Die Reproduktion und Aufzucht von Mehlkäfern (*Tenebrio molitor*)

Cepri, www.cepri.tech, info@cepri.tech

Vorwort

Das vorliegende Protokoll basiert hauptsächlich auf den Erfahrungen, die das Team von Cepri in seiner Insektenfarm gesammelt haben. Zusätzlich sind Infos aus verschiedenen Publikationen, Büchern und Erfahrungen anderer Insektenfarmer in dieses Protokoll mit eingeflossen. Das Protokoll soll als Leitfaden und Orientierungshilfe bei der Reproduktion und Aufzucht des Mehlkäfers dienen. In unterschiedlichen Standorten der Insektenfarmern herrschen auch immer unterschiedliche Bedingungen, wodurch es zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich ist, ein einheitliches Standardprotokoll zu erstellen, welches maßgeschneidert für jede Larvenaufzucht passt. Deshalb appellieren wir an Sie, auch nach eigenem Ermessen Anpassungen in Ihrer Insektenfarm vorzunehmen und Ihre eigenen Erfahrungen mit einfließen zu lassen.

Kontaktinformationen

Bei Rückfragen bezüglich des Protokolls kontaktieren Sie bitte

Lucas Hartmann

Mitgründer von Cepri

Email: lucas.hartmann@cepri.tech

Mobil: +49 151 61437334

oder an

Marcel Lieber

Mitgründer von Cepri

Email: marcel.lieber@cepri.tech

Mobil: +49 176 34559538

Inhalt

..... 1

1. Einleitung 1

1.1. Der Mehlkäfer (*Tenebrio molitor*) 1

1.2. Larvenzusammensetzung 2

2. Die Reproduktion 3

2.1. Verpuppung der Larven, Geschlechterbestimmung und Käfernernte 3

2.2. Käferhaltung 4

2.3. Ei-Ernte 4

2.4. Ei-Zählung 5

3. Die Larvenaufzucht 7

3.1. Setup der Insektenfarm 7

3.1.1. Temperatur 8

3.1.2. Luftfeuchtigkeit 8

3.1.3. Durchlüftung 8

3.2. Ablauf der Larvenaufzucht 8

3.2.1. Ansetzen der Aufzuchtboxen 8

3.2.2. Trockenfütterung und Sieben 9

3.2.3. Nassfütterung 10

3.2.4. Ernte 11

3.2.5. Larven für die Reproduktion 11

3.2.6. Lagerung und Versand 11

3.2.7. Reinigung 11

4. Troubleshooting 12

4.1. Pathogene und Krankheiten bei *Tenebrio molitor* 12

4.1.1. Bakterien 12

4.1.2. Pilze 13

4.1.3. Viren und Protozoen 13

4.1.4. Pathogen-Management 13

4.2. Schädlinge bei der Larvenaufzucht 14

4.2.1. Mehlmotte (*Plodia interpunctella*) 14

4.2.2. Mehlmilben (*Acaris siro*) 14

4.2.3. Gemeiner Speckkäfer (*Dermestes lardarius*) 15

5. Anhang 16

6. Quellen 17

1. Einleitung

Essbare Insekten werden weltweit von etwa 2 Milliarden Menschen verzehrt (Van Huis et al., 2013), hauptsächlich in subtropischen und tropischen Gebieten wie Mittel- und Südamerika, Afrika und Südostasien (Ramos-Elorduy, 2009). Traditionell werden in der Natur gefangene Insekten verzehrt, sodass industrielle Insektenfarmen bis auf wenige Ausnahmen global betrachtet etwas Neuartiges darstellen. Aufgrund des großen Potentials von Insekten in Bezug auf eine Nachhaltige Erzeugung tierischer Proteine und vorteilhafter Eigenschaften in Bezug auf die menschliche Ernährung werden Insekten auch nach und nach in der westlichen Gesellschaft als Lebensmittel verwendet. Seit Januar 2018 werden Insekten in der Europäischen Union als „Novel Food" (=neuartige Lebensmittel) reguliert. Für sieben verschiedene Insektenarten wurden bereits Novel Food-Anträge eingereicht, darunter ein Antrag zur Verwendung von Mehlwürmern, den Larven des Mehlkäfers (*Tenebrio molitor*), als neuartige Nahrungsquelle. Neben der Verwendung als Nahrungsmittel können Mehlwürmer aber auch als Tierfutter verwendet werden. Dabei werden sie inzwischen nicht mehr nur als Lebendfutter für Reptilien gehandelt, sondern im Haustierfutter bereits in hypoallergenem Hundefutter verarbeitet. Neben Haustieren können sie aber auch Nutztieren als Nahrungsquelle dienen. In der europäischen Union sind Insekten bis dato nur als Futtermittel in Aquakulturen zugelassen. In der Branche wird aber daran gearbeitet, dass Insekten auch für die Hühner- und Schweineproduktion zugelassen werden.

1.1. Der Mehlkäfer (*Tenebrio molitor*)

Der Mehlkäfer gehört zur Ordnung Coleoptera (=Käfer) und zur Familie der Schwarzkäfer (Tenebrionidae). Käfer gehören mit 659 essbaren Arten zu den am häufigsten verzehrten Insektenordnungen (Jongema, 2017). Der Mehlkäfer durchläuft eine vollständige Metamorphose (Holometabolismus) mit den vier Entwicklungsstadien Ei, Larve, Puppe und Imago (Abbildung 1).

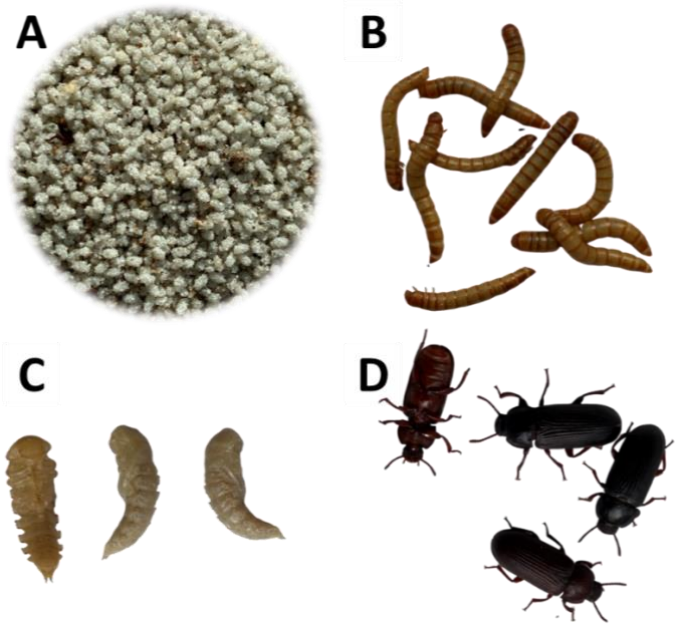

Abbildung 1: Die vier Entwicklungsstadien des Mehlkäfers (Tenebrio molitor): A: Die etwa 1,5 mm großen Eier. B: Die Larven, auch Mehlwürmer genannt, die von wenigen Millimetern bis zu einer Größe von 4 Zentimetern wachsen können. C: Puppen, das immobile Übergangsstadium zum adulten Insekt, bei dem kein Futter mehr aufgenommen werden kann. D: Die geschlechtsreifen Käfer (Imagines).

Mehlkäfer sind getrenntgeschlechtlich. Nach der Paarung legen die weiblichen Käfer die Eier mit ihrem Ovipositor (=Eilegeapparat) in ein Substrat ab. Die Käfer leben 2 bis 3 Monate und legen dabei bis zu 300 Eier ab. Bei einer Temperatur von 28°C schlüpfen die nur wenige Millimeter großen Larven nach 7 bis 10 Tagen aus den Eiern und beginnen sofort mit der Nahrungsaufnahme. Zwischen jedem der 9 bis 14 Larvenstadien häuten sich die Mehlwürmer. Frisch gehäutete Mehlwürmer sind weißlich bis rosa gefärbt und haben ein weiches Außenskelett, das sich erst nach einigen Stunden verhärtet und goldbraun verfärbt (Abbildung 2).

Abbildung 2: Larven direkt nach der Häutung. Die Larven sind weiß bis rosa gefärbt. In den hinteren Segmenten scheint der dunkle Verdauungstrakt durch das noch weiche und transparente Außenskelett hindurch.

Bei den Larven handelt es sich um das Stadium, welches zur Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln verwendet wird. Nach der letzten Häutung verpuppen sich die Insekten. Die Puppen bleiben im Futtersubstrat meist unbeweglich, bis sich nach einer Woche Käfer daraus entwickeln. Ihre Entwicklungszeit wird stark von Temperatur, Feuchtigkeit und Futter beeinflusst.

1.2. Larvenzusammensetzung

Die Larven weißen eine Trockenmasse von rund 35% auf. Bis zu 52% der Trockenmasse bestehen aus Proteinen und bis zu 44 % aus Fetten (Abbildung 3). Sowohl der Protein- als auch der Fettanteil und jeweils das Aminosäureprofil der Proteine und die Fettsäurezusammensetzung sind durch das Futter beeinflussbar.

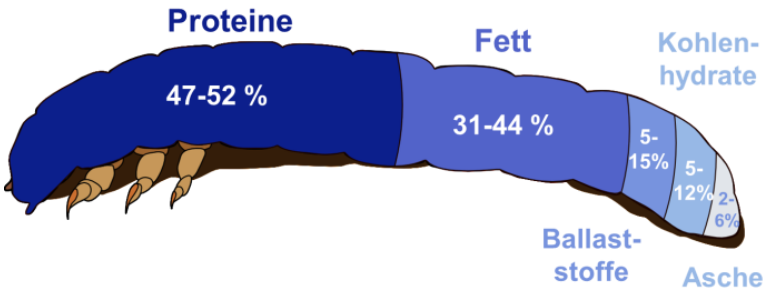

Abbildung 3: Die Zusammensetzung von Mehlwürmern auf Basis der Trockenmasse.

2. Die Reproduktion

Die Reproduktion im Kontext einer Insektenfarm umfasst den Zeitpunkt der Verpuppung der Larven bis zu den befruchteten Mehlkäfer-Eiern. Für die adulten und fortpflanzungsbereiten Käfer müssen hierbei Bedingungen geschaffen werden, dass sie sich untereinander optimal fortpflanzen und die Eier ablegen können. Im Folgenden soll eine Übersicht über eine Methode gegeben werden, wie die Reproduktion im kleinen Maßstab umgesetzt werden kann. Bei Cepri fokussieren wir uns besonders darauf, die Reproduktion mit smarter Technologie zu verbessern und selektive Auslese zu ermöglichen.

2.1. Verpuppung der Larven, Geschlechterbestimmung und Käfernernte

Die Larven, welche für die nächste Generation an Käfern ausgewählt wurden (siehe Punkt 3.2.5.), verpuppen sich nach einiger Zeit. Die Puppen können hier theoretisch bereits geerntet werden und es kann das Geschlecht der Mehlkäfer im Puppenstadium bestimmt werden (siehe Abbildung 4). Das Geschlechterverhältnis kann bei der Reproduktion von großer Bedeutung sein und durch die Bestimmung des Geschlechtes und die entsprechende Verteilung in den Käferboxen, kann die Reproduktion optimiert werden. Die Geschlechterbestimmung von Hand ist allerdings aufgrund der großen Menge an Insekten nicht umsetzbar. Ein Ziel von Cepri ist es deshalb, einen automatisierten Prozess zu entwickeln, wodurch die Geschlechter dann auch im industriellen Insektenfarmen bestimmt werden können. Das Geschlecht muss aber für die Reproduktion natürlich nicht zwingend bestimmt werden. Die Puppen können dann solange in den Boxen verbleiben, bis sich ein Großteil zu Käfern entwickelt hat. Vom Zeitpunkt der Verpuppung bis zum Käfer vergehen etwa 7 bis 12 Tage (28°C, 35% RH). Die Käfer werden mithilfe eines Siebes (Maschenweite 3 mm) vom restlichen Substrat abgetrennt und in neue Boxen verteilt (siehe nächstes Kapitel).

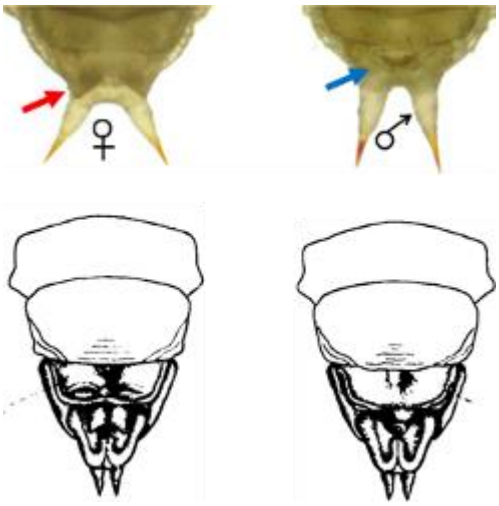

Abbildung 4: Bestimmung des Geschlechts bei Mehlkäfern und Puppen (Shukla & Palli, 2012; Bhattacharya et al., 1970).

2.2. Käferhaltung

Ähnlich wie die Larven, werden die Mehlkäfer in den Insektenzuchtboxen gehalten. Wir empfehlen die Käfer bei einer Temperatur zwischen 20,5°C bis 30°C zu halten. In jeder Insektenzuchtbox werden 200 g (8,34 g Käfer/ dm^2) bis zu 800 g (33,34 g Käfer/ dm^2) Käfer gehalten. Die Käfer werden auf einem nicht-fressbarem Eilege-Substrat mit Partikelgrößen zwischen 0,1 und 0,3 mm gehalten, in welches die Käfer ihre Eier ablegen konnten. Der Boden der Boxen wird komplett mit dem Eilege-Substrat bedeckt. Die Substratschicht muss mindestens 3 cm dick sein, damit die Käfer keine Eier auf den Boden der Box legen können (Diese würden dann festkleben und könnten nicht geerntet werden). In unseren Tests eignete sich vor allem kantengerundeter, gewaschener und keimfreier Quartzsand in der entsprechende Partikelgröße besonders gut als Legesubstrat. Dies mag vor allem daran liegen, dass der Mehlkäfer (*Tenebrio molitor*) ursprünglich aus einer afrikanischen Wüste stammt, bevor er sich weltweit als Kulturfolger etablierte. In seinem natürlichen Habitat lebte er bei etwa 26 bis 28 Grad im Sand. Es ist durchaus denkbar, dass er auch hier die Eier abgelegt hat. Drei Mal wöchentlich werden die Käfer mit Apfelstücken gefüttert (Abbildung 5). Pro Fütterung und Box werden etwa 70 Gramm Äpfel (am besten in Scheiben geschnitten) in jede Box gegeben. Nach 4 Wochen werden die Käfer einer Box mit neuen Käfern ausgetauscht.

Abbildung 5: Haltung der Käfer in einer Insektenzuchtbox auf Quartzsand. Die Käfer sammeln sich beim Feuchtfutter (hier: Äpfel), welches dreimal wöchentlich in die Boxen gegeben wird.

2.3. Ei-Ernte

Abwechselnd alle drei und vier Tage werden die abgelegten Eier abgeerntet. Zunächst werden die Käfer dazu über ein Kunststoffgewebe (3 mm Maschenweite) vom Legesubstrat getrennt. Daraufhin werden grobe Verunreinigungen (wie beispielsweise Futterreste) über ein Lochblech vom Legesubstrat, welches die Insekteneier enthält, abgetrennt. In einem letzten Siebschritt werden

mithilfe eines Drahtgewebes (Maschenweite zwischen 0,8 und 1 mm) die Insekteneier vom Legesubstrat getrennt. Zur Aufreinigung der Käfereier von feinen Verunreinigungen (wie beispielsweise Käferausscheidungen) wurde ein Zick-Zack Separator gebaut, womit die Eier von feinen Verunreinigungen getrennt werden können, ohne die empfindlichen Eier zu beschädigen.

2.4. Ei-Zählung

Zur Bestimmung der Anzahl der Eier gibt es zwei verschiedene Verfahren. Eine ungefähre, kostengünstige und schnelle Bestimmung über das Gewicht der geernteten Eier und eine genauerer aber technisch anspruchsvollere Bestimmung über ein optisches Verfahren.

Zur Bestimmung der Anzahl an Insekteneier über das Gewicht wurden die geernteten Eier in mehreren Versuchen gewogen, gezählt und bis zum Schlupf der Larven inkubiert. Die geschlüpften Larven wurden anschließend ausgezählt. Dabei wurden folgende Werte bestimmt, die dann für die Umrechnung der Ei-Einwaagen verwendet wurden: 1 Ei pro 1,8 ± 0,07 mg Einwaage, Es schlüpfen etwa 90,05 ± 6,45 % der geernteten Eier, pro 2,01 ± 0,13 mg Einwaage schlüpft eine Larve. Mithilfe dieser Werte lässt sich immer die Menge an Insekten-Eier abwiegen, die in eine Larvenaufzuchtbox überführt werden und aus denen später 10.000 Larven (die bei einem Erntegewicht von 100 mg nach der Larvenaufzucht 1 kg Lebendmasse ergeben) schlüpfen, also beispielsweise 21,4 g Eier für 1 kg Larven nach der Aufzucht. In Abbildung 6 ist die durchschnittliche Erntemenge einer Käferbox über den Zeitraum von 4 Wochen dargestellt.

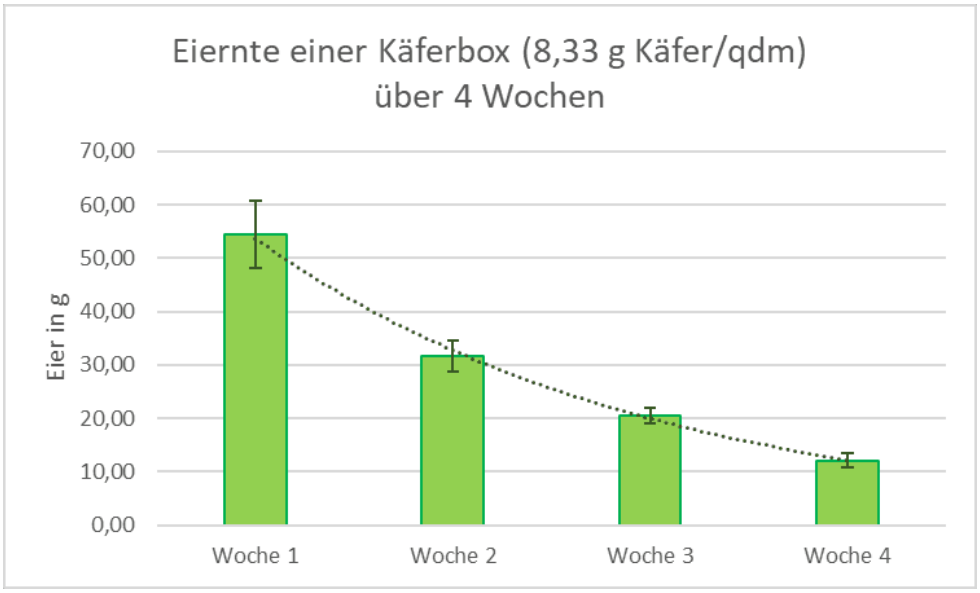

Abbildung 6: Durchschnittliche Eiernte einer Käferbox, die 200g Käfer enthält. Die Eilegeeffizienz nimmt mit zunehmendem Alter der Käfer ab.

Zur optischen Bestimmung der Anzahl werden die hellen Eier auf einem dunklen Fließband verteilt (und dadurch weitgehend vereinzelt) und laufen darüber unter einem Kamerasystem vorbei. Die Kamera erfasst die Eier und über eine Auswertesoftware kann die Anzahl bestimmt werden. Die Entwicklung dieser Methode ist noch nicht abgeschlossen. Die Genauigkeit muss noch verifiziert werden. In einem zweiten Schritt muss trotzdem noch die Schlupfrate mitbestimmt werden.

Tabelle 1: Ablaufschema der Reproduktion.

Prozessschritt	Beschreibung
Käferhaltung	• Lege-Substrat: kantengerundeter, gewaschener, keimfreier Quartzsand 0,1 -0,3 mm • Fütterung: 3 Mal wöchentlich • Ei-Ernte: Alle drei bis vier Tage • Käferdichte: 8,33 Käfer/dm^2
Siebschritt 1	• Kunststoffgewebe, 3 mm Maschenweite • Trennung der Käfer vom Legesubstrat mit Eiern
Siebschritt 2	• Lochblech, 2 mm Lochdurchmesser • Trennung von groben Verunreinigungen vom Legesubstrat mit Eiern
Siebschritt 3	• Drahtgewebe 0,8-1 mm Maschenweite • Trennung der Eier vom Legesubstrat
Zick Zack Luft Separator	• Luftstrom zur Trennung der Eier von feinen Verunreinigungen und restlichem Legesubstrat
Abschätzung der Anzahl der Eier über Gewicht	• Die Eier werden abgewogen • Pro 1,8 mg Einwaage befindet sich 1 Ei
Anzahl der Eier durch optische Methode	• Mithilfe einer Kamera und einem Fließband werden Eier angezählt
Portionierung	• Eier, aus denen nach Larvenaufzucht 1 kg Lebendmasse an Mehlwürmern entsteht, werden in je eine Aufzuchtbox überführt
Bestimmung der Schlupfrate (Stichproben)	• Stichprobenweise Bestimmung aus wie vielen Eier tatsächlich Mehlwürmer schlüpfen

3. Die Larvenaufzucht

Bei der Larvenaufzucht werden die Mehlwürmer vom Ei bis zur erntereifen Larve gehalten. Bei der Larvenaufzucht müssen die Larven regelmäßig gefüttert und von ihren Ausscheidungen getrennt werden. Im Folgenden wird der Aufbau einer händischen, auf die Larvenaufzucht spezialisierten Insektenfarm und der Ablauf der Larvenaufzucht beschrieben. Zukünftig wird eine Teilautomatisierung unumgänglich sein, um Mehlwürmer wirtschaftlich erzeugen zu können.

3.1. Setup der Insektenfarm

Die Larven werden in 600 mm langen, 400 mm breiten und 145 mm hohen Aufzuchtboxen mit seitlichen Einschnitten zur besseren Belüftung gehalten. In einer Box können 1 bis 2 kg der Larven erzeugt werden. Wir empfehlen die Aufzucht von einem bis zwei Kilogramm Larven pro Box. Die Eier, die wöchentlich geliefert werden, werden jeweils in Boxen überführt. Die innerhalb einer Woche neu angesetzten Boxen können gestapelt und zu einem Batch zusammengefasst werden (Abbildung 7). Die Boxen können mit der Batchnummer und einer individuellen Boxnummer versehen werden (Beispiel: Boxen mit Eiern aus Kalenderwoche 10 werden mit den Nummern KW10(Batch)-1 (Box), 2, 3 etc. versehen).

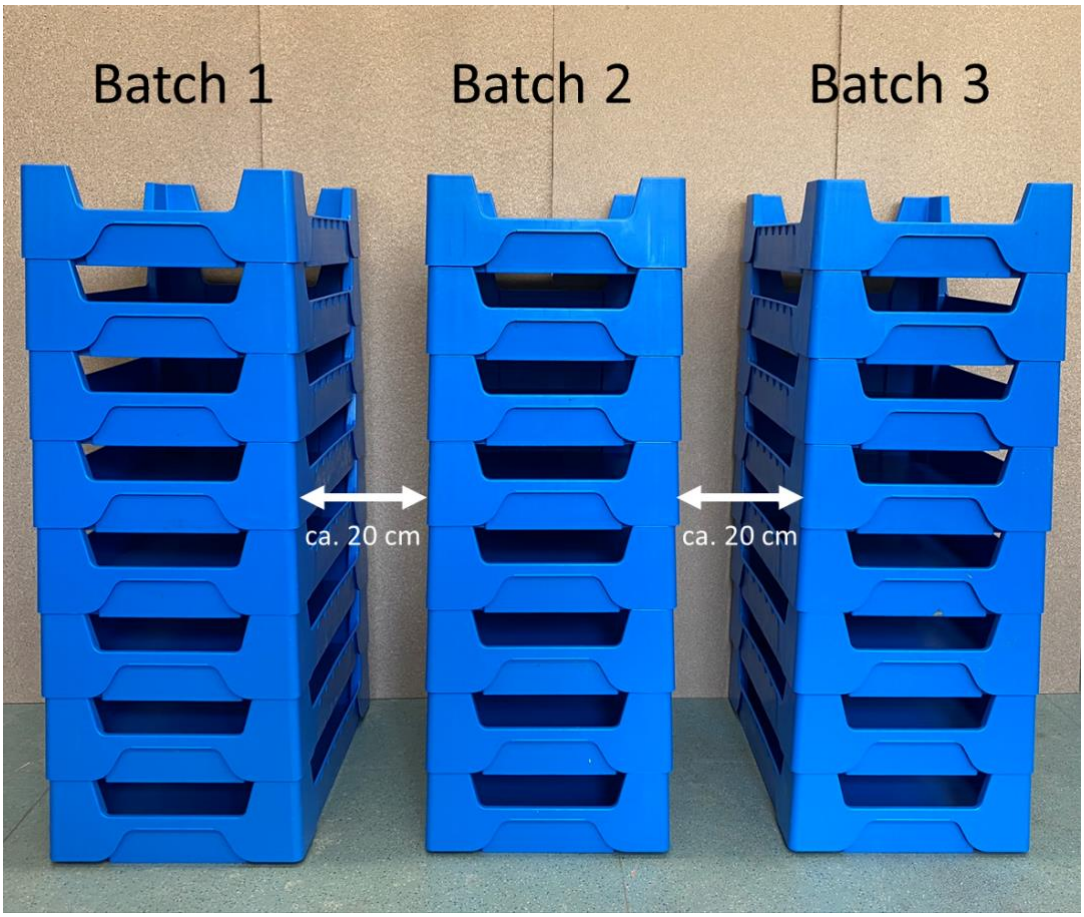

Abbildung 7: Aufbau der Aufzuchtboxen aufgeteilt in verschiedene Batches. Ein Batch enthält dabei die Aufzuchtboxen, die innerhalb einer Woche angesetzt wurden.

Damit die Larven optimal wachsen können, sollten in der Larvenaufzucht die Bedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit überwacht und geregelt werden. Zusätzlich sollte für eine ausreichende Belüftung gesorgt werden. Im Folgenden sind die optimalen Bedingungen aufgeführt.

3.1.1. Temperatur

Die Larven wachsen am besten bei einer Temperatur von 28 bis 30°C. Bei einer Temperatur über 30°C steig die Sterblichkeitsrate der Larven rapide an. Es ist zu beachten, dass die Temperatur innerhalb der Aufzuchtboxen höher ist als die Umgebungstemperatur, da durch die Individuen Dichte und die Bewegung der Larven in den Boxen Wärme erzeugt wird (Ritzenhoff, 2018). Während in den Boxen mit frisch geschlüpften Larven so gut wie keine Wärme erzeugt wird, nimmt dieser Effekt mit dem Wachstum der Larven zu. Zukünftig könnte es deshalb von Vorteil sein, die kleinen Larven bei höheren Temperaturen zu halten als die größeren Larven. Für eine kleinere Insektenfarm empfehlen wir jedoch zunächst eine einheitliche Außentemperatur in der Larvenaufzucht zwischen 24° bis maximal 28°C.

3.1.2. Luftfeuchtigkeit

Eine hohe Luftfeuchtigkeit von 60 bis 70 % begünstigt das Larvenwachstum. Allerdings steigt bei einer hohen Luftfeuchte auch das Risiko für Kontaminationen mit Schimmelpilzen und Bakterien. Eine Luftfeuchtigkeit von rund 30 % ist ausreichend, um die Larven zu halten.

3.1.3. Durchlüftung

Für kleine Insektenfarmen ist die Belüftung der Larvenaufzucht noch nicht von allzu großer Bedeutung. Wir empfehlen trotzdem regelmäßig für kurze Zeit die Türen und Fenster des Larvenaufzuchtraumes zu öffnen, damit frische Luft in die Insektenfarm gelangen kann. Bei großen Insektenfarmen werden Luftwechselraten von 8 bis 15 rv/h empfohlen (Van Der Borght, 2019). Das heißt, das 8 bis 15-fache des Raumvolumens sollte in einer Stunde ausgetauscht werden. Dafür wird dann ein Lüftungssystem mit Zu- und Abluft benötigt.

3.2. Ablauf der Larvenaufzucht

Wie bereits beschrieben läuft die Larvenaufzucht in Batches ab. Ein Batch startet mit der Ei-Lieferung und ist voraussichtlich nach 10 Wochen beendet, sodass die Larven in der 11. Woche geerntet werden können. Die Larvenaufzucht gliedert sich in folgende Schritte:

3.2.1. Ansetzen der Aufzuchtboxen

Um eine neue Aufzuchtbox anzusetzen, werden zunächst 500 g des Trockenfutters in die Box gegeben (Abbildung 8; A, B). Daraufhin werden die Eier aus einem Ei-Behältnis gleichmäßig auf dem Substrat verteilt (Abbildung 8; B, C). Das Ganze wird für alle Boxen eines Batchs wiederholt. Die Boxen eines Batchs werden wie bereits zuvor beschrieben beschriftet, aufeinandergestapelt und im Larvenaufzuchtraum inkubiert.

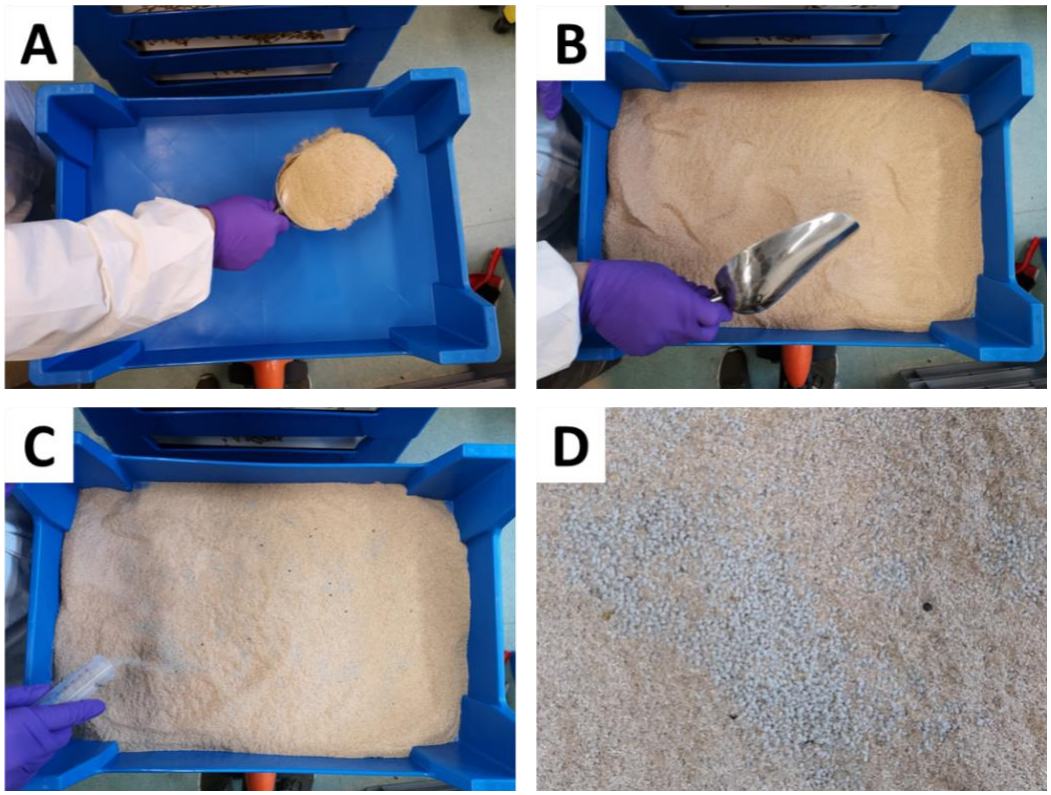

Abbildung 8: Ansetzen einer Larvenaufzuchtbox. Zunächst werden mit einer Futterschaufel 500 g Futtersubstrat in eine neue Box gegeben (A) und gleichmäßig in der Box verteilt (B). Die Eier aus einem Ei-Behälter werden dann gleichmäßig auf dem Futtersubstart verteilt (C). Die Eier sind deutlich vom Futtersubstrat unterscheidbar (D).

Nach etwa 7 bis 10 Tagen sind alle Larven aus den Eiern geschlüpft und beginnen zu fressen. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die eigentliche Larvenaufzucht, die bei 28°C und 30 bis 60% RH etwa 10 Wochen umfasst. In der 11. Woche können die Larven dann bei einem Individualgewicht von etwa 100 mg geerntet werden.

3.2.2. Trockenfütterung und Sieben

Als Trockenfutter haben wir sehr gute Erfahrungen mit Mühlennacherzeugnissen wie beispielsweise Weizenkleie und Grießkleie gemacht. Es können aber auch gerne andere Trockensubstrate getestet werden. Dabei ist es allerdings wichtig, dass innerhalb eines Batchs in allen Boxen dasselbe Futtersubstrat verwendet wird. Grundsätzlich ist beim Futter der Proteingehalt, der bestenfalls zwischen 15 und 21 % liegt, ein entscheidender Faktor, damit die Larven gut wachsen können.

Das Trockenfutter, das beim Ansetzten der Aufzuchtboxen hinzugefügt wurde, reicht voraussichtlich bis zum Beginn der 6. Woche aus, bevor der Großteil des Substrates aus Ausscheidungen besteht. Es wird dann als Restsubstrat bezeichnet. Der Unterschied zwischen Futter- und Restsubstrat ist in Abbildung 9 dargestellt.

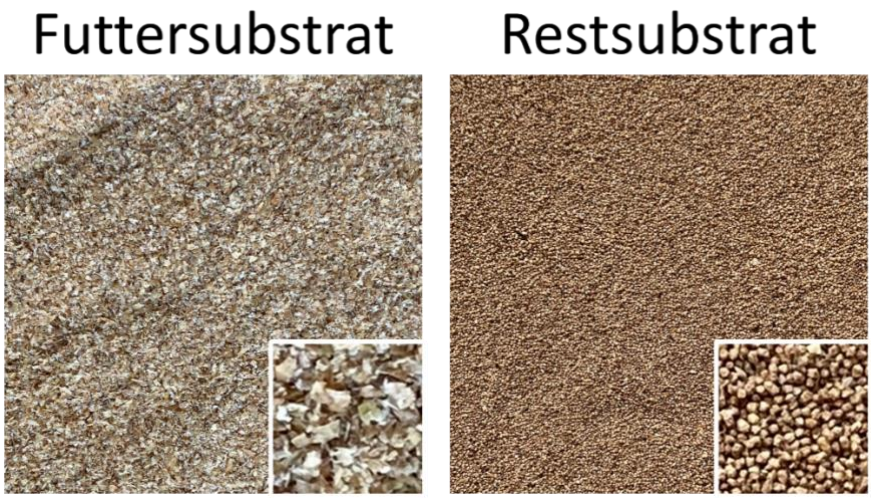

Abbildung 9: Unterschiedliches Erscheinungsbild von Futter- und Restsubstrat. Das Futtersubstrat, hier Weizengrießkleie, ist flockig und hat eine hellere Farbe als die dunkelbraunen, kugeligen Exkremente der Larven. Die Färbung der Exkremente kann je nach Substrat variieren.

Das Restsubstrat wird zunächst durch Sieben entfernt. Dazu wird die Aufzuchtbox in das Sieb entleert. Durch leichtes Schütteln des Siebes fällt das Restsubstrat durch das Siebgewebe und die Larven können sauber davon getrennt werden. Die Larven werden dann zusammen mit 500 g frischem Trockenfutter in die Box zurückgegeben. In der 7. und 8. Woche findet das schnellste Wachstum statt. Jeweils am Beginn der Wochen werden pro Box 500 g Trockenfutter ohne vorige Siebung zu den Boxen hinzugefügt (Abbildung 10).

Abbildung 10: Trockenfütterung der Larven. In die Larvenaufzuchtbox, bei der erkennbar nur noch Restsubstrat vorhanden ist (A) wird 500 g frisches Futtersubstart hinzugefügt (B) und gleichmäßig in der Box verteilt (C).

Beim Sieben und Trockenfüttern empfehlen wir das Tragen eines Schutzanzuges, einer Schutzbrille und einer Atemschutzmaske, sowie von Einmalhandschuhen zum persönlichen Schutz vor feinen, organischen Stäuben, die bei diesen Arbeitsschritten aufgewirbelt werden (Sharon Schillewaert, 2019).

3.2.3. Nassfütterung

Für ihren Wasserhaushalt benötigen die Mehlwürmer regelmäßig feuchtes Futter. Bisher haben sich vor allem Futtermöhren und Äpfel bewährt. Es können aber auch anderes Gemüse oder Obst oder andere Erzeugnisse (bspw. aus dem Ackerbau) mit ausreichend Feuchtigkeit verwendet werden. Wir empfehlen das Nassfutter mithilfe einer Küchenmaschine zu zerkleinern, dann kann es schneller von den Larven verzehrt werden und das Risiko, dass es das trockene Futtersubstrat aufweicht und Schimmel entsteht wird minimiert. Die Nassfütterung findet ab der 4. Woche jeweils zwei Mal wöchentlich statt. Die empfohlene Futtermenge ist der Übersicht (Tabelle 2) zu entnehmen. Der Ablauf ist in Abbildung 11 dargestellt.

Abbildung 11: Nassfütterung der Larven. Das zerkleinerte Nassfutter wird gleichmäßig mit der Hand (Handschuhe tragen!) oder mit einer Futterschaufel in der Box verteilt.

3.2.4. Ernte

Zu Beginn der 10. Wochen können die Larven geerntet werden. Durch Sieben werden die Larven dabei vom Restsubstrat getrennt. Danach werden sie für 24 Stunden ohne Futter in der Aufzuchtbox inkubiert. Dieser Schritt wird zur Entleerung des Verdauungstraktes der Larven durchgeführt. Nach 24 Stunden werden die Larven schließlich erneut gesiebt, um die restlichen Ausscheidungen abzutrennen und können dann verpackt und versendet oder bei 10 °C gelagert werden.

Abbildung 12: Erntereife Mehlwürmer.

3.2.5. Larven für die Reproduktion

Ein Anteil von ungefähr 10 % der geernteten Larven wird in die Reproduktion überführt. Diese müssen nicht über 24 Stunden ohne Futter inkubiert werden. Es werden immer nur etwa 500 g Larven in eine neue Aufzuchtbox, deren Boden mit einer dünnen Schicht Futtersubstrat bedeckt ist, überführt.

3.2.6. Lagerung und Versand

Die Larven können Kiloweise in Päckchen gefüllt und verschickt werden. Jedes Päckchen sollte dabei einen Eierkarton enthalten, damit sich die Larven während des Transports nicht gegenseitig zerquetschen.

3.2.7. Reinigung

Wir empfehlen das Sieb und die Futterschaufel nach jedem Arbeitstag, bei dem sie verwendet wurden, unter heißem Wasser zu reinigen. Ebenso sollten die Boxen mit heißem Wasser ausgespült werden, nachdem ein Batch geerntet wurde.

4. Troubleshooting

Eine gesunde Larvenpopulation ist das A und O in einer Insektenfarm. Ist mit der Population etwas nicht in Ordnung, so äußert sich das in einem langsameren Wachstum und oftmals in einer erhöhten Sterblichkeit der Larven. Tote Larven trocknen meist sehr schnell aus und verfärben sich schwarz oder hellgrau (Abbildung 13). Ursachen für eine erhöhte Sterblichkeit können falsche Umgebungsbedingungen wie Temperatur (wenn zu hoch) und Luftfeuchtigkeit (wenn zu niedrig), aber auch Insektenpathogene und Schädlinge darstellen. Im Folgenden werden die wichtigsten Pathogene und Schädlinge beschrieben.

Abbildung 13: Tote, ausgetrocknete Larven. Die Sterblichkeit der Larven ist ein Parameter dafür, ob es der Population gut geht. In einer gesunden Larvenpopulation treten nur vereinzelt tote Individuen auf.

4.1. Pathogene und Krankheiten bei *Tenebrio molitor*

In unserer Laborfarm hatten wir bisher noch keinerlei Krankheitsausbrüche bei unseren Mehlwürmern. Dennoch gibt es einige Insektenpathogene, die sowohl das Larven-, Puppen- als auch das Erwachsenenstadium des Mehlkäfers infizieren können und zu Einbrüchen in der Larvenaufzucht führen könnten. Bei einer industriellen Insektenfarm, in der die Tiere massenhaft gehalten werden, ist dieses Risiko natürlich nicht zu vernachlässigen. Ein Hauptgrund für das Auftreten und die Ausbreitung von Insektenpathogenen ist oftmals mangelnde Hygiene und eine unzureichende Entfernung toter Insekten. Außerdem kann eine gestresste Population anfälliger für opportunistische bakterielle Infektionen sein (Eilenberg, 2017).

4.1.1. Bakterien

Bei einer Infektion mit Bakterien, beispielsweise der Gattung *Serratia*, kommt es oftmals zu Veränderungen der Färbung und zur Schwellung der Insekten (Abbildung 14, E, F und G). Allerdings kommt es auch bei opportunistischen Bakterien, die beispielsweise in toten Larven wachsen können, zu ähnlichen Symptome, sodass es schwierig ist, zwischen echten Infektionen und dem Wachstum, das durch opportunistische Bakterien verursacht wird, zu unterscheiden. Es ist oftmals eine Polymerase-

Kettenreaktion erforderlich, um Bakterien auf Gattungs- oder Artniveau zu identifizieren (Eilenberg, 2017).

4.1.2. Pilze

Um Pilzinfektionen diagnostizieren zu können, lassen Sie die toten Larven mit frühen Symptomen (Abbildung 14, B) bis zu zwei Wochen in einer feuchten Kammer stehen (bspw. Geschlossenes Gefäß mit feuchtem Filterpapier). Bei einer Infektion mit *Beauveria* oder *Metarhizium* wird ein ausgedehnter Auswuchs beobachtet (Abbildung 14, C und D). Die erste Diagnose basiert auf der Farbe des Pilzes und anderen sichtbaren Symptomen, später wird die Sporenmorphologie zur Bestimmung des Gattungsnamens herangezogen. Wenn ein Artenname benötigt wird, kann eine PCR durchgeführt werden. Das Pilzwachstum auf toten Insekten kann durch Schimmelpilze verursacht werden (Eilenberg, 2017).

4.1.3. Viren und Protozoen

Mehlwürmer können sich ebenfalls mit Viren und Einzellern infizieren. Es ist jedoch wenig über die Auswirkungen auf die Insekten bekannt (Eilenberg, 2017).

4.1.4. Pathogen-Management

Die Boxen sollten regelmäßig auf tote Insekten überprüft werden. Kommen nur vereinzelt tote Insekten vor, so reicht es aus, diese lediglich zu entfernen. Wenn viele tote Larven vorgefunden werden, sollten die entsprechenden Boxen unter Quarantäne gestellt werden. Die äußerlichen Symptome der toten Larven könne bereits Rückschlüsse über mögliche Pathogene geben. Die Larven mit den infizierten Batches müssen meist abgetötet und unschädlich beseitigt werden. Die Boxen und Geräte sollten unverzüglich gereinigt und wenn möglich auch sterilisiert werden. (Eilenberg et al., 2015) (Eilenberg, 2017).

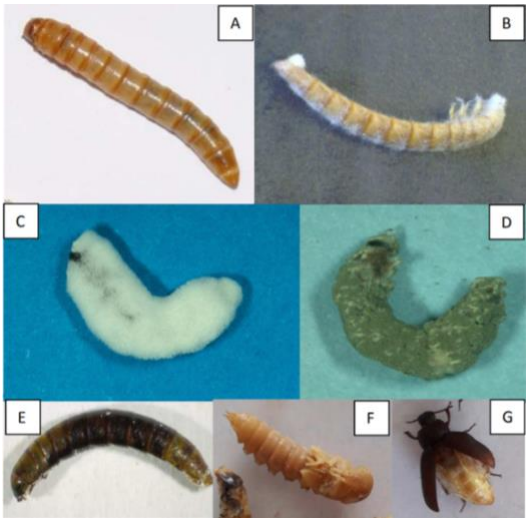

Abbildung 14: Übersicht möglicher Insektenpathogene von Tenebrio molitor: Gesunde Larve (A). Erster Auswuchs des Pilzes aus der Larve. Typische Pilzinfektionen werden von den Gattungen Beauveria und Metarhizium verursacht (B). Ausgedehnte Auswüchse und Sporenbildung, alle weißlich. Der Pilz ist Beauveria bassiana, mit weißen Sporen (C). In diesem Fall ist der Erreger der Pilz Metarhizium brunneum, welcher grüne Sporen in dichten Schichten aufweist (D). Eine Larve (dunkel), die von einem Bakterium getötet wurde. Bakterielle Infektionen werden durch sporenbildende oder nicht sporenbildende Arten verursacht (E). Puppe (rosa) durch das Bakterium Serratia marcescens getötet (F). Erwachsener Käfer mit geschwollenem Abdomen, möglicherweise durch ein

Bakterium oder einen anderen Mikroorganismus infiziert. Die Symptome können auch aus anderen Gründen als einer Infektion auftreten (G) (Eilenberg, 2017).

4.2. Schädlinge bei der Larvenaufzucht

Die Bedingungen einer Larvenaufzucht sind leider nicht nur optimal für Mehlwürmer, sondern ziehen auch Schädlinge an. Die drei häufigsten Schädlinge sind die Mehlmotte (*Plodia interpunctella*), Mehlmilben (*Acarus siro*) und der gemeine Speckkäfer (*Dermestes lardarius*). Am besten werden Schädlinge über präventive Maßnahmen wie beispielsweise der regelmäßigen Reinigung des Zucht-Equipments und des Larvenaufzuchtraums, der Lagerung des Futters in geschlossenen Behältern oder Futtersäcken und der Kontrolle des Futters beim Einkauf, vermieden.

4.2.1. Mehlmotte (*Plodia interpunctella*)

Der Entwicklungszyklus der Mehlmotte dauert vergleichbar lange wie der des Mehlwurms. Die Mehlmotte gehört zu den Schmetterlingen. Die Larven ernähren sich ebenfalls von Mehl und auch Mühlennacherzeugnissen, sodass sie mit den Mehlwürmern um Futter konkurrieren. Am häufigsten ist bereits das Futtermittel mit Mehlmotten Eiern kontaminiert, sodass es schwierig ist, die Schädlinge zu vermeiden. Wir haben gute Erfahrungen mit Klebefallen gemacht, um die ausgewachsenen Motten einzufangen und die Schädlinge unter Kontrolle zu halten. Bisher haben wir keinen negativen Einfluss auf das Larvenwachstum feststellen können.

Abbildung 15: Adulte Mehlmotte.

4.2.2. Mehlmilben (*Acaris siro*)

Mehlmilben gehören zu den Vorrats- und Futtermilben und können über das Futtersubstrat in die Larvenaufzucht eingeschleppt werden. Sie benötigen eine hohe Luftfeuchtigkeit von über 60 % und eine Substratfeuchte von 14 %. Bei einem möglichen Befall kann beispielsweise die Nassfütterung ausgesetzt werden und die Luftfeuchtigkeit herabgesetzt werden. Bei ungünstigen Bedingungen entwickeln sich allerdings sogenannte Dauernymphen, die bis zu 2 Jahre ohne Futter überleben können. Um die Milben nachhaltig zu bekämpfen, sollten die entsprechenden Aufzuchtboxen unter Quarantäne gehalten werden und die Zucht gründlich gereinigt werden. Weitere Infos zur Mehlmilbe finden Sie auf den Seiten des Umweltbundesamtes (https://www.umweltbundesamt.de/mehlmilbe#aussehen).

4.2.3. Gemeiner Speckkäfer (*Dermestes lardarius*)

In der Natur kommen Speckkäfer in Vogelnestern, Bienenstöcken und im Mulm von Laubbäumen vor, sie bewohnen aber als Kulturfolger hauptsächlich Lagerhäuser und ernähren sich dort von verschiedensten organischen Stoffen, wie z. B. Wolle, Textilien, Vorräten und tierischen Überresten. Der gemeine Speckkäfer hat einen schnelleren Entwicklungszyklus als der Mehlkäfer. Die ausgewachsenen Speckkäfer ernähren sich von kleinen Mehlwürmern und von den Mehlkäfer-Eiern. Wir haben bisher glücklicherweise noch keine Erfahrungen mit dem gemeinen Speckkäfer gemacht. Von anderen Zuchten haben wir jedoch bereits erfahren, dass sie zu einem starken Befall führen können und die Zuchträume daraufhin gründlich gereinigt werden müssen.

Abbildung 16: Larve des Gemeinen Speckkäfers. Die Larve hat lange Borsten.

5. Anhang

Tabelle 2: Übersicht über die Arbeitsschritte, die bei der Larvenaufzucht bei einem Batch anfallen. Die Übersicht soll Ihnen als Leitfaden dienen, wann welche Arbeitsschritte in der Zucht anfallen können. Natürlich können die Zeitpunkte und der Futterbedarf in Ihrer Larvenaufzucht variieren, sodass Sie beispielsweise schon früher als angegeben Futtersubstrat zufüttern können, sobald sichtlich nur noch Restfutter vorhanden ist, etc..

Woche	Tag	Stadium	Trockenfutter in g	Nassfutter in g	Substratwechsel
#1	Mo	Ei	500		
	Di				
	Mi				
	Do				
	Fr				
	Sa				
	So				
#2	Mo	Larve			
	Di				
	Mi				
	Do				
	Fr				
	Sa				
	So				
#3	Mo	Larve			
	Di				
	Mi				
	Do				
	Fr				
	Sa				
	So				
#4	Mo	Larve			
	Di			10	
	Mi				
	Do				
	Fr			10	
	Sa				
	So				
#5	Mo	Larve			
	Di			10	
	Mi				
	Do				
	Fr			10	
	Sa				
	So				
#6	Mo	Larve			
	Di			20	
	Mi				
	Do				
	Fr			20	
	Sa				
	So				
#7	Mo	Larve			
	Di		500	40	Sieben
	Mi				
	Do				
	Fr			40	
	Sa				
	So				

#8	Mo	Larve		
	Di		500	50
	Mi			
	Do			
	Fr			50
	Sa			
	So			
#9	Mo	Larve		
	Di		500	100
	Mi			
	Do			
	Fr			100
	Sa			
	So			
#10	Mo	Larve		
	Di			150
	Mi			
	Do			
	Fr			150
	Sa			
	So			
#11	Mo	erntereife Larven		Sieben
	Di		Kein Futter	
	Mi			
	Do		Versand / Lagerung	
	Fr			
	Sa			
	So			

6. Quellen

EILENBERG, J. 2017. Common insect diseases in yellow mealworm, Tenebrio molitor.

EILENBERG, J., VLAK, J., NIELSEN-LEROUX, C., CAPPELLOZZA, S. & JENSEN, A. B. 2015. Diseases in insects produced for food and feed. *Journal of Insects as Food and Feed,* 1**,** 87-102.

JONGEMA, Y. 2017. Worldwide list of recorded edible insects. *Aviable at: https://www.wur.nl/upload_mm/8/a/6/0fdfc700-3929-4a74-8b*, 69-f02fd35a1696_Worldwide.

RAMOS-ELORDUY, J. 2009. Anthropo-entomophagy: Cultures, evolution and sustainability. *Entomological Research,* 39**,** 271-288.

RITZENHOFF, P. 2018. Zuchtversuche Tenebrio molitor auf verschiedenen Substraten. *Zwischenbericht zu dem IGF Vorhaben 27L/N1,* Hochschuke Bremerhaven.

SHARON SCHILLEWAERT, F. V., JONAS CLAEYS 2019. Allergenen en stof bij de kweek van meelwormen. *TETRA project Entomatisation,* (HBC.2016.0126).

VAN DER BORGHT, M. 2019. Rearing, stabilization and biorefinery of edible insects at pilot scale. *Summer School Wageningen University*.

VAN HUIS, A., VAN ITTERBEECK, J., KLUNDER, H., MERTENS, E., HALLORAN, A., MUIR, G. & VANTOMME, P. 2013. *Edible insects: future prospects for food and feed security*, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

SHUKLA, J., PALLI, S. 2012. Sex determination in beetles: Production of all male progeny by Parental RNAi knockdown of transformer. *Scientific Reports,* 2:602.

BHATTACHARYA, A. K., AMEEL, J. J., WALDBAUE, G. P. 1970. A Method for Sexing Living Pupal and Adult Yellow Mealworms. *Annals of the Entomological Society of America*, Volume 63, Issue 6.