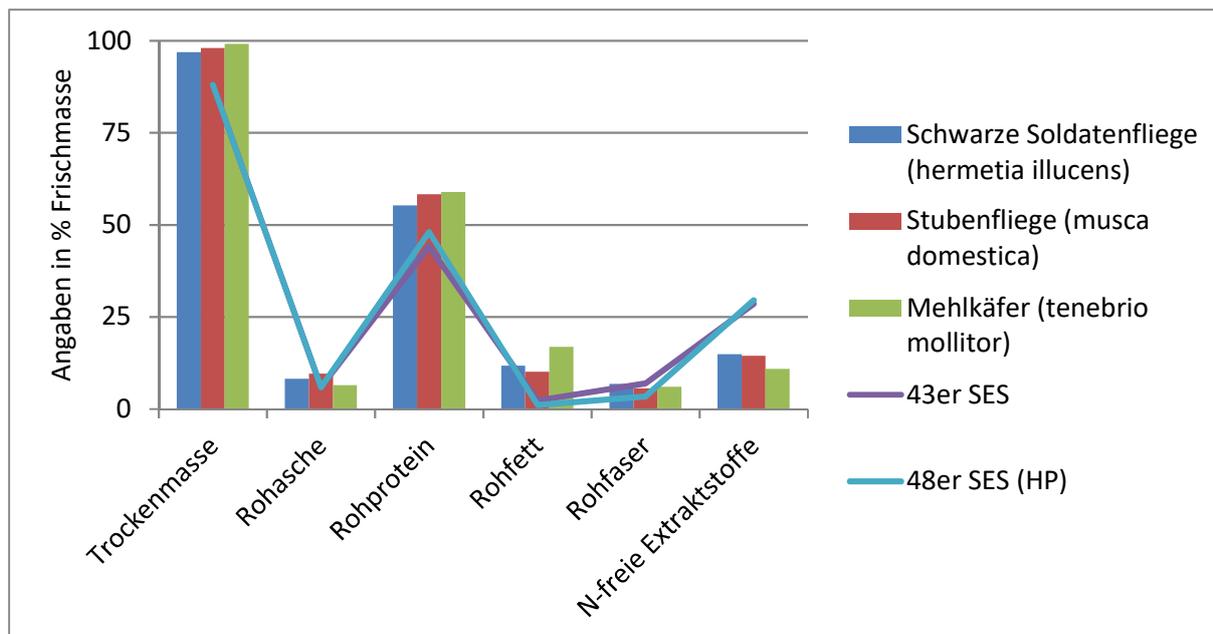


Abbildung 2: Nährstoffgehalte von teilentfetteten Insektenlarvenmehlen im Vergleich zu Sojaextraktionsschroten

Quelle: Eigene Berechnung nach Al-Quazzaz und Ismail (2016): 530; LfL (2010): 4; Makkar et al. (2014): 4, 7; Marono et al. (2016): 339; Yoo et al. (2019): 389

Die hohe Bedeutung von Insekten als alternative Proteinquelle wird maßgeblich durch die hohen Rohproteingehalte sowie das Aminosäuremuster bestimmt, das über die Qualität des Rohproteins entscheidet (Kirchgeßner, 2004; van Huis et al., 2013; Makkar et al., 2014). Bei der Fütterung von Monogastriern sind die essentiellen Aminosäuren Lysin, Methionin, Cystin, Threonin und Tryptophan von besonderer Bedeutung (Bellof und Weindl, 2016). In Tabelle 1 werden die Aminosäurezusammensetzungen der drei Insektenarten denen von SES gegenübergestellt.

Tabelle 1:
Absolute Gehalte essenzieller Aminosäuren von Insektenlarvenmehlen und Sojaextraktionsschroten

Angaben in % Frischmasse	Lysin	Methionin + Cystin	Threonin	Tryptophan
Schwarze Soldatenfliege (<i>hermetia illucens</i>)	3,65	1,71	2,04	0,28
Stubenfliege (musca domestica)	3,56	1,69	2,04	0,87
Mehlkäfer (tenebrio mollitor)	3,18	1,35	2,36	0,35
43er SES	2,67	1,22	1,71	0,59
48er SES (HP)	3,01	1,46	1,91	0,63

Quelle: Eigene Berechnung nach LfL (2010): 4; Makkar et al. (2014): 26

Die Insektenmehle weisen – bezogen auf die Frischmasse – einen höheren Anteil von Lysin und Threonin als SES auf. Mit Blick auf die Aminosäuren Methionin und Cystin zeigt sich das Insektenmehl der Mehlkäfer defizitär gegenüber SES, wohingegen das Mehl der Schwarzen Soldatenfliege und der Stubenfliege bessere Werte als SES erzielen. Hinsichtlich des Tryptophangehaltes übertrifft das Mehl der Stubenfliegenlarve die Werte des SES während die anderen zwei Insektenmehle geringere Werte aufweisen. Entscheidend für eine gute Verwertung des Rohproteins ist eine optimale Deckung des Aminosäurebedarfs der Nutztiere durch das Aminosäureverhältnis im Futtermittel (Kirchgeßner, 2004; Griep und Stalljohann, 2014). Ein ideales Aminosäureverhältnis in der Futtermittelration kann durch die Kombination verschiedener Futtermittelkomponenten oder durch die Ergänzung von Einzelaminosäuren erzielt werden (Kirchgeßner, 2004). Um SES durch Insektenlarvenmehle zu ersetzen empfehlen Makkar et al. (2014) eine Kombination aus den Larvenmehlen der Schwarzen Soldatenfliege und der Hausfliege im Verhältnis 50:50, um eine ausgewogene Aminosäurezusammensetzung für die Nutztierfütterung sicherzustellen. Neumann et al. (2018) empfehlen hingegen einen Ausgleich mit Einzelaminosäuren.

Ein weiterer wichtiger Aspekt hinsichtlich der ernährungsphysiologischen Wertigkeit von alternativen Proteinquellen stellt die Verdaulichkeit des Rohproteins dar, die bei Monogastriern in der präzökalen Verdaulichkeit der Aminosäuren gemessen wird. HP-SES weist gute Werte hinsichtlich der Verdaulichkeit des Rohproteins auf, die bei Broilern 89 % und bei Schweinen 82 % betragen (Bellof und Weindl, 2016). Nur wenige Studien befassen sich mit der Verdaulichkeit von Insektenproteinen. Die Ergebnisse der präzökalen Aminosäureverdaulichkeit für Broilerfuttermittel, die das Larvenmehl der Stubenfliege enthalten, reichen von 69 % (Pretorius, 2011) bis zu 98 % (Hwangbo et al., 2009). In beiden Studien wurden drei bzw. vier Wochen alte Broiler mit einer Futtermischung gefüttert, die zu 50 % bzw. zu 30 % Larvenmehl enthält. De Marco et al. (2015) untersuchen Futtermittel, die 25 % Larvenmehl der Schwarzen Soldatenfliege bzw. des Mehlkäfers enthalten, und ermitteln für Broiler im Durchschnitt eine Rohproteinverdaulichkeit von 68 % bzw. 86 %. In einem frühen Fütterungsversuch mit Absatzferkeln stellten Newton et al. (1977) bei der Verfütterung von Futtermitteln, die zu rund einem Drittel aus dem Larvenmehl der Schwarzen Soldatenfliege bestehen, eine Verdaulichkeit von 76 % fest. Dieser Wert weicht nur geringfügig von dem der Kontrollgruppe (77,2 %) ab, die mit einem Futtermittel mit rund einem Viertel SES gefüttert wurde. Die vorgestellten Studien untersuchen jedoch die Rohproteinverdaulichkeit eines Mischfutters mit Insektenmehlanteil, so dass keine Rückschlüsse über die Verdaulichkeit des reinen Larvenmehls getroffen werden können. Lediglich Marono et al. (2016) untersuchen die Rohproteinverdaulichkeit von Insektenlarvenmehl indem sie den Verdauungsvorgang im Reagenzglas mit Schweinemagenenzymen simulieren. Die Larvenmehle der Schwarzen Soldatenfliege und des Mehlkäfers weisen eine

Rohproteinverdaulichkeit von 67 % bzw. 66 % auf. Diese geringeren Werte unterstützen die Ergebnisse von Sánchez-Muros et al. (2014), die eine Rohproteinverdaulichkeit bei Insektenmehlen zwischen 45 % und 69,9 % feststellten. Dass diese Werte unter denen der meisten pflanzlichen Proteinfuttermittel liegen, erklären Marono et al. (2016) mit dem erhöhten Chitinanteil im Insektenmehl. Das Polysaccharid kann vom Dünndarm nicht aufgespalten und aufgenommen werden, weshalb ihm eine Reduktion der Proteinverdaulichkeit nachgesagt wird (Józefiak et al., 2016). Ein weiterer Insektenbestandteil, der beachtet werden sollte, sind antimikrobielle Peptide. Diesen Stoffen wurde in den vergangenen Jahren zunehmend Aufmerksamkeit zuteil, da sie als natürliche Antibiotika wirken, die keine bakteriellen Resistenzen erzeugen. Insekten werden hohe Gehalte an antimikrobiellen Peptiden zugeschrieben, weshalb eine Verfütterung von Insektenmehlen einen positiven Einfluss auf die Tiergesundheit der Nutztiere haben kann. Auch das Chitin wird positiv beurteilt, da es beispielsweise im Hühnerdarm die Produktion von Chitosan anregt, dem antioxidative, antimikrobielle, hypocholesterinämische und immunsystemverbessernde Eigenschaften zugeschrieben werden (Józefiak et al., 2016).

Neumann et al. (2018) stellten in ihren Fütterungsversuchen bei Broilern, in denen 50 %, 75 % und 100 % des SES durch teilentfettetes Insektenmehl der Schwarzen Soldatenfliege ersetzt wurde, fest, dass die Proteinverdaulichkeit ebenfalls sinkt, wenn die im Insekteneiweiß defizitären Aminosäuren nicht oder nicht ausreichend ausgeglichen werden. Werden jedoch zum Erreichen des idealen Aminosäureverhältnisses Einzelaminosäuren hinzugegeben, wird im Vergleich zur SES-Kontrollgruppe sogar eine bessere Rohproteinverdaulichkeit festgestellt. Von einer Überinterpretation der Verdaulichkeitsparameter raten die Autoren jedoch ab, da die teilweise auseinanderfallenden Studienergebnisse mit unterschiedlichen Techniken der Stickstoff-Kotanalyse begründet werden, die eine Vergleichbarkeit erschweren. Deshalb wird an dieser Stelle hinsichtlich der Futtermittelbewertung auf den Gehalt der Bruttoaminosäuren verwiesen.

Makkar et al. (2014) kommen zu dem Ergebnis, dass abhängig von der Tierart 25 % bis 100 % der traditionellen Proteinquellen durch Insektenmehle ersetzt werden können. Andere Studien bestätigen den unproblematischen Einsatz von Insekten im Futtermittel für Monogastrier (Józefiak et al., 2016; Kouřimská und Adámková, 2016; Fitches et al., 2018; Khan, 2018), sofern Einzelaminosäuren ausgeglichen werden (Neumann et al., 2018).

4.3.2 Algen

Ebenso wie bei den Insektenarten existieren auch bei den Mikroalgen artenspezifische Unterschiede in der Nährwertzusammensetzung, die eine differenzierte Betrachtung erforderlich machen. Dies

liegt sowohl an der Anzahl der Arten, die mit über 100.000 beziffert wird (Enzing et al., 2014), als auch am Einfluss der Umweltbedingungen auf die Produktion. Beispielsweise nehmen die Temperatur, die Lichtverhältnisse, der pH-Wert sowie der Mineraliengehalt, das CO₂-Angebot oder die Durchmischungsgeschwindigkeit des Wassers einen Einfluss auf die Nährwertzusammensetzung der Algen (Becker, 2004). Abbildung 3 stellt die Nährwertzusammensetzung der Algenmehle aus Chlorella und Spirulina dar und zieht einen Vergleich zu SES.

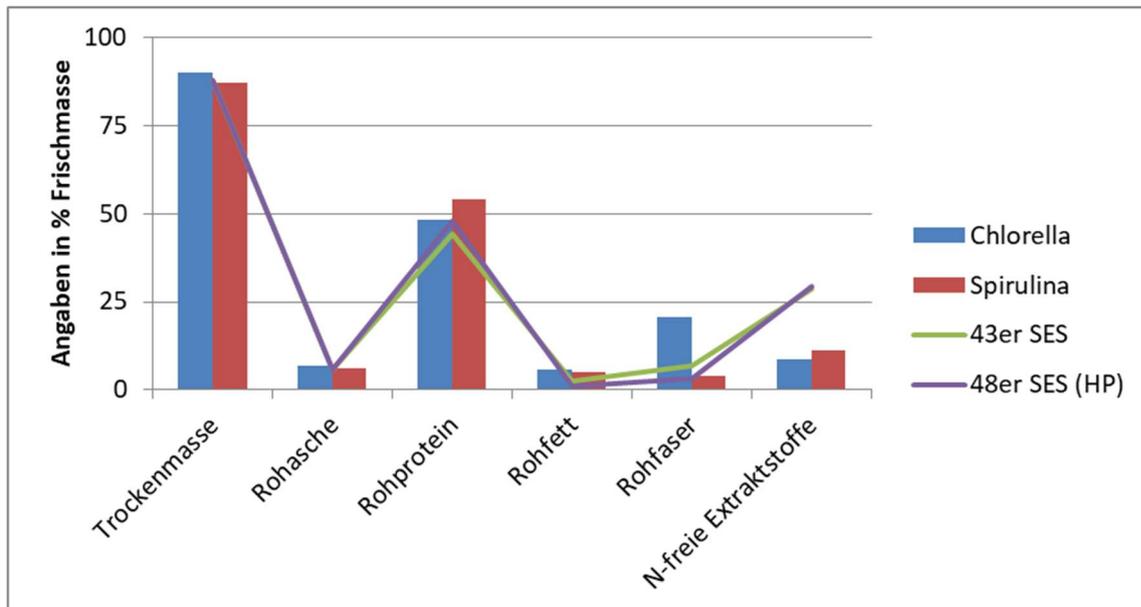


Abbildung 3: Nährstoffgehalte von Algenmehlen im Vergleich zu Sojaextraktionsschroten

Quelle: Eigene Berechnung nach Ahsan Bin Habib et al. (2008): 5; Halle et al. (2009): 9; LfL (2010): 4; Radhakrishnan et al. (2017): 4.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Zusammensetzung der beiden Algenarten und des SES hinsichtlich des Trockenmasse-, des Rohasche- und des Rohfettgehaltes sehr ähnlich ausfällt. Auch der Rohfasergehalt der Spirulina ähnelt dem von SES. Chlorella erzielt hier deutlich höhere Werte. Bezüglich des Rohproteingehalts erreichen beide Algenarten ähnlich hohe Werte wie das SES. Allerdings ist anzumerken, dass im Algenrohprotein ca. 10 % Nicht-Stickstoffprotein enthalten ist (Becker, 2004). Der in anderen Zellkomponenten chemisch gebundene Stickstoff kann zu einer Überbewertung des Rohproteins führen (Becker, 2007). Ebenso wie bei den betrachteten Insektenarten zeigt sich die Qualität des Rohproteins in dem Aminosäureverhältnis der Algenarten, das in Tabelle 2 dargestellt ist.

Tabelle 2:**Absolute Gehalte essenzieller Aminosäuren in Algenmehlen und Sojaextraktionsschroten**

Angaben in % Frischmasse	Lysin	Methionin + Cystin	Threonin	Tryptophan
Chlorella	4,05	1,73	2,31	1,01
Spirulina	2,60	1,84	3,36	0,16
43er SES	2,67	1,22	1,71	0,59
48er SES (HP)	3,01	1,46	1,91	0,63

Quelle: Eigene Berechnung nach LfL (2010): 4; Becker (2007): 208

Die Tabelle verdeutlicht, dass die Aminosäuregehalte der Algen mehrheitlich höher sind als jene des SES. Lediglich der Tryptophangehalt der Spirulina unterschreitet die Werte des SES deutlich. Ähnlich wie beim Einsatz von Insekten als alternative Proteinquelle würde sich auch bei dem Einsatz von Algen eine Kombination beider Arten anbieten, um eine möglichst gute Deckung des Aminosäurebedarfs zu erzielen.

Neben dem hohen Proteinanteil beinhalten Algen weitere als vorteilhaft bewertete Inhaltsstoffe, wie Vitamine, Mineralien und essenzielle Fettsäuren. Gleichzeitig ist ihr Kohlenhydratanteil gering. Algen werden zudem mit positiven Effekte auf das Immunsystem und die Fruchtbarkeit der Tiere in Verbindung gebracht (Spolaore et al., 2006; Yaakob et al., 2014). Zu der präzäkalen Aminosäureverdaulichkeit von Spirulina oder Chlorella bei Monogastriern liegen bislang, anders als bei den betrachteten Insektenarten, keine Untersuchungen vor.

Aus verschiedenen Fütterungsversuchen geht jedoch hervor, dass eine Supplementierung des eingesetzten Sojaanteils im Futtermittel durch Algenmehle einen positiven Effekt auf die Mastleistung von Schweinen ausüben kann. Šimkus et al. (2013) ergänzten das Mastschweinefutter um 2 g frische Spirulina. Die Supplementierung erfolgt ab einem Mastgewicht von 30 kg bis zur Schlachtung der Tiere. Im Vergleich zur Kontrollgruppe konnten die durchschnittlichen Tageszunahmen um über 9 % gesteigert werden. Die Ausschlagung fiel um rund 2 % höher aus, wobei der intramuskuläre Fettgehalt bei der mit Spirulina gefütterten Gruppe um 0,33 % geringer war als bei der Kontrollgruppe (Šimkus et al., 2013). Grinstead et al. (2000) konnten in ihren Versuchen hingegen keinen eindeutigen Effekt einer Spirulina-Beimengung auf die Wachstumsleistung von Schweinen feststellen.

Höhere Spirulinabeigaben wurden im Geflügelbereich getestet. Kharde et al. (2012) setzen dem Futter von Masthähnchen 300 bzw. 500 g Spirulina pro kg zu und ermitteln signifikant höhere Lebendmassen, bessere Zunahmen und Futtermittelnutzungsraten im Vergleich zur Kontrollgruppe, wobei die Futtermittelaufnahme bei den mit Spirulina gefütterten Gruppen geringer ausfiel (Kharde et al., 2012). Höhere Mastsergebnisse und eine größere Ausschachtung wurden auch von Bellof und Carrasco Alarcon (2010) festgestellt, die in der ökologischen Masthähnchenfütterung Spirulina bis zu einem maximalen Mischungsanteil von 5 % hinzugefügt haben. Veränderungen in der Futtermittelaufnahme und der Tiergesundheit wurden hingegen nicht beobachtet. Keine signifikanten Unterschiede der Lebendmasse und Futtermittelnutzungsrate im Vergleich zur Kontrollgruppe stellen Bonos et al. (2016) fest als sie 5 g und 10 g Spirulinapulver pro kg Masthähnchenfutter zugesetzt haben. Jedoch wird bei der Gruppe mit 5 g Spirulinazusatz ein gesteigener Anteil an mehrfach ungesättigten Fettsäuren im Muskelfleisch beobachtet (Bonos et al., 2016). In der Fütterung von Legehennen zeigen 12 % Chlorella im Futtermittel keine negativen Auswirkungen auf die Legemenge, das Eigewicht und die Futtermittelnutzung (Becker, 2004). Von der Beimengung von Algenmehlen zu bestehenden Futtermischungen werden positive Effekte auf die Physiologie der Tiere, wie beispielsweise höhere Wachstumsraten, eine bessere Futtermittelnutzung oder höhere Reproduktionsleistungen, beobachtet. Diese werden mit Verbesserungen der Immunabwehr oder der Darmfunktion der Tiere erklärt (Madeira et al., 2017).

Erfolgt statt einer Beimengung von Algenmehlen eine anteilige Substitution von SES durch Algenmehl, fallen die Ergebnisse der Fütterungsversuche negativer aus. So stellten Gongnet et al. (2001) in einem Fütterungsversuch mit Masthähnchen bei der Substitution von 100 g bzw. 150 g Soja durch Spirulina eine um 20 % geringere Lebendmassezunahme fest. Eine Substitution von 50 g Soja durch Spirulina blieb jedoch ohne Effekt auf die Lebendmasse. Auch Velten et al. (2018), die 50 % des SES im Futter von männlichen Eintagsküken mit Spirulinapulver ersetzen, beobachten Depressionen im Wachstum, der Futtermittelaufnahme sowie der Futter- und Proteinverwertungsrate, obwohl der Bedarf der Tiere mit Einzelaminosäuren ausgeglichen wurde. Die Autoren beschreiben jedoch, dass ein Einzelaminosäureausgleich über den Bedarf der Tiere hinaus zu einer Verbesserung der genannten Parameter führt. Sie weisen zudem darauf hin, dass die Futtermittelmischungen mit Spirulina von den Tieren schlechter akzeptiert werden (Velten et al., 2018). Die negativen Auswirkungen der höheren Substitutionsraten auf die Leistungsparameter zeigen die Einsatzgrenzen der Algenmehle auf.

4.4 Auswirkungen auf das Endprodukt

4.4.1 Insekten

Damit Insektenprotein eine relevante Alternative zu den herkömmlichen Eiweißfuttermitteln darstellen kann, ist der Effekt des Einsatzes in der Nutztierhaltung auf das tierische Endprodukt und somit für die Akzeptanz der alternativen Proteinquelle entlang der Wertschöpfungskette von zentraler Bedeutung.

Frühe Studien von Gawaad und Brune (1979) stellten beispielsweise einen intensiveren Geruch und Geschmack bei dem Fleisch von Hähnchen fest, die mit Insekten gefüttert wurden. Aktuellere Studien von Altmann et al. (2018) beobachteten in einem Versuch mit dem Larvenmehl der Schwarzen Soldatenfliege ebenfalls einen intensiveren Geschmack des Hähnchenfleisches zu Beginn der Lagerzeit. Darüber hinaus stellten sie jedoch keine Abweichungen von der Kontrollgruppe fest. Da einige Konsumenten einen intensiveren Fleischgeschmack bevorzugen würden, sei diese Auswirkung jedoch nicht als Negativkriterium zu beurteilen (Altmann et al., 2018). Andere Fütterungsversuche, in denen Hähnchenfuttermittel mit Stubenfliegenlarvenmehl ergänzt wurde, beobachteten keine Auswirkungen auf die Qualität des Brustmuskelfleisches (Awoniyi et al., 2004; Hwangbo et al., 2009). Zudem wurde das Fleisch von Hähnchen, deren Futter statt SES eine Kombination aus Insektenmehlen enthielt, als zarter und saftiger beschrieben, wobei Geschmack und Aroma als vergleichbar mit der Kontrollgruppe eingestuft wurden. Als ursächlich wird der höhere Fettanteil des Fleisches von den mit Insekten gefütterten Tieren angesehen (Khan et al., 2018). Dem in dem Insektenprotein enthaltenen Chitin wird zudem eine immunverbessernde Wirkung zugeschrieben (Muzzarelli, 2016).

Neben den Auswirkungen auf die Fleischqualität ist auch die Akzeptanz des Insektenfuttermittels durch die Endverbraucher ein entscheidender Parameter für die Etablierung von Insekten als Proteinfuttermittel. Das europäische Forschungsprojekt PROteINSECT stellte in seinen global ausgelegten Untersuchungen fest, dass 66 % der befragten Verbraucher Fleisch von Tieren, die mit Insekten gefüttert wurden, essen würde. Ein ebenso hoher Anteil der Verbraucher schätzt das gesundheitliche Risiko, dass mit dem Konsum der Produkte verbunden ist, als gering oder nicht vorhanden ein. Dennoch wünschen sich 88 % der Befragten mehr Informationen zu diesem Thema und erachten ein Labeling der Endprodukte von Tieren, die mit Insekten gefüttert wurden, als wichtig (PROteINSECT, 2016).

Verbeke et al. (2015) beobachteten, dass belgische Landwirte, Stakeholder und Konsumenten eine positive Einstellung gegenüber Insekten im Futtermittel haben. Insektenbasierte Futtermittel und auch die Endprodukte werden als nachhaltiger und nährreicher eingestuft. Die mikrobielle Sicherheit

der Futtermittel wird hingegen geringer eingeschätzt während das Endprodukt als gesünder wahrgenommen wird. In den Endprodukten wird von den Probanden ein Auftreten von Off Flavour und Allergenen vermutet. Auch polnische Konsumenten sind Insekten im Futtermittel gegenüber positiv eingestellt: Kostecka et al. (2017) beschreiben, dass rund die Hälfte der Befragten Insekten im Schweinefutter als positiv empfinden während die Bestätigung in Bezug auf Geflügelfleisch noch positiver ausfiel. Auch bei italienischen Konsumenten stellen Laureati et al. (2016) fest, dass diese bereit wären, Insekten als Tierfuttermittel zu akzeptieren und die Produkte von mit Insekten gefütterten Tieren zu konsumieren.

Altmann et al. (2019) geben zu bedenken, dass der anteilige Austausch von SES durch Insektenmehl von den Konsumenten vermutlich nicht wahrgenommen würde. Die Ergebnisse eines Choice-Experiments weisen hingegen sogar darauf hin, dass Verbraucher das Fleisch von Hähnchen, die mit Insektenmehl gefüttert wurden, basierend auf der äußeren Erscheinung bevorzugen würden. Wurden die Verbraucher über die Verfütterung des Insektenproteins informiert, bevorzugten insbesondere Personen mit einem hohen Umweltbewusstsein diese Alternative. Eine größere Verbrauchergruppe lehnte den Konsum des Fleisches jedoch ab, ausgenommen es werde zu sehr günstigen Preisen angeboten (Altmann et al., 2019).

4.4.2 Algen

Fütterungsversuche zum Einsatz von Algenmehlen in der Fütterung von Monogastriern resultieren in unterschiedlichen Ergebnissen. Beispielsweise können die enthaltenen Carotinoide zu einer abweichenden Färbung des Fleisches führen. Bei einem hohen Chlorellaanteil in der Futtermittelmischung können die hohen Carotinoidgehalte beispielsweise bei Hühnereiern zu einer dunkleren Färbung des Eigelbs führen (Gouveia et al., 1996). Auch Altmann et al. (2018) beobachten eine intensivere dunkle rot-gelbe Färbung des Brustmuskelfleisches, wenn Soja im Hähnchenfutter zu 50 % durch Spirulina ersetzt wird. Daneben stellen die Autoren jedoch eine bessere Fleischqualität fest: Die Brustfilets der mit Spirulina gefütterten Gruppe haben einen höheren pH-Wert, eine bessere Wasserbindekapazität beim Lagern und Kochen sowie einen geringeren metallischen Off-Flavour. Oh et al. (2015) stellen ebenfalls einen positiven Einfluss von fermentierter Chlorella auf die Fleischqualität von Pekingtonen fest. Vossen et al. (2017) beschreiben, dass der Einsatz von Algen im Futtermittel von Nutztieren außerdem zu einer Anreicherung wertvoller langkettiger und mehrfach ungesättigter Fettsäuren, wie beispielsweise Docosahexaensäure (DHA), im intramuskulären oder subkutanen Fett der Tiere und in den daraus entstehenden Fleischprodukten führt. In ihrer Untersuchung zur Qualität von Rohschinken und Lenden aus Schweinen, deren Futtermischung mit Algen sublementiert war, stellten die Autoren fest, dass der höhere DHA-Gehalt die

Konsumentenakzeptanz hinsichtlich Aussehen, Aroma, Textur und Geschmack nicht beeinflusst. Der Algeneinsatz im Futtermittel von Schweinen hat lediglich einen geringen Einfluss auf die Fleischfarbe und die Oxidationsstabilität. Eine Erhöhung der Oxidationsstabilität von Hähnchenfleisch während der Lagerung vermuten hingegen Dlouha et al. (2008), die Chlorella in Kombination mit Selen an Hähnchen verfütterten. Das Fleisch zeigt eine geringere Konzentration an Oxidationsprodukten von Fetten.

Zur Akzeptanz von Algenproteinen als Futtermittel liegen bislang kaum Studienergebnisse vor. Altmann et al. (2019) stellten in einem Choice-Experiment fest, dass Verbraucher einer durch das verfütterte Algenmehl bedingten, dunkleren Fleischfarbe indifferent gegenüberstehen. Personen, die über die Hintergründe der farblichen Abweichung informiert wurden und sich zugleich durch ein starkes Umweltbewusstsein auszeichnen, zeigen hingegen eine Präferenz für das dunkler gefärbte Hähnchenbrustfleisch. Sofern der Zusammenhang zwischen einem höheren Spirulinaanteil im Futtermittel und der dunkleren Fleischfarbe an eine größere Verbrauchergruppe vermittelt werden kann, kann die dunkle Fleischfarbe im Sinne einer Nischenstrategie als Attribut einer nachhaltigeren Nutztierhaltung vermarktet werden (Altmann et al., 2019). Weitere Studien zur grundsätzlichen Akzeptanz von Algen als Futtermittel fehlen bislang.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Alternative Proteinquellen, wie eiweißreiche Insekten- und Algenmehle, sind gegenwärtig Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Arbeiten auf internationaler Ebene. Der Literaturreview macht deutlich, dass Algen- und Insektenproteinen ein hohes Potenzial zur Verringerung der auf dem europäischen Markt vorherrschenden Eiweißlücke zugesprochen werden. Fütterungsversuche mit Schweinen und Geflügel haben gezeigt, dass sowohl Algen- als auch Insektenproteine als Alternativen für das bisher überwiegend eingesetzte SES geeignet sind. Die Versuche verdeutlichen, dass Insektenmehle gegenüber Algenmehlen vorzuziehen sind.

Verglichen mit SES weisen Algen ähnliche und Insekten sogar höhere Rohproteingehalte auf. Die Proteinqualität der alternativen Proteinquellen ist mit Blick auf die essenziellen Aminosäuren ebenfalls mit SES vergleichbar, teilweise werden sogar höhere Werte erzielt. Defizite, beispielsweise bei den Tryptophangehalten der Spirulina, können mit Einzelaminosäurezugabe ausgeglichen werden. In der Beurteilung der Futtermittelverwertung und der Einflüsse auf die Fleischqualität schneiden Mischungen mit Insektenmehlen jedoch besser ab als jene mit Algenmehlen. Dennoch werden auch Algenmehle als relevante (Ergänzungs-)Futtermittel bewertet.

Der Ausbau der europäischen Algen- und Insektenproduktion kann einen relevanten Beitrag zur Verringerung der Sojaimporte leisten. Neben einer verringerten Importabhängigkeit des europäischen Marktes reduziert die inländische Eiweißfuttermittelproduktion auch den europäischen Anteil an den negativen Umweltauswirkungen der Sojaproduktion in den Anbauregionen. In den aktuell in Europa geführten gesellschaftlichen Debatten um einen stärkeren Umwelt- und Klimaschutz wird regelmäßig eine nachhaltigere Ausrichtung der Futter- und Lebensmittelindustrie gefordert, zu der die alternativen Proteinquellen durch die Reduzierung der Sojaimporte einen wichtigen Beitrag leisten können.

Dennoch ist insbesondere der Einsatz des Insekteneiweißes in der Tierernährung bislang stark durch die restriktive Gesetzgebung eingeschränkt. Die Zulassung für die Verfütterung in der Aquakultur sowie die Aufnahme in die Novel Food Verordnung werden jedoch als erste Anzeichen eines Umdenkens gewertet. Eine weitere Lockerung der Fütterungsbeschränkungen von Insektenproteinen für Monogastrier erscheint angesichts des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes denkbar und naheliegend. Dem Einsatz des Insekten- und Algeneiweißes stehen die vergleichsweise hohen Produktionskosten entgegen, die die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber dem SES schwächen. Vor diesem Hintergrund gewinnt die technische Weiterentwicklung sowie die Standardisierung der Produktions- und Verarbeitungsverfahren an Bedeutung: Um sich zukünftig als tatsächliche Alternative zum SES etablieren zu können, müssen relevante Mengen der alternativen Proteinquellen für den Einsatz in der Futtermittelindustrie lieferbar sein. Hierfür sind der Ausbau der Produktionskapazitäten und die Entwicklung einer geeigneten Wertschöpfungskette unbedingt erforderlich.

Trotz ihres Potenzials werden Algen und Insekten in Europa bislang nur in einem sehr begrenzten Umfang produziert. Als ursächlich hierfür werden neben den – verglichen mit wärmeren Klimazonen – nachteiligen Standortbedingungen vor allem die noch nicht ausgereiften Produktions- und Verarbeitungsverfahren angesehen. In diesem Zusammenhang besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Entwicklung klimaangepasster, intensiver Produktionssysteme, die die Integration der Algen- und Insektenproduktion in industrielle Wertschöpfungsketten ermöglichen. Mögliche Synergieeffekte, z.B. die Nutzung der Abwärme von Biogasanlagen in der Algen- oder Insektenproduktion, sollten in den Entwicklungen Berücksichtigung finden. Auf Grundlage der wissenschaftlichen Erkenntnisse sollte die Rechtsprechung zur Zulassung von Insektenmehlen als Futtermittel für Monogastrier überarbeitet werden. Weiterhin ist es erforderlich, die für die Insektenproduktion zugelassenen Nährsubstrate zu überprüfen und ggf. zu erweitern. Schließlich gilt es zu analysieren, welche Akzeptanz die alternativen Proteinquellen bei den verschiedenen Akteuren

entlang der potenziellen neuen Wertschöpfungsketten erfahren, um mögliche Hemmnisse bei der Etablierung der alternativen Proteinquellen im Vorhinein aufzudecken.

Literatur

1. Ahsan Bin Habib, M., Mashuda, P. und M.R. Hasan (2008): A Review on Culture, Production and Use of Spirulina as Food for Humans and Feed for Domestic Animals and Fish. In: FAO fisheries and aquaculture circular, no. 1034, URL: <http://www.fao.org/3/a-i0424e.pdf>.
2. Al-Quazzaz, M.F. und D.B. Ismail (2016): Insect Meal as a Source of Protein in Animal Diet. In: *Animal Nutrition and Feed Technology* 16 (3): 527-547.
3. Altmann, B., A. Risius und S. Anders (2019): Feeds of the Future: A Choice Experiment of Chicken Breast Produced with Micro Algae or Insect Meal. Beitrag anlässlich der 59. Jahrestagung der GEWISOLA. 25.-27.09.2019.
4. Altmann, B., Neumann, C., Velten, S, Liebert, F. und D. Mörlein (2018): Meat quality derived from high inclusion of a micro-alga or insect meal as an alternative protein source in poultry diets: a pilot study. In: *Foods* 7 (3): 1-15.
5. Awoniyi, T.A.M., Adebayo, I.A. ; Aletor, V.A. (2004): A study of some erythrocyte indices and bacteriological analysis of broiler-chickens raised on maggot-meal based diets. In: *International Journal of Poultry Science*. 3 (6): 386-390
6. Barragan-Fonseca, K.B., Dicke, M. und J.J.A. van Loon (2017): Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed - a review. In: *Journal of Insects as Food and Feed* 3: 105 - 120.
7. Becker, E.W. (2004): Microalgae in Human and Animal Nutrition. In A. Richmond (Hrsg.): *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*: 325–364.
8. Becker, E.W. (2007): Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, 25: 207–210.
9. Begon, M., R. Howarth, W. Robert, W. Townsend und R. Colin (2017): *Ökologie*. 3. Auflage 2017, Springer Verlag: Berlin, Heidelberg.
10. Behrens, P. (2005): Photobioreactors and fermentors: The light and dark sides of growing algae. In: *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53 (9): 189–204
11. Bellof, G. (2013): Heimische Sojaprodukte in der Fütterung landwirtschaftlicher Nutztiere. FiBL Deutschland e.V., D.Frankfurt. http://orgprints.org/24970/1/soja_fuetterungsfibel.pdf.
12. Bellof, G. und L.S. Carrasco Alarcon (2010): Einsatz der Mikroalge *Spirulina platensis* in der ökologischen Broilermast. Schlussbericht des Forschungsprojekts Nr. 08OE098 des Bundesprogramm Ökologischer Landbau (BÖL).
13. Bellof, G. und P. Weindl (2016): Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes regionaler Eiweißfuttermittel als Ersatz für importiertes Sojaextraktionsschrot. Deutsche Vilomix (Hrsg.): *Themen zur Tierernährung, Fachtagung 2015/2016*. URL: http://www.vilomix.de/pdf_files/2016-eiweissversorgung-bellof-weindl-vilomix-fachgespraech_1720_1.pdf.
14. BLE (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung) (2018): Bericht zur Markt- und Versorgungslage Futtermittel 2018. URL: https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Futter/2018BerichtFuttermittel.pdf;jsessionid=87983DB155AEFCC9DBDEF9A3F6C380F1.2_cid325?__blob=publicationFile&v=5.
15. BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2019): Eiweißpflanzenstrategie. URL: https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Pflanzenbau/Ackerbau/_Texte/Eiweisspflanzenstrategie.html.

15. Bonos, E., Kasapidou, E., Kargopoulos, A., Karampampas, A., Christaki, E., Florou-Paneri, P., und I. Nikolakakis (2016): Spirulina as a functional ingredient in broiler chicken diets. In: South African Journal of Animal Science 46 (1): 94-102.
16. Brennan, L. und P. Owende (2010): Biofuels from microalgae. A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2): 557–577.
17. Bulak, P., K. Proc, M. Pawlowska, A. Kasprzycka, W. Berus und A. Bieganski (2020): Biogas generation from insects breeding post production wastes. In: Journal of Cleaner Production. 244: 1-8.
18. Dabbert, S., E. Berg, R. Herrmann, S. Pöchtrager und K. Salhofer (2009): Kompass für agrarökonomische Zeitschriften: das GEWISOLA-ÖGA-Publikationsranking. In: Agrarwirtschaft 58 (2): 109-113.
19. Daliry, S., Hallajani, A., Mohammadi Roshandeh, J., Nouri, H. und A. Golzary (2017): Investigation of optimal condition for Chlorella vulgaris microalgae growth. In: Global Journal of Environmental Science and Management 113 (2): 217-230.
20. De Marco, M., Martinez, S., Hernandez, F., Madrid, J., Gai, F., Rotolo, L., Belforti, M., Bergero, D., Katz, H., Dabbou, S., Kovitvadi, A., Zoccarato, I., Gasco, L. und A. Schiavone (2015): Nutritional value of two insect larval meals (Tenebrio molitor and Hermetia illucens) for broiler chickens: Apparent nutrient digestibility, apparent ileal amino acid digestibility and apparent metabolizable energy. In: Animal Feed Science and Technology 209: 211-218.
21. Dlouha, G., Sevcikova, S., Dokoupilova, A., Zita, L., Heindl, J., Skrivan, M., 2008. Effect of dietary selenium sources on growth performance, breast muscle selenium, glutathione peroxidase activity and oxidative stability in broilers. Czech Journal of Animal Science 53: 265-269.
22. Dobermann, D., Swift, J.A. und L.M. Field (2017): Opportunities and hurdles of edible insects for food and feed. In: Nutrition Bulletin 42: 293-308.
23. DVT (Deutscher Verband Tiernahrung e. V.) (2019): Eiweißversorgung bei Nutztieren. URL: <https://www.dvtiernahrung.de/aktuell/futterfakten/eiweissversorgung-bei-nutztieren.html>.
24. EFSA (European Food Safety Authority) (2015): Risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. In: <https://www.efsa.europa.eu/de/efsajournal/pub/4257>.
25. Enzing, C., Ploeg, M., Barbosa, M.J. und L. Sijtsma (2014): Microalgae-based products for the food and feed sector: An outlook for Europe. In: Vigani, M., Parisi, C. und E.R. Cerezo (Hrsg.): Joint Research Centre (JRC) scientific and policy reports of the European Commission. URL: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC85709/final%20version%20online%20ipts%20jrc%2085709.pdf>.
26. EP (Europäisches Parlament) (2011): Das Proteindesizit in der EU. In: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//NONSGML+TA+P7-TA-2011-0084+0+DOC+PDF+V0//DE>.
27. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2017): FAO and the SDGs - Indicators: Measuring up to the 2030 Agenda for Sustainable Development. In: <http://www.fao.org/3/a-i6919e.pdf>.
28. FEFAC (Fédération Européenne des fabricants d'aliments composés pour animaux, Europäischer Verband der Mischfutterindustrie) (2017): Feed & Food Statistical Yearbook 2017. <https://www.fefac.eu/files/86004.pdf>.
29. Fitches, E.C., M. Dickinson, D. De Marzo, M.E. Wakefield, A.C. Charlton und H. Hall (2018): Alternative protein production for animal feed: Musca domestica productivity on poultry litter and nutritional quality of processed larval meals. In: Journal of Insects as Food and Feed. 0 (0): 1-12.

30. Gasco, I., M. Finke und A. van Huis (2018): Can diets containing insects promote animal health? In: *Journal of Insects as Food and Feed* 4 (1): 1-4.
31. Gawaad, A. und H. Brune (1979): Insect protein as a possible source of protein to poultry. *Z. Tierphysiol. Tierernaehrung Futtermittelkd* 42: 216–222.
32. GD Santé (Generaldirektion Gesundheit und Lebensmittelsicherheit der Europäischen Kommission) (2017): Strategic Safety Concept for Insects as Feed, updated. In: https://ec.europa.eu/food/sites/food/files/safety/docs/animal-feed_marketing_concept_paper_insects_201703.pdf.
33. Gold, M., C.M. Cassar, C. Zurbrügg, M. Kreuzer, S. Boulos, S. Diener und A. Mathys (2020): Biowaste treatment with black soldier fly larvae: Increasing performance through the formulation of biowastes based on protein and carbohydrates. In: *Waste Management*. 102: 319-329.
34. Gong, Q., Feng, Y., Kang, L., Luo, M., & J. Yang (2014): Effects of Light and pH on Cell Density of *Chlorella Vulgaris*. In: *Energy Procedia* 61: 2012–2015.
35. Gongnet, G. P., Niess, E., Rodehutsord, M., Pfeffer, E. (2001): Algae-meal (*Spirulina platensis*) from lake Chad replacing soybean-meal in broiler diets. In: *Archiv Für Geflügelkunde* 65 (6): 265-268.
36. Gouveia, L., Batista, A.P., Sousa, I., Raymundo, A. und N.M. Bandarra (2008): Microalgae in novel food products. In: Papadoupoulos, K. (Hrsg.): *Food Chemistry Research Developments*, Nova Science Publishers, New York: 75–112.
37. Gouveia, L., Gomes, E. und J. Empis (1996): Potential use of a microalga (*Chlorella vulgaris*) in the pigmentation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) muscle. *Zeitschrift Für Lebensmittel-Untersuchung und –Forschung* 202 (1): 75–79.
38. Griep, W. und G. Stalljohann (2014): Der Futtermittelreport – Futtermittel und Fütterungsstrategien für Deutschland zur Verminderung des Verbrauchs von importierten Sojaerzeugnissen in der Schweinefütterung. In: WWF, World Wildlife Fund (Hrsg.): *Der Futtermittelreport*, URL: https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Futtermittelreport_Schweine.pdf.
39. Grinstead, G. S., Tokach, M. D., Dritz, S. S., Goodband, R. D., Nelssen, J. L. (2000): Effects of *Spirulina platensis* on growth performance of weanling pigs. *Animal Feed Science and Technology* 83: 237–247.
40. Halle, I., Janczyk, P., Freyer, G. und W.B. Souffrant (2009): Effect of microalgae *Chlorella vulgaris* on laying hen performance. In: *Archiva Zootechnica* 12 (2): 5-13.
41. Halloran, A., Roos, N., Eilenberg, J. Cerutti, A., Bruun, B. (2016): Life cycle assessment of edible insects for food protein: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 36 (57): 1-13.
42. Hwangbo, J., Hong, E.C., Jang, A., Kang, H.K., Oh, J.S., Kim, B.W., Park, B.S. (2009): Utilization of house fly-maggots, a feed supplement in the production of broiler chickens. *Journal of Environmental Biology* 30: 609–614.
43. IPIFF (International Platform of Insects for Food and Feed) (2019). Draft EU Guide on Good Hygiene Practices. URL: http://ipiff.org/wp-content/uploads/2019/02/IPIFF_Guide_A4_2019.pdf.
44. IPIFF (International Platform of Insects for Food and Feed) (2019): Did you know? URL: <http://ipiff.org/>.
45. Ites, S., S. Smetana, S. Töpfl und V. Heinz (2019): Modularity of insect production and processing as a path to efficient and sustainable food waste treatment. In: *Journal of Cleaner Production*. 248: 1-43.
46. Józefiak, D., Józefiak, A., Kierończyk, B., Rawski, M., Świątkiewicz, S., Długosz, J., Engberg, R. M. (2016): Insects - A Natural Nutrient Source for Poultry- A Review. *Annals of Animal Science* 16 (2): 297-313.

47. Khan S., Khan R.U., Alam W. und A. Sultan (2018): Evaluating the nutritive profile of three insect meals and their effects to replace soya bean in broiler diet. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 102 (2): 662–668.
48. Khan, S.H. (2018): Recent advances in role of insects as alternative protein source in poultry nutrition. In: *Journal of Applied Animal Research* 46 (1): 1144-1157.
49. Kharde, S. D., Shirbhate, R. N., Bahiram, K. B., Nipane, S. F. (2012): Effect of Spirulina supplementation on growth performance of broilers. In: *Indian Journal of Veterinary Research* 21 (1): 66-69.
50. Kirchgeßner, M. (2004): *Tierernährung, Leitfaden für Studium, Beratung und Praxis*. 11. Auflage, DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main.
51. Klamczynska, B. und W.D. Mooney (2017): Heterotrophic Microalgae: A Scalable and Sustainable Protein Source. In: Nadathur, S., Wanasundara, J.P.D. und L. Scanlin (Hrsg.): *Sustainable Protein Sources*: 327 – 339.
52. Kostecka J., Konieczna K. und L.M. Cunha (2017): Evaluation of insect-based food acceptance by representatives of Polish consumers in the context of natural resources processing retardation. In: *Journal of Ecological Engineering* 18 (2): 166–174.
53. Kouřimská, L. und A. Adámková (2016): Nutritional and sensory quality of edible insects. In: *NFS Journal* 4: 22-26.
54. Kroes, H. und B. Kuepper (2015): Mapping the soy supply chain in Europe, in: Profundo Research & Advice (Hrsg.): *Forschungspaper für den niederländischen WWF (WNF)*, URL: http://assets.wnf.nl/downloads/mapping_the_soy_supply_chain_in_europe_wnf_12_may_2015_final_1.pdf.
55. Laureati M., Proserpio C., Jucker C. und S. Savoldelli (2016): New sustainable protein sources: Consumers' willingness to adopt insects as feed and food. *Italian Journal of Food Science* 28 (4): 652–668.
56. LfL, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, (2010): *Verdauungsversuche mit Eiweißfutter – Sojaextraktionsschrot 43/48GVO/48NonGVO4. Versuchsbericht S12/1.* https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/26325_sojaschrot.pdf.
57. Lum, K.K., Kim, J. und X.G. Lei (2013): Dual potential of microalgae as a sustainable biofuel feedstock and animal feed. In: *Journal of animal science and biotechnology* 4 (1): 1–7.
58. Madeira, M.S.; Cardoso, C.; Lopes, P.A.; Coelho, D.; Afonso, C.; Bandarra, N.M. und J.A.M. Prates (2017): Microalgae as feed ingredients for livestock production and meat quality: a review. In: *Livestock Science* 205: 111-121.
59. Makkar, H.P.S., G. Tran, V. Heuzé und P. Ankers (2014): State-of-the-art on use of insects as animal feed. In: *Animal Feed Science and Technology* 197: 1-33.
60. Marono, S., Piccolo, G., Loponte, R., Di Meo, C., Attia, Y.A., Nizza, A. und F. Bovera (2015): In Vitro Crude Protein Digestibility of *Tenebrio Molitor* and *Hermetia Illucens* Insect Meals and its Correlation with Chemical Composition Traits. In: *Italian Journal of Animal Science* 14 (3): 338-343.
61. Martin, N. (2015): Domestic soybean compensate the European protein deficit: illusion in real market opportunity? In: *OCL*. 22 (5): 1-9.
62. Milledge, J.J. (2011): Commercial application of microalgae other than as biofuels. A brief review. In: *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 10 (1): 31–41.
63. Muzzarelli, R.A.A. (2010): Chitins and chitosans as immunoadjuvants and non-allergenic drug carriers. In: *Marine Drugs* 8 (2): 292–312.
64. Neumann, C.; Velten, S. und F. Liebert (2018): The Graded Inclusion of Algae (*Spirulina platensis*) or Insect (*Hermetia illucens*) Meal as a Soybean Meal Substitute in Meat Type Chicken Diets

- Impacts Growth, Nutrient Deposition and Dietary Protein Quality Depending on the Extent of Amino Acid Supplementation. In: Open Journal of Animal Sciences 8: 163-183.
65. Newton GL, Booram CV, Barker RW, Hale OM (1977) Dried *Hermetia illucens* larvae meal as a supplement for swine. *Journal of Animal Science* 44, 395–400.
 66. Norsker, N.H., Barbosa, M.J., Vermuë, M.H. und R.H. Wijffels (2011): Microalgal production - A close look at the economics. In: *Biotechnology Advances* 29: 24–27.
 67. Oh, S.T., Zheng, L., Kwon, H.J., Choo, Y.K., Lee, K.W., Kang, C.W. und B.K. An (2015): Effects of dietary fermented *Chlorella vulgaris* on growth performance, relative organ weights, cecal microflora, tibia bone characteristics, and meat qualities in Pekin ducks. In: *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 28: 95-101.
 68. Pistrich, K., S. Wendtner und H. Janetschek (2014): Versorgung Österreichs mit pflanzlichem Eiweiß – Fokus Sojakomplex. In: Bundesanstalt für Agrarwirtschaft (Hrsg.): Schriftenreihe 107 der Bundesanstalt für Agrarwirtschaft.
 69. Pretorius, Q. (2011): The Evaluation of Larvae of *Musca domestica* (Common House Fly) as Protein Source For Broiler Production. Abschlussarbeit zur Erlangung des Titels Master of Science an der University of Stellenbosch, South Africa. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/cf11/32f8c0829b71f4bb3896fe29c0f585a9296a.pdf>.
 70. PROteINSECT (Europäisches Forschungsprojekt) (2016): Insect Protein – Feed for the Future. White Paper 2016. URL: http://www.proteinsect.eu/fileadmin/user_upload/press/proteinsect-whitepaper-2016.pdf.
 71. Radhakrishnan, S.; Bhavan, P.S.; Seenivasan, C. und T. Muralisankar (2017): Nutritional Profile of *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris* and *Azolla pinnata* to Novel Protein Source for Aquaculture Feed Formulation. In: *Austin Journal Aquaculture and Marine Biology* 2 (1), <https://austinpublishinggroup.com/aquaculture-marine-biology/download.php?file=fulltext/ajamb-v2-id1005.pdf>.
 72. Richmond, A. und J. Grobbelaar (1986): Factors affecting the output rate of *Spirulina platensis* with reference to mass cultivation. In: *Biomass* 10 (4): S. 253–264.
 73. Sanchez-Muros, M.J., Barroso, F.G. und F. Manzano-Agugliaro (2014): Insect meal as renewable source of food for animal feeding: a review. In: *Journal of Cleaner Produktion*. 65: 16-27.
 74. Šimkus, A., Šimkienė, A., Černauskienė, J., Kvietkutė, N., Černauskas, A., Paleckaitis, M., Kerzienė, S. (2013): The effect of blue algae *Spirulina platensis* on pig growth performance and carcass and meat quality. In: *Veterinarija Ir Zootechnika* 61 (83): 70-74.
 75. Smetana, S., Palanisamy, M., Mathys, A. und V. Heinz (2016): Sustainability of insect use for feed and food: Life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production* 137: 741-751.
 76. Sogari, G., Amato, M., Biasato, I., Chiesa, S. und L. Gasco (2019): The Potential Role of Insects as Feed: A Multi-Perspective Review. *Animals (Basel)* 9 (4): 119.
 77. Sogari, G.; M. Amati, I. Biasto, S. Chiesa und L. Gasco (2019): The Potential Role of Insects as Feed: A Multi-Perspective Review. In: *Animals*. 9 (4): 119-124.
 78. Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., & A. Isambert (2006): Commercial applications of microalgae. In: *Journal of Bioscience and Bioengineering* 101(2): 87–96.
 79. Stamer, A. (2015): Insect proteins - a new source for animal feed. *EMBO Reports* 16 (6): 676-680.
 80. Stangl, G. (2011): Die Nährstoffe und ihr Stoffwechsel. In: Kirchgeßner, M. (Hrsg.): *Tierernährung: Leitfaden für Studium, Beratung und Praxis*, 13. Auflage, Frankfurt am Main: DLG Verlag, S. 45-132.
 81. Steinbusch, S. (2015): Einfluss von Licht und Temperatur auf die Kultivierung von Mikroalgen. Auslegung und Betrieb von Freiland-Pilotanlagen zur Bestimmung prozessrelevanter Kinetiken. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

82. Stockinger, B. und R. Schätzl (2012): Strategien zur Erhöhung des Anteils von heimischen Eiweißfuttermitteln in der Nutztierfütterung. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): LfL-Praktikerforum 2012, S. 291-294. URL: http://oega.boku.ac.at/fileadmin/user_upload/Tagung/2012/Short_Paper_2012/33_Stockinger_TB_2012.pdf.
83. Thiel, M. (2013): Grüne Gentechnik in Deutschland, Einstellungen der Bevölkerung, Dissertation zur Erlangung des Doktorgrads an der Sozialwissenschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen, Stuttgart: ibidem-Verlag.
84. Trostle, R. (2008). Global Agricultural Supply and Demand: Factors Contributing to the Recent Increase in Food Commodity Prices. Economic Research Service (Vol. WRS-0801). Washington, D.C.
85. Vantomme, P., Mertens, E., van Huis, A., Klunder, H., 2012. Assessing the Potential of Insects as Food and Feed in Assuring Food Security. United Nations Food and Agricultural Organization, Rome, Italy.
86. van der Hulst, C. (2012): Microalgae cultivation systems. Master thesis. Utrecht University, Utrecht. Energy and Resources.
87. Van Huis, A. (2019): insects as food and feed, a new emerging agricultural sector: a review. In: Journal of Insects as Food and Feed. 6 (1): 27-44.
88. van Huis, A. Dicke, M., van Loon, J. J. A. (2015): Insects to feed the world. Journal of Insects as Food and Feed 1: 3-5.
89. van Huis, A., J. van Itterbeeck, H. Klunder, E. Mertens, A. Halloran, G. Muir und P. Vantomme (2013): Edible Insects: future prospects for food and feed security. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations (Hrsg.). In: <http://www.fao.org/docrep/018/i3253e/i3253e.pdf>.
90. Veldkamp, T., van Duinkerken, G. van Huis, A., Lakermond, C.M.M., Ottevanger, E., Bosch, G. und T. van Boekel (2012): Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets : a feasibility study. Wageningen UR Livestock Research Report 638 – 48. <https://edepot.wur.nl/234247ID>
91. Velten, S. und F. Liebert (2018): Larven der schwarzen Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) als potentieller Proteinlieferant in der Schweine- und Geflügelernährung. In: <https://www.proteinmarkt.de/fachartikel/kw31-larven-der-schwarzen-soldatenfliege-hermetia-illucens-als-potentieller-proteinlieferant-in-der-schweine-und-gefluegelernaehrung/>.
92. Velten, S.; Neumann, C.; Bleyer, M.; Gruber-Dujardin, E.; Hanuszewska, M.; Przybylska-Gornowicz, B. und F. Liebert (2018): Effects of 50 Percent Substitution of Soybean Meal by Alternative Proteins from *Hermetia illucens* or *Spirulina platensis* in Meat-Type Chicken Diets with Graded Amino Acid Supply. In: Open Journal of Animal Sciences 8: 119-136
93. Verbeke, W., T. Spranghers, P. De Clercq, S. De Smet, B. Sas und M. Eeckhout (2015): Insects in animal feed: Acceptance and its determinants among farmers, agriculture sector stakeholders and citizens. In: Animal Feed Science and Technology 204: 72–87.
94. Viganì, M., Parisi, C., Rodríguez-Cerezo, E., Barbosa, M.J., Sijtsma, L., Ploeg, M. und C. Enzing (2015): Food and feed products from micro-algae. Market opportunities and challenges for the EU. In: Trends in Food Science and Technology 42 (1): 81-92
95. Vonshak, A. und A. Richmond (1988): Mass production of the blue-green alga *Spirulina*: An overview. Biomass 15 (4): 233–247
96. Vonshak, A., Abeliovich, A., Boussiba, S., Arad, S. und A. Richmond (1982): Production of spirulina biomass: Effects of environmental factors and population density. Biomass 2 (3): 175–185.
97. Vossen, E., Raes, K., van Mullem, D. und S. de Smet (2017): Production of docosahexaenoic acid (DHA) enriched loin and dry cured ham from pigs fed algae: Nutritional and sensory quality. In: European Journal of Lipid Science and Technology 119 (5), URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ejlt.201600144>.

98. Yaakob, Z., Ali, E., Zainal, A., Mohamad, M. & M.S. Takriff (2014): An overview. Biomolecules from microalgae for animal feed and aquaculture. In: Journal of Biological Research 21 (1): 1–10.
99. Yoo, J.S., Cho, K.H., Hong, J.S., Jang, H.S., Chung, Y.H., Kwon, G.T., Shin, D.G und Y.Y. Kim (2019): Nutrient ileal digestibility evaluation of dried mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae compared to three animal protein by-products in growing pigs. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences 32 (3): 387-394.
100. Zentrallausschuss der Deutschen Landwirtschaft, Normenkommission für Einzelfuttermittel (2019): Positivliste für Einzelfuttermittel. 13. Auflage. www.landwirtschaftskammern.de/pdf/futtermittel-positivliste.pdf

Zusammenfassung

Sind Algen und Insekten das Proteinfuttermittel der Zukunft?

Ein Literaturüberblick zum Stand der Forschung

Die Nachfrage nach tierischen Produkten steigt und dementsprechend wird auch der Bedarf an Rohprotein, der wichtigsten Futtermittelkomponente für die tierische Ernährung, weiterhin zunehmen. Zur Deckung des Proteinbedarfs ist Europa bereits jetzt auf Sojaimporte aus Süd- und Nordamerika angewiesen. Diese Importe stehen jedoch in der Kritik: neben nachteiligen Effekten auf die Anbauregionen werden auch die entstehenden Abhängigkeiten der Importländer hinterfragt. In Wissenschaft und Wirtschaft wird zunehmend der Einsatz alternativer Proteinquellen in der Tierernährung diskutiert. Ein besonders hohes Potenzial wird dabei Algen- und Insektenproteinen zugesprochen. Der vorliegende Beitrag liefert einen umfassenden Literaturüberblick zum gegenwärtigen Stand der Forschung. Neben den rechtlichen Rahmenbedingungen werden die Grundlagen der Kultivierung von Algen und Insekten, ihre ernährungsphysiologischen Eigenschaften sowie die Effekte auf das tierische Endprodukt betrachtet.

Summary

Are algae and insects the protein feed of the future?

A literature review of the state of research

The demand for animal products is increasing and, accordingly, the need for raw protein, the most important feed component for animal nutrition, will continue to increase. Europe is already dependent on soy imports from South and North America to meet protein needs. However, these imports are under criticism: in addition to adverse effects on the growing regions, the emerging dependencies of the importing countries are also questioned. The use of alternative protein sources in animal nutrition is increasingly being discussed in science and the industry. Algae and insect

proteins are considered to have a particularly high potential. This article provides a comprehensive literature review of the current state of research. In addition to the legal framework, the basics of the cultivation of algae and insects, their nutritional properties and the effects on the final animal product are considered.

Anschrift der Autoren

Dr. Marie Diekmann

Georg-August-Universität Göttingen

Department für Agrarökonomie und RURale Entwicklung

Betriebswirtschaftslehre des Agribusiness

Platz der Göttinger Sieben 5

37073 Göttingen

E-Mail: marie.diekmann@agr.uni-goettingen.de