FiBL Deutschland e.V.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Abschlussbericht

für ein FuEuI-Vorhaben des im Rahmen der Bekanntmachung des BMFTR

„Innovationsräume Bioökonomie“

geforderten Innovationsraums

„NewFoodSystems – Neue Lebensmittelsysteme“

mit dem Titel

„Nachhaltige und resiliente Kultivierung von Insekten für den innovativen Einsatz in der Futter- und Lebensmittelherstellung (reKultI4Food)“

Zuwendungsempfänger: FiBL Deutschland e.V.

Förderkennzeichen: 31B1206A

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen [31B1206A] gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2022 - 31.04.2025

Teil II - Eingehende Darstellung

1. Projektbeschreibung

1.1. Zielstellung

Das FiBL hat die Gesamtprojektkoordination des Verbundprojekts reKultI4Food verantwortet und war in allen drei Teilprojekten in die Versuchsdurchführung, Auswertung und Veröffentlichung involviert.

Ziel von **Teilprojekt 1** war es ein in Bezug auf die Aminosäurezusammensetzung bedürfnisgerechtes Starterfutter für *Hermetia illucens* Larven des ersten Stadiums zu formulieren. Das erste Larvenstadium ist das sensibelste Stadium während der Aufzucht von *Hermetia illucens*. Die Mortalität ist unter aktuellen Praxisbedingungen hoch und die Heterogenität der Größe der Larven bei Eintritt in das zweite und dritte Larvenstadium, also vor der eigentlichen Verwertung von Restströmen während der Mast, entsprechend groß. Die hier angestrebte systematische Optimierung fand in mehreren Versuchsreihen am FiBL auf der Ebene der Protein- bzw. Aminosäureversorgung (Komplementierung ausgewählter essentieller Aminosäuren) statt.

Teilprojekt 2 zielte auf zwei Schwerpunkte ab, die in aufeinanderfolgenden Ansätzen adressiert wurden. Zunächst wurde im Labormassstab die für Larven der Schwarzen Soldatenfliege quantitative (Entwicklungsparameter) und qualitative (Nährstoffzusammensetzung) Eignung verschiedener relevanter Nebenströme der landwirtschaftlichen Nahrungs- und Futtermittelproduktion evaluiert. Nach einem eingehenden Screening potentiell als Futtersubstrat geeigneter Komponenten durch die Südzucker AG wurden die Komponenten in Abstimmung mit den praktischen Erfahrungen der Hermetia Baruth GmbH in Fütterungsversuchen auf unterschiedlichen Skalierungsebenen (Labormaßstab, Industriemaßstab) im Vergleich zu einem Kontrollfutter verglichen. Die Hermetia Baruth GmbH stellte für die Versuche Insektenlarven zur Verfügung. Basierend auf den Ergebnissen aus dem Labormaßstab wurden drei Szenarien, die wirtschaftlich vielversprechend erscheinen, im industriellen Massstab evaluiert. Die Fütterungsversuche wurden durch mikrobielle Beurteilungen zur Sicherheit von Insekten für Lebensmittel- bzw. Futtermittelanwendungen durch den Partner ATB komplementiert.

Das **Teilprojekt 3** des Verbundvorhabens reKultI4Food hatte zum Ziel, die Substitution von Fischmehlkomponenten in der Aquakulturfütterung durch proteinreiches Mehl der Larven der Schwarzen Soldatenfliege am Beispiel der pazifischen Weissbeingarnele (*Peneaus vannamei*) zu evaluieren. Damit sollte ein anwendungsorientierter Beitrag zur sozioökonomischen Beurteilung einer besonders nachhaltigen Insektenproteinproduktion basierend auf dem Einsatz von Restströmen aus der Lebensmittelproduktion geleistet werden, indem vorrangigen Fragen der Verwertungseffizienz und der Tiergesundheit im wachsenden Aquakultursektor nachgegangen wird.

1.2 Teilprojekt 1

1.2.1 Vorversuche zur Abtrennung von nicht-vitalen Neonates

Für die Fütterungsversuche von Teilprojekt 1 wurden frisch geschlüpfte Larven (Neonates) der *Hermetia illucens* (Schwarze Soldatenfliege) benötigt. Die Versanddauer an das FiBL in die Schweiz kann bis zu zwei Tage betragen und stellt daher eine besondere Herausforderung dar. Die Handhabung dieser neugeborenen Tiere, die sich in einer sensiblen Entwicklungsstufe befinden und abhängig von der Umgebungsfeuchtigkeit und Temperatur sind, ist äußerst kritisch. Um eine Austrocknung der Tiere zu vermeiden, wurden diese in einem feuchten und gekühlten Substrat versendet.

In Vorversuchen im Jahr 2022 wurde gezeigt, dass eine Lagerung der frisch geschlüpften Larven (Neonates) der *Hermetia illucens* zu einer Mortalität von bis zu 80 % führen kann. Daraufhin wurden 2 Sendungen mit Neonates an das FIBL für Vorversuche gesendet. Bei beiden Sendungen zeigte sich eine höhere Mortalität als in den zuvor durchgeführten Lagerungsversuchen an der Hermetia Baruth GmbH. Sehr wahrscheinlich wurden diese durch die Transportbedingungen und Belastungen während des Transportes durch Förderbänder und Rutschen verursacht, welche wir als Kunde eines Versanddienstleisters nicht beeinflussen können.

Zur Erzielung bestmöglicher Ergebnisse in den Fütterungsexperimenten am FIBL, sollte eine Vorbehandlung der Neonates vor der Dosierung in die Fütterungsbehälter untersucht werden. Die Implementierung eines zusätzlichen Prozesses vor der Nutzung der Tiere ist die einzige Möglichkeit, die Transport-Schäden an den Neonates nicht auf das Experiment zu übertragen. Hierfür sollten geschädigte Neonates, die tot oder nicht mehr vital genug sind, von den vitalen Tieren abgetrennt werden.

Zunächst wurden die Tiere in ein Küchensieb gegeben und gesiebt. Jedoch wurden durch diese aktive Siebung auch deutlich inaktive und dunkel gefärbte Neonates durchgesiebt. In weiterführenden Tests wurde eine passive Siebung, bei welcher das Bewegungsverhalten der Tiere genutzt wird, angewendet. Bei dieser passiven Siebung sind keine inaktiven und dunkel gefärbten Neonates in der vitalen Neonate-Fraktion sichtbar.

1.2.2 Fütterungsversuche

Die Fütterungsversuche wurden im FiBL in der Schweiz durchgeführt, wo insgesamt 15 Futtermittelbehandlungen formuliert wurden, wie in Tabelle 1 aufgeführt. Die PC-Behandlung enthielt 100 % Junghennenfutter (18,9 % Rohprotein, 6,6 % Rohfaser, 7,8 % Rohasche, 42 % Stärke), während alle anderen Futterbehandlungen aus 33 % Junghennenfutter, 40 % Weizen (11,9 % Rohprotein, 4,0 % Rohfaser, 3,7 % Rohasche, 60,0 % Stärke) und 20 % Stroh (3,9 % Rohprotein, 43,8 % Rohfaser, 6,0 % Rohasche, 1,7 % Stärke) bestanden. Der NC-Diät und allen Diäten mit reduziertem Aminosäuregehalt wurde Cellulose zugesetzt. Die Referenzkontrolle (RC) wurde so formuliert, dass sie das gleiche Aminosäureprofil und die gleichen Aminosäuregehalte wie die PC enthielt, während in den anderen Diätbehandlungen die einzelnen Aminosäuren (AA) Methionin (Met), Lysin (Lys), Threonin (Thr), Tryptophan (Trp), Arginin (Arg) oder Isoleucin

(Ile) entweder um 41, 46, 42, 31, 46 bzw. 40 % erhöht (+) oder verringert (-) wurden. In NC wurden alle einzelnen Aminosäuren gleichzeitig reduziert.

Tabelle 1: Futtermischungen im Fütterungsversuch mit *Hermetia illucens* Neonates

Futtermischung	Beschreibung
PC	Kommerzielles Junghennenfutter
RC	Versuchsfutter mit AA-Profil des PC-Futters
NC	Met, Lys, Thr, Trp, Arg, Ile reduziert
+Met	RC mit 41% erhöhtem Met
+Lys	RC mit 46% erhöhtem Lys
+Thr	RC mit 42% erhöhtem Thr
+Trp	RC mit 31% erhöhtem Trp
+Arg	RC mit 46% erhöhtem Arg
+Ile	RC mit 40% erhöhtem Ile
-Met	RC mit 41% reduziertem Met
-Lys	RC mit 46% reduziertem Lys
-Thr	RC mit 42% reduziertem Thr
-Trp	RC mit 31% reduziertem Trp
-Arg	RC mit 46% reduziertem Arg
-Ile	RC mit 40% reduziertem Ile

Die Neonates wurden in 45 Kästen mit einer Fläche von 353 cm² (23,5 x 15 cm) gezüchtet, die mit Deckeln verschlossen waren, die durch eine mit Gaze bedeckte Öffnung die notwendige Belüftung ermöglichten. Jede Behandlung wurde dreimal wiederholt. Die zu Beginn des Versuchs bereitgestellte Futtermenge betrug 10 mg Trockenmasse (TM)/Neugeborenes mit 10.000 Neugeborenen (18 µg/Neonates) pro Wiederholung, was 100 g TM-Futter/Box ergab. Das Futter wurde mit Wasser befeuchtet, um einen TM-Gehalt von 35 % zu erreichen. Während des Versuchs wurde Wasser hinzugefügt, um ein Austrocknen der Neonates zu vermeiden. Stroh wurde hinzugefügt, um den Neonates eine geeignete Struktur zum Bewegen zu bieten. Die Larven wurden bei 27 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit in einer Klimakammer (KBF 720, Binder GmbH, Tuttlingen, Deutschland) aufgezogen. Die Position der Boxen innerhalb der Kammer wurde täglich nach dem Zufallsprinzip geändert.
Ab dem sechsten Tag nach Versuchsbeginn wurden täglich 20 Larven pro Box gewogen (ABP 100-5DM, Kern & Sohn GmbH, Balingen, Deutschland). Der Versuch wurde beendet, als das durchschnittliche Körpergewicht pro Larve in jeder Wiederholung 12 mg erreichte oder überschritt, was zwischen dem 10. und 14. Tag des Experiments der Fall war. Die gesamte Biomasse der Aufzuchtbox, die Mortalität, die Futterverwertungsrate und die Substratreduktion wurden am Ende des Versuchs quantifiziert. Larven und Frass wurden manuell getrennt.

Alle Fraktionen, einschließlich Futter (zu Beginn), Larven-Biomasse und Frass, wurden gemäß Standardmethoden (AOAC International, 2023; Fontaine, 2003) auf Trockensubstanzgehalt, Stickstoff (Rohprotein: N x 6,25) und Aminosäuren analysiert. Auf der Grundlage dieser Analysen wurden die Bilanzen berechnet, indem die Aminosäureverluste durch Subtraktion der Aminosäuregehalte in Larven und Frass ermittelt wurden.
Im einem zweiten Fütterungsversuch wurden entsprechend des ersten Fütterungsversuch im selben Versuchsdesign die folgenden Aminosäuren getestet: Leucin, Phenylalanin, Valin und Histidin.

1.2.3 Ergebnisse

Die Wachstumskurven der *Hermetia*-Larven, die mit Futtermitteln mit verringertem oder erhöhtem Gehalt an einzelnen Aminosäuren aufgezogen wurden, sind in Abbildung 1 dargestellt. Dementsprechend führte kommerzielles Junghennenfutter (PC) zu einem außergewöhnlich hohen individuellen Körpergewicht, das am 10. Tag seinen Höchstwert erreichte. Interessanterweise war das Wachstum der RC-Larven bis zum 9. Tag geringer als das der PC-Larven, danach stieg das Körpergewicht der Larven innerhalb der folgenden zwei Tage um 160 %. Darüber hinaus lagen die mit RC aufgezogenen Larven, deren Zielkörpergewicht für das Erreichen der Mastphase auf 7 mg/Larve festgelegt war, signifikant hinter denen von PC zurück ($P < 0,05$), was bedeutet, dass sie etwa einen Tag länger brauchten, um den vordefinierten Beginn der Mastphase zu erreichen. In Bezug auf das Zielgewicht von 7 mg/Larve konnten vier Gruppen statistisch unterschieden werden ($P < 0,05$). Die Behandlungen +Lys und +Arg erreichten das Zielgewicht am frühesten, während eine Gruppe von Behandlungen, darunter RC, +Met, +Thr, +Trp, +Ile, -Met und -Thr, dieses einen Tag später erreichten. Die dritte Gruppe, bestehend aus PC, -Trp, -Ile und -Arg, benötigte einen zusätzlichen Tag, während das langsamste Wachstum bei NC und -Lys beobachtet wurde.

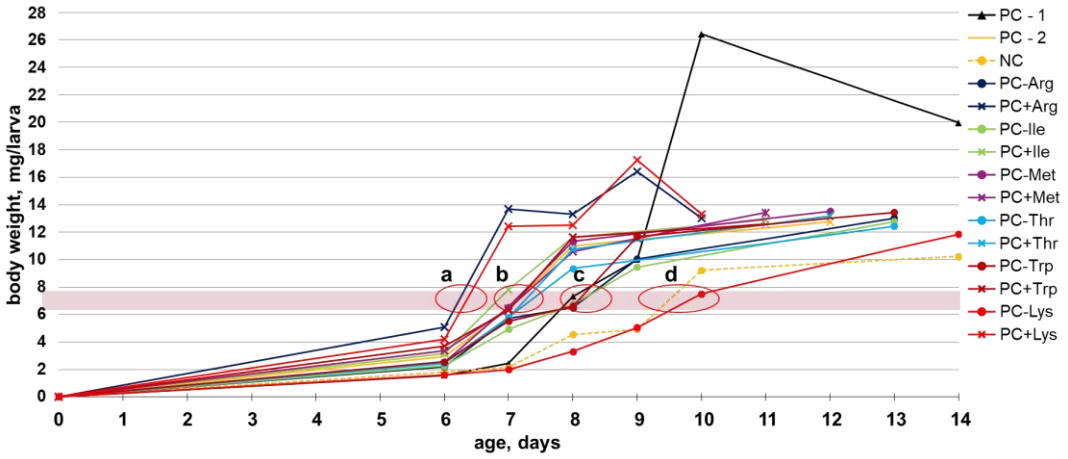

Abbildung 1: Wachstumskurven von Neugeborenen der Schwarzen Soldatenfliege, die auf der positiven Kontrolle (PC), der negativen Kontrolle (NC), der Referenzkontrolle (RC) und den Diätbehandlungen mit Ergänzung (+) oder Reduktion (-) der einzelnen Aminosäuren Met, Lys, Thr, Trp, Arg und Ile (n = 3) aufgezogen wurden. a,b,c,d Unterschiedliche hochgestellte Buchstaben (a-d) weisen auf signifikant unterschiedliche Altersstufen hin, die erforderlich sind, um 7 mg/Larve zu erreichen ($P <0,05$).

Das Wachstum der mit NC und Lys gefütterten Larven war im Vergleich zu den anderen Behandlungen am stärksten verzögert (P < 0,05), während die Zugabe von Lys zu RC zu einer steileren Wachstumskurve führte (P < 0,05). Die Behandlung +Arg (P < 0,05) zeigte eine außergewöhnlich steile Wachstumskurve. Im Gegensatz dazu verzögerte die Reduzierung von Arg, Ile und Trp das Erreichen des Zielgewichts um einen Tag im Vergleich zur Gruppe mit RC (P < 0,05). Die Reduzierung von Met und Thr hatte im Vergleich zu RC keine negativen Auswirkungen auf das Wachstum.

Der Rohproteingehalt in den Larven der Behandlungen RC (52,1 %) und -Arg (50,7 %) war höher als der der Behandlungen NC (40,8 %), +Trp (44,2 %) und +Lys (44,4 %) (P < 0,05), während sich alle anderen Behandlungen nicht unterschieden (P > 0,05) und zwischen 45,6 % und 47,3 % lagen (Abbildung 2). Im Frass wies RC (21,8 %) einen höheren (P < 0,05) und NC (11,0 %) einen niedrigeren (P < 0,05) Rohproteingehalt auf als alle anderen Behandlungen, die zwischen 14,2 und 14,9 % lagen (Abbildung 2).

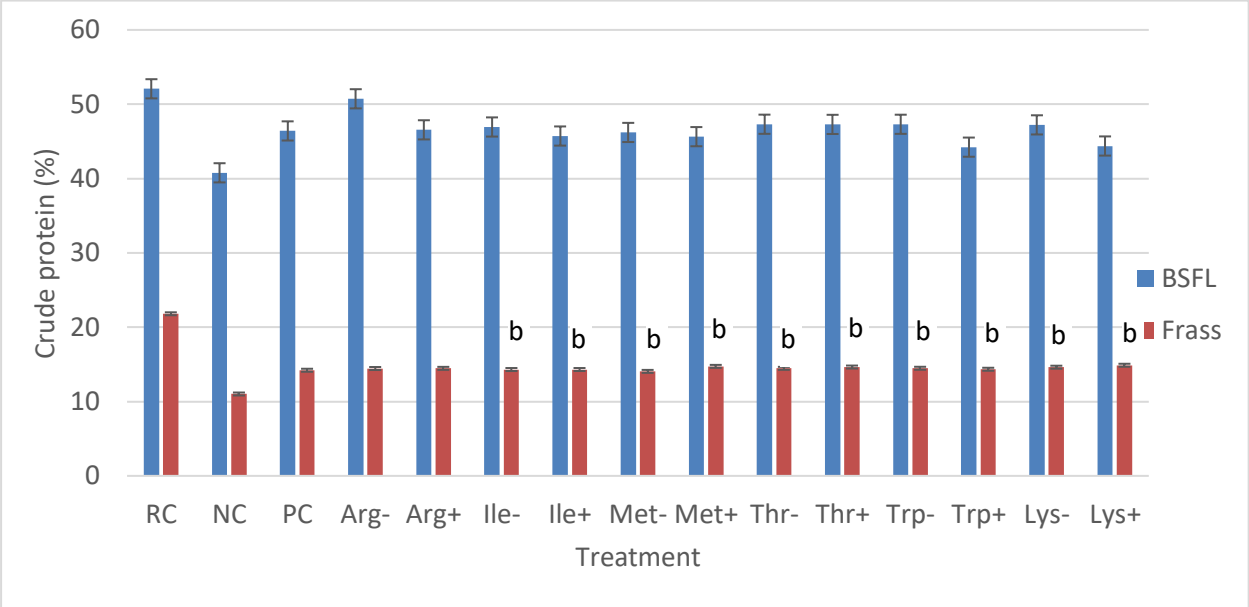

Abbildung 2: Rohproteingehalt (crude protein, % TM) in *Hermetia*-Larven (BSFL; blau) und Frass (rot) am Ende der Aufzuchtphase der Positivkontrolle (PC), Negativkontrolle (NC), Referenzkontrolle (RC) und der Diätbehandlungen mit Ergänzung (+) oder Reduktion (-) der einzelnen Aminosäuren Met, Lys, Thr, Trp, Arg und Ile (n = 3, LSMeans ± Standardfehler). * Signifikant unterschiedlich zu allen anderen Behandlungen innerhalb von Larven oder Frass (P < 0,05).

Tabelle 2 zeigt die AA-Retention in Larven-Biomasse im Verhältnis zur mit dem Futter angebotenen AA-Menge. Die Retentionseffizienz variierte erheblich innerhalb, aber auch zwischen den einzelnen AA. Beispielsweise wurde die niedrigste Lys-Retention bei +Lys beobachtet, während die höchste Retention, die sogar 100 % überstieg, die bei -Lys festgestellt wurde (P < 0,05). Die anderen Behandlungen lagen dazwischen und wiesen untereinander vergleichsweise geringe Schwankungen auf. Interessanterweise führte die Fütterung von PC mit einer hohen Aminosäurekonzentration (wie in RC nachgeahmt) zu einer hohen Retentionseffizienz der Aminosäuren.

Tabelle 2: Retention von Aminosäuren (in % der mit dem Futter zugeführten Aminosäuren) in der Biomasse von *Hermetia*-Larven während der Aufzuchtphase, die mit der positiven Kontrolle (PC), der negativen Kontrolle (NC), der Referenzkontrolle (RC) und den Diätbehandlungen mit Ergänzung (+) oder Reduktion (-) der einzelnen Aminosäuren Met, Lys, Thr, Trp, Arg und Ile (n = 3) gefüttert wurden.

Treatment	Met	Met+Cys	Lys	Thr	Trp	Arg	Ile
PC	60.4%^{b}	49.7%^{a}	86.3%^{c}	72.8%^{b}	79.9%^{a}	56.7%^{c}	88.1%^{b}
NC	64.0%^{b}	49.9%^{a}	103.6%^{b}	80.6%^{b}	70.6%^{b}	72.2%^{b}	96.9%^{b}
RC	48.3%^{cd}	39.3%^{bc}	69.7%^{de}	57.8%^{cd}	56.9%^{de}	48.4%^{d}	71.3%^{cd}
-Arg	50.2%^{c}	41.5%^{b}	73.9%^{d}	61.0%^{c}	64.5%^{bc}	91.9%^{a}	73.1%^{c}
-Ile	47.0%^{cde}	38.8%^{bcd}	68.1%^{de}	56.9%^{cd}	58.7%^{cd}	47.0%^{d}	115.4%^{a}
-Met	78.0%^{a}	48.1%^{a}	69.4%^{de}	55.5%^{cd}	56.9%^{de}	47.0%^{d}	67.2%^{cdef}
-Thr	44.4%^{cde}	36.9%^{bcd}	71.6%^{de}	92.3%^{a}	56.7%^{de}	44.9%^{de}	60.3%^{defgh}
-Trp	44.8%^{cde}	36.9%^{bcd}	73.8%^{d}	53.5%^{cd}	79.8%^{a}	44.3%^{de}	56.5%^{fghi}
-Lys	41.1%^{e}	34.0%^{cd}	126.3%^{a}	50.3%^{d}	56.7%^{de}	40.9%^{e}	52.3%^{hi}
+Arg	43.3%^{de}	35.5%^{cd}	63.8%^{e}	52.9%^{d}	50.8%^{e}	31.1%^{f}	64.5%^{cdefg}
+Ile	47.2%^{cd}	38.9%^{bc}	68.4%^{de}	56.4%^{cd}	54.7%^{de}	47.0%^{d}	48.3%^{i}
+Met	34.6%^{f}	33.4%^{d}	70.5%^{de}	55.9%^{cd}	55.6%^{de}	47.5%^{d}	68.1%^{cde}
+Thr	44.6%^{cde}	36.6%^{bcd}	73.5%^{d}	37.8%^{e}	56.8%^{de}	44.1%^{de}	56.5%^{fghi}
+Trp	42.6%^{de}	35.2%^{cd}	70.4%^{de}	51.2%^{d}	41.3%^{f}	43.1%^{de}	53.9%^{ghi}
+Lys	44.1%^{de}	36.3%^{bcd}	50.8%^{f}	53.1%^{cd}	53.5%^{de}	44.9%^{de}	57.3%^{efghi}

Im zweiten Fütterungsversuche zeigte die Kontrolle bei der Ernte wiederum die höchsten Larvengewichte und die Negativkontrolle die geringsten. Die Versuchsgruppen mit den unterschiedlichen Gehalten der Einzel-Aminosäuren schwankten in geringem Maß. Die Mortalitäten waren generell wesentlich höher als im 1. Versuch (vermutlich batch-Effekte). Bei allen Untersuchungsparametern ergaben sich zwischen der Kontrolle und der Negativkontrolle größere Unterschiede, sodass die Datensätze der beiden Versuche nicht wie ursprünglich geplant verglichen werden konnten.

1.2.4 Ergebniseinordnung

Der Fütterungsversuch mit Neonates der Schwarzen Soldatenfliege ergab, dass diese empfindlich und signifikant auf die Zugabe oder Reduzierung einzelner Aminosäuren im Substrat reagieren, was sich deutlich auf die Zeit bis zur Ernte auswirkte. Die Versuche ermöglichten es, die am stärksten limitierende Aminosäure (Lys) sowie mitlimitierende Aminosäuren (Arg, Ile, Trp) zu identifizieren. Die Aminosäuren Met und Thr limitierten das Wachstum der Neonates in Futtermitteln, die ähnlich wie handelsübliches Junghennenfutter zusammengesetzt waren, nicht. Im

Allgemeinen lässt sich feststellen, dass der Aminosäurebedarf von Neonates ähnlichen Ernährungsprinzipien folgt wie bei anderen Nutztieren.
Das Aminosäure-Balance-Modell ermöglichte die Interpretation der Aminosäureverwertung für die Retention. In diesem Zusammenhang wurden negative Verluste bei Behandlungen festgestellt, bei denen einzelne Aminosäuren im Futter reduziert wurden. Dies deutet auf Vorteile hin, da diese negativen Verluste auf einen Nettobeitrag von Aminosäuren durch mikrobielle Synthese bei Aminosäure-defizitären Futtermischungen hindeuten, die wiederum bei Futtermischungen auftreten, die mit dem Ziel einer möglichst hohen Zirkularität und entsprechend geringer Nahrungskonkurrenz zur menschlichen Ernährung formuliert wurden. Auch wenn weitere Studien erforderlich sind, um die Auswirkungen von unter diesen Gesichtspunkten formulierten Futtermischungen weiter zu belegen, deuten die vorliegenden Ergebnisse bereits darauf hin, dass das Mikrobiom in der Lage ist, einen schweren Mangel an diesen Aminosäuren zumindest so weit auszugleichen, dass der Bedarf des Mikrobioms, aber auch der Insektenlarven gedeckt wird. Die Ergebnisse der Aminosäurebilanz stimmten gut mit den Beobachtungen zu den Wachstumskurven von Neonates überein und bestätigten die positiven Auswirkungen der Aminosäuresynthese des Mikrobioms auf die Larven.

1.3 Teilprojekt 2

1.3.1 Vorversuche zum Einsatz von Restströmen

Im Teilprojekt 2 wurden Fütterungsversuche mit Restströmen von Südzucker durchgeführt. Die zu untersuchenden Restströme sind Rübenmelasse, Rübenschnitzel, Apfeltrester, Protiwanze und Protigrain. Zur Testung der Eignung und zur Entwicklung der Rezepturen wurden Vorversuche bei der Hermetia Baruth GmbH durchgeführt.
Die Restströme wurden zunächst mit einem Trockenmasseanteil von 30 % als Einzelfuttermischung angesetzt. Es zeigte sich, dass einige Substrate für eine Einzelfuttermischung ungeeignet sind. Vor allem die Restströme Rübenmelasse und Apfeltrester haben sich abgesetzt und entwickelten eine hohe wässrige Phase über den sich absetzenden festen Partikeln. Diese Restströme weisen eine geringe Wasserhaltekapazität auf und durch die wässrige Phase kann es zum Ertrinken der kleinen Junglarven der *Hermetia illucens* führen. Daher ist die Nutzung von Rübenmelasse und Apfeltrester für die Anwendung als Einzelfuttermischung ungeeignet. Die Restströme Rübenschnitzel, Weizenkleie und Protigrain zeigten eine hohe Wasserhaltekapazität auf. Bei allen 3 Substraten war nur eine geringe oder gar keine wässrige Phase zu beobachten. Über die Fütterungszeit wurde die Protigrain-Futtermischung sehr klebrig und bildete Futteragglomerate, sodass eine Ernte der Larven unmöglich war. Die Zuckerrübenschnitzel- und Weizenkleie-Mischung zeigten eine Eignung als Einzelfuttermischung.
Aufgrund der sehr unterschiedlichen Eigenschaften der Restströme sollten Komponentenfuttermischungen mit 24 % Reststromsubstrat, 3,9 % Schweinefutter und 2,1 % Weizenkleie getestet werden. Diese Komponentenfuttermischung enthält das Substrat Schweinefutter, welche eine Komponente des Mastfutters bei der Hermetia Baruth GmbH darstellt. Zudem wurde zu allen Mischungen Weizenkleie zugefügt, da dieses Substrat eine hohe Wasserhaltekapazität besitzt

und in vorherigen Experimenten positive Effekte gezeigt hat. Für den besseren Vergleich wurde auch die Einzelfuttermischung nochmals hergestellt und im Vergleich zur Komponentenmischung dargestellt.
Die Rübenmelasse-Futtermischung zeigte bei beiden Rezepturen so gut wie keine Wasserhaltekapazität, verursacht durch den sehr geringen Faseranteil der Rübenmelasse. Die geringe Menge an Faseranteil führt zum Ertrinken die Larven und macht eine Trennung der Larven vom Restsubstrat unmöglich. Die Protigrain-Futtermischung zeigte eine sehr klebrige Konsistenz, die sich auch bei der Zumischung von Schweinefutter und Weizenkleie nur gering verbesserte. Durch die sich bildenden Futteragglomerate ist eine Trennung der Larven vom Frass und den Frassagglomeraten nicht möglich. Die Weizenkleie- und Zuckerrübenschnitzel-Mischung zeigten eine hohe Wasserhaltekapazität und Quellverhalten. Nach der Fütterung entstand zudem ein siebfähiges Restsubstrat.
Aufgrund der beschriebenen Beobachtungen sind nicht alle Restströme als Einzelkomponenten geeignet. Ebenso erzielte eine Zugabe von geringen Anteilen an Schweinefutter keine Verbesserung. Auf Grundlage dieser Vorversuche wurde nach ergiebiger Diskussion mit den Projektpartnern beschlossen, die verschiedenen Restströme zu kombinieren. Dabei sollten die Anteile der Einzelsubstrate nicht 60 % übersteigen. Die Restströme Rübenmelasse und Apfeltrester sollten möglichst mit einem saugfähigen und faserhaltigen Substrat wie Weizenkleie, Rübenschnitzel, Protigrain und Protiwanze gemischt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Trockensubstanzgehalte der Reststromsubstrate wird die Futterzusammensetzung für die weiteren Vorversuche am FIBL auf Grundlage der Trockensubstanz berechnet werden.

1.3.2 Vorversuche zum Einsatz von Restströmen

Im Teilprojekt 2 soll die Mikrobiota der Larven erfasst werden, um substratspezifische Verschiebungen dieser zu untersuchen. Mit Next Generation Sequencing (NGS)-Technik beim Projektpartner ATB soll die Insektenmikrobiota über den gesamten Reproduktionszyklus erfasst werden. Die Daten dieser Vorversuche sollen als Grundlage für die Beprobungen während der effektiven Fütterungsversuche im Teilprojekt 2 am FIBL genutzt werden. Hierfür wurde der gesamte Lebenszyklus der *Hermetia illucens* mit Hilfe des Bioreaktor im Insektentechnologiecenter der Hermetia Baruth GmbH nachgebildet, getreu der Prozesse in der Produktion der Hermetia Baruth GmbH.
In enger Kooperation mit Mitarbeitern des ATB in Potsdam wurden die Zuchtbehälter, die verschiedenen Anzuchtfutter, sowie Starterlarven (Neonates), Mast-Larven, Prepuppen, Puppen, adulten Fliegen und des Restsubstrates beprobt. Das Experiment wurde im biologischen Triplikat gestartet. In der unten dargestellten Abbildung ist der experimentelle Zeitplan aufgezeigt. Die jeweiligen Stadien wurden täglich kontrolliert und gegebenenfalls die Futtermengen und Inkubationsparameter angepasst.

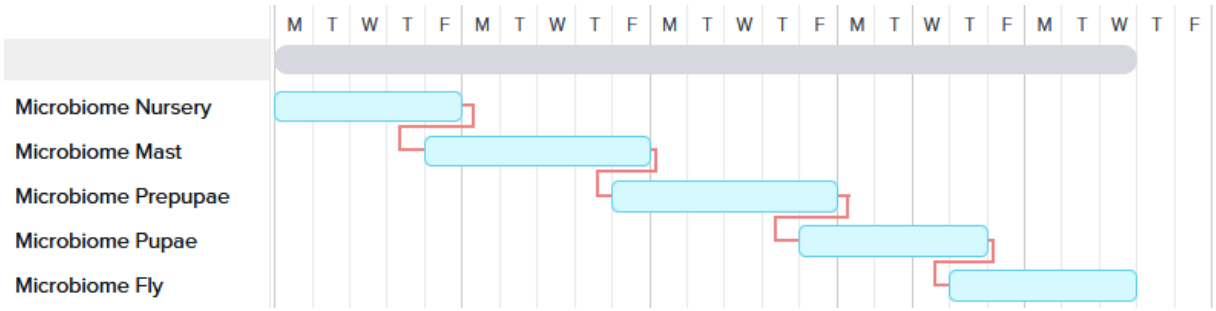

Abbildung 3: Experimenteller Zeitplan für die Probenentnahme während des Lebenszyklus der *Hermetia illucens*. Gezeigt ist ein Gant-Chart mit Ansicht der Wochenarbeitstage (M-Monday, T-Tuesday, W-Wednesday, T-Thursday, F-Friday)

Die bei ATB durchgeführte mikrobiologische Analyse umfasste sowohl eine Plattenzählung als auch eine molekulare Analyse. Für die Plattenzählung wurden jeweils 5 Gramm jedes Probenmaterials 2 Minuten lang mit 45 ml Peptonwasser in einem Stomacher-Beutel homogenisiert. Die ursprünglichen Lösungen wurden seriell verdünnt (10-fache Verdünnungen) und auf Agarplatten ausgestrichen und gemäß den aktuellen DIN-EN ISO-Normen für das mikrobielle Wachstum inkubiert. Die folgenden mikrobiellen Parameter wurden berücksichtigt: TVC (Gesamtzahl der lebensfähigen aeroben mesophilen Bakterien), *Enterobacteriaceae*, *Escherichia coli*, *Bacillus cereus*, *Salmonella spp.*, *Listeria spp.*, *Campilobacter spp.*, *Yersinia spp.* und *Vibrio spp.*. Die molekulare Mikrobiologie wurde durch Extraktion der bakteriellen DNA aus allen Proben durchgeführt und anschließend zur 16S-DNA-Sequenzierung an die Novogene GmbH (Planneg, Deutschland) gesendet.

1.3.3 Fütterungsversuch im Labormaßstab

Aus dem Screening potentieller Futtersubstrate und den Vorversuchen bei der Hermetia Baruth GmbH wurden die folgenden Komponenten für den Einsatz im Labormaßstab ausgewählt und im Fütterungsversuch auf ihre Eignung für den Einsatz in der Mastphase von *Hermetia*-Larven getestet:

- Rübenschnitzel
- Rübenmelasse
- Weizenkleie
- Apfeltrester
- ProtiWanze (Weizenhefekonzentrat)
- ProtiGrain (Trockenschlempe, engl. Dried Distillers Grains with Solubles, DDGS).

Die Auswahlkriterien umfassten die Zusammensetzung der Makro- und Mikronährstoffe sowie physikalische/chemische Eigenschaften wie Fermentationseigenschaften, Wasserbindungskapazität, Mischbarkeit und Textureigenschaften. Tabelle 3 enthält die Nähstoffzusammensetzung.

Die Futtersubstrate wurden im Vergleich zu einer Kontrollration in sechs Rationen mit unterschiedlichen Anteilen der jeweiligen Substrate verfüttert (Tabelle 4). In der Trockensubstanz bestand die Kontrollration aus Schweinefutter (93%) und Weizenkleie (7%). Das Schweinefutter wurde entsprechend in den Versuchsrationen auf 13% reduziert.

Tabelle 3: Nährstoffzusammensetzung der getesteten Futtermittelsubstrate (in %) im Industriemaßstab

Futtermittel-komponente	Trocken-masse	Rohpro-tein	Rohfett	Rohfa-ser	Roha-sche	Zucker	N-freie Extrakt-stoffe
Rübentrocken-schnitzel, gemahlen	94,9	9,8	1,2	17	7,4	7,8	59,4
PROTIGRAIN, gemahlen	90,2	29,2	7	6,4	4,2	4,4	43,5
Apfeltrester, gemahlen	92,4	5,2	2,5	20,7	1,3	17,8	62,6
Weizenkleie	89,3	15,5	4,3	10,8	5,6	5,9	53,1
Rübenmelasse	77,0	11,5	0,2	0,2	10,1	48,1	55,1
PROTIWANZE	25,5	7,1	1,5	0,6	1,2	2,6	15,1

Tabelle 4: Zusammensetzung und Nährstoff- und Aminosäuregehalt in der Trockensubstanz (% TS) der einzelnen Testfutter

Komponente	Kontrolle (CF)	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Schweinefutter	93	13	13	13	13	13	13
Weizenkleie	7	7	7	7	7	7	7
Rübenmelasse	-	-	-	5	5	-	-
Rübenschnitzel	-	-	51	-	36	-	60
Apfeltrester	-	43	-	39	-	48	-
ProtiWanze	-	-	-	-	39	32	20
ProtiGrain	-	37	29	36	-	-	-
Nährstoff / Aminosäure							
Rohprotein	18,37	19,44	19,42	19,16	20,36	15,68	16,39
Methionin	0,31	0,29	0,30	0,27	0,29	0,23	0,25
Cystein	0,36	0,33	0,32	0,31	0,33	0,26	0,26
Lysin	0,78	0,52	0,71	0,50	0,78	0,61	0,78
Threonin	0,65	0,60	0,69	0,58	0,69	0,54	0,63
Tryptophan	0,23	0,20	0,21	0,20	0,21	0,18	0,18
Arginin	0,99	0,85	0,85	0,81	0,88	0,77	0,75
Isoleucin	0,62	0,64	0,66	0,62	0,64	0,53	0,56
Leucin	1,16	1,31	1,30	1,28	1,14	0,96	0,97
Valin	0,85	0,83	0,94	0,81	0,90	0,71	0,81
Histidin	0,42	0,39	0,46	0,38	0,42	0,32	0,41
Phenylalanin	0,73	0,80	0,80	0,78	0,71	0,59	0,60
Tyrosin	0,48	0,52	0,62	0,52	0,57	0,40	0,52
Glycin	0,84	0,78	0,80	0,76	0,81	0,67	0,68
Serin	0,76	0,80	0,85	0,76	0,82	0,66	0,72
Prolin	1,36	1,50	1,40	1,42	1,13	0,92	0,91
Alanin	0,81	0,81	0,85	0,80	0,92	0,76	0,76
Asparaginsäure	1,27	1,19	1,18	1,15	1,27	1,16	1,12
Glutaminsäure	3,48	3,92	3,50	3,84	3,15	2,65	2,31
Rohfett	2,9	4,7	3,6	4,6	3,3	4,2	3,4
Rohfaser	6,3	11,5	12,8	12,9	8,9	9,7	9,8
Rohasche	5,0	2,2	6,4	4,0	6,3	3,7	6,0
Zucker	5,7	9,6	6,8	13,6	11,0	11,9	8,3
N-freie Extrakt-stoffe	56,8	58,5	57,3	58,8	59,4	59,9	58,9
Energie AMEn, MJ/kg DM)	13,04	13,81	13,39	13,70	13,50	13,83	13,49

Das Experiment dauerte vom 3. bis zum 6. Larvenstadium. Vor Beginn des Experiments wurden die Larven eine Woche lang vorkultiviert. Anschließend wurden sie von den Exkrementen getrennt. Anhand einer Reihe von Messungen mit einer Analysenwaage ABP 100-5DM (Kern & Sohn GmbH in Balingen, Deutschland) wurde das Durchschnittsgewicht einer einzelnen Larve (0,0073 g) bestimmt.
Zu Beginn des Experiments wurden je 1.200 Larven (8,7 g Frischgewicht) in Boxen mit einer Gesamtfläche von mit 4232,5 cm^2 Grundfläche (LxBxH 25 x 176,9 x 11,4 cm) von Auer Packaging Swiss GmbH, Baar, Schweiz) und mit 342 g Trockenmasse (TS) Futter gefüttert. Dies entspricht 0,285 g pro Larve. Bei einer Versuchsdauer von 12 Tagen sind das 0,024 g pro Larve pro Tag. Durch Zugabe von Wasser wurde der Trockensubstanzgehalt in allen Boxen auf 30 % eingestellt. Jede Versuchsfutterart wurde zufällig auf 28 Boxen mit 4 Wiederholungen pro Behandlung verteilt. In jeder Box kommen zu den 8,7 g Larven ca. 1100 g Futterfrischmasse bei einem TS-Gehalt von 30 % dazu. Die Testfutter sollten vom Versuchskonzept her einen möglichst vergleichbaren Proteinanteile (isonitrogen) und ähnliche Energiewerte (isoenergetisch) aufweisen. Aufgrund von produktionsbedingten Nährwertschwankungen ergaben sich nachträglich Varianzen zwischen den zu Beginn des Experiments vorliegenden Nährwerten und den abschließenden Analysewerten.
Die Boxen wurden mit Deckeln verschlossen, die durch eine mit Gaze bedeckte Öffnung die notwendige Belüftung ermöglichten. Alle 28 Boxen wurden auf vier Regalen in einer Klimakammer (KBF 720, Binder GmbH, Tuttlingen, Deutschland) platziert. Bei den täglichen Kontrollen wurden die Positionen der Boxen nach dem Zufallsprinzip gedreht und die Regale ausgetauscht. Die Temperatur blieb während des gesamten Experiments konstant bei 27 °C mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 %. Bei den täglichen Kontrollen wurde je nach visueller Beurteilung eine kleine Menge Wasser mit einer Spritze hinzugefügt und protokolliert. Am 4., 7. und 10. Tag des Experiments wurde eine Probe von 20 Larven aus dem Frass entnommen, mit warmem Wasser gereinigt, getrocknet und mit einer Analysenwaage ABP 100-5DM (Kern & Sohn GmbH in Balingen, Deutschland) gewogen.
Das Ende des Experiments wurde eingeleitet, als die ersten Larven ihre Farbe veränderten, was auf das Vorpuppenstadium (6. Larvenstadium) hinwies. Daher erfolgte die Ernte vom 11. bis zum 14. Versuchstag. Nach Beendigung des Experiments wurden die BSFL-Biomasse und der Frass manuell getrennt und gewogen. Alle Larven wurden pro Box gezählt, um die Sterblichkeitsrate zu berechnen. Alle Fraktionen, einschließlich Futter (zu Beginn), BSFL-Biomasse und Frass, wurden bei -20 °C bis zur Lyophilisierung gelagert und mit Standardanalysemethoden (AOAC International, 2023; Fontaine, 2003) von Evonik Operations GmbH (Essen, Deutschland) analysiert. Die Analysedaten wurden verwendet, um den Biomassezuwachs, die Futterverwertung, den Proteinertrag und den Fettgehalt auf Trockenmassebasis zu berechnen.

1.3.4 Fütterungsversuche im Industriemaßstab

Basierend auf den Ergebnissen des Fütterungsversuches im Labormaßstab wurden drei Versuchsfuttermittel mit unterschiedlichen Zusammensetzungen der Nebenprodukte formuliert,

wie in Tabelle 5 dargestellt. Das Futtermittel 3 aus Versuch 1 wurde unverändert verwendet und als Futtermittel „Getreide-Obst“ definiert (Ration 1). Die Diät „alle Nebenprodukte“ wurde neu formuliert und enthielt alle getesteten Nebenprodukte aus Versuch 1 sowie einen erhöhten Anteil an Schweinefutter (39 %) (Ration 2). Die Diät 5 aus Versuch 1 wurde mit 7 % Protigrain® ergänzt, um den Rohproteingehalt zu erhöhen, und als Diät „Destillate-Obst“ definiert (Ration 3).
Die Diäten wurden in 9 Boxen mit einer Gesamtfläche von 8.140 cm² (LxBxH 110 x 74 x 30 cm) und jeweils 75.000 BSFL getestet, wobei jede Diät dreimal wiederholt wurde. Die Berechnung der Futterrationen war identisch und es wurden insgesamt 623 kg Frischmasse an Futter in jeder Box gefüttert (Mengenberechnung anhand des Laborversuches).

Tabelle 5: Proteingehalt und Nährstoff- und Animosäurezusammensetzung (in %) der drei untersuchten Rationen im Industriemaßstab

Komponente	Ration 1	Ration 2	Ration 3
Schweinefutter	13	39	13
Weizenkleie	7	7	7
Rübenmelasse	5	8	-
Rübenschnitzel	-	16	-
Apfeltrester	39	9	33
ProtiWanze	-	11	40
ProtiGrain	36	10	7
Rohprotein	19,60	17,97	20,36
Lysin	0,54	0,61	0,69
Methionin + Cystein	0,59 (108%)	0,54 (91%)	0,63 (91%)
Threonin	0,59 (108%)	0,57 (93%)	0,65 (94%)
Arginin	0,84 (155%)	0,79 (129%)	0,92 (132%)
Rohfett	4,6	3,3	4,4
Rohfaser	12,9	9,0	10,4
Rohasche	4,0	5,7	3,7
Zucker	13,6	12,2	11,7
N-freie Extraktstoffe	58,8	59,0	59,6
Energie (AMEn, MJ/kg DM)	13,70	13,27	13,83

Ebenso wie im Fütterungsversuch im Labormaßstab, wurden die frischgeschlüpften Neonates vor Beginn des Experiments sieben Tage lang in drei Boxen mit einer Gesamtfläche von 1.053 cm² (LxBxH 39 x 27 x 10 cm) mit Schweinefutter gefüttert (750 g Frischmasse und 1.300 ml Wasser pro Box). Die Boxen wurden in einer Klimakammer bei 28 °C und 67 % relativer Luftfeuchtigkeit aufgestellt. Nach 4 Tagen wurde eine zweite Futterration mit ähnlichen Mengen bereitgestellt. Im Alter von 7 Tagen wurden Larven und Frass manuell voneinander getrennt.

Wie oben beschrieben, wurde das Durchschnittsgewicht der Larven bestimmt (0,0069 g) und 75.000 BSFL (515,2 g Frischbiomasse) wurden in die 9 Boxen gegeben. Die Boxen wurden in einem geschlossenen Raum (5,5 x 6,5 m) mit 3 Boxen pro Seite aufgestellt. Die Position der Boxen wurde täglich nach dem Zufallsprinzip geändert. Es wurde eine Raumtemperatur von 25 °C angestrebt. Die Belüftung wurde durch ein Belüftungssystem mit Partikelfilter und Wärmetauscher sichergestellt. Zusätzlich wurden vier Ventilatoren in den Ecken des Raumes aufgestellt und stündlich abwechselnd eingeschaltet. Die Oberflächentemperatur der Substrate stieg kontinuierlich von 27 °C zu Beginn des Experiments auf 29–35 °C am Tag 3 und 31–37 °C am Tag 6. An Tag 8 und 9 erreichte das Futter „Distillers-Fruit“ eine Temperatur von 50 °C unter der Oberfläche.
Die Datenerhebung erfolgte ähnlich wie in Experiment 1. Das Ende des Experiments wurde erneut eingeleitet, als die ersten Larven nach 10 bis 12 Tagen ihre Farbe veränderten, was auf das Vorpuppenstadium (6. Larvenstadium) hinwies. Die Nährstoffanalysen wurden wie in Experiment 1 beschrieben durchgeführt.

1.3.5 Ergebnisse

1.3.5.1 Vorversuche

Die Ergebnisse zeigen, dass alle Insektenstadien besonders reich an Proteobacterien, Firmicuten, Bacteriodota und Actinobacteria waren. Eine ähnliche Zusammensetzung wurde auch in Frass beobachtet, während das Ausgangsfutter eine deutlich geringere Häufigkeit von Firmicuten und Bacteroidota aufwies. Auf Gattungsebene wies das Futter die höchste Variabilität auf, während Frass und Insekten entlang der verschiedenen Entwicklungsstadien eine Homogenität aufwiesen. Die Datenanalyse hob das Vorhandensein von *Morganella spp., Salmonella spp. und Staphylococcus spp.* bei den Neugeborenen, *Enterococcus spp., Bacillus spp.* und *Enterobacter spp.* bei den Larven und *Listeria spp., Escherichia spp.* und *Streptococcus spp.* bei den adulten Fliegen hervor (Abbildung 4).

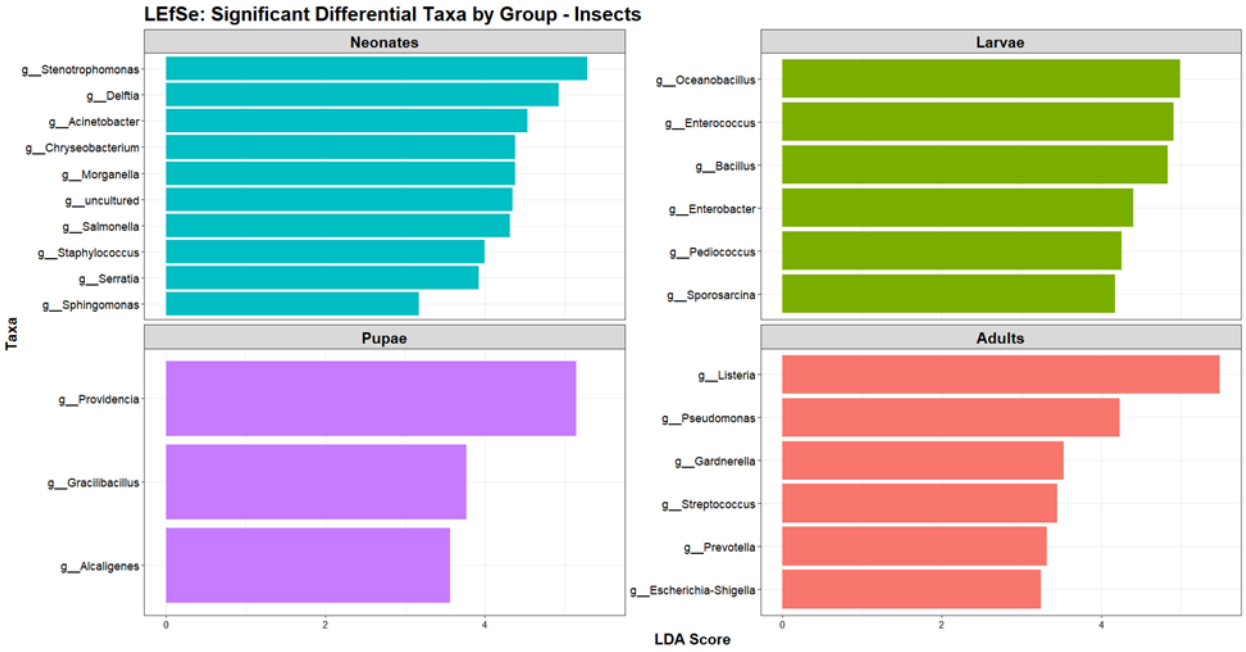

Abbildung 4: Lineare Diskriminanzanalyse (LEfSE) zur Hervorhebung mikrobieller Biomarker, die in verschiedenen Entwicklungsstadien der schwarzen Soldatenfliegen nachgewiesen wurden: Neugeborene, Larven (Starterlarven, Mastlarven, Präpuppen), Puppen und ausgewachsene Tiere.

Die Plattenzählungsanalyse ergab eine hohe Keimzahl für Insekten in allen Entwicklungsstadien. Bei TVC und *Escherichia coli* wurde jedoch ein progressiver Rückgang von den Neugeborenen bis zu den Adulten festgestellt. Andererseits war die Anzahl der Enterobacteriaceae bei den Starterlarven zu Beginn der Studie (Tag 7) signifikant höher als bei den Neugeborenen (Tag 0) und nahm von den Larven zu Beginn der Studie bis zu den adulten Tieren (Tag 38) linear ab (Abbildung 5). In keinem Entwicklungsstadium der Insekten wurden jedoch Krankheitserreger nachgewiesen.

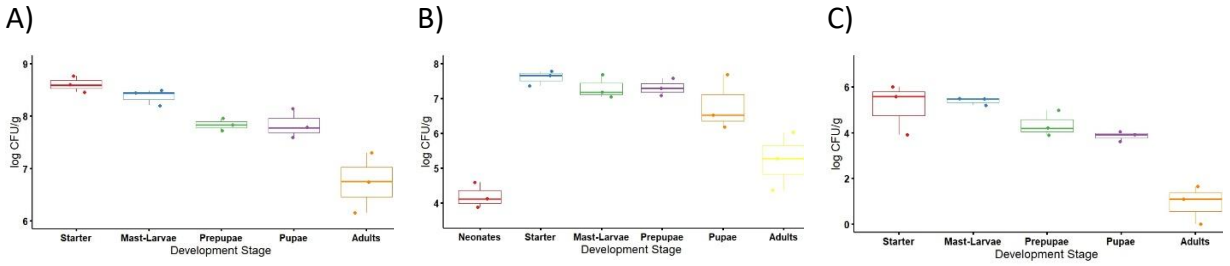

Abbildung 5: Keimzahl von Insekten in verschiedenen Entwicklungsstadien: (a) TVC, (b) Enterobacteriaceae, (c) *Escherichia coli*.

1.3.5.2 Labormaßstab Ergebnisse

Bei der Ernte nach 11 Masttagen lagen alle Versuchsmischungen in der Gewichtsentwicklung unter dem Kontrollfutter (Tabelle 6). Generell nachteilig waren Rationen mit hohem Anteil (>50%) Rübenschnitzel. Generell vorteilhaft waren geringe Anteile Rübenmelasse (steilere

Wachstumskurve), signifikante Anteile von Apfeltrester, ProtiGrain und ProtiWanze und Rationen mit ProtiGrain (erreichen Wachstumspeak früher). Die beiden Versuchsfuttermischungen F4 und F6 mit dem geringsten Proteingehalt von 15% zeigten eine sehr unterschiedliche Leistungsentwicklung.

Tabelle 6: Überlebensrate, Wachstumsparameter und Futterkonversionsraten (FCR) von *Hermetia illucens* Larven im Fütterungsversuch im Labormaßstab

Parameter	Kontrolle (CF)	F1	F2	F3	F4	F5	F6	Standardfehler	*P-Wert*
Larvenmasse, mg/Larve									
Tag 4	83.6 *ab*	86.3 *ab*	68.4 *ab*	83.7 *ab*	86.9 *ab*	91.6 *a*	64.3 *b*		
Tag 7	202 *ab*	169 *b*	123 *c*	208 *a*	192 *ab*	181 *ab*	115 *c*		
Tag 10	246 *a*	129 *b*	104 *c*	139 *b*	134 *b*	143 *b*	103 *c*		
Substratverwertung, g/g	3.24 *a*	4.72 *b*	6.82 *c*	4.33 *b*	4.34 *b*	3.88 *ab*	7.94 *d*		
Substratreduktion, g/g	42.5	42.3	41.0	41.7	39.3	46.7	36.1		
Überlebensrate (%)	60.5^{b}	82.5^{a}	78.7^{a}	81.4^{a}	83.6^{a}	80.6^{a}	79.1^{a}	1.31	<0.001
Biomasse produktion (g Frischmasse)	157	128	98	136	135	139	97	3.8	<0.001
FCR $_{DM}$	3.09^{c}	4.42^{b}	6.21^{a}	4.08^{b}	4.09^{b}	3.66^{bc}	7.19^{a}	0.213	<0.001
FCR $_{CP}$	1.29^{bc}	1.60^{b}	2.34^{a}	1.51^{b}	1.65^{b}	1.09^{c}	2.38^{a}	0.084	<0.001
FCR $_{Met}$	1.56^{b}	1.51^{b}	2.47^{a}	1.42^{b}	1.44^{b}	0.98^{c}	2.28^{a}	0.075	<0.001
FCR $_{Cys}$	4.56^{b}	4.66^{b}	6.70^{a}	4.59^{b}	4.64^{b}	3.02^{c}	5.77^{ab}	0.268	<0.001
FCR $_{Lys}$	1.08^{c}	0.79^{d}	1.71^{b}	0.76^{d}	1.17^{c}	0.75^{d}	2.08^{a}	0.052	<0.001
FCR $_{Thr}$	1.40^{bc}	1.48^{b}	2.66^{a}	1.41^{bc}	1.69^{b}	1.08^{c}	2.75^{a}	0.085	<0.001

a,b,c: unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von P<0,05.

1.3.5.3 Industriemaßstab Ergebnisse

Die Ergebnisse des Fütterungsversuches im Industriemaßstab sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Moralität lag in allen drei Rationen auf einem äußerst niedrigen Niveau, so dass die signifikant erhöhte Mortalität in Ration 1 von lediglich 1,7% vernachlässigt werden kann. Die Larvenmasse hingegen war in den Rationen 2 und 3 signifikant höher als in der Ration 1. Dies spiegelte sich auch in einer signifikant höheren Proteinproduktion dieser beiden Rationen wider. Die Futterkonversionskoeffizienten zeigten keine Unterschiede zwischen den drei Rationen, während der

Frass-Rückstand mit über 42% in Ration 1 höher als in den beiden Ration 2 (34,2%) und 3 (36,7%) war.

Tabelle 7: Leistungsparameter, Futterkonversionskoeffizienten und Frass Rückstände von *Hermetia illucens* Larven im Fütterungsversuch im Industriemaßstab

Parameter	Ration 1	Ration 2	Ration 3	Standardfehler	*P-Wert*
Mortalität [%]	1.7[a]	0[b]	0[b]	0.6	<0.05
Larvenmasse (g Trockenmasse)	2693[b]	3301[a]	3401[a]	55,4	<0.001
Rohprotein-Produktion (g)	1226[b]	1483[a]	1549[a]	39,3	<0,01
FCR $_{DM}$	4,70	4,59	4,57	0,127	n.s.
FCR $_{CP}$	2,03	1,84	2,04	0,065	n.s.
Frass Rückstand (% Trockenmasse)	42,4[a]	34,2[b]	36,7[b]	0,88	<0.01

a,b,c: unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von P<0,05.

1.3.6 Ergebniseinordnung

Bei den sechs Testfuttermischungen im Fütterungsversuch im Labormaßstab wurden, bestanden jeweils 20% der Futtermischung aus Schweinefutter und Weizenkleie und die variablen 80 % wurden in vier der Versuchsfuttermischungen mit je zwei Komponenten ergänzt. Zwei Mischungen bestanden aus 3 Komponenten, bei denen jeweils eine der anderen vier Mischungen durch eine geringe Zugabe von Rübenmelasse ergänzt wurde (F1/F3 und F6/F4). Dies ist bedingt durch den extrem hohen Zuckergehalt und die flüssig-klebrige Konsistenz der Rübenmelasse, was sich für die Larvenmast weniger gut eignet.

Die Testfutter sollten vom Versuchskonzept her einen möglichst vergleichbare Proteinanteile (isonitrogen) und ähnliche Energiewerte (isoenergetisch) aufweisen. Aufgrund von produktionsbedingten Nährwertschwankungen ergaben sich nachträglich Varianzen zwischen den zu Beginn des Experiments vorliegenden Nährwerten und den abschließenden Analysewerten.

Die Analyse der Versuchsfutter ergab erhebliche Abweichungen der analysierten Rohproteingehalte von den erwarteten (berechneten) Rohproteingehalten. Während rund 2% (relativ) geringere Gehalte bei den Erwartungswerten methodisch bedingt sind, weil diese auf Basis von Rohproteingehalten, die nach Kjehldahl bestimmt wurden, berechnet wurden, und das Futter nach Dumas analysiert wurde, sind darüber hinaus gehende Abweichungen insbesondere den zugelegten Nebenprodukten zuzuordnen (Tabelle 4). Es ist festzustellen, dass der Proteingehalt maximal 20.4% (F4) und minimal 15.7% (F5) betrug. Interessanterweise, ist das Muster vom Rohprotein zwischen den Behandlungen nicht in den Aminosäuregehalten reflektiert. So finden sich die niedrigsten Lysingehalte in den TF 1 und 3 (0.52 bei 19,4% RP; 0.50% bei 19,2% RP) während F6 mit 16.4% RP mit 0.78% Lys identische Lys-Gehalte wie F4 (20.4% RP) oder das Kontrollfutter

(18.4% RP) aufwies. Bei den schwefelhaltigen Aminosäuren Methionin plus Cystein finden sich die höchsten Gehalte im Kontrollfutter und das für das Lysin beschriebene Muster ist nicht erkennbar.

1.4 Teilprojekt 3

1.4.1 Vorversuche

Für die Fütterung der pazifischen Weissbeingarnele wurde zunächst anhand einer Literaturrecherche und in Abstimmung mit dem Futtermittelhersteller der Oceanloop Munich GmbH und bestehender Praxiserfahrungen der Anteil an Fischmehl, bzw. Fischmehlprotein, eruiert, der zur Substitution durch Larvenmehl der Schwarzen Soldatenfliege am sinnvollsten erscheint (10% Insektenmehl der Schwarzen Soldatenfliege, teilentfettet, Testfettgehalt < 5%). Anschliessend wurde eine Versuchsfuttermischung mit einem 10%-igen Anteil von Insektenmehl der Schwarzen Soldatenfliege, welches von der Hermetia Baruth GmbH bereitgestellt wurde, in einem Vorversuch bei der Oceanloop Munich GmbH unter realistischen Produktionsbedingungen in einer Kreislaufanlage für die Weißbeingarnele (*Penaeus vannamei*; Abbildung 6) getestet. In zwei Vorversuchen wurden Effekte auf das Garnelenwachstum, aber insbesondere auch in Bezug zum Biofilter, dem „Kernstück“ einer jeden Kreislaufanlage, bewertet. Der erste Vorversuch startete am 29. September 2022 mit dem Besatz der Larven. Ein zweiter Besatz erfolgte am 04. Oktober 2022. Beide Vorversuche wurden über einen Zeitraum von 6 Monaten durchgeführt. In beiden Vorversuchen wurde festgestellt, dass die Garnelen gut wachsen und keine höheren Mortalitäten im Vergleich zum bisherigen Futter entstehen. Auch ein Effekt auf die Wassertrübung und damit auf den Biofilter der Anlage als ein wesentliches Entscheidungskriterium für die Durchführung der Hauptversuche wurde nicht beobachtet.

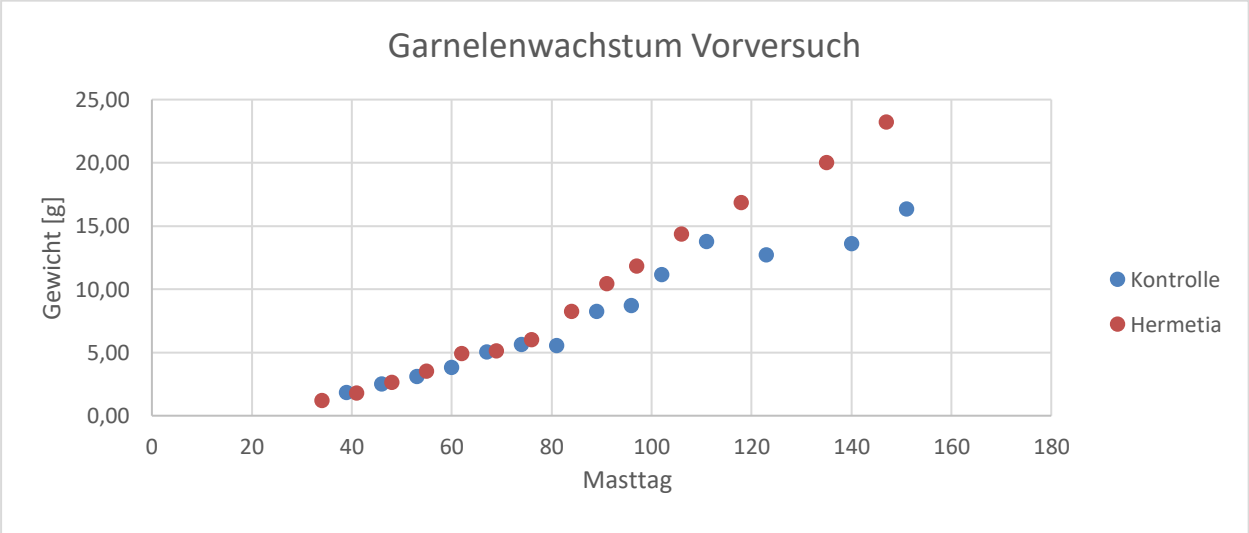

Abbildung 6: Wachstum der Weißbeingarnelen (*Penaeus vannamei*) in den beiden Vorversuchen

Nach den erfolgreichen Ergebnissen der Vorversuche wurden die Hauptversuche gestartet, wobei keine Anpassungen in der Futterformulierung im Vergleich zu den Vorversuchen notwendig war.

1.4.2 Hauptversuche

Fütterungsversuche im laufenden Produktionsbetrieb zu integrieren und mit wissenschaftlich notwendiger Genauigkeit durchzuführen, stellt immer eine gewisse Herausforderung dar. Die Garnelenzucht Oceanloop Munich produziert in geschlossenen Kreislaufanlagen pazifische Weißbeingarnelen (*P. vannamei*), die weltweit mengenmäßig am meisten produzierte Garnele. In der Anlage zirkuliert das Haltungswasser kontinuierlich und wird durch die Wasseraufbereitung, bestehend aus Trommelfilter, Abschäumung, Biofilter, Denitrifikationsreaktor und Entgasung, gereinigt, wodurch eine Wasseraustauschrate von nur 1–3 % pro Tag ermöglicht wird. Darüber hinaus existieren weitere Eintragssysteme für technischen Sauerstoff, Pufferlösungen und Wärme, um das Haltungswasser optimal auf die Bedürfnisse der Garnelen einzustellen. Der Sauerstoffgehalt in den Mastbecken beträgt 5–7 mg/L, der pH-Wert 7,4–8,3 und die Temperatur 29–31 °C. Die Fütterung erfolgt stündlich über Futterautomaten und orientiert sich an einem Futtermodell. Die Futtermenge wird täglich nach Bedarf angepasst, sodass Futterreste in den Becken zu jeder Zeit vermieden werden. Kommerzielle Anlagen sind nicht auf möglichst viele Versuchsreplikate und direkt parallele Produktion ausgerichtet. In der Anlage sind aber geeignete Kapazitäten vorhanden, um Kontroll- und Versuchsfutter parallel zu füttern. Daher wurden vier zeitliche Replikate durchgeführt. In den Versuchsfuttermischungen wurden 10 % des Fischmehls durch Insektenmehl der Schwarzen Soldatenfliege ersetzt, ohne weitere Anpassungen im Nährstoffprofil vorzunehmen. Die Zusammensetzung der Kontrollfuttermischung ist in Tabelle 8 dargestellt. Im Versuchsfutter hatte das Fischmehl nach dem teilweisen Austausch mit dem Insektenmehl noch einen Anteil von 11 % (110 g/kg). Zudem wurde der Gehalt an Krillmehl erhöht, um die Differenz des Proteingehalts von Fischmehl und Insektenmehl zu kompensieren.

Daraus ergab sich, dass zwar die Rohproteingehalte annähernd gleichblieben, die Versuchsfutter aber z. B. 0,10–0,13 %-Punkte niedrigere Methionin- + Cystein-, 0,07–0,08 %-Punkte niedrigere Threonin-, 0,11–0,14 %-Punkte niedrigere Arginin-, 0,05–0,07 %-Punkte niedrigere Valin- + Isoleucin- und 0,19 %-Punkte niedrigere Leucingehalte aufwiesen, während Lysin nur marginal betroffen war. Innerhalb der essenziellen Aminosäuren lagen nur die Tyrosingehalte um 0,07 % höher. Diese Effekte sind hauptsächlich damit zu erklären, dass ein höherer Teil des Rohproteins im Insektenmehl-Futter durch Chitin im Larvenmehl zu erklären ist, während die Aminosäurekonzentration geringer ist. Beide Futter wurden in zwei verschiedenen Pelletgrößen (1,6 und 2,2 mm Durchmesser) extrudiert, um der zunehmenden Größe der Garnelen gerecht zu werden.

Nach ihrer Quarantänezeit wurden je 12.500 Garnelen (Postlarven im Alter von 10 Tagen) mit gleicher Größe und gleichem Gewicht (im Schnitt über alle vier Durchgänge: 3,74 mg) in die jeweiligen Abteile eingesetzt. Verfüttert wurden das normal genutzte Standardfutter als Kontrollfutter und das Versuchsfutter mit gleicher ernährungsphysiologischer Zusammensetzung. Die Fütterungsmenge betrug zu Beginn der Versuche 5,9 % der Biomasse und am Ende 3,8 % der Biomasse. Die Fütterungsdauer (Masttage) richtete sich nach der Größe der Garnelen und den

betriebswirtschaftlichen Umständen. Am Ende der Mastperiode wurden beide Abteile parallel abgefischt, sodass die Anzahl Masttage identisch war.

Tabelle 8: Zusammensetzung der Kontrollfuttermischungen

Komponente	Kontrollfutter [g/kg]
Weizennachmehl	320
Fischmehl	280
Triticale	50
Rapsschrot	50
Sonnenblumenschrot	50
Krillmehl	50
Weizenkeime	50
Rapssaat	40
Futterkalk	35
Fischöl	25
Lecithin	5

Die Nährwertangaben für die beiden Pelletgrößen 1,6 und 2,2 mm Durchmesser sind in Tabelle 9 dargestellt. Die Nährwertangaben unterscheiden sich leicht zwischen beiden Pelletgrößen, wobei keine Unterschiede zwischen Kontroll- und Versuchsfutter vorlagen.

Tabelle 9: Nährstoffzusammensetzung für das Kontroll- und Versuchsfutter in den beiden Pelletgrößen 1,6 mm und 2,2 mm

Nährstoff	Pelletgröße	
	1,6 mm	2,2 mm
Rohprotein (g/kg)	400	360
Rohfett (g/kg)	100	95
Rohasche (g/kg)	103	100
Rohfaser (g/kg)	25	30
Bruttoenergie (MJ/kg)	19,3	18,0

Zu Beginn eines jeden Durchgangs wurden ca. 200 g Garnelen als Initialgruppe für die spätere Aminosäurebestimmung gefangen und eingefroren. Die Mastdauer pro Durchgang betrug im Mittel 97 ± 8,5 Tage mit einer Spannbreite von 83–105 Tagen. In regelmäßigen Abständen (alle 1–2 Wochen) wurden Stichproben aus jeder Gruppe gewogen und anschließend die Anzahl Tiere ausgezählt, um das Wachstum zu dokumentieren. Am Ende eines jeden Durchgangs wurden jeweils 1 kg Garnelen aus dem Kontroll- und dem Versuchsbecken gefangen und für die spätere Aminosäurebestimmung durch Evonik eingefroren.

Am Ende des Versuchs wurden sämtliche Garnelen aus den Initial-, Kontroll- und Versuchsgruppen gefriergetrocknet und vermahlen. Anschließend wurden die Aminosäurezusammensetzungen aller Kontroll- und Versuchsfutter in beiden Pelletgrößen im Duplikat und aller beprobten Garnelen (Initial-, Kontroll- und Versuchsgruppen) in jeweils vier Replikaten bei Evonik bestimmt. Die erhobenen Daten (Wachstum, Futterverwertung und Mortalität) wurden genutzt, um Produktivitätskennzahlen und somit die Performance der beiden Futter zu berechnen. Diese beinhalteten u. a. die folgenden Kennzahlen:

1.4.3 Ergebnisse

Die vergleichende Modellanalyse zum Wachstumsverlauf ergab, dass der Effekt der Fütterungsgruppe (Kontrolle vs. Insektenmehl) vernachlässigbar war (sowohl interaktiv als auch additiv) und die zeitliche Funktion allein die Daten hinreichend und signifikant gegenüber einem Null-Modell erklärt (siehe Abbildung 7). Über die vier Durchgänge wurde kein Effekt der Fütterung auf die Mortalität gefunden ($p = 0{,}229$). Während sich für die Futterverwertung nur ein Trend zugunsten der BSFL-gefütterten Gruppe ergab ($p = 0{,}109$), wurde für die spezifische Wachstumsrate pro Tag ein signifikant positiver Effekt ($p = 0{,}036$) festgestellt. Die Erntegewichte der BSFL-gefütterten Garnelen waren signifikant höher als die der Kontrollgruppe ($p = 0{,}003$), die Proteingehalte der geernteten Garnelen beider Gruppen unterschieden sich jedoch nicht ($p = 0{,}153$). Die entsprechenden Daten sind in Tabelle 10 dargestellt. Die gesamte Mastdauer betrug zwischen 83 und 105 Tage und im Mittel 97,8 Tage. Das Anfangsgewicht ist bei beiden Gruppen identisch, da sie am gleichen Tag in die Becken eingesetzt wurden und entsprechend gleich schwer waren. Die Mastdauer ist ebenfalls identisch für beide Gruppen, da sie am gleichen Tag abgefischt wurden.

Tabelle 10: Übersicht über die wichtigsten produktionsrelevanten Parameter. Im individuellen Endgewicht sind nur die Bereiche angegeben und es wurde wegen der verschiedenen Mastdauern und damit uneinheitlichen Abfischzeitpunkte kein Mittelwert gebildet. Bei Mortalität, FCR, SWR und Gewichtszunahme handelt es sich um Mittelwerte ± Standardabweichung (N = 4); SWR: spezifische Wachstumsrate

Parameter	Kontrolle	Insektenmehl
individuelles Endgewicht (g)	22,4 ± 4,4	24,0 ± 4,2
Mortalität (%)	53 ± 20	51 ± 19
Futterverwertung (g Futter/g Zuwachs)	1,56 ± 0,15	1,52 ± 0,18
SWR (%/Tag)	9,16 ± 0,25	9,24 ± 0,25
Gewichtszunahme (g/Tag)	0,23 ± 0,029	0,25 ± 0,026

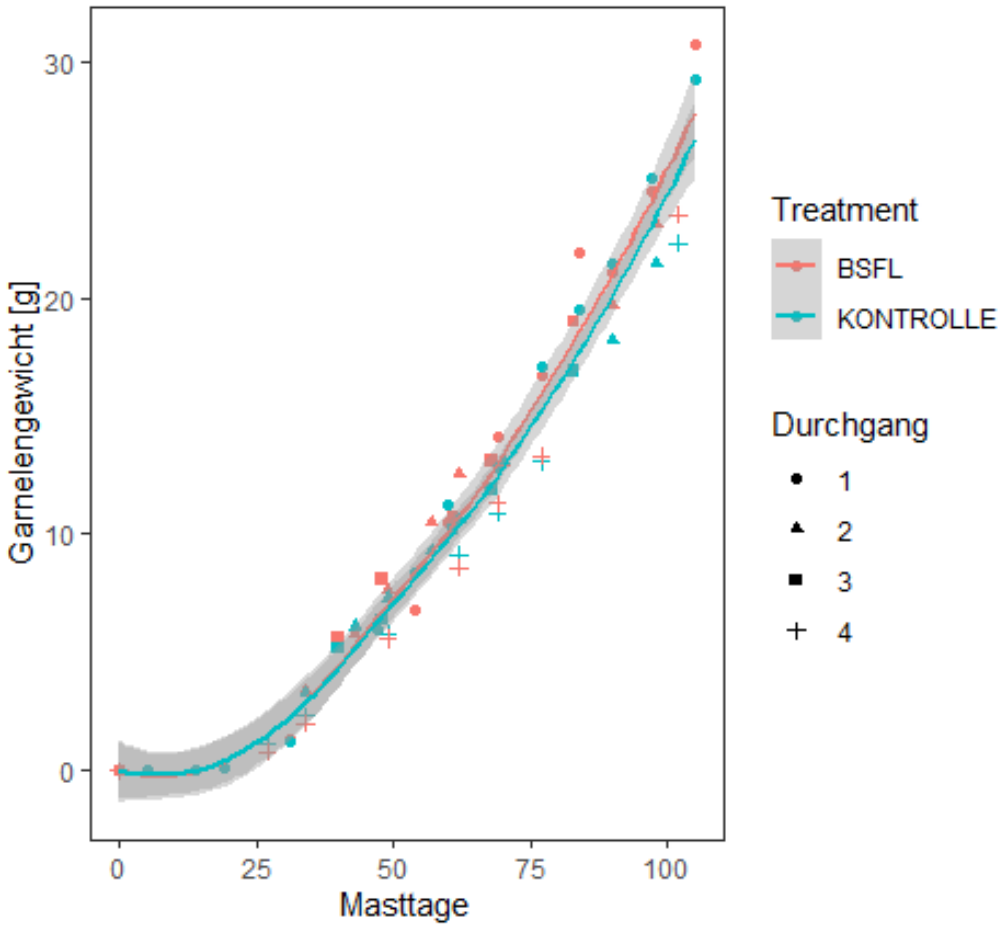

Abbildung 7: Darstellung des Wachstumsverlaufs der Insektenmehl-gefütterten (BSFL, rot) gegenüber den kontrollgefütterten (grün) Garnelen über die Zeit in den vier einzelnen Durchgängen (Symbole)

Die Aminosäuregehalte in den Versuchsfuttermischungen waren geringer als im Kontrollfutter (Tabelle 11). In den Aminosäureprofilen der abgefischten Shrimps zeigte sich, dass viele BSFL-gefütterte Tiere höhere Aminosäuregehalte in der Trockensubstanz aufwiesen. Bei Lysin, Arginin, Leucin und Glycin waren die Gehalte am Ende der Mast bei BSFL-gefütterten Shrimps signifikant ($p < 0,05$) höher als bei den Anfangstieren und den kontrollgefütterten Tieren. Bei Tyrosin wiesen sowohl die Kontroll- als auch die BSFL-gefütterten Tiere einen signifikant höheren Wert auf als die Anfangstiere (siehe Tabelle 12).

Tabelle 11: Rohproteingehalt und Aminosäureprofile der Kontroll- und Insektenmehl-Versuchsfuttermischungen, jeweils für die beiden Pelletgrößen 1,6 mm und 2,2 mm (Angaben in %)

	Kontrolle		Insektenmehl-Futter	
Nährstoff / Aminosäure	**Pelletgröße 1,6 mm**	**Pelletgröße 2,2 mm**	**Pelletgröße 1,6 mm**	**Pelletgröße 2,2 mm**
Rohprotein	39,7	39,2	38,9	38,3
Methionin	1,05	1,04	1,01	0,97
Cystein	0,54	0,54	0,49	0,48
Methionin + Cystein	1,59	1,58	1,49	1,45
Lysin	2,26	2,26	2,29	2,23
Threonin	1,51	1,50	1,45	1,42
Tryptophan	0,45	0,45	0,46	0,46
Arginin	2,22	2,26	2,13	2,11
Isoleucin	1,51	1,51	1,47	1,44
Leucin	2,70	2,67	2,52	2,47
Valin	1,92	1,90	1,88	1,84
Histidin	1,05	1,05	1,02	0,99
Phenylalanin	1,56	1,56	1,47	1,46
Tyrosin	1,14	1,16	1,21	1,22
Glycin	2,28	2,23	2,14	2,07
Serin	1,65	1,64	1,52	1,51
Prolin	2,01	1,98	1,93	1,93
Alanin	2,10	2,06	2,07	2,02
Asparagin	3,13	3,19	3,04	3,02
Glutamin	5,57	5,67	5,37	5,36

Tabelle 12: Rohproteingehalt und Aminosäureprofile der Shrimps jeweils vor Fütterungsbeginn (Initial) und am Ende nach Fütterung und Abfischen der Kontroll- und BSFL-gefütterten Tiere (N = 4; Angaben in %)

	Initial	Kontrolle	Insektenmehl
Rohprotein	71,9 ±0,91	75,7 ± 2,63	77,55 ±2,32
Methionin	1,58 ± 0,04	1,53 ± 0,04	1,68 ± 0,10
Cystein	0,79 ± 0,02	0,76 ± 0,02	0,83 ± 0,05
Methionin + Cystein	2,36 ± 0,06	2,30 ± 0,06	2,51 ± 0,15
Lysin	4,72 ± 0,09[a]	4,78 ± 0,09[a]	5,10 ± 0,19[b]
Threonin	2,56 ± 0,05	2,50 ± 0,05	2,67 ± 0,16
Tryptophan	0,75 ± 0,02	0,76 ± 0,01	0,78 ± 0,01
Arginin	5,38 ± 0,17[a]	5,62 ± 0,08[a]	6,13 ± 0,32[b]
Isoleucin	2,69 ± 0,06	2,64 ± 0,05	2,85 ± 0,16
Leucin	4,65 ± 0,09[a]	4,68 ± 0,07[a]	4,97 ± 0,21[b]
Valin	3,10 ± 0,06	3,03 ± 0,06	3,22 ± 0,19
Histidin	1,60 ± 0,05	1,52 ± 0,03	1,59 ± 0,09
Phenylalanin	2,89 ± 0,07	2,82 ± 0,06	2,99 ± 0,17
Tyrosin	2,32 ± 0,06[a]	2,64 ± 0,06[b]	2,63 ± 0,08[b]
Glycin	4,37 ± 0,17[a]	4,83 ± 0,27[a]	5,53 ± 0,25[b]
Serin	2,65 ± 0,05	2,62 ± 0,04	2,77 ± 0,16
Prolin	4,38 ± 0,21	4,66 ± 0,24	4,66 ± 0,36
Alanin	4,24 ± 0,16[a, b]	4,13 ± 0,13[a]	4,52 ± 0,14[b]
Asparagin	6,59 ± 0,13	6,49 ± 0,13	6,98 ± 0,39
Glutamin	9,83 ± 0,16	9,49 ± 0,21	10,3 ± 0,58

[a, b] Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (Irrtumswahrscheinlichkeit 5%)

1.4.4 Ergebniseinordnung

Die allgemeine Produktionsleistung unterschied sich nicht zwischen den beiden Gruppen (Mortalität, Futterverwertung) bzw. war in der Insektenmehl-Gruppe verbessert (Wachstum). Im Vergleich zu bislang publizierten Ergebnissen zur Fütterung von *P. vannamei* aus kontrollierten

Laborversuchen [1234] schneiden die Ergebnisse dieses Praxisversuchs ähnlich ab. Die Mortalität war in beiden Gruppen sehr ähnlich, im Mittel aber eher im oberen Bereich der von publizierten Studien berichteten Mortalitäten. Überlebensraten (100 % – Überlebensrate = Mortalität) von 86,7–95,6 % wurden von Cummins et al. [1] berichtet während Chen et al. [2] sogar noch höhere Überlebensraten von über 95 % beobachtete. Nur He und Kollegen [4] berichteten über ähnliche Mortalitäten (26,7–62,7 %), wie sie in dieser Studie beobachtet wurden. Dort waren die Überlebensraten in der Kontrolle und in einer Gruppe mit geringem Anteil an BSFL im Futter (25 %) deutlich besser im Vergleich zu 100 %-igem Fischmehlersatz durch BSFL, wo nur 26,7 % der Garnelen überlebt haben [4]. Wichtig zu bedenken ist hier jedoch noch die Mastdauer. Keine der oben genannten Studien hat den kompletten Mastzyklus von Besatzgarnelen bis zum Abfischen der vermarktungsfähigen Garnelen umfasst, sondern sie dauerten nur zwischen 4 [3] und 9 Wochen [1]. Betrachtet man die Mortalitäten der hier vorliegenden Studie unter Praxisbedingungen, können sie als gut eingeschätzt werden, auch wenn in einem der Durchgänge eine erhöhte Sterberate festgestellt wurde. Zwischen der Kontrolle und dem Insektenmehl-Futter wurde kein Unterschied festgestellt.

Die spezifische Wachstumsrate (SWR, %/Tag) ist über das gesamte Experiment, unabhängig von der Gruppe oder einzelnen Durchgängen gemittelt, sehr hoch (Kontrolle: 9,16 ± 0,25 %/Tag; BSFL: 9,24 ± 0,25 %/Tag). Sie befindet sich im Vergleich zu anderen Studien deutlich oberhalb der jeweilig publizierten Bereiche (3,06–4,07 %/Tag [2]; 4,15–4,34 %/Tag [2]; 6,01–7,53 %/Tag [3]) und kann somit, besonders betrachtet über den gesamten Produktionszeitraum, als sehr gut bewertet werden. Dies kann v. a. mit der verwendeten Genetik begründet werden, die sich durch ein sehr hohes Wachstumspotenzial auszeichnet. Die SWR nahm bei Richardson et al. [4] mit zunehmendem Anteil an Insektenmehl sogar signifikant zu und es wurde kein Plateau mit wieder abnehmenden Werten im Wachstum beobachtet, wie bei den übrigen Studien, welche klare negative Effekte zeigten, wenn der Anteil an Insektenmehl im Futter zu hoch war oder gar

---

[1] Cummins VC Jr, Rawles SD, Thompson KR, et al.: Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal as partial or total replacement of marine fish meal in practical diets for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Aquaculture 2017; 473: 337–44. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2017.02.022

[2] Chen Y, Chi S, Zhang S, et al.: Evaluation of the dietary black soldier fly larvae meal (*Hermetia illucens*) on growth performance, intestinal health, and disease resistance to *Vibrio parahaemolyticus* of the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Front Mar Sci 2021; 8: 706463. DOI: 10.3389/fmars.2021.706463.

[3] Richardson A, Dantas-Lima J, Lefranc M, Walraven M: Effect of a black soldier fly ingredient on the growth performance and disease resistance of juvenile Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Animals 2021; 11: 1450. DOI: 10.3390/ani11051450

[4] He Y, Liu X, Zhang N, et al.: Replacement of commercial feed with fresh black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Aquaculture Nutrition 2022. DOI: 10.1155/2022/9130400

zu 100 % Black Soldier Fly-Larven verfüttert wurden [4]. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass die Larven frisch und nicht wie im vorliegenden Versuch in extrudierter Form verfüttert wurden. Ähnlich verhält es sich mit den in diesem Experiment beobachteten Futterverwertungen. Beide Gruppen zeigten sehr nahe beieinander liegende Futterverwertungen mit 1,56 g Futter pro g Zuwachs in der Kontrolle und 1,52 g Futter pro g Zuwachs in der Insektenmehl-Versuchsgruppe. Dies liegt etwas unterhalb des für 2020 prognostiziertem globalen Futterverwertung für Garnelen von 1,6 [5]. Im Vergleich zu Studien mit Insektenmehl im Futter von *P. vannamei* ist die Futterverwertung aber deutlich niedriger als die von Cummins et al. [1] berichteten Futterverwertungen von 2,01 (7 % Insektenmehl) bis hin zu 4,51 (36 % Insektenmehl). Ähnliche aber doch leicht höhere Futterverwertungen im Vergleich zu unserer Studie wurden von Chen et al. [2] erreicht und schwankten zwischen 1,55 bei 20 % Fischmehlproteinersatz durch BSFL-Protein und 1,7 bei 30 % Fischmehlproteinersatz durch BSFL-Protein. Etwas niedrigere Futterverwertungen werden von Richardson et al. [3] berichtet. Diese sanken mit zunehmendem BSFL-Anteil im Futter von 1,42 auf 1,23 und lagen damit signifikant unter der Kontrolle (1,70) [3].
Eine niedrige Futterverwertung hat einen sehr direkten Einfluss auf die Nachhaltigkeit, sowohl auf die finanzielle als auch die ökologische Nachhaltigkeit. Die Futterverwertung von 1,6 auf 1,2 zu senken bedeutet direkt eine Reduzierung der Futterkosten um 25 % bei identischem Futterpreis und auch eine direkte Reduktion von Nährstoffemissionen (z. B. Stickstoff und Phosphor), die jedoch zusätzlich von der Verdaulichkeit des Futters und der Nährstoffretention im Tier beeinflusst wird. Generell gelten Tiere niedrigerer trophischer Stufe (also z. B. herbivore Tiere) als finanziell und ökologisch nachhaltiger und stabiler produzierbar, aber nicht unbedingt profitbringender gegenüber Tieren höherer trophischer Stufen (z. B. karnivore Tiere) [6]. Die pazifischen Weißbeingarnelen sind mit einer relativ niedrigen trophischen Stufe von 2,5 [6] eher nachhaltig in der Produktion. Andererseits sind die Futterverwertungen aufgrund der Art und Weise der Futteraufnahme bei Garnelen höher als bei Fischen. Fische schlucken Pellets meist als Ganzes runter und eine eventuelle mechanische Zerkleinerung findet im Schlund oder oft auch gar nicht statt. Garnelen hingegen „knabbern“ an den Futterpellets, weswegen es bei ihnen zu einem sogenannten „sloppy feeding“ kommt, wobei es, je nach Pelletstabilität und Vermahlungsgrad der Futterkomponenten (je feiner, desto stabiler das Pellet), zu Partikelbildung und entsprechendem Abrieb kommt. Schlechte mechanische Pelleteigenschaften erhöhen somit nicht nur die Futterkosten durch weniger Futteraufnahme bzw. mehr Abrieb, sondern steigern auch die Notwendigkeit, das Wasser in der Kreislaufanlage mit Trommel- und Biofilterfilter aufzubereiten. Im Versuch wurden die Pelleteigenschaften nicht untersucht; Beobachtungen an den Becken legen aber nahe, dass es zwischen den beiden Futtervarianten keine grundlegenden Unterschiede gab.

---

[5] Tacon AGJ, Metian M: Feed matters: satisfying the feed demand of aquaculture. Rev Fish Sci Aquac 2015; 23: 1–10. DOI: 10.1080/23308249.2014.987209.

[6] Neori A, Nobre AM: Relationship between trophic level and economics in aquaculture. Aquacult Econ Manag 2012; 16: 40–67. DOI: 10.1080/13657305.2012.649046.

2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des Projekts stellen die Positionen Personal- und Materialkosten die zentralen Bestandteile des zahlenmäßigen Nachweises dar. Personalkosten umfassen insbesondere den zeitlichen Aufwand für die Projektkoordination am FiBL Deutschland e.V. in Höhe von 332.160,21 €. Die Reiskosten am FiBL Deutschland e.V. beliefen sich auf 2.943,63 € für die Teilnahme an Projekt- und Konsortialtreffen, NewFoodSystems Days sowie die Durchführung des Wissenstransfers. Für den Unterauftrag an das FiBL Schweiz für die Planung, praktische Durchführung der Fütterungsversuche, die Datenauswertung und Veröffentlichung sowie Teilnahme an Projekt- und Konsortialtreffen sowie wissenschaftlichen Tagungen sind insgesamt 262.418,63 € angefallen. Die urspüngliche Kostenplanung wurde damit eingehalten.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren sowohl inhaltlich notwendig als auch im Hinblick auf Umfang und Aufwand angemessen. Sie orientierten sich an den im Antrag definierten Zielen und Maßnahmen und waren entscheidend für die planmäßige Umsetzung der Projektbausteine.

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Teilprojekt 1 gewonnenen Erkenntnisse über die Nährstoffbedürfnisse heranwachsender Larven der Schwarzen Soldatenfliege bilden die Grundlage für die Weiterentwicklung spezialisierter Futtermittel für die Insektenzucht. Die Hermetia Baruth GmbH nutzt diese Ergebnisse gezielt, um die Zusammensetzung der Junglarven-Futtermischung im Produktionsbetrieb bedarfsgerecht anzupassen. Ziel ist es, ein möglichst effizientes Wachstum der Junglarven zu fördern und gleichzeitig den Einsatz von Substraten zu minimieren. Durch die datenbasierte Feinabstimmung der Nährstoffzusammensetzung können Futterverwertung und Wachstumsraten verbessert, Ressourcen geschont und die Wirtschaftlichkeit der Produktion nachhaltig gesteigert werden.
Die im Rahmen von Teilprojekt 2 gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass durch gezielte Anpassungen in der Fütterung und die Entwicklung effizienterer Futtermischungen die Insektenzucht deutlich optimiert werden kann. Dabei wurde deutlich, dass sich Nebenprodukte aus der Lebensmittel- und Futtermittelproduktion ressourcenschonend und wirtschaftlich sinnvoll einsetzen lassen. Besonders effektiv ist dies, wenn die eingesetzten Nebenströme entsprechend ihrer physikalischen Eigenschaften gezielt kombiniert werden. So kann eine ausgewogene Substratstruktur geschaffen werden, die sowohl das Wachstum der Larven unterstützt als auch den Materialeinsatz optimiert. Auf diese Weise lässt sich die Produktion effizienter gestalten und zugleich das Potenzial neuer Anwendungen und Märkte für Insekten als alternative Proteinquelle weiter erschließen.
Die Ergebnisse des Teilprojekte 3 zeigen deutlich, dass das eingesetzte Mehl aus der Schwarzen Soldatenfliege Fischmehl in der Fütterung teilweise ersetzen kann, ohne die Wachstumsleistung

der Tiere zu beeinträchtigen. Damit bestätigt sich das Potenzial von Insektenmehl als nachhaltige und zukunftsfähige Proteinquelle in der Tierernährung. Trotz derzeit höherer Produktionskosten bietet regional erzeugtes Insektenmehl ökologische Vorteile gegenüber konventionellen Proteinquellen, deren Umweltfolgen bislang nicht im Preis berücksichtigt sind.
Insgesamt haben die Ergebnisse und Erfahrungen aus dem Projekt dazu beigetragen den Einsatz von Insektenmehl der Schwarzen Soldatenfliege als Futtermittel in der Tierernährung zu steigern.

5. Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind während des Projektverlaufs keine relevanten Ergebnisse von dritter Seite bekanntgeworden.

6. Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

G. Rossi, F. Schindler, D. K. Ramakrishnan, A. Abdelfattah, O. Schlüter (2026). Evolution of bacterial microbiome in black soldier fly along developmental stages: a pilot-scale analysis. Journal of Insects as Food and Feed (in preparation).

G. Rossi, F. Schindler, D. K. Ramakrishnan, A. Abdelfattah, O. Schlüter (2026). Evolution of bacterial microbiome in black soldier fly along developmental stages: a pilot-scale analysis. Journal of Insects as Food and Feed (in preparation).

C. Sandrock, G. Rossi, J. Wohlfahrt, M. Wittwer, F. Schindler, L. Rossi Ribeiro, T. Stadtlander, A. Lemme, J. Kowalczyk, A. Abdelfattah, O. Schlüter, C. Lambertz (2025) Screening of co-products from feed and food production for black soldier fly larval performance, body composition across different production scales. Animal (eingereicht).

G. Rossi, J. Wohlfarth, C. Sandrock, F. Schindler, L. Rossi Ribeiro, O. Schlüter, J. Kolwalczyk, A. Lemme, C. Lambertz (2025). Side-stream valorisation for black soldier fly larvae production: impact on rearing performences and microbiological safety. Towards New Food Systems-Konferenz, Berlin, Deutschland, 28.-30.10.2025 (Vortrag).

O. Schlüter (2025). Aspekte der zirkulären Bioökonomie in der Lebensmittelproduktion: Neue Konversionskonzepte und ausgewählte Beispiele. Towards New Food Systems-Konferenz, Berlin, Deutschland, 28.-30.10.2025 (Vortrag).

C. Sandrock, G. Rossi, J. Wohlfahrt, M. Wittwer, F. Schindler, L. Rossi Ribeiro, T. Stadtlander, A. Lemme, J. Kowalczyk, A. Abdelfattah, O. Schlüter, C. Lambertz (2025) Comprehensive screening of different mixtures of agricultural by-products for black soldier fly larval performance, body

composition and microbial landscapes across production scales. 76. Jahrestagung der European Federation of Animal Science (EAAP), Innsbruck, Österreich, 25.-29.08.2025, p575 (Vortrag).

C. Lambertz, C. Sandrock, J. Wohlfahrt, T. Stadtlander, F. Schindler, S. Brosthaus, M. Hardick, A. Lemme, J. Kowalczyk, K. Deininger, G. Rossi, O. Schlüter (2025) Sustainable and resilient cultivation of insects for an innovative use in feed and food production (reKultI4Food). Workshop – Closing the loop: circularity and alternative proteins in food and feed, InsectsPlus, Cloppenburg, 12.-14.05.2025 (Vortrag).

G. Rossi, A. Abdelfattah, F. Schindler, O. Schlüter (2025). Microbial dynamics throughout the black soldier fly life cycle: a pilot scale investigation for feed safety purposes. InsectsPlus, Cloppenburg, 12.-14.05.2025 (Poster).

T. Stadtlander, K. Deininger, C. Sandrock, F. Schindler, B. Wecker, J. Wohlfahrt, A. Lemme, C. Lambertz (2025) Larven-Mehl der schwarzen Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) eignet sich für die Fütterung der Weißbeingarnele (*Penaeus vannamei*) unter Praxisbedingungen in einer modernen Kreislaufanlage. Ernährungs Umschau, 2025, 72(8): AP44-52.

C. Sandrock, K. Deininger, F. Schindler, B. Wecker, G. Rossi, J. Wohlfahrt, A. Lemme, C. Lambertz, T. Stadtlander (2025) Larval meal of the black soldier fly (Hermetia illucens) is suitable for feeding the white leg shrimp (Litopenaeus vannamei) under practical conditions in a modern recirculation system. 76. Jahrestagung der European Federation of Animal Science (EAAP), Innsbruck, Österreich, 25.-29.08.2025, p762 (Vortrag).

C. Sandrock, J. Wohlfahrt, T. Stadtlander, F. Schindler, M. Hardick, M. Terranova, C. Lambertz, A. Lemme (2024) Evaluating amino acid requirements of neonatal black soldier fly larvae. 75. Jahrestagung der European Federation of Animal Science (EAAP), Florenz, Italien, 01.09.2024-05.09.2024, p257 (Vortrag).

C. Sandrock, J. Wohlfahrt, T. Stadtlander, F. Schindler, M. Hardick, M. Terranova, C. Lambertz, A. Lemme (2024) Assessing amino acid requirements of neonate larvae of the black soldier fly, Hermetia illucens. INSECTA, Potsdam, 14.-16.05.2024, S. 46 (Vortrag).