



Insekten als nachhaltige Proteinquelle

Potenziale und Herausforderungen

Benedikt Jahnke, Berlanti Puteri, Christian Rung, Mirjam Busch, Simon Früh, Andreas Detzel, Rebecca Rüscher, Kathleen Oehlke

Abstract

Im Rahmen des NewFoodSystems-Projekts „Pr:Ins“ wurde die Produktion und Vermarktung von Larven des Mehlkäfers (*Tenebrio molitor*; Coleoptera: Tenebrionidae; Mehlwürmer) als alternative Proteinquelle in Bezug auf Qualität, Nachhaltigkeit und Verbraucherakzeptanz betrachtet. Die Forschungsergebnisse zeigen vielversprechende Entwicklungsmöglichkeiten. So weisen Mehlkäferlarven ein günstiges Nährwertprofil mit hohem Proteingehalt auf, können durch nachhaltige Produktionsmethoden, u. a. durch Nutzung von Nebenprodukten, umweltschonend produziert werden und stoßen bei etwa 45 % der Verbraucher*innen auf grundsätzliche Akzeptanz. Als Futtermittel kommen u. a. zahlreiche Nebenströme aus der Lebens- und Futtermittelproduktion in Frage, was aus ökologischer Sicht günstig ist, gleichzeitig den größten Kostentreiber darstellt. Zentrale Herausforderungen umfassen darüber hinaus die Optimierung von Produktionsprozessen und Verarbeitungstechnologien, den Umgang mit potenziellen Sicherheitsrisiken sowie die Entwicklung zielgruppengerechter Marketingstrategien. Hier sollten zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ansetzen, um das Potenzial von Mehlkäferlarven als innovative Proteinquelle vollständig zu erschließen.

Zitierweise

Jahnke B, Puteri B, Rung C, Busch M, Früh S, Detzel A, Rüscher R, Oehlke K: Insects as a sustainable protein source. Potential and challenges. Ernährungs Umschau 2026; 73(2): online first.

Open access

The English version of this article is available online: DOI: 10.4455/eu.2025.058

Peer-Review-Verfahren

Manuskript (Übersicht) eingereicht: 28.02.2025; Überarbeitung angenommen: 25.08.2025

Dr. Benedikt Jahnke¹, Berlanti Puteri¹

Christian Rung², Mirjam Busch², Simon Früh², Andreas Detzel²

Rebecca Rüscher³, Dr. Kathleen Oehlke³

¹ Universität Kassel, Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften, Fachgebiet Agrar- und Lebensmittelmarketing, Witzenhausen, Deutschland

² Institut für Energie und Umweltforschung gGmbH, Heidelberg, Deutschland

³ Max Rubner-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel, Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik, Karlsruhe, Deutschland

Einleitung

Die Lebensmittelproduktion wird, mit dem voraussichtlichen Wachstum der Weltbevölkerung auf ca. 9,7 Mrd. im Jahre 2050, um etwa 70 % ansteigen müssen [1]. Die Auswirkungen des Klimawandels gefährden zusätzlich die globale Ernährungssicherheit. Der Lebensmittelsektor steht damit vor der Herausforderung, seine Umweltauswirkungen zu reduzieren und gleichzeitig die Menge der auf dem globalen Markt produzierten Lebensmittel zu erhöhen. Die Suche nach alternativen Nahrungs- und Proteinquel-

len mit geringeren Umweltauswirkungen ist dafür ein wesentlicher Baustein.

Insekten als Lebens- und Futtermittel werden als Teil eines Lösungsansatzes für die Herausforderungen der Ernährungssicherheit diskutiert. Die Insektenzucht ermöglicht nicht nur die Bereitstellung von Proteinen, sondern, unter Berücksichtigung der geltenden Futtermittelregularien, auch eine kreislauforientierte Verwertung von Nebenströmen aus der Lebens- und Futtermittelproduktion [2]. Während weltweit ca. 2100 essbare Insektenarten bekannt sind, wurden bislang der Mehlkäfer (*Tenebrio molitor*, Coleoptera: Tenebrionidae) im Larvenstadium (gelber Mehlwurm), die Wanderheuschrecke (*Locusta migratoria*, Orthoptera: Acrididae), die Hausgrille (*Acheta domesticus*, Orthoptera: Gryllidae, Heimchen) sowie Larven des glänzendschwarzen Getreideschimmelkäfers (*Alphitobius diaperinus*, Coleoptera: Tenebrionidae, Buffalowurm) als neuartige Lebensmittel in der EU zugelassen [3]. Die Produktion von Insektenproteinen erfordert eine Reihe sukzessiver Prozessschritte, die von der Aufzucht bis zur finalen Verarbeitung reichen (♦ Abbildung 1). Dabei umfasst die Futtermittelbereitstellung die Herstellung und den Transport der Futtermittel sowie die Konditionierung zu fertigem Substrat. Die Zucht findet in klimatisierten Räumen statt und unterteilt sich in Aufzucht der Junglarven, Mast sowie Reproduktion. Bei der Weiterverarbeitung können neben den dargestellten Schritten (Trocknung, Vermahlung, Entfettung, Proteinextraktion) auch andere Verfahren wie die Extrusion zum Einsatz kommen.

Damit sich Insekten als Lebensmittel erfolgreich am Markt etablieren können, müssen Wissenslücken hinsichtlich Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, Verbraucherakzeptanz, Qualität und Sicherheit geschlossen werden. Deshalb ist das Ziel des NewFoodSystems-Projekts „Pr:Ins – Ganzheitliche Bewertung von alternativen Proteinquellen unter besonderer Berücksichtigung von Insekten“, Kenntnisse in diesen Bereichen zu erweitern.

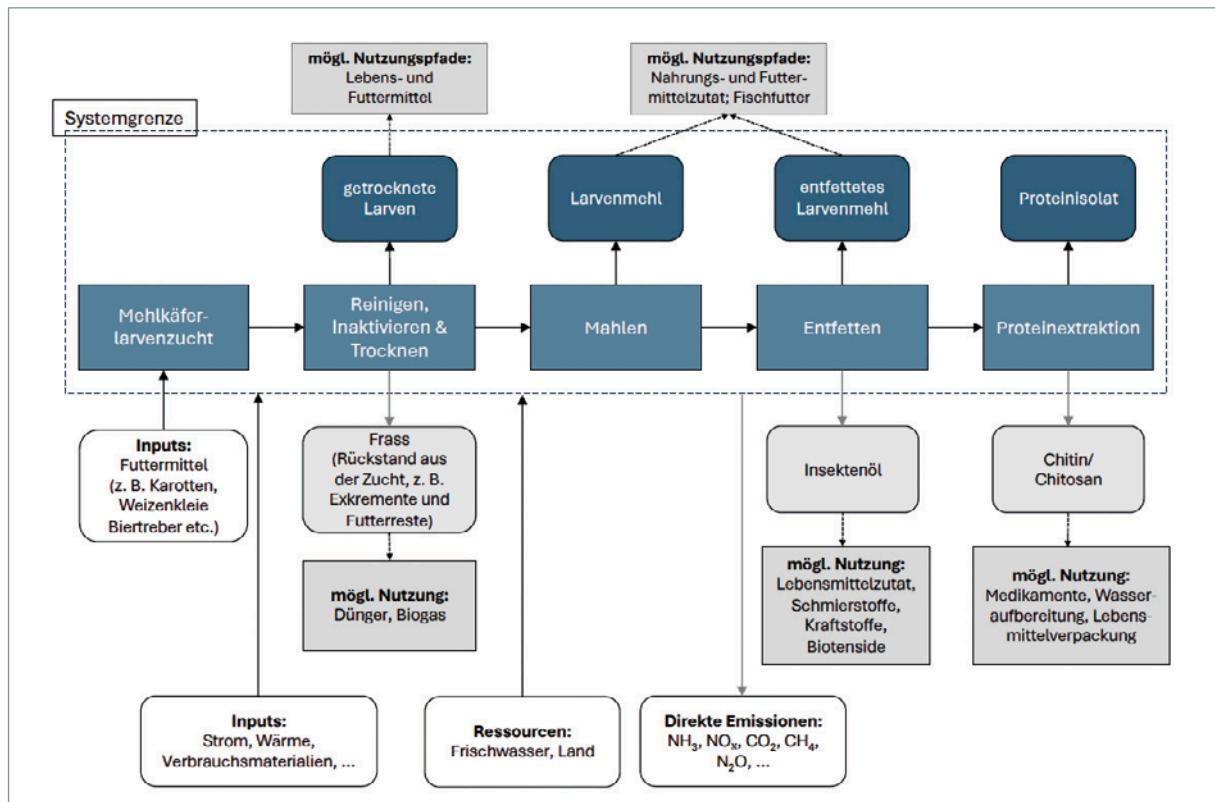


Abb. 1: Systemgrenzen und Prozessschritte der Produktion von Mehlkäferlarven mit den zugehörigen Inputs, Ressourcen und direkten Emissionen

Dargestellt sind die Hauptprozessschritte von der Larvenzucht bis zur Proteinextraktion sowie die jeweiligen Zwischenprodukte.

Im Rahmen von drei Teilprojekten mit jeweils eigenem Schwerpunkt werden Insektenprodukte, mit Fokus auf Mehlkäferlarven, als nachhaltige und innovative Lebensmittel analysiert. Dabei wird u. a. herausgearbeitet, wie die Teilbereiche miteinander verknüpft sind und sich gegenseitig beeinflussen können (♦ Abbildung 2). In diesem Beitrag werden die wichtigsten Aspekte der Qualität und Sicherheit (Teilprojekt 3), der Nachhaltigkeit (Teilprojekt 1) und der Verbraucherakzeptanz (Teilprojekt 2) betrachtet und deren Verknüpfungen aufgezeigt.

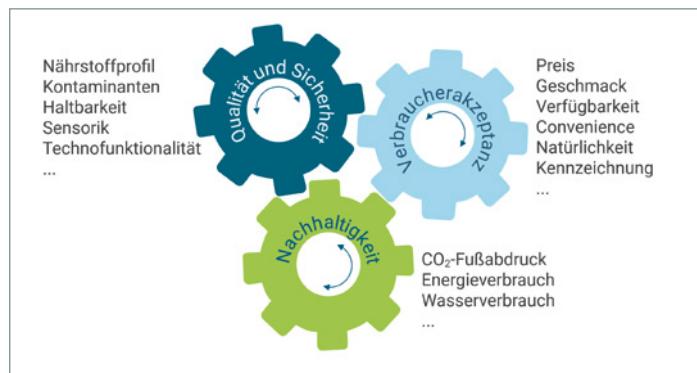


Abb. 2: Schematische Darstellung der drei Teilprojekte zur ganzheitlichen Bewertung der Mehlwurmproduktion bzw. mehlwumbasierter Produkte mit den jeweils wichtigsten untersuchten Parametern

Qualität und Sicherheit

Nährstoffprofil und ernährungsphysiologische Qualität

Die ernährungsphysiologische Qualität von Insekten ist insgesamt hoch. Speziesabhängige Unterschiede und die Einflüsse der Verarbeitung sind jedoch so groß, dass allgemeine Aussagen kaum möglich sind. Selbst innerhalb einer Spezies können die Nährstoffzusammensetzung und damit weitere qualitäts-

bestimmende Merkmale stark schwanken. Wichtige Einflussfaktoren dabei sind die Futtermittel und deren nutritive Qualität, die Aufzuchtbedingungen sowie das Alter bzw. Stadium, in dem die Larven geerntet werden, wie u. a. in eigenen Untersuchungen gezeigt wurde (♦ Abbildung 3).

Frische, d. h. ungetrocknete, Mehlkäferlarven enthalten typischerweise 11–30 % Rohprotein, 6–23 % Fett, 56–71 % Wasser, etwa 1 % Asche und ca. 5 % andere Bestandteile [9]. Mit einem Restfeuchtegehalt von ca. 1–3 % enthalten getrocknete Mehlkä-

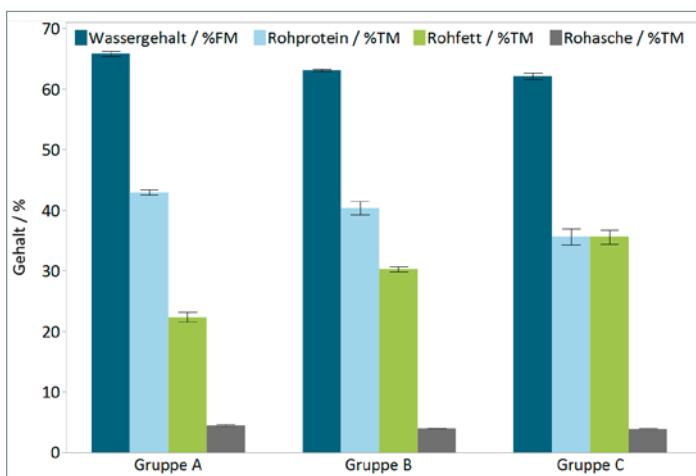


Abb. 3: Beispielhafte Zusammensetzung von Mehlkäferlarven aus einer eigenen Fütterungsstudie, in der Futtermittel und Erntegewicht variiert wurden

Gruppe A: Weizenkleie, Erntegewicht 80 mg; Gruppe B: Rübenpressschlemel + Trockenschlemel, Erntegewicht 80 mg; Gruppe C: Weizenkleie + Reiskleie + Apfelmutter, Erntegewicht 100 mg

Rohprotein- und Rohfettgehalt beziehen sich auf die Trockenmasse (TM), Wassergehalt und Erntegewicht auf die Frischmasse (FM). Bestimmung von Rohprotein mittels Kjeldahl-Methode [4] mit Umrechnungsfaktor 4,76 [5], von Rohfett mittels Weibull-Stoldt [6, 7], des Wassergehalts gravimetrisch und des Aschegehalts nach Veraschung [8].

Angegeben sind Mittelwerte \pm Standardabweichungen von $n = 5$ biologischen Replikaten. (unveröffentlichte Daten)

ferlarven und daraus hergestellte Mehle dementsprechend etwa 24–55 % Rohprotein, 28–49 % Fett, 3 % Asche und ca. 10 % andere Bestandteile. Proteinkonzentrate werden über mehrstufige Verfahren hergestellt (► Abbildung 1) und enthalten je nach Prozessführung bis etwa 80 % Protein [10]. Proteinreiche Futtermittel können häufig zu einem höheren Proteingehalt führen, wobei die Proteinquelle eine wichtige Rolle spielt [11]. Mit zunehmendem Larvenalter bzw. Larvenstadium nimmt der Proteingehalt ab. Eine Gewichtszunahme von 80 mg auf 100 mg hatte in eigenen Fütterungsstudien bspw. eine Abnahme des Proteingehalts um rund 10 % zur Folge (unveröffentlichte Daten).

Der Proteingehalt von Lebensmitteln wird häufig mittels Kjeldahl-Analyse bestimmt, bei der sich der Proteingehalt durch Multiplikation des Stickstoffgehalts mit einem Umrechnungsfaktor ergibt. Die Lebensmittelinformationsverordnung VO 1169/2011 schreibt einen Umrechnungsfaktor von 6,25 vor. Bei Insekten führt dieser Faktor aufgrund des hohen Gehalts an Nichtprotein-Stickstoff aus dem Chitin zu einer Überschätzung des Proteingehalts. Für Mehlkäferlarven wurden alternativ die Faktoren 4,76 [5] bzw. 5,33 [12] vorgeschlagen, werden aber noch nicht standardmäßig genutzt. Momentan muss daher davon ausgegangen werden, dass viele Angaben den tatsächlichen Proteingehalt von Insekten um etwa 20 % überschätzen.

Die Proteinverdaulichkeit von Mehlkäferlarven und -mehl ist etwa so hoch wie die von anderen tierischen Proteinquellen, z. B. Fleisch oder Fisch [13]. Berichte über den Einfluss der Verarbeitung, insbesondere Erhitzungsschritte, Garverfahren oder auch Extrusion, sind kaum verfügbar und kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen, sodass hier weiterer Forschungsbedarf besteht. Die hohe Proteinqualität ergibt sich des Weiteren aus dem günstigen Ami-

nosäureprofil, in dem alle für Menschen essentiellen Aminosäuren enthalten sind. Limitierend sind die schwefelhaltigen Aminosäuren Cystein und Methionin; unproblematisch ist hingegen z. B. das in Weizen limitierende Lysin [14]. Das Aminosäureprofil wurde in eigenen, bislang unveröffentlichten Arbeiten durch das Futtermittel und das Larvenalter wenig beeinflusst, was sich mit den Beobachtungen in der Literatur deckt [15].

Der Fettgehalt von Mehlkäferlarven nimmt mit zunehmender Anzahl an Larvenstadien zu und kann bis zu 22 % in der Frischmasse bzw. 50 % in der Trockenmasse betragen, typisch sind Werte um 35 % [9]. Durch eine gezielte Fütterung und einen frühen Erntezeitpunkt konnten in einer eigenen, bislang unveröffentlichten Studie deutlich fettärmeren Larven mit lediglich 14 % Fett in der Trockenmasse herangezogen werden. Das Fettsäureprofil zeichnet sich generell durch hohe Gehalte an ungesättigten Fettsäuren aus, insbesondere Ölsäure und α -Linolensäure, die ca. 45 % bzw. ca. 20 % der gesamten Fettsäuren ausmachen [16]. Während das Aminosäureprofil von Mehlkäferlarven weitgehend stabil und unabhängig von der Fütterung ist, kann das Fettsäureprofil durch unterschiedliche Futtermittel beeinflusst werden. Bspw. konnte durch den Zusatz von Lein- oder Chiasamen zum Futtermittel das $\omega_6:\omega_3$ -Verhältnis in Mehlkäferlarven (inkl. ihres Darminhalts) von 50 auf 3–6 gesenkt werden, was für die menschliche Ernährung günstig ist [17].

Da der Verzehr von Insekten nicht wesentlich zur Aufnahme von Kohlenhydraten beiträgt, wird hierauf nicht weiter eingegangen. Erwähnenswert hingegen ist das Chitin, das bei getrockneten Mehlkäferlarven ca. 5 % der Trockenmasse ausmacht. In der Literatur finden sich Hinweise darauf, dass das weitgehend unverdauliche Chitin positive Effekte auf die Darmgesundheit hat; andererseits wird ein negativer Einfluss auf die Proteinverdaulichkeit und die Mineralstoffbioverfügbarkeit diskutiert [18]. Abschließend sei erwähnt, dass verbliebene Futtermittelreste im Darm der Larven zum Nährstoffprofil beitragen können [19], was bei der Interpretation von entsprechenden Studienergebnissen berücksichtigt werden muss. Bei Anwendungen für die menschliche Ernährung ist eine mind. 24-stündige Futterkarenz vor der Tötung zum Zweck der Darmentleerung vorgeschrieben [20], sodass eine mögliche Nährstoffanreicherung durch Futtermittelreste im Darm in der Praxis an Relevanz verliert.



Sensorische Qualität und Verarbeitung

Der Geruch bzw. Geschmack von getrockneten Mehlkäferlarven oder Mehlwurmmehl ist charakterisiert durch würzige/umami, nussige, ölige, „tierische“ Noten mit einem charakteristischen Nachgeschmack [21]. Wie auch bei anderen Lebensmitteln beeinflussen Trocknungs- und andere Verarbeitungsverfahren maßgeblich die sensorischen Eigenschaften eines insektenbasierten Produkts. Auch futtermittelbedingte Einflüsse sind nicht auszuschließen und werden momentan im Rahmen des Projekts „Pr:Ins“ untersucht. Die charakteristischen Aromen sowie der Einfluss von Insektenmehlen z. B. auf Backeigenschaften sind teils limitierend für potenzielle Anwendungen. Sensorisch akzeptabel bzw. aus technofunktioneller Sicht umsetzbar sind etwa in Keksen und Crackern 10–20 % Mehlwurmmehl und in Weizenbrot 5–10 % Mehlwurmmehl [22]. In eigenen, noch unveröffentlichten Arbeiten lieferte ein Anteil von 30 % blanchierten Mehlkäferlarven in herzhaften Snackbällchen gute Ergebnisse. Der Zusatz von Mehlkäferlarven zu pflanzenbasierten Fleischersatzprodukten kann deren Akzeptanz sogar erhöhen [23]. Hingegen wurden bei verschiedenen fleischbasierteren Wurstwaren aufgrund von Einbußen bei der Textur 5–10 % Mehlwurmmehl als Obergrenze ermittelt [24]. Inwiefern verschiedene Verarbeitungsverfahren die Funktionalität von Mehlwurmmehlen und daraus hergestellten proteinreichen Fraktionen verbessern können, ist Gegenstand der Forschung [25] und wird ebenfalls im Projekt „Pr:Ins“ untersucht.

Sicherheitsaspekte

Die mikrobiologische Sicherheit von Mehlkäferlarven ist in der Regel nach entsprechender Erhitzung gegeben. Ohne vorherigen Erhitzungsschritt ähneln die möglichen Gefahren denen anderer tierischer Proteinquellen [26]. Da als Vorteil von Insekten genannt wird, dass sie auf Nebenströmen herangezogen werden können, stellt sich die Frage nach einem möglichen Übergang von Kontaminanten aus dem Futtermittel. Mehrere Studien konnten zeigen, dass keine Anreicherung von Mykotoxinen durch Mehlkäferlarven stattfindet [27]. Problematisch hingegen könnte die Anreicherung von Schwermetallen sein [28]. In einer eigenen Fütterungsstudie führte die Fütterung mit Reiskleie bspw. zu einer Anreicherung von Arsen (Daten noch nicht veröffentlicht). Andererseits konnten durch eine Anreicherung mit Zink über das Substrat die Cadmiumgehalte in Mehlkäferlarven reduziert werden [29].

Ein wesentlicher sicherheitsrelevanter Faktor beim Verzehr von Insekten ist ihr allergenes Potenzial. Kreuzallergien mit Hausstaubmilben und Krustentieren stellen für Allergiker*innen einen wesentlichen Hinderungsgrund für den Verzehr dar. Ursächlich sind dafür eine Reihe von Proteinen, darunter Tropomyosin und Arginin kinase [30]. Inwiefern die Allergenität von Insekten durch Verarbeitungsverfahren beeinflusst werden kann, ist Gegenstand der aktuellen Forschung. Zumindest eine teilweise Reduktion der Allergenität kann durch Hitzebehandlungen erreicht werden [31]. Zu den üblichen Futtermitteln von Mehlkäferlarven gehören in erster Linie Getreideprodukte. Da Substratreste an der Haut haften oder im Darm der Larven vorkommen können, können Spuren von Gluten auch in verarbeiteten Mehlkäferlarven nicht ausgeschlossen werden [21]. Mehlkäferlarven entwickeln sich aber auch auf vielen glutenfreien Substraten gut, sodass grundsätzlich auch glutenfreie mehlwurmbasierte Produkte hergestellt werden können.

Nachhaltigkeitsbewertung: Umweltbilanz und Optimierungspotenziale der Mehlwurmproduktion

Umweltbilanz von Mehlwurmprotein von der Pilot- zur Industrieanlage

Die beschriebenen Hauptproduktionsschritte, von der Futtermittelbereitstellung über die Zucht bis hin zur Proteinextraktion, stellen die technische Grundlage für die industrielle Mehlwurmproduktion dar. Die Anlagen zur Zucht und Verarbeitung befinden sich derzeit auf verschiedenen Technologiereifegraden und Produktionskapazitäten, die von experimenteller Entwicklung bis hin zu marktreifen Industrieanlagen reichen. Labor- und Pilotanlagen arbeiten oft manuell und in begrenztem Produktionsumfang, während industrielle Produktionssysteme durch Automatisierung und höhere Effizienz gekennzeichnet sind.

Die wissenschaftliche Literatur zur Nachhaltigkeit der Mehlwurmzucht und -verarbeitung ist begrenzt. Derzeit liegen lediglich drei Studien vor, die auf Anlagenprimärdaten marktreifer Produktionen mit geringer bis mittlerer Produktionskapazität basieren [32–34]. Die verbleibenden sechs verfügbaren Literaturstudien stützen ihre Analysen auf diese Primärdaten und/oder verschneiden sie mit experimentellen Daten sowie Ergebnissen aus Fütterungsstudien. Die Studien beleuchten grundlegende Aspekte der Mehlwurmproduktion oder -verarbeitung in spezifischen Regionen, bieten jedoch keine umfassenden Umweltbilanzen, da sie nur einzelne Wirkungskategorien adressieren. Die meisten Studien analysieren die potenziellen Auswirkungen auf den Klimawandel, wobei Werte für die Erzeugung frischer Mehlkäferlarven zwischen 1,0 und 4,6 kg CO₂-Äquivalenten pro Kilogramm berichtet wurden [33, 35–37]. Die Bandbreite ist auf Unterschiede in den Futterzusammensetzungen, den Energiequellen und den Produktionsmethoden zurückzuführen. Die bedeutendsten Umweltbelastungen treten dabei bei der Futtermittelproduktion und beim Energieverbrauch während der Zucht auf [32, 34, 36]. Diese beiden Faktoren machen bei der Mast von Mehlkäferlarven in der Regel jeweils bis zu 50 % der gesamten Treibhausgasemissionen

(THG-Emissionen) aus. Andere Faktoren wie Abwasser und Abfälle aber auch die Prozessierung und Verarbeitung der gemästeten Mehlkäferlarven tragen im Allgemeinen nur geringfügig zur Gesamtemissionsbilanz bei. Der Energieverbrauch resultiert größtenteils aus dem Beheizen der Aufzuchtanlagen, während die Emissionen der Futtermittelproduktion aus Anbau, Transport und der Nutzung von Düngemitteln entstehen. Die Wahl des Strommixes beeinflusst die THG-Emissionen, wobei Regionen mit erneuerbaren Energien oder Kernkraft deutlich niedrigere Emissionen haben als solche mit fossilen Brennstoffen [36].

Um die Datenlage zu verbessern und Wissenslücken zu schließen, wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Pr:Ins“ Primärdaten verschiedener Insektenfarmen und -verarbeiter in Europa erhoben. Das Ziel ist eine umfassende Analyse der europäischen Mehlwurmproduktion und ihrer Umweltpotenziale mit Blick auf ihre Integration in zukünftige Ernährungssysteme. Anhand der erhaltenen Produktionsdaten konnte die Zucht und Verarbeitung von Mehlkäferlarven sowohl in Pilot- wie auch geplanten Industrieanlagen analysiert werden. Die Ergebnisse zeigten kennzeichnende Unterschiede zwischen den Anlagen, abhängig von Faktoren wie Futterart, Energiequelle, Automatisierungsgrad und geografischer Lage. Pilotanlagen wiesen dabei häufig höhere Umweltbelastungen auf als größere, industrielle Anlagen. Dieses Potenzial zeigte sich auch in der Berechnung der Planungsdaten für eine Industrieanlage der Firma Alpha-Protein GmbH (Bruchsal, D), die ihre Daten für die Bewertung zur Verfügung stellte. Dabei konnten Produktionsoptimierungen im Upscaling zu Verbesserungen von bis zu 72 % der Umweltbelastungen führen. Die Herstellung von frischen Mehlkäferlarven in der geplanten Industrieanlage von Alpha-Protein GmbH zeigt Klimawandelergebnisse, die im unteren Bereich der aus der Literatur bekannten Werte liegen. Dabei trägt die Futtermittelbereitstellung ca. 22 %, die Mast ca. 48 % und die Prozessierung ca. 16 % zum Klimawandelergebnis bei (► Abbildung 4). Als Futtermittel wurden Brauhefe, Altbrot,

Lignocellulose und Weizenkleie bilanziert. Der Hauptbeitrag zum Treibhausgaspotential kommt dabei aus letzterer bzw. dem ihr zugerechneten Anteil an Weizenanbau und -verarbeitung. Bei Mast und Prozessierung stammt der Hauptbeitrag aus der eingesetzten Energie.

Optimierungspotenziale in der Mehlwurmproteinproduktion

Die Umweltbilanz der Mehlwurmzucht wird primär durch die Futtermittelherstellung sowie den Energieträger und -bedarf für die Mast bestimmt, während Transportwege, Verarbeitung und Infrastruktur nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Wahl des Futters hat sowohl Einfluss auf die mit der Futtermittelherstellung verbundenen Umweltlasten als auch auf zentrale Zuchtparameter wie die Futterverwertungsrate (FCR), die Überlebensrate und die Aufzuchtdauer. Eine niedrige FCR kombiniert mit einer hohen Überlebensrate optimieren die Ressourcennutzung und minimieren Verluste. Ergänzende primäre Futtermittel wie Karotten können die Aufzuchtdauer verkürzen und die Überlebensrate erhöhen. Nebenprodukte wie Weizenkleie, Bierhefe oder auch Altbrot bieten eine kostengünstige und umweltfreundliche Alternative zu primären Futtermitteln und tragen dazu bei, Kreisläufe zu schließen, was die Ressourcennutzung effizienter gestaltet. Im Vergleich zu anderen Insektspezies wie der Schwarzen Soldatenfliege zeigen Mehlkäferlarven eine höhere physiologische Sensitivität gegenüber der Komposition und Qualität der Nebenproduktströme wie Untersuchungen u. a. des Max Rubner-Instituts zeigen. Eine suboptimale Zusammensetzung der Nährsubstrate führt zu einer deutlichen Reduktion der Larvenüberlebensrate, was konsekutiv einen erhöhten Ressourceninput und eine Verschlechterung der Umweltbilanz zur Folge hat. Zudem steht die Nutzung von Nebenströmen potenziell in Konkurrenz zu einer bereits etablierten Verwendung in anderen Sektoren. Nebenströme wie Getreidekleie, Obst- und Gemüseabfälle oder Ölschrote werden heute häufig in der Tierfütterung, der Biogasproduktion oder als Rohstoff in der chemischen Industrie eingesetzt. Eine Umwidmung dieser Ressourcen für die Insektenzucht könnte bestehende Wertschöpfungsketten stören und möglicherweise den Druck auf Primärrohstoffe erhöhen, falls diese Nebenströme knapper werden. Sollte der Konsum anderer tierischer Lebensmittel in Zukunft zurückgehen, könnten die dadurch freiwerdenden Nebenströme allerdings für die Insektenzucht genutzt werden.

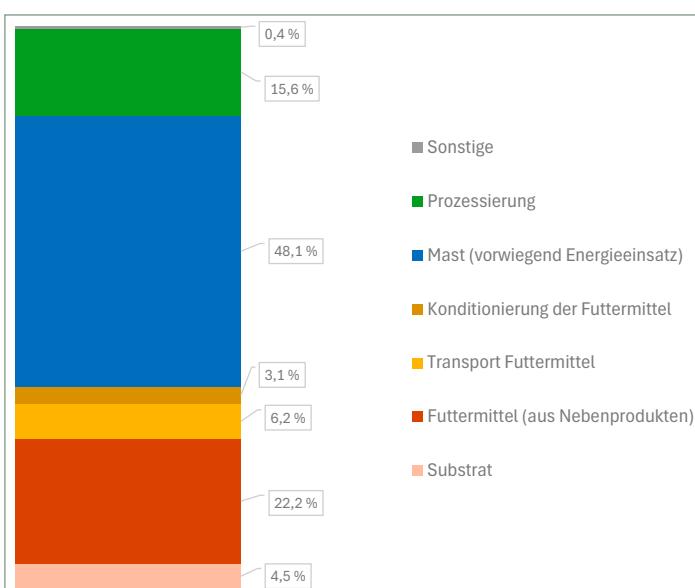


Abb. 4: Beitragsanalyse der Prozessschritte zum Treibhausgaspotential der geplanten Industrieanlage von der Alpha-Protein GmbH zur Herstellung von Mehlkäferlarvenmehl (noch unveröffentlichte Daten)



Die Strommenge, die für die Aufrechterhaltung der optimalen Zuchtbedingungen erforderlich ist, stellt den zweitgrößten Einflussfaktor auf die Umweltbilanz dar. Der Wechsel zu erneuerbaren Energien bietet hier erhebliches Potenzial zur Reduktion von Emissionen. Durch regionale Aufzucht und Nutzung lokal verfügbarer Ressourcen lassen sich zudem Transportwege verkürzen und regionale Wirtschaftskreisläufe stärken.

Wie am Beispiel von Alpha-Protein GmbH gezeigt wurde, führt das Upscaling von Pilot- zu Industrieanlagen zu einer Verringerung der Umweltbelastungen, was durch optimierte Ressourcennutzung, den Einsatz fortschrittlicher Technologien sowie verbesserte Produktionsprozesse ermöglicht wird. So werden Skaleneffekte genutzt, um den Energieverbrauch und resultierende Emissionen pro Produktionsseinheit weiter zu reduzieren und somit die Nachhaltigkeit der gesamten Wertschöpfungskette zu steigern.

Ein weiteres Optimierungspotenzial liegt in der Nutzung der Nebenprodukte der Mehlwurmproduktion. Die Larvenexkremente und Futterreste aus der Mast (Frass) können als hochwertiger Dünger genutzt werden. Dies reduziert den Bedarf an konventionellen Düngemitteln und verringert dadurch die Emissionen, die bei deren Produktion entstehen. In Zukunft könnte die Mehlwurmproduktion so nicht nur eine wichtige Proteinquelle darstellen, sondern auch ein Bestandteil eines ressourcenschonenden Ernährungssystems werden.

Verbraucherakzeptanz

Akzeptanzbarrieren und Marktpotenzial
Ungeachtet der Tatsache, dass Insekten von mehr als zwei Mrd. Menschen auf der Welt täglich oder als Teil traditioneller Speisen verzehrt werden, gelten sie in westlichen Ländern (z. B. in der EU) als neuartige Lebensmittel und ihr Verzehr wird als unüblich betrachtet. Eine fehlende bzw. zu geringe Akzeptanz und Bereitschaft seitens der Verbraucher*innen, Insekten in die Ernährung zu integrieren, gelten als die größten Herausforderungen für den Aufbau und die Entwicklung eines Markts und führen dazu, dass Insekten bislang v. a. als Futtermittel verwendet werden. Zu den wichtigsten Hindernissen der Verbraucherakzeptanz zählen Ekelgefühle und Lebensmittel-Neophobie sowie Bedenken bzgl. der Qua-

lität und Sicherheit [38, 39]. Hinzu kommen verbraucherexterne produkt- und marktbedingte Faktoren wie die geringe Verfügbarkeit von insektenbasierten Lebensmitteln am Markt und hohe Preise, die einem vermehrten Konsum von Insekten entgegenstehen. Daher leisten Unternehmen trotz z. T. langjähriger Erfahrungen nach wie vor Pionierarbeit, um einen Markt für Insekten aufzubauen. Aufgrund dieser Situation ist es Ziel dieses Beitrags, aktuelle Erkenntnisse aus der Verbraucherforschung zu insektenbasierten Lebensmitteln und deren Vermarktungsmöglichkeiten kompakt darzustellen. Dabei wird zurückgegriffen auf eine Reihe bereits veröffentlichter Daten aus Experteninterviews, Fokusgruppendiskussionen mit Verbraucher*innen, Verbraucherbefragungen und einem Literaturreview [40–43], aus denen die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst werden.

Trotz der dokumentierten Akzeptanzbarrieren für den Konsum von Insekten ist die Gesellschaft in Deutschland nicht uniform. Es gibt eine nicht zu vernachlässigende Gruppe an Verbraucher*innen, die eine grundsätzliche Offenheit gegenüber insektenbasierten Lebensmitteln zeigt. Eigene Studienergebnisse deuten an, dass sich von über 18000 Befragten knapp 45 % den Verzehr von Insekten vorstellen können [41]. Von diesen haben zwischen 30 % und 40 % bereits Insekten gegessen und bewerten diese Erfahrung überwiegend positiv. Beides, die grundsätzliche Offenheit für Insekten sowie positive Geschmackserlebnisse, sind Voraussetzungen für eine weitere Etablierung und sie bilden daher eine wichtige Zielgruppe. Zu beobachten ist, dass Menschen, die sich den Verzehr von Insekten grundsätzlich vorstellen können, in der konkreten Kauf- oder Konsumsituation ein Gefühl von Unsicherheit und inneren Widersprüchen (Neugier/Interesse vs. Ekel) empfinden. Um dieser Ambivalenz entgegenzuwirken, sind genaue Kenntnisse über die Wünsche und Bedürfnisse der Zielgruppen und darauf abgestimmte Marketinginstrumente erforderlich. Ergebnisse und Ansatzpunkte dazu werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

Produktherstellung und -kennzeichnung

Eine Stellschraube zur Stärkung der Verbraucherakzeptanz ist die Produktherstellung und -kennzeichnung. Die Vermarktung ganzer Insekten, ob einzeln oder als sichtbarer Bestandteil verarbeiteter Lebensmittel, ist aufgrund der existierenden Ekelbarriere mit hohen Hürden verbunden und wird auf absehbare Zeit nur eine marginale Konsumentengruppe finden. Studien aus Europa und den USA dokumentieren eine größere Offenheit gegenüber der Verwendung von Insekten als unsichtbare Zutat (z. B. Mehl) in verarbeiteten Lebensmitteln [44].

Als Zutat sind Insekten potenziell in einer Vielzahl an Produkten aus unterschiedlichen Bereichen einsetzbar, jedoch gilt es, diejenigen Produkte zu identifizieren, die auf die größte Zustimmung treffen. Dies sind v. a. Produkte, die westlichen Verbraucher*innen vom Aussehen und Geschmack vertraut sind. Gerade der Snackbereich scheint hier gute Voraussetzungen zu bieten. So wiesen in einem Choice-Experiment insektenbasierte Cracker im Vergleich zu falafelähnlichen Bällchen höhere Akzeptanzwerte und Wiederkaufsbekundungen auf [41]. Cracker, aber auch andere Snacks wie Riegel, profitieren dabei einerseits vom anhaltenden Convenience-Trend und der Möglichkeit, diese Produkte überall und jederzeit dabei zu haben. Andererseits knüpfen sie, bedingt durch



die hochwertigen Proteine und Fettsäuren der Insekten, an das Interesse von Verbraucher*innen nach Produkten zur Eiweißergänzung, Sporternährung und Nahrungsergänzung an [45]. Eine gezielte Ansprache dieser Interessen, z. B. durch das Angebot von mit „high protein“ gekennzeichneten Produkten, ermöglicht es Herstellern, von einer höheren Zahlungsbereitschaft der Verbraucher*innen zu profitieren, wodurch wiederum höhere Produktionskosten gedeckt werden können.

Um Verbraucher*innen eine bewusste Entscheidung für oder gegen den Kauf eines insektenbasierten Produkts zu ermöglichen, ist eine verständliche Kennzeichnung auf der Vorderseite der Verpackung notwendig. Die in einer eigenen Verbraucherstudie dokumentierten Ansprüche und Wünsche an eine solche Kennzeichnung zeigen, dass eine dezente aber eindeutige Kennzeichnung z. B. in Form eines standardisierten Labels favorisiert wird [43]. Weiterhin legt diese Studie nahe, dass im Abwägungsprozess zwischen der Informations- und Marketingwirkung eines solchen Labels eine allgemeine Bezeichnung „mit Protein aus Insekten“ einer Nennung der spezifischen Insektenart „mit Protein aus Mehlwürmern“ vorzuziehen ist und speziell das Herausstellen des Proteins im Vergleich zu z. B. Insektenmehl auf Anklang bei den Verbraucher*innen trifft.

Verbraucherkommunikation und Produktverkostungen

Zur Stärkung der Verbraucherakzeptanz und erfolgreichen Vermarktung von insektenbasierten Produkten gilt es, die Verbraucherkommunikation zielgerichtet zu entwickeln. Viele Hersteller heben insbesondere die Vorteile von Insekten in Hinblick auf die ökologische Nachhaltigkeit und Nährwertqualität hervor. Derartige Informationen verbessern nachweislich die Einstellung von Verbraucher*innen gegenüber insektenbasierten Lebensmitteln und erhöhen die Kaufabsicht bzw. Probierbereitschaft [46–48]. Die Ergebnisse einer eigenen Studie zeigen erweiternd, dass eine Ergänzung und Betonung des Aspekts der Natürlichkeit für Verbraucher*innen entscheidungsrelevant ist [41]. Natürlichkeit steht dabei stellvertretend auch für einen guten Geschmack und gesundheitliche Vorteile – beides hedonistische Produktmerkmale. Für den Bereich der Produktentwicklung ließe sich dies berücksichtigen, indem herstellerseitig auf einfache und natürliche Zutaten sowie kurze Zutatenlisten und einen Verzicht auf Zusatz- und Konservierungsstoffe geachtet wird. Der zunehmenden Skepsis von Verbraucher*innen gegenüber sogenannten hochverarbeiteten Produkten sowie der wachsenden Bedeutung von *Clean Labeling* [49] würde damit Rechnung getragen und könnte perspektivisch ein relevantes Merkmal sein, um sich gegenüber vielen anderen veganen und vegetarischen Alternativprodukten abzuheben. Einer gezielten Kommunikation bedarf es auch, um die Qualitäts- und Sicherheitsbedenken von Verbraucher*innen zu adressieren. Dies kann, so verdeutlichen unsere Studienergebnisse, insbesondere durch eine unabhängige Produktvalidierung seitens vertrauenswürdiger Institutionen erfolgen. Gerade für skeptische und unerfahrene Verbraucher*innen können derartige objektive Untersuchungen, die auf den Produktverpackungen durch entsprechende Siegel oder Kennzeichnungen symbolisiert werden, wichtige Entscheidungsgrundlagen darstellen.

Neben Informationen über die Vorteile des Insektenkonsums und dem Herausstellen von *Unique Selling Points* (USPs) insektenbasierter Lebensmittel spielen Verkostungen eine entscheidende Rolle

bei der Steigerung der Verbraucherakzeptanz. So haben Studien gezeigt, dass Verkostungen sich positiv auf die Einstellung der Verbraucher*innen zur Entomophagie auswirken und die Absicht erhöhen, erneut insektenbasierte Lebensmittel zu essen [50, 51]. Verkostungen richten sich als ein unverbindliches und niedrigschwelliges Angebot an Verbraucher*innen, eigene sensorische Erfahrungen zu sammeln. Hinzu kommt, dass bei Verkostungen die Zeitspanne zwischen Information und Verzehr sehr gering ist, wodurch Informationen direkt mit einem Geschmackserlebnis verknüpft und effektiver aufgenommen werden. Verkostungen im öffentlichen Raum haben, anders als beim Verzehr im Privaten, zusätzlich noch eine soziale Komponente. Indem sich andere beim Verkosten beobachten lassen, verliert der Verzehr von Insekten den Charakter des Abnormalen. Dies kann Ekelvorstellungen reduzieren und einen gewissen Schneeball-Effekt auslösen. Verkostungen, gerade wenn es sich dabei für Verbraucher*innen um einen Erstkontakt mit Insekten handelt, kommt eine Schlüsselfunktion zu, indem Negativerfahrungen zu einer grundsätzlichen Ablehnung und Positiverfahrungen zu einer langfristigen Offenheit gegenüber insektenbasierten Lebensmitteln führen können.

Ausblick

Die Produktion und Vermarktung von Mehlkäferlarven als Lebensmittel stehen vor komplexen, aber lösbar Herausforderungen in den Bereichen Qualität und Sicherheit, Nachhaltigkeit sowie Verbraucherakzeptanz. Im Bereich Qualität und Sicherheit zeigt sich, dass Mehlkäferlarven ein vielversprechendes Nährwertprofil aufweisen, das durch gezielte Fütterung und optimale Erntezeiten an bestimmte Produktanforderungen angepasst werden kann. Besonders hervorzuheben sind der hohe Proteingehalt und das günstige Fettsäureprofil, beides Merkmale, die im Zuge einer gesundheits- und fitnessorientierten Ernährung von Seiten der Verbraucher*innen zukünftig noch stärker nachgefragt werden. Die Produktsicherheit kann durch kontrollierte Aufzuchtbedingungen und standardisierte Verarbeitungsprozesse gewährleistet werden und sollte durch unabhängige Institutionen geprüft und zertifiziert werden, um Verbrauchervertrauen aufzubauen. Allerdings bedarf es weiterer Forschung, um bspw. die



Rolle des Chitingehalts besser zu verstehen und potenzielle Allergierisiken vollständig zu erfassen. Auch die Optimierung der Verarbeitungsprozesse hinsichtlich sensorischer und technofunktioneller Eigenschaften bleibt ein wichtiges Entwicklungsfeld.

Die Analyse der im Forschungsräumen erhobenen Primärdaten zeigt deutliche Optimierungspotenziale beim Übergang von Pilot- zu Industrieanlagen. Die größten Hebel zur Verbesserung der Umweltbilanz liegen in der Futtermittelwahl und dem Energieverbrauch. Der Einsatz von Nebenprodukten aus der Lebensmittelindustrie als Futtermittel kann die Umweltbelastung erheblich reduzieren, wobei die physiologischen Anforderungen der Mehlkäferlarven berücksichtigt werden müssen. Hinsichtlich der Verwendung von Nebenströmen als Futtermittel ist zu beachten, dass auch bei der Insektenmast die Futtermittelregulierungen der EU bindend sind und somit viele nährstoffreiche Nebenströme nicht als Futtermittel für Insekten verwendet werden dürfen. Auch ist zu prüfen, inwiefern das Verfüttern aus ökologischer wie ökonomischer Perspektive als vorteilhaft gegenüber alternativen Verwendungsmöglichkeiten zu bewerten ist. Die Nutzung erneuerbarer Energien und effiziente Produktionssysteme können den ökologischen Fußabdruck weiter verringern. Auch die Integration in regionale Wirtschaftskreisläufe und die Verwertung von Nebenprodukten der Mehlwurmzucht bieten vielversprechende Ansätze für eine nachhaltige Produktion.

Die Verbraucherakzeptanz stellt weiterhin eine zentrale Herausforderung dar, zeigt aber auch positive Entwicklungen: Etwa 45 % der Verbraucher*innen sind grundsätzlich bereit, insektenbasierte Produkte zu konsumieren. Um diese Basis auszubauen und in tatsächliches Handeln zu überführen, ist eine zielgerichtete Produktentwicklung und Vermarktungsstrategie erforderlich. Verarbeitete Produkte, bei denen Insekten als „unsichtbare“ Zutat eingesetzt werden, stoßen auf deutlich höhere Akzeptanz als ganze Insekten. Besonders der Snackbereich bietet vielversprechende Möglichkeiten. Wichtige Erfolgsfaktoren sind eine klare aber dezente Kennzeichnung, eine natürliche Fokussierte Kommunikation sowie das ermöglichen von Geschmackserfahrungen durch Verkostungen.

Für die zukünftige Rolle von Insekten in der menschlichen Ernährung wird es entscheidend sein, die unterschiedlichen Bereiche und ihre Wechselwirkungen untereinander gemeinsam

zu betrachten und ganzheitlich weiterzuentwickeln (Abbildung 2). Insektenbasierte Produkte müssen den Verbrauchererwartungen entsprechen und zu wettbewerbsfähigen Preisen angeboten werden. Gleichzeitig muss die Optimierung der Produktionsprozesse sowohl Qualitäts- und Sicherheitsaspekte als auch Nachhaltigkeitsziele berücksichtigen. Dabei spielen die Auswahl der Futtermittel und die Aufzuchtbedingungen eine wesentliche Rolle, da sie sowohl Qualitätsparameter als auch Nachhaltigkeitsaspekte direkt beeinflussen und sich mindestens indirekt auf die Verbraucherakzeptanz auswirken. Mit solch einem integrierten Ansatz kann die Mehlwurmproduktion und -vermarktung dazu beitragen, dass Insekten ihr Potenzial als nachhaltige und akzeptierte Proteinquelle für das Ernährungssystem der Zukunft entfalten.

Förderung

Beitrag im Rahmen der Publikationsreihe des Innovationsraums NewFoodSystems – Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie 2030“ des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR).



Danksagung

Die Autoren und Autorinnen danken dem BMFTR-Innovationsraum NewFoodSystems für die Förderung des Vorhabens Pr:Ins – Ganzheitliche Bewertung (FKZ: 031B1236A, B3101236H, 031B1236F) sowie allen Kooperationspartnern, die an dem Projekt beteiligt sind und maßgeblich zum Erfolg des Projekts beigetragen haben.

Mehr Informationen unter → www.newfoodsystems.de

Angaben zu Interessenkonflikten und zum Einsatz von KI

Die Autor*innen erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen und bei der Erstellung des Manuskripts keine KI-Anwendungen eingesetzt wurden.

Literatur

1. Food and Agriculture Organization (FAO): *How to feed the world in 2050*. 2009. www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf (last accessed on 19 August 2025).
2. Van Peer M, Frooninckx L, Coudron C, et al.: *Valorisation potential of using organic side streams as feed for Tenebrio molitor, Acheta domesticus and Locusta migratoria*. Insects 2021; 12: 796.
3. European Commission: *Commission Implementing Regulation (EU) 2017/2470 of 20 December 2017 establishing the Union list of novel foods in accordance with Regulation (EU) 2015/2283 of the European Parliament and of the Council on novel foods*. 2025.
4. Federal Office of Consumer Protection and Food Safety (BVL): *Official collection of analysis methods according to § 64 of the German Food and Feed Code (LFGB)*. Untersuchung von Lebensmitteln – Bestimmung des Stickstoffgehaltes in Milch- und Milcherzeugnissen – Teil 1: Kjeldahl-Verfahren und Berechnung des Rohprotein gehaltes. L 0100 10/1.



5. Janssen RH, Vincken J-P, van den Broek LAM, Fogliano V, Lakemond CMM: Nitrogen-to-protein conversion factors for three edible insects: *Tenebrio molitor*, *Alphitobius diaperinus*, and *Hermetia illucens*. *J Agric Food Chem* 2017; 65: 2275–8.
6. Bench BJ, Whittington W, Kranz M, Guerrera F: Validation study. Total fat content by automated acid hydrolysis (HYDROTHERM) – ISO 8262-1. www.gerhardt.de/fileadmin/Redaktion/downloads/Publikationen_und_Whitepaper/Validation_Study_HYDROTHERM_ISO_8262-1_AOAC_922.06_german.pdf (last accessed on 22 October 2025).
7. International Organization for Standardization ISO 8262-1 | IDF 124-1:2005: Milk products and milk-based foods – Determination of fat content by the Weibull-Berntrop gravimetric method (Reference method); p. 8.
8. Federal Office of Consumer Protection and Food Safety (BVL): Official collection of analysis methods according to § 64 of the German Food and Feed Code (LFGB). Bestimmung der Asche in Fleisch, Fleischerzeugnissen und Wurstwaren. Gravimetrisches Verfahren (Referenzverfahren). L 0600–4.
9. Payne CLR, Scarborough P, Rayner M, Nonaka K: A systematic review of nutrient composition data available for twelve commercially available edible insects, and comparison with reference values. *Trends Food Sci Technol* 2016; 47: 69–77.
10. Pinel G, Berthelot U, Queiroz LS, et al.: Influence of the processing on composition, protein structure and techno-functional properties of mealworm protein concentrates produced by isoelectric precipitation and ultrafiltration/diafiltration. *Food Chem* 2024; 449: 139177.
11. Kröncke N, Benning R: Influence of dietary protein content on the nutritional composition of mealworm larvae (*Tenebrio molitor* L.). *Insects* 2023; 14: 261.
12. Boulos S, Tännler A, Nyström L: Nitrogen-to-protein conversion factors for edible insects on the Swiss market: *T. molitor*, *A. domesticus*, and *L. migratoria*. *Front Nutr* 2020; 7: 89.
13. Rodríguez-Rodríguez M, Barroso FG, Fabrikov D, Sánchez-Muros MJ: In vitro crude protein digestibility of insects: A review. *Insects* 2022; 13.
14. Oliveira LA, Pereira SMS, Dias KA, et al.: Nutritional content, amino acid profile, and protein properties of edible insects (*Tenebrio molitor* and *Gryllus assimilis*) powders at different stages of development. *J Food Compos Anal* 2024; 125: 105804.
15. Ruschioni S, Loreto N, Foligni R, et al.: Addition of olive pomace to feeding substrate affects growth performance and nutritional value of mealworm (*Tenebrio molitor* L.) larvae. *Foods* 2020; 9: 317.
16. Dreassi E, Cito A, Zanfini A, Materozzi L, Botta M, Francardi V: Dietary fatty acids influence the growth and fatty acid composition of the yellow mealworm *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Lipids* 2017; 52: 285–94.
17. Lawal KG, Kayle RR, Akanbi TO, Mirosa M, Agyei D: Enrichment in specific fatty acids profile of *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* larvae through feeding. *Future Foods* 2021; 3: 100016.
18. Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE): 15. DGE-Ernährungsbericht. 2024. www.dge.de/fileadmin/dok/wissenschaft/ernaehrungsberichte/15eb/15-DGE-Ernaehrungsbericht.pdf (last accessed on 19 August 2025).
19. Firke MD: Gut loading to enhance the nutrient content of insects as food for reptiles: A mathematical approach. *Zoo Biol* 2003; 22: 147–62.
20. EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA), Turck D, Bohn T, et al.: Safety of frozen and dried forms of whole yellow mealworm (*Tenebrio molitor* larva) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA Journal* 2025; 23: e9155.
21. Mancini S, Fratini F, Tuccinardi T, Degl'Innocenti C, Paci G: *Tenebrio molitor* reared on different substrates: is it gluten free? *Food Control* 2020; 110: 107014.
22. Amoah I, Cobbinah JC, Yeboah JA, et al.: Edible insect powder for enrichment of bakery products – a review of nutritional, physical characteristics and acceptability of bakery products to consumers. *Future Foods* 2023; 8: 100251.
23. de Albuquerque RS, Bernardo YAdA, Conte-Junior CA: Edible insects as an alternative protein source in meat products: advantages, challenges, limitations, and gaps. *Eur Food Res Technol* 2025. DOI: 10.1007/s00217-025-04802-1.
24. Borges MM, da Costa DV, Trombete FM, Câmara AKFI: Edible insects as a sustainable alternative to food products: An insight into quality aspects of reformulated bakery and meat products. *Curr Opin Food Sci* 2022; 46: 100864.
25. Mishyna M, Keppler JK, Chen J: Techno-functional properties of edible insect proteins and effects of processing. *Curr Opin Colloid Interface Sci* 2021; 56: 101508.
26. Efsa Scientific Committee: Risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. *EFSA Journal* 2015; 13: 4257.
27. Schrögel P, Wätjen W: Insects for food and feed-safety aspects related to mycotoxins and metals. *Foods* 2019; 8: 288.
28. Truzzi C, Illuminati S, Girolametti F, et al.: Influence of feeding substrates on the presence of toxic metals (Cd, Pb, Ni, As, Hg) in larvae of *Tenebrio molitor*: Risk assessment for human consumption. *Int J Environ Res Public Health* 2019; 16: 4815.
29. Keil C, Maares M, Kröncke N, Benning R, Haase H: Dietary zinc enrichment reduces the cadmium burden of mealworm beetle (*Tenebrio molitor*) larvae. *Scientific Reports* 2020; 10: 20033.
30. Ribeiro JC, Sousa-Pinto B, Fonseca J, Fonseca SC, Cunha LM: Edible insects and food safety: allergy. *J Insects Food Feed* 2021; 7: 833–47.
31. Yang J, Zhou S, Kuang H, Tang C, Song J: Edible insects as ingredients in food products: nutrition, functional properties, allergenicity of insect proteins, and processing modifications. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2024; 64: 10361–83.
32. Oonincx DGAB, de Boer IJM: Environmental impact of the production of mealworms as a protein source for humans – a life cycle assessment. *PLoS ONE* 2012; 7: e51145.
33. Thévenot A, Rivera JL, Wilfart A, et al.: Mealworm meal for animal feed: Environmental assessment and sensitivity analysis to guide future prospects. *J Clean Prod* 2018; 170: 1260–7.
34. Dreyer M, Hörtenhuber S, Zollitsch W, et al.: Environmental life cycle assessment of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) production for human consumption in Austria – a comparison of mealworm and broiler as protein source. *Int J Life Cycle Assess* 2021; 26: 2232–47.
35. Joensuu K, Silvenius F: Production of mealworms for human consumption in Finland: A preliminary life cycle assessment. *J Insects Food Feed* 2017; 3: 211–6.
36. Modahl IS, Brekke A: Environmental performance of insect protein: A case of LCA results for fish feed produced in Norway. *SN Applied Sciences* 2022; 4: 183.
37. Zlaugotne B, Sanchez FAD, Pubule J, Blumberga D: Protein alternatives for use in fish feed – life cycle assessment of black soldier fly, yellow mealworm and soybean protein. *Environ Climate Technol* 2023; 27: 581–92.
38. Onwezen MC, Bouwman EP, Reinders MJ, Dagevos H: A systematic review on consumer acceptance of alternative



- proteins: Pulses, algae, insects, plant-based meat alternatives, and cultured meat. *Appetite* 2021; 159: 105058.
39. Sogari G, Riccioli F, Moruzzo R, et al.: Engaging in entomophagy: The role of food neophobia and disgust between insect and non-insect eaters. *Food Qual Prefer* 2023; 104: 104764.
40. Puteri B, Jahnke B, Zander K: Booming the bugs: How can marketing help increase consumer acceptance of insect-based food in Western countries? *Appetite* 2023; 187: 106594.
41. Puteri B, Oehlmann M, Jahnke B: Who has an appetite for insects? Identifying segments of early adopters of insect-based food and their product attribute preferences: Insights from a choice experiment study in Germany. *Food Res Int* 2024; 196: 114994.
42. Puteri B, Suckert M, Kocaaydin S, Jahnke B: Kurzbericht zur Status-Quo-Analyse in Forschung und Praxis. 2023. https://newfoodsysteams.de/wp-content/uploads/2024/01/PrIns_Status-Quo-Bericht_final.pdf (last accessed on 19 August 2025).
43. Puteri B, Jahnke B: A cute little grasshopper on the front? A qualitative study of consumers' perceptions and expectations of insect-based food labelling in Germany. *Future Foods* 2025; 12: 100705.
44. Kröger T, Dupont J, Büsing L, Fiebelkorn F: Acceptance of insect-based food products in western societies: A systematic review. *Front Nutr* 2022; 8: 759885.
45. Nutrition Hub: Trendreport Ernährung 2025. www.nutrition-hub.de/post/trendreport-ernaehrung-trends-2025 (last accessed on 19 August 2025).
46. Verneau F, La Barbera F, Kolle S, Amato M, Del Giudice T, Grunert K: The effect of communication and implicit associations on consuming insects: An experiment in Denmark and Italy. *Appetite* 2016; 106: 30–6.
47. Lombardi A, Vecchio R, Borrello M, Caracciolo F, Cembalo L: Willingness to pay for insect-based food: The role of information and carrier. *Food Qual Prefer* 2019; 72: 177–87.
48. Naranjo-Guevara N, Fanter M, Conconi AM, Floto-Stammen S: Consumer acceptance among Dutch and German students of insects in feed and food. *Food Science & Nutrition* 2021; 9: 414–28.
49. Grant KR, Gallardo RK, McCluskey JJ: Consumer preferences for foods with clean labels and new food technologies. *Agribusiness* 2021; 37: 764–81.
50. Menozzi D, Sogari G, Veneziani M, Simoni E, Mora C: Eating novel foods: An application of the Theory of Planned Behaviour to predict the consumption of an insect-based product. *Food Qual Prefer* 2017; 59: 27–34.
51. Barton A, Richardson CD, McSweeney MB: Consumer attitudes toward entomophagy before and after evaluating cricket (*Acheta domesticus*)-based protein powders. *J Food Sci* 2020; 85: 781–8.