

# 19. BOKU-SYMPOSIUM TIERERNÄHRUNG

TAGUNGSBAND

Tierernährung zwischen  
Tierwohl und Umweltschutz

15. April 2021 in Wien



TIERERNÄHRUNG  
TIERISCHE LEBENSMITTEL  
ERNÄHRUNGSPHYSIOLOGIE

**Tagungsband**



## **19. BOKU-Symposium TIERERNÄHRUNG**

**Tierernährung zwischen Tierwohl und Umweltschutz**

15. April 2021, Wien

**Institut für Tierernährung, Tierische  
Lebensmittel und Ernährungsphysiologie**



**Department für Agrarbiotechnologie,  
IFA-Tulln**



**Universität für Bodenkultur Wien**



Tagungsband:

19. BOKU-Symposium TIERERNÄHRUNG

**Tierernährung zwischen Tierwohl und Umweltschutz**

15. April 2021, Wien

Herausgeber:

Kristina Kube, Martin Gierus

Institut für Tierernährung, Tierische Lebensmittel und Ernährungsphysiologie

Department für Agrarbiotechnologie, IFA-Tulln

Universität für Bodenkultur Wien

Muthgasse 11, A-1190 Wien

[www.boku.ac.at/tte-symposium](http://www.boku.ac.at/tte-symposium)

[tte@boku.ac.at](mailto:tte@boku.ac.at)



Eigenverlag:

Institut für Tierernährung, Tierische Lebensmittel und Ernährungsphysiologie

978-3-900932-72-5



Für den Inhalt der Beiträge sind allein die Autoren verantwortlich.

The authors are solely responsible for the content of their own contributions.

## Die Aufzucht von Larven der Schwarzen Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) und Emissionen

### *Greenhouse gas emissions during black soldier fly larval development in relation to different feeding substrates*

Christoph Sandrock<sup>1</sup>, Christina Walter<sup>1</sup>, Jens Wohlfahrt<sup>1</sup>, Sergej L. Amelchanka<sup>2</sup>, Michael Kreuzer<sup>2</sup>, Florian Leiber<sup>1</sup>

<sup>1</sup> FiBL, Departement für Nutztierwissenschaften, Frick, CH

<sup>2</sup> ETH Zürich, Agrovet Strickhof, Lindau, CH

### Abstract

Insect protein derived from black soldier fly larvae (BSFL) is considered a prime alternative for replacing conventional diet components in aquaculture and monogastric livestock feed. A dual agronomic sustainability improvement may be provided via more efficient nutrient recovery from food-production side-streams and thereby mitigating ongoing depletion of marine and terrestrial resources. However, reliable empirical data on ecological footprints of BSFL reared on different by-products, key estimates for comparative sustainability assessments, are scarce. Using open circuit respiration chambers, we continuously quantified greenhouse gas emissions over replicated entire cycles of BSFL development relative to insect biomass gain. Two distinct feeding substrates, based on high fibre (A) versus well digestible (B) pre-consumer food waste types, were compared using identical feeding regimes. As expected, feed conversion ratios were lower and BSFL biomass gain higher in substrate B, yet insect survival did not differ between treatments. CO<sub>2</sub> emissions were similar between treatments, whereas CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O production was higher for feeding substrate A and B, respectively. For both treatments, feeding events and actual developmental stage had major impact on specific emission profiles. Although separate assessments revealed that substantial parts of the detected emissions can be attributed to associated microbes, these must be considered intrinsically coupled with corresponding production systems. The magnitude of overall emitted CO<sub>2</sub> equivalents appears to be relevant and comparable to other monogastric livestock. Since BSFL-based protein is primarily focus of alternative feed applications, our study highlights that accounting for insects as an additional trophic level is not possible at zero ecological cost.

### Hintergrund

Insektenbasiertes Eiweiss ist aktuell viel diskutiert als alternative Proteinquelle für monogastrische Nutztiere und für die Aquakultur, da sie idealerweise mit Abfallprodukten aus Lebensmittelindustrie, Gastronomie, Schlachthöfen oder gar Fäkalstoffen gefüttert und damit - theoretisch - wichtige Lücken in Nährstoffkreisläufen geschlossen werden könnten. Gleichzeitig würde dies beitragen, den Bedarf an Ackerfrüchten (v.a. Soja) und Fischmehl in der Tierernährung zu reduzieren, was ein wesentlicher Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit in der Nutztierhaltung und Aquakultur sein könnte (Schader et al., 2015; Bruni et al., 2020). Es darf dabei aber nicht übersehen werden, dass vorläufig beschriebene ökologische Überlegenheit von Insektenprotein zum Beispiel über Fleisch von Monogastriern (Oonincx & de Boer, 2012) für Lebensmittel gelten kann, nicht jedoch für Futtermittel, da für diese nur gegen pflanzliche Produkte (oder Fischmehl) verglichen werden kann, welche in der Tierernährung zum Einsatz kommen.

Eine der am stärksten beachteten Insektenarten ist in diesem Kontext die Schwarze Soldatenfliege (*Hermetia illucens*). Fütterungsversuche mit Geflügel (Maurer et al., 2016; Leiber et al., 2017; Gasco et al., 2019) und Fischen (Stadtlander et al., 2017; Renna et al., 2017; Bruni et al., 2020) zeigten eine hohe Äquivalenz mit Sojakuchen bzw. Fischmehl. Allerdings zeigt sich, dass die Larven der Schwarzen

Soldatenfliege (BSFL) relativ hohe Substratansprüche haben und nicht auf jedem Nährboden gleich effizient gedeihen (Bava et al., 2019; Spranghers et al., 2016).

Das zeigt die Relevanz eines angemessenen Life-Cycle-Assessments (LCA) um die substratbezogenen Ressourcen, vor allem aber auch die bei der Larvenaufzucht entstehenden Gase mit Treibhauspotential zu quantifizieren und in die ökologische Effizienz einzubeziehen. Eine in diesem Zusammenhang vielzitierten Studie von Doninckx et al. (2010) hat BSFL jedoch gar nicht explizit untersucht, und bei einer Reihe anderer Insekten auch lediglich Momentaufnahmen innerhalb des relevanten Entwicklungszyklus auf einem einzigen Futtersubstrat betrachtet. Eine Extrapolation, wie oft vorgenommen, erscheint für BSFL aufgrund mehrerer spezifischer Besonderheiten allerdings fraglich. Allein die Vielfalt und Konzentration des Mikrobioms in Substraten und Larven bei der Produktion von BSFL (Wynants et al., 2019; Bruno et al., 2019) ist ein Grund, von hoher Atmungsaktivität und auch anaerobem Stoffwechsel mit entsprechender Gasbildung auszugehen. Aktuell gibt es jedoch nur wenige empirische Daten zu Treibhausgasemissionen aus der Aufzucht von BSFL (Mertenat et al., 2019; Ermolaev et al., 2019). Diese Publikationen basieren zum Einen auf Experimenten im Labormassstab, deren Extrapolation auf realistische Produktionsbedingungen schwierig erscheint, zum Zweiten scheinen die experimentellen Methoden und die Nährstoffbilanzen in diesen Studien nicht in allen Punkten zu überzeugen. So ist zum Beispiel die Aussage, BSFL würden kein Ammoniak (Ermolaev et al., 2019) oder kein Methan (Bava et al., 2019) emittieren, empirisch falsch (Green & Popa, 2012).

Das Fehlen valider Daten zum Treibhausgas-Beitrag von BSFL macht auch verlässliche Modellberechnungen schwierig; gleichzeitig wird dieses Thema aber in entsprechenden Publikationen schlicht ignoriert. Auch aktuellste LCA zu BSFL berücksichtigen die direkten Treibhausgasemissionen der Larven und Substrate nicht (Bosch et al., 2019; Salomone et al., 2017; Smetana et al., 2016; 2019), weisen aber auch nicht auf die Problematik hin. Dadurch wird eine Dimension der ökologischen Nachhaltigkeit für die Produktion von Insektenprotein derzeit weitgehend ausgeblendet, die bei der Nutztierhaltung eigentlich von höchster Priorität ist: die direkte Emission von Treibhausgasen als Resultat von Verdauung, Stoffwechsel und Atmung. Ohne entsprechende Zahlen von der Nachhaltigkeit von Insektenproteinen zu sprechen, insbesondere, wenn diese als Futtermittel eingesetzt werden sollen, erscheint fragwürdig. Vor diesem Hintergrund wurde das nachfolgend beschriebene Experiment durchgeführt, welches zum Ziel hatte, die Gasbildung bei der Produktion von BSFL in einem realistischen Produktionsmassstab, basierend auf verschiedenen Substraten und über den vollen Mastzyklus der Larven kontinuierlich zu quantifizieren und zu analysieren.

## Material und Methoden

Larven der *Hermetia illucens* wurden vom sechsten Lebenstag an für 14 Tage (womit mind. 60% der Larven das Präpuppenstadium erreicht hatten) in voll klimatisierten Respirationenkammern zur Messung der Gasbildung gehalten. Zwei verschiedene Nährsubstrate wurden mit jeweils drei Durchläufen getestet. In jedem Durchlauf wurden drei Boxen mit je 10'000 Individuen zusammen in einer Respirationenkammer gemessen. Damit waren die statistischen Einheiten für die Gasmessung N=3 (Durchläufe) und für die Stoffbilanzen in Substrat, Restsubstrat und die Erhebungen zu life-history und Larven-Biomasse N=9 (Boxen). Die Kammern waren klimatisiert auf 27.5°C und 50% Luftfeuchtigkeit. Ein ständiger Gaswechsel von 0.1 m<sup>3</sup>/min gewährleistete eine stabile Luftzusammensetzung. Die Fütterung der Larven fand diskontinuierlich an den Tagen 1 (1800g FM/Box), 4 (2500g FM/Box), 7 (3000g FM/Box) und 10 (2200g FM/Box) statt, wobei die gesamte Futtermasse auf einmal in die Mitte der Box platziert wurde. Die zwei Substrate wurden aus den gleichen Komponenten durch unterschiedliche Proportionen so gestaltet, dass eines möglichst reich an Rohfaser (A) und das andere möglichst reich an leicht verdaulichen Nährstoffen war (B). Die Komponenten wurden nach Frischmasse in den Substraten A und B wie folgt eingesetzt: Bananen (A: 30%, B: 10%), Apfeltrester (A: 15%, B: 5%), Möhrentrester (A: 15%, B: 5%), Rote Beete Trester (A: 15%, B: 5%), Biertreber (A: 15%, B: 45%), Pasta (A: 10%, B: 30%). Die Trockensubstanz wurde für beide Substrate auf 24% eingestellt. Der Rohproteingehalt unterschied sich deutlich (A: 9%; B: 14,4%). Jedes Futtersubstrat wurde in einer einzigen Charge aus den gleichen

Einzelkomponenten hergestellt, portioniert eingefroren und jeweils ca. 12h vor der Verfütterung bei Raumtemperatur aufgetaut.

In Zu- und Abstrom der Respirationskammern wurden CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> kontinuierlich bestimmt. Mindestens viermal täglich wurde zudem in Einzelmessungen N<sub>2</sub>O in Zu- und Abluft bestimmt. Die Biomasse der Larven, ihre Anzahl (Schätzung) und Einzelgewichte wurden zu fünf Zeitpunkten bestimmt, ausserdem wurde an Tag 15, nach Abschluss der experimentellen Durchläufe, die Überlebensrate geschätzt.

Um die durch den Insektenmetabolismus selbst erzeugten Treibhausgasemissionen von rein mikrobiell erzeugten näherungsweise differenzieren zu können, wurden die beiden Komponenten Futtersubstrat und verbliebenes Restsubstrat, sowie deren Kombination, jeweils ohne Larven für 24 Stunden in den Respirationskammern untersucht. Dazu wurden, basierend auf den gleichen Futtersubstraten, andere Larven 7 Tage lang separat und unter gleichen Bedingungen (Dichte, Klima, vorheriges Fütterungsregime) gemästet, bis sie vom entsprechenden Restsubstrat separiert wurden.

Alle Futter-, Larven- und Restsubstratproben wurden zunächst eingefroren und dann gefriergetrocknet und gemahlen. Anschliessend wurde diese nass-chemisch auf absolute Trockensubstanz, C/N-Gehalte, Rohasche, Rohfett sowie auf ADF und NDF Gehalte untersucht. Ammoniak-Emissionen wurden indirekt über die N-Massenbilanzen eruiert.

## Ergebnisse und Diskussion

Die Überlebensrate zwischen den beiden Substraten war gleich gut (A: 92.5%; B: 93.0%), das Larvenwachstum unterschied sich jedoch erwartungsgemäss; es war besser mit Substrat B (Abbildung 1). Die Futterkonvertierungsrate war entsprechend ebenfalls besser auf Substrat B (5.3) als auf Substrat A (8.2). Die Futterkonvertierungsrate kann technisch nicht direkt mit jener von Geflügel, Schweinen oder Rindern verglichen werden, da die Larven ja im Futter leben. Die technisch exakte bedarfsoptimierte Einstellung der Rationen stand nicht im Fokus dieses Experimentes. Zudem war der Rohfasergehalt wesentlich höher, als für Monogastrierrationen üblich, und für die eingesetzten Rationen wäre ein Vergleich mit Wiederkäuern eher angezeigt.

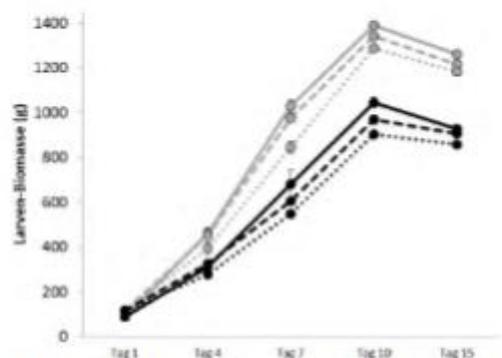


Abbildung 1. Dynamik der Biomasse für Larven der *Hermetia illucens* auf einem eher rohfaserreichen (A, schwarze Kurven) und einem eher rohfasereduzierten (B, graue Kurven) Substrat. Durchgehende, gestrichelte und gepunktete Kurven repräsentieren aufeinanderfolgende Replikate der einzelnen Respirationskammer-Messungen; Fehlerindikatoren zeigen die Standardabweichungen zwischen den 3 Larven-Boxen innerhalb dieser statistischen Replikate.

Dennoch zeigen die CO<sub>2</sub>-Kurven (Abbildung 2) deutliche Peaks, jeweils einen Tag nach Fütterung, die nach zwei Tagen wieder abfallen, was darauf schliessen lässt, dass ein grosser Anteil des verdaulichen Futters dann jeweils bereits verdaut und verstoffwechselt war. Damit muss angenommen werden, dass mit den eingesetzten Rationen keine Konkurrenzfähigkeit der *Hermetia illucens* mit landwirtschaftlichen Wirbeltieren in Bezug auf die Futtermittelverwertung gegeben ist.

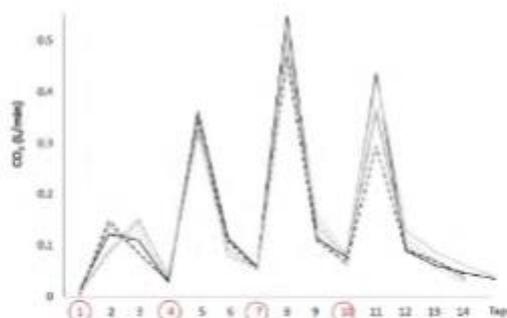


Abbildung 2. Kohlendioxidemissionen aus Produktionseinheiten der *Hermetia illucens* auf einem eher rohfaserreichen (A, schwarze Kurven) und einem eher rohfaserverreduzierten (B, graue Kurven) Substrat. Durchgehende, gestrichelte und gepunktete Kurven repräsentieren aufeinanderfolgende Replikate der einzelnen Respirationsskammer-Messungen. Das gemessene CO<sub>2</sub> ist nicht differenziert nach Larven und Substrat. Eingezeichnet auf der x-Achse sind die Tage der Futterzufuhr.

Die in Abbildung 2 dargestellten CO<sub>2</sub> Mengen stammen aus Substrat und Larven, beziehungsweise den jeweils assoziierten Mikroorganismen. Die separate Messung von Substratboxen in den Respirationsskammern ergab, dass ein erheblicher Teil des CO<sub>2</sub> auch ohne Larven gebildet wird (ca. 16 bzw. 40%) und damit nur 60% (A) bzw. 84% (B) direkt den BSFL zuzuordnen sind.

Beim gemessenen Methan (Abbildung 3) zeigte sich ein deutlicher Peak jeweils ca. 24 Stunden nach Fütterung. Ausserdem fand sich ein Effekt des Substrates im Sinne einer höheren Methanbildungsrate bei grösserem Rohfaseranteil. Hier ergab sich, dass die Methanbildung quasi vollständig auch ohne Larven gemessen wurden, also den fibrolytischen Mikroorganismen im Substrat zuzuordnen sind. Tendenziell (gemittelt über alle Replikate) war die Methanbildung in Anwesenheit der Larven sogar niedriger, was durch deren mechanische Aktivität und die damit einhergehende Unterbindung anaerober Bereiche plausibel erscheint. Insgesamt ist das Substrat, also die Kombination von Futter und Restsubstrat und entsprechende Zusammensetzungen und Dynamiken der Mikrobiota aber ein systemischer Bestandteil der Produktionseinheit und folglich müsste immer die gesamte gebildete Gasmenge (CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>) in entsprechenden LCA zur Anwendung kommen.

Auch die Lachgasemissionen (nicht abgebildet) zeigten starke Peaks jeweils etwa einen halben Tag nach der Fütterung. Hier war es Substrat B, welches zu wesentlich höheren Konzentrationen führte.

Die Gasmengen pro kg gebildeter Larven-Biomasse betragen für CO<sub>2</sub> 2.12kg (A) und 1.63kg (B), für CH<sub>4</sub> 49g (A) und 26g (B) und für N<sub>2</sub>O 314mg (A) und 424mg (B). In CO<sub>2</sub>-Äquivalente aufsummiert war der Betrag 3.44kg für Substrat A und 2.41kg für Substrat B. Gemessen z.B. an der direkten CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> Ausscheidung je kg Lebendgewicht bei Mastrindern (Renand et al., 2019) sind diese Mengen zwar deutlich weniger als 20%, aber sie sind nicht verschwindend gering. Die deutlich höhere Methanbildung bei höherem Faseranteil des Substrates gibt Grund zur Annahme, dass die Methanbildung auch in der Praxis genau dann ansteigen wird, wenn weniger hochwertige, Abfall-basierte Substrate verwendet werden. Letzteres sind aber die in Europa denkbaren Optionen, wenn die Insektenproduktion zum Nährstoffrecycling genutzt werden und nicht in Futterkonkurrenz zu Geflügel und Schwein stehen soll.

Ein Ansatz zur relativen Reduktion der Treibhausgasbildung könnte eine frühere Ernte der Larven sein, da diese in ihrem letzten Stadium nicht mehr an Biomasse zulegen (im Gegenteil), sondern vor allem noch Fettreserven bilden (Liu et al., 2017), welche nicht in der Hauptsache erwünscht sind und den Insekten lediglich als Energiereserven für die anstehenden Puppen- und Adultstadien dienen (Sheppard et al., 2002). So könnte durch eine verkürzte Mast das Verhältnis Proteinbiomasse zu Treibhausgasen positiv beeinflusst werden.

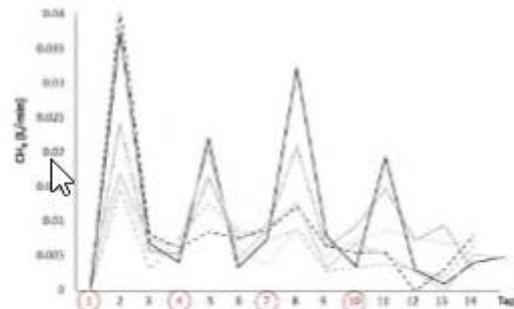


Abbildung 3. Methanemissionen aus Produktionseinheiten der *Hermetia illucens* auf einem eher rohfaserreichen (A, schwarze Kurven) und einem eher rohfaserverreduzierten (B, graue Kurven) Substrat. Durchgehende, gestrichelte und gepunktete Kurven repräsentieren aufeinanderfolgende Replikate der einzelnen Respirationskammer-Messungen. Das gemessene CH<sub>4</sub> ist nicht differenziert nach Larven und Substrat. Eingekreist auf der x-Achse sind die Tage der Futterzufuhr.

Die hier präsentierten Daten unterliegen Einschränkungen in Bezug auf die Wahl der Substrate und die technologischen Verfahren, wie zum Beispiel die Feuchtigkeit. Dennoch ist diese Studie wesentlich umfassender und praxisnäher als andere den Autoren bekannte Studien zur Gasbildung bei *Hermetia illucens*. Sie zeigt, dass die Bildung von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O in nicht zu vernachlässigenden Raten stattfindet. Die Bildung von Treibhausgasen im Larven-Substrat-Gemisch bei der Produktion von Insekten muss also bei der Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von Insektenprotein berücksichtigt werden. Wichtig ist zudem, dass diese Werte bei der Verwendung als Lebensmittel mit denen für die Produktion von Fleisch oder Eiern verglichen werden müssen; wenn das Insektenprotein jedoch als Futtermittel vorgesehen ist, müssen sie addiert werden, was die grundsätzliche Nachhaltigkeit von insektenbasiertem Futter eher unwahrscheinlich macht.

## Schlussfolgerungen

Die Futterzusammensetzung, die Fütterungszeitpunkte und das Entwicklungsstadium haben deutlichen Einfluss auf die Bildung klimarelevanter Gase im Larven-Substrat-Gemisch bei der Produktion von BSFL. Insbesondere Methan und Lachgas sind offensichtlich von der Futterzusammensetzung abhängig und können im Wesentlichen wohl mikrobieller Aktivität zugeordnet werden, welche jedoch als intrinsisch mit entsprechenden Produktionssystemen gekoppelt angesehen werden müssen. Die Größenordnung der Treibhausgasbildung in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten ist als relevant und dem Monogastrier vergleichbar einzuschätzen. Eine relativ frühere Ernte der Larven vor Erreichen des letzten Larvenstadiums, um hohe Proteinanteile zu erzielen, könnte die relative Treibhausgasbildung signifikant reduzieren. Etlliche technische Aspekte, wie Feuchtigkeit, Substrattiefe und allfällig vorteilhafte Mikroben-Innokulationen, bedürfen der weiteren gezielten Erforschung. Generell wird deutlich dass die Produktion von BSFL-basiertem Insektenprotein nicht zum ökologischen Nulltarif möglich ist.

## Literatur

- Bevs, L., Jucker, C., Gistler, G., Lupi, D., Seiboldelli, S., Zucali, M., Colombini, S. (2019): Rearing of *Hermetia illucens* on Different Organic By-Products: Influence on Growth, Waste Reduction, and Environmental Impact. *Animals* 9, 289.
- Bosch, G., van Zanfen, H.H.E., Zamprogna, A., Veenenbos, M., Meijer, N.P., van der Fels-Klerx, H.J., van Loon, J.J.A. (2019): Conversion of organic resources by black soldier fly larvae: Legislation, efficiency and environmental impact. *J. Cleaner Prod.* 222, 355-363.
- Bruni, L., Belghit, I., Lock, E.J., Secchi, G., Toldi, C., Parisi, G. (2020): Total replacement of dietary fish meal with black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae does not impair physical, chemical or volatile composition of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *J. Sci. Food Agric.* 100, 1039-1047.
- Bruno, D., Bonelli, M., De Filippis F., Di Lelio, I., Tettamenti, G., Casartelli, M., Ercolini, D., Cecchi, S. (2019) : The Intestinal Microbiota of *Hermetia illucens* Larvae Is Affected by Diet and Shows a Diverse Composition in the Different Midgut Regions. *Appl. Environ. Microbiol.* 85: e01864-18.
- Ermoleev, E., Lalander, C., Vinneras, B. (2019): Greenhouse gas emissions from small-scale fly larvae composting with *Hermetia illucens*. *Waste Management* 96, 65-74.
- Gesco, L., Biasato, I., Debbou, S., Schiavone, A., Gai, F. (2019): Animals Fed Insect-Based Diets: State-of-the-Art on Digestibility, Performance and Product Quality. *Animals* 9, 170.
- Green, T.R., Pope, R. (2012): Enhanced Ammonia Content in Compost Leachate Processed by Black Soldier Fly Larvae. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 166, 1381-1387.
- Leiber, F., Galencsár, T., Stamer, A., Amsler, Z., Wohlfahrt, J., Früh, B., Maurer, V. (2017): Insect and legume-based protein sources to replace soybean cake in an organic broiler diet: effects on growth performance and physical meat quality. *Renew. Agric. Food Syst.* 32, 21-27.
- Liu, X., Chen, X., Wang, H., Yang, Q., ur Rehmann, K., Li, W., Cai, M., Li, Q., Mazza, L., Zhang, J., Yu, Z., Zheng, L. (2017): Dynamic changes of nutrient composition throughout the entire life cycle of black soldier fly. *PLoS ONE* 12: e012601.
- Maurer, V., Holinger, M., Amsler, Z., Früh, B., Wohlfahrt, J., Stamer, A., Leiber, F. (2016): Replacement of soybean cake by *Hermetia illucens* meal in diets for layers. *J. Insects Food Feed* 2, 83-90.
- Mertenst, A., Diener, S., Zurbrugg, C. (2019): Black Soldier Fly biowaste treatment - Assessment of global warming potential. *Waste Management* 84, 173-181.
- Ooninx, D.G.A.B., van IJzerbeek, J., Heestkamp, M.J.W., van den Brand, H., van Loon, J.J.A., van Huis, A. (2010): An Exploration on Greenhouse Gas and Ammonia Production by Insect Species Suitable for Animal or Human Consumption. *PLoS ONE* 5: e14445.
- Ooninx D.G.A.B., de Boer, J.J.H. (2012): Environmental Impact of the Production of Mealworms as a Protein Source for Humans - A Life Cycle Assessment. *PLoS ONE* 7: e51145.
- Renard, G., Vinet, A., Decruyeneere, V., Maupetit, D., Dosses, D. (2019): Methane and Carbon Dioxide Emission of Beef Heifers in Relation with Growth and Feed Efficiency. *Animals* 9, 1136.
- Schäfer, C., Müller, A., El-Hage Scialabba, N., Hecht, J., Isensee, A., Erb, K.H., Smith, P., Makkar, H.P.S., Klocke, P., Leiber, F., Schwegler, P., Stolze, M., Niggli, U. (2015): Impacts of feeding less food-competing feedstuffs to livestock on global food system sustainability. *J. Royal Soc. Interface* 12, 20150891.
- Renna, M., Schiavone, A., Gai, F., Debbou, S., Lussiana, C., Malfatto, V., Prearo, M., Capucchio, M.T., Biasato, I., Biasibetti E., De Marco, M., Brugiapaglia, A., Zoccarato, I., Gesco, L. (2017): Evaluation of the suitability of a partially defatted black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal as ingredient for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) diets. *J. Anim. Sci. Technol.* 8, 57.
- Salomone, R., Seija, G., Mondello, G., Giannetto, A., Fasulo, S., Sevastano, D. (2017): Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens*. *J. Cleaner Prod.* 140, 890-905.
- Sheppard, D.C., Tomberlin, J.K., Joyce, J.A., Keer, B.C., Sumner, S.M. (2002): Rearing methods for the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Medical Entomology* 39, 695-698.
- Smetana, S., Pelenisamy, M., Mathys, A., Heinz, V. (2016): Sustainability of insect use for feed and food: Life Cycle Assessment perspective. *J. Cleaner Prod.* 137, 741-751.
- Smetana, S., Schmitt, E., Mathys, A. (2019): Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: Attributional and consequential life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling* 144, 285-296.
- Sprengelers, T., Ottoboni, M., Klaobvijak, C., Oryn, A., Deboosere, S., De Meuleneer, B., Michiels, J., Eeckhout, M., De Clercq, P., De Smet, S. (2016): Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates. *Science of Food and Agriculture* 97, 2594-2600.

Stadler, T., Stamer, A., Buser, A., Wohlfahrt, J., Leiber, F., Sandrock, C. (2017): *Hermetia illucens* meal as fish meal replacement for rainbow trout on farm. *J. Insects Food Feed* 3, 165–175.

Wynants, E., Froomink, L., Crauwels, S., Verreth, C., De Smet, J., Sandrock, C., Wohlfahrt, J., Van Schelt, J., Depraetere, S., Lievens, B., Van Miert, S., Clees, J., Van Campenhout, L. (2018): Assessing the Microbiota of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*) Reared on Organic Waste Streams on Four Different Locations at Laboratory and Large Scale. *Microbial Ecology* 77, 913–930.

#### **Autorenanschrift**

Dr. Christoph Sandrock  
Department für Nutztierwissenschaften  
Forschungsinstitut für biologischen Landbau, FiBL  
Ackerstrasse 113  
5070 Frick, Schweiz  
E-Mail: christoph.sandrock(at)fibl.org

