



**Verfahrenstechnische, umweltbezogene
und ökonomische Untersuchungen zur
Produktion und Verarbeitung eines
Eiweißfuttermittels für Geflügel
auf Basis von Larven der
Schwarzen Soldatenfliege - InseG**



Projektbericht

Finanzierung: StMELF

Förderkennzeichen: E/22/02

Geschäftszeichen: G2-7366-1/64

Projektlaufzeit: 01.02.2023 bis 31.01.2024

Projektleiter: Dr. Philipp Hofmann

Projektbearbeiter: Mathias Effenberger, Dr. Frank Schubert, Patrick Sudwischer, Dr. Thomas Venus, Wolfgang Westermeier

Herausgegeben im: März 2023

Verfahrenstechnische, umweltbezogene und ökonomische Untersuchungen zur Produktion und Verarbeitung eines Eiweißfuttermittels für Geflügel auf Basis von Larven der Schwarzen Soldatenfliege - InseG

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Darstellung des derzeitigen Kenntnisstandes.....	17
2	Evaluierung von ausgewählten regionalen Nebenprodukten der Lebensmittelverarbeitung als Substrat für die Larvenmast	19
2.1	Aufzucht, Mast und Eigewinnung.....	19
2.2	Futtersubstrate für die Larven der Schwarzen Soldatenfliege	19
2.3	Daten und Kennzahlen	24
2.4	Ergebnisse	25
2.5	Diskussion und Schlussfolgerung	32
3	Selektion der Larvengenetik zur gesteigerten Futtermittelnutzung von Nebenprodukten der Lebensmittelverarbeitung.....	33
3.1	Material und Methoden	33
3.2	Ergebnisse	35
3.2.1	Selektion auf Traubentrester	35
3.2.2	Selektion auf Holundertrester.....	38
3.2.3	Test der selektierten Larven im Mastdurchlauf.....	39
3.3	Diskussion und Schlussfolgerung	42
4	Untersuchungen zur optimierten Prozessierung der Larven und der nährstofflichen Charakterisierung der generierten Produkte.....	44
4.1	Verarbeitung von Insekten	44
4.1.1	Trockenverfahren	44
4.1.2	Nassverfahren.....	45
4.1.3	Mikrobiologische Untersuchungen	47
4.2	Ergebnisse	47
4.2.1	Trocknungstechnologie	47
4.2.2	Presskuchen aus dem Trockenverfahren	52
4.2.3	Nassverfahren.....	56
4.3	Anwendungsempfehlung.....	61
5	Ökobilanzielle Bewertung von Insektenprotein	63
5.1	Hintergrund	63
5.2	Material und Methoden - Durchführung der Studie.....	63
5.3	Zielgruppe	63
5.4	Beschreibung des zu untersuchenden Produktsystems	63
5.5	Beschreibung der Versuche als Basis für die Sachbilanz.....	65

5.5.1	Erprobung verschiedener Nebenprodukte aus der Lebensmittelverarbeitung als Nährsubstrate	65
5.5.2	Züchtung durch Selektion zur Verbesserung der Futtermittelverwertung von Reststoffen.....	66
5.5.3	Erprobung von Verfahren zur Herstellung eines Proteinfuttermittels aus Insektenlarven	66
5.6	Funktionale Einheit	67
5.7	Vergleichssystem: Bereitstellung von Sojaextraktionsschrot	68
5.8	Nebenprodukte aus der Lebensmittelverarbeitung und Allokationsverfahren	68
5.9	Varianten und Sensitivitätsanalyse.....	69
5.10	Methode der Wirkungsabschätzung	70
5.11	Aufstellung der Sachbilanz	70
5.12	Nährsubstrate für die Insekten.....	70
5.13	Aufzucht und Mast der Insektenlarven	72
5.14	Verarbeitung der gemästeten Larven zu einem Proteinfuttermittel	72
5.15	Verwertung von Fraß	74
5.16	Vergleichssystem Sojaextraktionsschrot.....	74
5.17	Ergebnisse der Umweltwirkungsbilanz.....	79
5.17.1	Produkt „Insektenlarven zur direkten Verfütterung“	79
5.17.2	Produkt „Eiweißfuttermittel aus Insektenlarven“	83
5.17.3	Vergleichsprodukt Sojaextraktionsschrot.....	84
5.18	Diskussion und Schlussfolgerung	86
6	Verwertungsmöglichkeit der Ergebnisse und Erfolgsaussichten nach Projektende	88
	Literaturverzeichnis	89

Abkürzungsverzeichnis

AT.....	Aroniabeerentrester
CCP	kritische Kontrollpunkte
D-Wert.....	Dezimalreduktionszeit D
GKZ.....	Gesamtkeimzahl
HT.....	Holunderbeerentrester
IFF	Internationale Forschungsgemeinschaft Futtermitteltechnik e.V.
KDS	Kartoffeldampfschalen
SES	Sojaextraktionsschrot
TBC	Gesamtbakterienzahl
TT	Traubentrester

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Gesamt-Larvengewicht nach Abschluss der Mastphase (a), Futteraufwand (b) und Gewicht Fraß (c) der Larven der Schwarzen Soldatenfliege, die mit Nebenprodukten der Lebensmittelverarbeitung gefüttert wurden. Unterschiedliche Buchstaben je Graphik zeigen signifikante Unterschiede an ($p < 0,05$). 26
- Abbildung 2: Überlebensrate der Larven der Schwarzen Soldatenfliege, die auf unterschiedlichen Futtersubstraten gemästet wurden..... 27
- Abbildung 3: Überblick über den Ablauf der Selektionsreihe. Bei den mit „Beobachtung“ gekennzeichneten Entwicklungsabschnitten wurden Daten erhoben, bei „Selektion“ zusätzlich nach Merkmalen (Größe und Gewicht) selektiert. 34
- Abbildung 4: Anpassung der Larven an das Futtersubstrat mit Traubentrester über sechs Generationen. **A:** Entwicklung des durchschnittlichen Puppengewichts unter Anpassung an das Futtersubstrat über sechs Generationen. Die lineare Trendlinie (blau) unterstreicht den erkennbaren Anstieg des Puppengewichts über den beobachteten Zeitraum ($R^2=0,98$). **B:** Entwicklung des Gesamterntegewichts der Puppenproduktion unter Anpassung an das Traubentrester-Substrat über sechs Generationen. Im Vergleich zu Generation 1, hat das Gesamtgewicht der Puppen aller weiterer Generationen zugelegt. Lineare Regression in blau mit $R^2=0,27$. **C:** Entwicklung der gemessenen Ei-Ausbeute unter Anpassung an das Futtersubstrat mit Traubentrester über sechs Generationen. Nach Reduktion der Ei-Ausbeute zu Beginn der Versuchsreihe, konnte in Generation 6 ein deutlicher Anstieg der Ei-Produktion gemessen werden. Lineare Regression in blau mit $R^2=0,23$. **D:** Beobachtung der Dauer des Lebenszyklus über sechs Generationen unter Anpassung an das Futtersubstrat. Über den Zeitraum von sechs Generationen hat sich die Dauer des Lebenszyklus von Ei zu Ei tendenziell verlängert. Die Ei-Mengen von Generation 2 konnten nicht zweifelsfrei ermittelt werden. Lineare Regression in blau mit $R^2=0,43$ 36
- Abbildung 5: Anpassung der Larven an das Futtersubstrat mit Holundertrester über 6 Generationen. **A:** Zunahme des durchschnittlichen Puppengewichts über sechs Generationen auf Holundertrester. Die Gewichtszunahme ist beinahe linear mit $R^2= 0,90$ (orange). **B:** Beobachtete Entwicklung des Gesamtgewichts der auf Holundertrester produzierten Puppen über sechs Generationen. Trotz fehlender Messpunkte für Generation 2 und 4 ist ein Anstieg des Gesamt-Puppengewichts klar erkennbar ($R^2= 0,74$, orange). **C:** Die Ei-Ausbeute über sechs Generationen auf Holundertrester-Substrat. Nach der ersten Generation auf Holundertrester bricht die Ei-Produktion in Generation 2 stark ein und erholt sich danach nicht mehr vollständig innerhalb des Beobachtungszeitraums, auch wenn in Generation 5 ein vergleichsweise hoher Wert gemessen wurde. $R^2= 0,1$ (orange). **D:** Die Dauer des Lebenszyklus von einer Ei-Generation zur nächsten bleibt zunächst nahezu unverändert und verkürzt sich in der sechsten Generation um vier Tage auf insgesamt 28 Tage. $R^2= 0,2$ (orange). 38
- Abbildung 6: Mastversuch mit den auf Traubentrester selektierten Larven. Vergleich der Leistung der 1. Generation zur 6. Generation. **A:** Das Durchschnittsgewicht der Larven nach der Mastphase nach der Selektion

	über sechs Generationen. Das Larvengewicht zwischen den getesteten Generationen bleibt nahezu gleich. Jedoch wird bei 50% Tresteranteil der Effekt der Selektion gut sichtbar. B: Die Selektion der Larven hat nur bei einer Inklusion von 50% Traubentrester im Mastfutter nach der 6. Generation zu einer Steigerung des Erntegewichts geführt und zeigt den positiven Effekt der vorangegangenen Selektion. C: Mit Ausnahme des Kontrollfutters, wurden nach sechs Generationen Selektion auf allen Restsubstrat-Mischungen bessere Überlebensraten erzielt als zu Beginn der Versuchsreihe. D: Aus den bisher beschriebenen Ergebnissen ergibt sich eine leichte Verbesserung des Futteraufwands bei den niedrigeren Beimischungen und eine Steigerung des Futteraufwands um mehr als 0,5 Einheiten für die 50%-Mischung. Standardabweichungen werden als Fehlerbalken dargestellt.	40
Abbildung 7:	Mastversuch mit den auf Holundertrester selektierten Larven. Vergleich der Leistung der 1. Generation zur 6. Generation. A: Das durchschnittliche Larvengewicht ist nach sechs Generationen höher als noch in der 1. Generation. Mit zunehmender Inklusion von Holundertrester im Futtersubstrat ist dieser Effekt stärker ausgeprägt. B: Das Gesamtgewicht der Larven pro Mastkiste fiel nach der Selektion für alle Futtermischungen höher aus. In der 1. Generation nahm das Gesamtgewicht mit höherem Anteil an Holundertrester im Futter ab, in der 6. Generation ist dieser Effekt umgekehrt. C: Die ohnehin bereits hohe Überlebensrate der Larven auf Holundertrester konnte durch die Selektion nicht weiter gesteigert werden. D: Nach sechs Generationen Selektion auf Holundertrester zeigt sich bei allen Inklusionsgraden eine Verbesserung der FCR im Vergleich zur 1. Generation. In der 6. Generation bewirkte ein höherer Anteil Holundertrester im Futter eine bessere FCR als niedrigere Inklusionsgrade. Standardabweichungen als Fehlerbalken.....	41
Abbildung 8:	Schematische Darstellung des Trockenverfahrens.....	45
Abbildung 9:	Schematische Darstellung des Nassverfahrens	46
Abbildung 10:	Spezifischer Energiebedarf in kWh/t frische Larven bei verschiedenen Trocknungstemperaturen.....	48
Abbildung 11:	Abbaurrate der Proteinlöslichkeit (normiert auf 100 % Ursprungslöslichkeit) bei verschiedenen Trocknungstemperaturen.	49
Abbildung 12:	Beispiel Maillard-Reaktion mit Lactose und Lysin.	50
Abbildung 13:	Schematische Darstellung des zu untersuchenden Produktsystems für die Erzeugung und Aufbereitung von Insektenlarven als Futtermittel, einschließlich der Verwertung von Fraß als Substitut für Maissilage zur Biogaserzeugung.	64
Abbildung 14:	Prozess- und Stoffstromplan des bilanzierten Produktsystems für die Bereitstellung von Insektenlarven zum direkten Verfüttern, einschließlich der Verwertung von Fraß zur Biogaserzeugung im Austausch für Maissilage; funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein in Larven-Frischmasse. Plan erstellt unter LCA for Experts Version 10.7.1.28 (Sphera Solutions GmbH).....	65
Abbildung 15:	Prozessplan des Verfahrens zur nassen Verarbeitung der Larven im Stoffstrommodell.....	67
Abbildung 16:	Prozessplan des Verfahrens zur trockenen Verarbeitung der Larven im Stoffstrommodell.	67

Abbildung 17: Stoffstrommodell für Sojaextraktionsschrot, welches in der EU aus in der EU angebauten Sojabohnen hergestellt wurde.....	78
Abbildung 18: Stoffstrommodell für Sojaextraktionsschrot, welches in der EU aus importierten Sojabohnen hergestellt wurde.	78
Abbildung 19: Stoffstrommodell für Sojaextraktionsschrot, welches als solches in die EU importiert wurde.....	79
Abbildung 20: Gegenüberstellung der Bilanzwerte für die Umweltwirkung a) Klimawandel (ausschl. biog. Kohlenstoff) bzw. b) Terrestrische Versauerung im Basis-Szenario und in den drei Varianten des Produktsystems „Insektenlarven zur direkten Verfütterung“, unterteilt nach Energiebedarf (KE: konventionelle Energieversorgung; EE: erneuerbare Energieversorgung), Mastfutter, direkte Emissionen und vermiedene Emissionen durch Fraßverwertung; bewertet nach ReCiPe2016v1.1 Midpoint (H); funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein.	81
Abbildung 21: Aufteilung der Umweltwirkungen a) Klimawandel (ausschließl. biog. C), (b) Feinstaubbildung und c) Terrestrische Versauerung auf die einzelnen Prozesse im Produktsystem „Insektenlarven zur direkten Verfütterung“ in der Variante 1 – Weizenkleie + Kartoffel-Dampfschalen; bewertet nach ReCiPe2016v1.1 Midpoint (H); funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein.	82
Abbildung 22: Aufgliederung der Bilanzwerte für die Umweltwirkung Klimawandel (ausschl. biog. C) für die Larvenverarbeitung im „nassen“ Verfahren für die Variante Strommix (ausgefüllte dunkelblaue Säulen) vs. EE-Strom (türkis umrandete Säulen); bewertet nach ReCiPe2016v1.1 Midpoint (H); funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein.	84
Abbildung 23: In der vorliegenden Studie berechneter Wert zur spezifischen Umweltwirkung von Soja-Extraktionsschrot auf den Klimawandel (Säule ganz links ohne Füllung) im Vergleich zu Literaturwerten (Anmerkungen: Die veröffentlichten Zahlenwerte konnten nicht alle auf dieselbe Charakterisierungsmethode umgerechnet werden und sind deshalb nicht exakt vergleichbar. *) Säule markiert den Mittelwert, angedeutet ist zusätzlich der Wertebereich zwischen dem 10. und 90. Perzentil); Bezugswert: 1 kg Rohprotein.....	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nährstoffkonzentration (g/kg, wenn nicht anders gekennzeichnet, Bezug auf 88 % TM) der Nebenprodukte, die in den Versuchsfuttermischungen eingesetzt wurden.	20
Tabelle 2: Zusammensetzung (%) der für die Mast der Larven der Schwarzen Soldatenfliege eingesetzten Nährsubstrate.	21
Tabelle 3: Nährstoffkonzentration (Nährstoffkonzentration (g/kg, wenn nicht anders gekennzeichnet, Bezug auf 88 % TM)) der Mischungen an Nährsubstraten, die an die Larven der Schwarzen Soldatenfliege verfüttert wurden.	22
Tabelle 4: Nährstoffkonzentration (g/kg, Bezug auf 88 % TM) von Larven der Schwarzen Soldatenfliege, die mit unterschiedlichen Futtersubstraten gefüttert wurden.	28
Tabelle 5: Nährstoffkonzentration (g/kg, Bezug auf 88 % TM) von Fraß der Schwarzen Soldatenfliege, die mit unterschiedlichen Futtersubstraten gefüttert wurden.	30
Tabelle 6: Die für die Selektionsversuche eingesetzten Futtersubstrate.	34
Tabelle 7: Extraktionsparameter für die Extraktion der Insekten mittels Nassverfahren.	46
Tabelle 8: Bildung von Furosin während der Trocknung von Insekten.	50
Tabelle 9: Analysedaten sowohl für die Rohware als auch für die hergestellten Presskuchen.	53
Tabelle 10: Analysedaten der mikrobiologischen Untersuchungen.	54
Tabelle 11: Energiebedarf in Kilowattstunden pro Tonne Frischmasse.	55
Tabelle 12: Analysedaten der Rohware sowie der im Nassverfahren hergestellten Presskuchen.	56
Tabelle 13: Analysedaten der mikrobiologischen Untersuchungen.	58
Tabelle 14: Energieverbrauch in Kilowattstunden (kWh) pro Tonne Frischmasse.	60
Tabelle 15: Zur Modellierung des Mastprozesses verwendete Parameter, welche aus den Versuchsergebnissen durch Mittelwertbildung abgeleitet wurden (TM: Trockenmasse; FM: Frischmasse).	71
Tabelle 16: Auflistung der in der Sachbilanz verwendeten Parameter zur Modellierung der Bereitstellung der eingesetzten Nährsubstrate.	71
Tabelle 17: Auflistung der in der Sachbilanz erfassten Parameter für die Prozesse zur Bereitstellung vom Fraß gereinigter Larven, exklusive der eingesetzten Nährsubstrate.	72
Tabelle 18: Auflistung der in der Sachbilanz verwendeten Parameter zur Modellierung der Verarbeitungsprozesse von Insektenlarven.	73
Tabelle 19: Auflistung der verwendeten Parameter zur Modellierung der Substitution von Maissilage für die Biogaserzeugung durch Fraß.	74
Tabelle 20: Herkunft und Charakterisierung des innerhalb der EU als Futtermittel verwendeten Rohproteins aus Sojaschrot für 2022/23 (verändert nach [10][8]).	75
Tabelle 21: Aufteilung der Importe an Sojabohnen nach Deutschland im Jahr 2022 nach Herkunft (Spalten 1 bis 3, verändert nach [8]) sowie Modellierung im Vergleichssystem (Spalten 4 und 5).	75
Tabelle 22: Aufteilung der Importe an Sojaschrot nach Deutschland im Jahr 2022 nach Herkunft (Spalten 1 bis 3, verändert nach [8]) sowie Modellierung im Vergleichssystem (Spalten 4 und 5).	76

Tabelle 23: Annahmen zur Modellierung der transportbedingten Emissionen für die Materialströme von Sojaextraktionsschrot (Quellen: [11],[12] bzw. wie in Tabelle angegeben).	77
Tabelle 24: Ergebnisse für ausgewählte Umweltwirkungen des Produktsystems „Insektenlarven zur direkten Verfütterung“ im Basis-Szenario mit Aufteilung in die Kategorien Energiebedarf, Mastfutter, direkte Emissionen und vermiedene Umweltwirkungen, bewertet nach ReCiPe2016v1.1 Midpoint (H) [14]; funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein. 80	80
Tabelle 25: Ergebnisse für ausgewählte Umweltwirkungen der Verarbeitung der Insektenlarven zu einem Eiweißfuttermittel im nassen und trockenen Verfahren mit Energieversorgung aus dem Strommix, bewertet nach ReCiPe2016v1.1 Midpoint (H) [8]; funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein. 83	83
Tabelle 26: Ergebnisse für ausgewählte Umweltwirkungen des Vergleichssystems „Proteinfuttermittel-Mix aus Sojaextraktionsschrot (SES)“ bewertet nach ReCiPe2016v1.1 Midpoint (H) [14]; funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein.	85

Zusammenfassung

Derzeit besteht in Deutschland eine vergleichsweise große Abhängigkeit von Futtermittelimporten, insbesondere für hochwertige Eiweißfuttermittel wie Sojaextraktionsschrot, welches überwiegend aus Nord- und Südamerika importiert wird. Die negativen Umweltauswirkungen des Pestizideinsatzes und der Rodung von Primärwäldern beim Sojaanbau sowie die kritische Sichtweise der Verbraucher/-innen auf den Einsatz von gentechnisch verändertem Saatgut machen alternative Eiweißquellen für die Nutztierfütterung notwendig. Insektenprotein, insbesondere von Larven der Schwarzen Soldatenfliege, rückt daher als vielversprechende Alternative in den Fokus der Forschung. Damit die Produktion von Larven der Schwarzen Soldatenfliege effizient und nachhaltig erfolgen kann, ist es erforderlich die Fütterung der Larven der Schwarzen Soldatenfliege näher zu untersuchen.

Die Mast von Larven der Schwarzen Soldatenfliege erfolgte in der hier beschriebenen Studie auf verschiedenen Nährsubstraten: neben Weizenkleie waren dies Nebenprodukte / Trester aus der Trauben- (TT { XE "TT" \t "Traubentrester" }), Holunderbeeren- (HT{ XE "HT" \t "Holunderbeerentrester" }), und Aroniabeerenverarbeitung (AT{ XE "AT" \t "Aroniabeerentrester" }) sowie Kartoffeldampfschalen (KDS{ XE "KDS" \t "Kartoffeldampfschalen" }). Es wurden die Auswirkungen dieser Substrate u.a. auf das Larvenwachstum und den Futteraufwand untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl des Nährsubstrats einen signifikanten Einfluss auf das Larvenwachstum und den Futteraufwand hat. Anteile von HT führten zu geringeren Larvengewichten und erhöhtem Futteraufwand im Vergleich zu anderen Substraten wie KDS. Bei einem Anteil von 50% verringerte sich die Wachstumsleistung der Larven über alle Nebenprodukte hinweg. Die Zusammensetzung des Larvenproteins variierte je nach verwendetem Substrat, wobei Larven, die mit HT gefüttert wurden, die höchste Konzentration an Rohprotein und Aminosäuren aufwiesen. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Bedeutung der Substratwahl für die Qualität des Insektenproteins. Eine ausgewogene Mischung der Substrate ist daher entscheidend für eine erfolgreiche Larvenmast.

Darüber hinaus wurden Selektionsversuche mit Larven der Schwarzen Soldatenfliege durchgeführt, um sie an Futtersubstrate mit hohem Anteil an TT und HT anzupassen. Über sechs Generationen hinweg wurden Larven auf Futtermischungen gezüchtet, die 50% TT bzw. 50% HT enthielten. Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Zunahme des durchschnittlichen Gewichts der Puppen und der Gesamternte der Puppen über die Selektionsreihe hinweg, was auf eine erfolgreiche Anpassung hinweist. Die Ei-Produktion und die Lebenszyklus-Dauer zeigten jedoch keine einheitlichen Verbesserungen. In Mastversuchen nach der Selektion bestätigten sich die vielversprechenden Ergebnisse, insbesondere bei einer 50%igen Beimischung von TT oder HT im Futter. Die Studie legt nahe, dass die Schwarze Soldatenfliege durch Selektion an unterschiedliche Futtersubstrate angepasst werden kann. Es wird empfohlen, die Selektionslinien fortzuführen, um weitere Anpassungen zu erforschen und effizientere Zuchtlinien zu entwickeln.

Aufgrund ihres hohen Rohfettgehalts müssen Larven der Schwarzen Soldatenfliege entfettet werden, damit sie hohe Anteile von Sojaextraktionsschrot in Futtermischungen für Nichtwiederkäuer ersetzen können. In der hiesigen Studie wurden das Trocken- und Nassverfahren für die Entfettung von Larven der Schwarzen Soldatenfliege verglichen. Zur Beurteilung

des Effektes der Restfeuchte auf den Pressprozess im Trockenverfahren wurden die Versuche mit Restfeuchtegehalten von 3, 4 und 5% durchgeführt. Für die Austrittsfläche des Presskuchens wurden zwei unterschiedliche Scheiben mit einer Austrittsfläche von 791 und 1.017 mm² verwendet. Es zeigte sich, dass die Feuchtigkeitsgehalte der Presskuchen unabhängig von den gewählten Prozessparametern gleich waren. Die Ölausbeute beim Pressen war am größten, wenn eine kleine Austrittsmatrize (791 mm²) verwendet wurde und die Produktfeuchtigkeit bei 5 % lag. Eine Vergrößerung der Austrittsmatrize (1.017 mm²) führte zu einer signifikanten Reduzierung der Ölausbeute auf unter 10 %. Die Rohproteinkonzentration im Presskuchen stieg mit zunehmender Ölausbeute und erreichte maximal 48,4 %. Dies bedeutet eine Aufkonzentration von +10 % im Vergleich zur Rohware.

Beim Nassverfahren wurden für die Fettextraktion die Parameter Temperatur (60°C, 80°C, 100°C), Extraktionsdauer (52 Sekunden, 64 Sekunden, 88 Sekunden) und Salzsäurekonzentration (0,10 M oder 0,04 M Salzsäure) variiert, um den Effekt auf die Entfettung zu untersuchen. Die Trennung von Insektenfett und Protein führte zu einer Rohprotein Konzentrationsabnahme. Dies lässt sich durch die Löslichkeit von Proteinen in der Extraktionslösung erklären. Die weiterführende Technik zur Aufkonzentration der wässrigen Phase wurde im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt. Eine relevante Ölausbeute wurde nur bei spezifischen Bedingungen erreicht: Verwendung von 0,1 M HCl und einer Aufschlusstemperatur von 100 °C, wobei ein Restfettgehalt von ca. 18% im Proteinmehl verblieb. Andere Versuchsbedingungen ergaben keine technologisch relevanten Ergebnisse.

Um den potenziellen Beitrag des Einsatzes von Larven der Schwarzen Soldatenfliege in der Nutztierfütterung zur Reduzierung der Umweltauswirkungen in der Tierhaltung zu bestimmen, wurde eine ökobilanzielle Bewertung von Insektenprotein durchgeführt. Die Studie konzentrierte sich auf die Analyse der Nährsubstrate, Mastverfahren und Verarbeitungsschritte. Die funktionale Einheit betrug 1 kg Rohprotein im erzeugten Futtermittel. Die Allokation von Umweltwirkungen erfolgte primär nach Masse, als Referenz diente ein Vergleichssystem für die Bereitstellung von Sojaextraktionsschrot. Die Bilanzierung des Produkts „Insektenlarven zur direkten Verfütterung“ zeigte, dass eine erhebliche Umweltwirkung der Ammoniakemission aus der Insektenmast entstehen. Die Entfettung (sowohl Trocken- als auch Nassverfahren) der Insektenlarven erzeugt zusätzliche Umweltbelastungen. Die ökobilanzielle Bewertung der Produktion von Insektenprotein für die Nutztierfütterung ergab, dass die Auswahl der Nährsubstrate den größten Einfluss auf die Umweltauswirkungen hat. Etwa 90 bis 95 % der Umweltwirkungen sind auf die eingesetzten Nährsubstrate wie Weizenkleie, KDS und TT zurückzuführen, wenn diese nicht allokatonsfrei gestellt werden können. Die erhobenen Daten zur Aufzucht und Mast von Insektenlarven unterliegen einer gewissen Unsicherheit, und die Effizienz des Prozesses kann von Betrieb zu Betrieb variieren. Eine weitergehende Verarbeitung der Larven zu proteinreichen Futtermitteln kann unter dem Aspekt der Umweltbelastung sinnvoll sein, wenn der Energiebedarf aus Ökostrom gedeckt wird. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen im Technikumsmaßstab sind jedoch nur begrenzt auf eine industrielle Umsetzung übertragbar, und Lösungen für die Verwertung von Reststoffen und Abwasserströmen müssen gefunden werden. Zukünftige Arbeiten zur Ökobilanzierung von Insektenprotein sollten darauf abzielen, das Produktsystem realitätsnah zu definieren, insbesondere hinsichtlich der Bewertung der eingesetzten

Nährsubstrate. Ein Stoffstrommodell, wie im Projekt entwickelt, bietet eine gute Grundlage und kann relativ einfach erweitert und verfeinert werden. Idealerweise sollten konkrete Fallbeispiele aus der Umsetzung der Larvenerzeugung auf landwirtschaftlichen Betrieben bilanziert werden, um realistische Daten zu erhalten.

Die generierten Daten aus dieser Studie liefern wertvolle Erkenntnisse, die direkt im Nachfolgeprojekt InseG2 verwendet und weiterentwickelt werden können. Dieses Nachfolgeprojekt befasst sich mit der Verfütterung von vollfetten und entfetteten Larven der Schwarzen Soldatenfliege beim Masthuhn. Neben der Verdaulichkeit der Insektenmehle und der Erfassung von Mast- und Schlachtmerkmalen wird auch die Ökobilanz und Ökonomie der Masthühnerhaltung unter Einsatz von Insektenprotein erfasst.

1 Einleitung und Darstellung des derzeitigen Kenntnisstandes

Mit Beginn des Angriffskriegs Russlands auf die Ukraine im Februar 2022 wurden Futtermittel in Deutschland schlagartig knapp und es folgte eine überdurchschnittliche Erhöhung der Futtermittelpreise. Auch wenn sich die Situation mittlerweile wieder entspannt hat, wurde die Abhängigkeit von Futtermittelimporten deutlich. Speziell die bei der Fütterung von Nichtwiederkäuern wie Geflügel benötigten hochwertigen Eiweißfuttermittel, insbesondere Sojaextraktionsschrot (SES{ XE "SES" \t "Sojaextraktionsschrot" }), können in Deutschland bzw. Europa nicht in ausreichender Menge produziert werden. Für den Sojabohnenanbau in Nord- und Südamerika werden überwiegend gentechnisch veränderte Sorten verwendet, was von Verbraucherinnen und Verbrauchern zunehmend kritisch gesehen wird. Zudem werden in Südamerika Regenwaldflächen für den Sojaanbau gerodet, was aus Sicht des Umwelt- und Klimaschutzes negativ zu bewerten ist. Um unabhängiger von Futtermittelimporten zu werden und die Tierhaltung nachhaltiger zu gestalten, sind daher alternative Eiweißfuttermittel von Nöten, die möglichst regional erzeugt werden können.

In den vergangenen Jahren rückte die Anwendung von Insekten als alternatives Eiweißfuttermittel bei der Rationsgestaltung von Geflügel in den Fokus der Forschung (Moula und Dettleux 2019; Hartinger et al. 2021). Eiweißfuttermittel, generiert aus der Insektenproduktion, bieten die Möglichkeit zur Verringerung der Abhängigkeit von Futtermittelimporten aus Übersee, vorrangig Sojaextraktionsschrot, bei deutlich verminderten negativen Umweltwirkungen der Futtermittelproduktion und -bereitstellung (Schäfer et al. 2016). Darüber hinaus kann, je nach Produktion der Insekten, durch die Verfütterung von Insektenprotein der ökologische Fußabdruck des erzeugten tierischen Lebensmittels verringert werden. Speziell die Erzeugung von Larven der Schwarzen Soldatenfliege wurden in den vergangenen Jahren intensiv wissenschaftlich erforscht. Diesbezüglich konnte bereits nachgewiesen werden, dass in der Masthühnerfütterung hohe Mengenteile an Sojaextraktionsschrot durch Larven der Schwarzen Soldatenfliege ersetzt werden können, ohne das Wachstum beim Masthähnchen negativ zu beeinflussen (Hartinger et al. 2021).

Aufgrund gesetzlicher Vorgaben werden Larven der Schwarzen Soldatenfliege in der EU derzeit häufig mit hochwertigen Substraten (basierend auf Mais und Sojaextraktionsschrot etc.) gemästet, welche auch direkt ohne Transformation über die Insekten an Nutztiere verfüttert werden könnten. Dies ist dadurch begründet, dass Insekten, die zum Einsatz als Futtermittel gezüchtet werden, ebenfalls dem Futtermittelrecht unterliegen und deshalb nur mit solchen Nährsubstraten erzeugt werden dürfen, die wiederum futtermittelrechtlich zugelassen sind. Die Verfütterung von Abfällen aus der Lebensmittelerzeugung oder -verarbeitung ist daher in der Regel verboten. Der Einsatz von Insekten im Futter von Geflügel kann aber nur dann nachhaltig und effizient erfolgen, wenn die Futtergrundlage der Insekten in möglichst geringer Konkurrenz zu Mensch und Nutztier steht.

Unter diesen Gegebenheiten stellt die Verfütterung von Insektenlarven in der Geflügelernährung momentan noch keine wirtschaftlich und ökologisch nachhaltigere Alternative zu importierten Eiweißfuttermitteln, vorrangig Sojaextraktionsschrot, dar. Dies könnte jedoch geändert werden, indem regional anfallende Reststoffe aus der Lebensmittelverarbeitung für die Larvenaufzucht eingesetzt werden. Neben der Substratqualität wird das Wachstum der Insektenlarven zudem von der Larvengenetik beeinflusst. Die Forschung zu den bestmöglichen Kombinationen aus Larvengenetik und Substrat wird hierbei durch den sehr kurzen Reproduktionszyklus der Insektenlarven begünstigt.

Um Extraktionsschrote, z. B. von Soja oder Raps, in den Futtermischungen für Geflügel durch Insektenprotein ersetzen zu können, müssen die Insektenlarven aufgrund des hohen Rohfettgehaltes entfettet werden. Die Entfettung der Larven resultiert in einer Aufkonzentration des Gehaltes an Protein und der darin enthaltenen Aminosäuren im Futtermittelausgangsstoff und ermöglicht einen gesteigerten Einsatz in der Ration in der Geflügelfütterung, da ohne Entfettung der hohe Energie- bzw. Fettgehalt den Einsatz limitieren würde. Im Hinblick auf die Prozessierung (Entfettung) der Insekten besteht noch Forschungsbedarf zu den einzelnen Prozessparametern.

Um Insektenprotein in der Nutztierfütterung sinnvoll zu implementieren, ist zusätzlich eine vergleichende ökonomische und ökologische Bewertung der Herstellung von Eiweißfuttermitteln auf Basis der Larven der Schwarzen Soldatenfliege vorzunehmen. In der Auswahl der Nährsubstrate für die Insektenlarven wird das größte Potenzial gesehen, um die negativen Umweltwirkungen der konventionellen Erzeugung von Futtermitteln für die Nutztierhaltung durch den Einsatz von Insektenprotein signifikant zu verringern. Die ökobilanzielle Bewertung der Umweltwirkungen verschiedener Nährsubstrate für Larven der Schwarzen Soldatenfliege soll hierfür fundierte Informationen liefern.

In diesem Forschungsvorhaben wurde deshalb die Produktion und Verarbeitung von Insektenprotein als heimisches, regional produziertes Eiweißfuttermittel näher untersucht. Die Ergebnisse sollen als Grundlage dienen, um im Nachfolgeprojekt „InseG2“ den Einsatz von Insektenprotein in der Hühnermast näher untersuchen zu können.

2 Evaluierung von ausgewählten regionalen Nebenprodukten der Lebensmittelverarbeitung als Substrat für die Larvenmast

Als Teil des Projekts "Verfahrenstechnische, umweltbezogene und ökonomische Untersuchungen zur Produktion und Verarbeitung eines Eiweißfuttermittels für Geflügel auf Basis von Larven der Schwarzen Soldatenfliege – InseG" des Instituts für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft wurde die FarmInsect GmbH mit der Durchführung der Aktivitäten zur Haltung und Mast der Larven der Schwarzen Soldatenfliege beauftragt. Im Folgenden wird die Aufzucht und Gewinnung von Larven der Schwarzen Soldatenfliege, die auf verschiedenen Nährsubstraten gemästet wurden, beschrieben.

2.1 Aufzucht, Mast und Eigewinnung

Die Aufzucht der Larven vom Ei bis zum Präpuppenstadium fand in Boxen mit einer Grundfläche von 40 cm x 60 cm in automatisch gesteuerten und sensorüberwachten Klimakammern statt. Das Klima (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Lufttauschrate) wurde über den Aufzucht- und Mastzeitraum der Tiere dynamisch geregelt und ist an die Bedingungen und Anforderungen der larvalen Entwicklungsstadien angepasst (33 °C bis 35 °C, 30% bis 85% rH). Die im Puppenstadium befindlichen Fliegen wurden anschließend in klimakontrollierte Flugkäfige überführt, wo die Fliegen für die darauffolgende Eiproduktion schlüpften.

2.2 Futtersubstrate für die Larven der Schwarzen Soldatenfliege

Das Hauptziel dieser Versuche bestand darin, die grundsätzliche Verwertbarkeit verschiedener Nebenströme wie TT, HAT, AT sowie KDS durch die Larven der Schwarzen Soldatenfliege zu bewerten. Die Nährstoffzusammensetzung der verwendeten Nebenprodukte ist in Tabelle 1 dargestellt.

Die Tiere, die als Ausgangspunkt für die Versuchsreihe dienten, wurden aus der Zuchtlinie der FarmInsect GmbH entnommen, deren spezifische Wachstumsmerkmale bekannt sind. Für jede Futterration standen 6 Boxen (40 cm x 60 cm) zur Verfügung, in denen die Larven gemästet wurden. Zu Beginn der Mast enthielt jede Box ca. 11.000 Larven, die zum Zeitpunkt des Besatzes sechs Tage alt waren. In jede Box wurden 10 kg Futtersubstrat gegeben. Nach Beendigung der siebentägigen Mastphase wurden die Larven durch Sieben vom Fraß (Kot-/Futtergemisch, welches nach der Ernte der Larven übrig bleibt) getrennt und die versuchsrelevanten Daten erhoben (siehe 2.3).

Als Kontrollration diente ein standardisiertes Aufzuchtfutter (Tabelle 2). Dieses basierte auf den Mühlennebenprodukten Weizenkleie und Weizengrieß und wird üblicherweise bei der FarmInsect GmbH als Mastfutter eingesetzt. In den Versuchsrationen wurden TT, HT, AT und KDS in Anteilen von 15%, 30% und 50% im Austausch gegen Weizenkleie und Weizengrieß eingemischt. Zusätzlich wurden auch Kombinationen verschiedener Restströme getestet. Die Futtersubstrate wurden so konzipiert und mit Wasser versetzt, dass in allen

Gruppen ein Trockenmassegehalt von 22% erreicht wurde. Die Nährstoffzusammensetzung der Futtersubstrate ist in Tabelle 3 dargestellt. Während der 7-tägigen Mast wurde das Larvenwachstum, die Überlebensrate, der Futteraufwand sowie das Gewicht vom Fraß bewertet.

Tabelle 1: Nährstoffkonzentration (g/kg, wenn nicht anders gekennzeichnet, Bezug auf 88 % TM) der Nebenprodukte, die in den Versuchsfuttermischungen eingesetzt wurden.

	Trauben- trester	Holundertres- ter	Aronia- trester	Kartoffeldampf- schalen
Rohprotein	90	115	56	88
Rohfett	41	61	36	2
Rohfaser	120	255	229	33
Rohasche	72	47	15	52
Cystein	1,14	3,02	1,04	1,08
Asparaginsäure	6,48	7,63	5,02	10,42
Methionin	1,40	1,95	0,86	1,07
Threonin	3,60	4,13	2,26	2,76
Serin	4,19	4,81	2,68	2,91
Glutaminsäure	9,12	11,30	7,16	8,99
Glycin	4,60	6,88	3,36	2,78
Alanin	4,47	5,37	2,91	5,29
Valin	4,21	5,63	3,09	4,05
Isoleucin	3,17	3,94	2,39	2,77
Leucin	5,68	7,12	4,25	4,61
Phenylalanin	3,64	4,51	2,38	2,87
Lysin	4,84	5,84	3,60	4,31
Histidin	2,24	2,32	1,32	1,20
Arginin	4,75	6,16	3,02	2,03
Prolin	4,99	4,97	2,78	3,14
Calcium	3,6	4,1	2,7	1,2
Phosphor	3,5	3,5	1,1	2
Natrium	0,06	0,04	0,06	0,21
Magnesium	1	1,5	0,4	0,9
Kalium	28,3	7,7	1,8	20,9
Schwefel	1,8	1,7	0,7	1,4
Eisen, mg/kg	63,4	258,1	98,7	60
Kupfer, mg/kg	39,7	33,8	4,5	8,6
Zink, mg/kg	10,4	17,3	4,8	19,4
Mangan, mg/kg	8,6	14,5	20,6	12,1

Tabelle 2: Zusammensetzung (%) der für die Mast der Larven der Schwarzen Soldatenfliege eingesetzten Nährsubstrate.

Mischungsanteil (%)	Kontrolle	Traubentrester (TT)			Holundertrester (HT)			Kartoffeldampfschalen (KDS)			TT/KP	HT/KP	Aroniatrester (AT)		
		15	30	50	15	30	50	15	30	50	25/25	25/25	15	30	50
Weizenkleie	15,1	12,5	10,3	7,3	12,5	10,3	7,3	12,5	10,3	7,3	7,3	7,3	12,5	10,3	7,3
Grießkleie	8,6	7,3	6,0	4,3	7,3	6,0	4,3	7,3	6,0	4,3	4,3	4,3	7,3	6,0	4,3
Mineralfutter	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Futtersäure	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
Traubentrester, trocken ¹	0	3,7	7,3	12,2	0	0	0	0	0	0	6,1	0	0	0	0
Holundertrester, trocken ¹	0	0	0	0	3,7	7,3	12,2	0	0	0	0	6,1	0	0	0
Kartoffeldampfschalen ²	0	0	0	0	0	0	0	25,3	50,8	80,0	42,0	42,0	0	0	0
Aroniatrester ¹	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,7	7,3	12,2
Wasser	75,5	75,5	75,3	75,1	75,5	75,3	75,1	53,9	31,8	7,3	39,2	39,2	75,5	75,3	75,1
Trockenmasse	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22

¹ Annahme TS= 90%

² Annahme TS= 13%

Tabelle 3: Nährstoffkonzentration (Nährstoffkonzentration (g/kg, wenn nicht anders gekennzeichnet, Bezug auf 88 % TM)) der Mischungen an Nährsubstraten, die an die Larven der Schwarzen Soldatenfliege verfüttert wurden.

Futtersubstrate	Kontrolle	Traubentrestler (TT)			Holundertrestler (HT)			Kartoffeldampfschalen (KDS)			TT/KDS		HT/KDS		Aroniatrestler (AT)		
		15	30	50	15	30	50	15	30	50	25/25	25/25	15	30	50		
Mischungsanteil (%)		15	30	50	15	30	50	15	30	50	25/25	25/25	15	30	50		
Rohprotein	132	124	117	113	132	128	122	136	145	143	139	142	123	105	91		
Rohfett	33	33	37	38	40	43	48	29	28	24	36	40	33	32	34		
Rohfaser	94	105	109	115	121	140	186	84	88	81	107	140	119	144	171		
Rohasche	68	73	72	65	66	61	62	72	75	78	81	72	61	64	47		
Cystein	3,68	3,44	3,29	2,53	3,35	3,31	3,14	2,84	3,06	2,78	2,77	3,50	2,74	2,45	2,08		
Asparaginsäure	8,29	8,09	7,66	7,52	8,15	8,11	7,89	8,17	9,34	10,51	9,51	9,40	7,67	7,11	6,77		
Methionin	2,13	2,11	1,88	1,90	2,12	2,11	1,95	2,08	2,00	1,92	1,98	1,72	1,68	1,46	1,36		
Threonin	4,32	4,35	4,05	4,10	4,32	4,35	4,24	3,81	4,27	4,56	4,52	3,98	3,66	3,29	3,10		
Serin	5,93	5,75	5,50	5,29	5,70	5,74	5,51	4,98	5,16	5,48	5,47	5,24	4,84	4,35	4,06		
Glutaminsäure	21,47	20,35	18,08	16,17	19,63	18,87	16,78	19,91	20,20	20,14	18,42	17,47	18,30	15,74	14,18		
Glycin	6,80	6,56	6,09	5,98	6,73	6,95	7,06	6,79	6,88	6,34	6,60	6,83	5,95	5,37	4,96		
Alanin	6,39	6,21	5,85	5,63	6,09	6,09	5,97	7,94	8,16	7,76	7,13	7,00	5,43	4,80	4,41		
Valin	5,09	5,02	4,33	4,43	5,03	5,27	4,92	6,25	6,32	6,58	6,28	5,26	5,24	4,43	4,17		
Isoleucin	3,52	3,57	3,12	3,39	3,56	3,75	3,73	4,41	4,53	4,58	4,52	3,56	3,59	3,18	3,05		
Leucin	7,69	7,61	6,96	6,97	7,47	7,63	7,56	8,25	7,86	7,61	7,60	6,93	6,77	5,95	5,80		
Phenylalanin	5,08	5,17	4,55	4,43	4,85	5,01	4,84	5,56	5,53	5,49	5,32	4,71	4,44	3,81	3,52		
Lysin	5,36	5,47	5,12	5,20	5,71	5,68	5,55	5,87	6,00	6,26	6,09	5,24	4,86	4,34	4,32		
Histidin	3,43	3,37	3,00	2,90	3,27	3,16	2,81	3,69	3,58	3,32	3,47	2,85	3,01	2,51	2,32		
Arginin	8,81	8,22	7,42	6,93	8,28	8,15	7,32	7,90	7,52	6,85	7,80	6,96	7,54	6,36	5,79		
Prolin	8,12	8,07	7,73	7,18	8,09	7,67	6,88	8,50	8,37	7,87	7,76	7,08	7,16	6,30	5,23		

Tabelle 3: Fortsetzung

Calcium	4,5	6,1	6,4	4,2	5,6	4,9	6,4	6,3	5,9	6,7	7,1	7,3	5,4	9,2	6,3
Phosphor	13,5	12,2	10,4	8,5	12	10,6	8,6	12,6	12,7	10,7	10,7	10	11,4	9,8	7
Natrium	0,66	1,11	1,22	0,53	0,72	0,61	0,77	0,89	1,07	1,07	1,24	1,09	0,73	1,29	0,8
Magnesium	4,7	4,3	3,7	2,9	4,5	4	3,4	4,8	4,7	4,4	3,8	3,7	4,1	3,7	2,6
Kalium	14	16,4	18,3	21,2	12,8	12	10,5	16,2	20,1	22,5	23,9	15,8	11,9	9,6	7,2
Schwefel	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	2,1	2,1	2	1,8	1,6	1,4	1,2
Eisen, mg/kg	165,1	170,3	165,9	129,9	199,9	200,2	240,1	214,6	252,3	219,7	216,3	254,9	176,3	236,2	177,7
Kupfer, mg/kg	18,5	29,7	35,6	31,2	27,1	27,3	34,2	24,6	30,7	29,9	31,4	26,9	16,6	24,3	14,8
Zink, mg/kg	116,1	106	92,7	55,4	109,7	84,3	79,7	144,1	142	155,7	133,6	129,4	104,4	165,3	88,4
Mangan, mg/kg	118,6	111,2	90,6	59,4	107	86	87,9	133,1	121,3	116,2	118,1	113,2	108,5	139,1	82,1

2.3 Daten und Kennzahlen

Folgende Daten wurden nach der siebentägigen Mast erhoben:

- Gesamtgewicht 100 Larven bzw. Puppen: Eine repräsentative Probe von 100 Larven oder Puppen wurden abgezählt und anschließend gewogen.
- Gesamtgewicht Larven: Das Gesamtgewicht der Larven, die in einer Kiste aufgezogen wurden, wurde nach Separation vom Substrat per Wiegung ermittelt.
- Gesamtgewicht Frass: Das Gesamtgewicht des Restsubstrats einer Kiste wurde nach Separation von den Larven per Wiegung ermittelt.
- Überlebensrate: Die Überlebensrate wurde errechnet aus dem Anfangsbesatz und der Anzahl der vorhandenen Larven nach Beendigung des Produktionsabschnitts (z.B. nach der Aufzucht, nach der Mast, etc.).
- Futteraufwand: Für die Berechnung des Futteraufwands wird das Gesamtlebendgewicht der Larven in Relation zum eingesetzten Futtersubstrat (bezogen auf Trockenmasse) gesetzt.

2.4 Ergebnisse

Der Einsatz unterschiedlicher Nebenprodukte (TT, HT, KDS, AT) hatte, abhängig von der Einsatzrate, unterschiedliche Effekte auf das Larvengewicht, den Futteraufwand und das Gewicht vom Fraß (Abbildung 1).

Am Ende der siebentägigen Mast erzielte die Kontrollgruppe ein Gesamtgewicht von 1.700 g je Kiste. Vergleichbare Werte wurden beim Einsatz von 25% TT/25% KDS, 15% TT, 15% AT und bis zu 30% KDS erzielt. Alle anderen Varianten zeigten geringere Larvenendgewichte, wobei die Larvenendgewichte überwiegend geringer waren, je höher der Einsatz der Nebenprodukte war. Lediglich die Varianten mit Einsatz von HT unterschieden sich unabhängig vom Eimischungsgrad nicht voneinander und erzielten im Mittel ein Larvenendgewicht von 1.298 g.

Die Ergebnisse des Futteraufwands bestätigten die Ergebnisse der Larvenendgewichte. Während die Varianten, die die höchsten Endgewichte aufwiesen, den geringsten Futteraufwand von durchschnittlich 1,35 kg Futtersubstrat/kg Zuwachs aufwiesen, zeigten die Varianten mit niedrigeren Larvenendgewichten einen höheren Futteraufwand von bis zu 2,10 kg Futtersubstrat/kg Zuwachs.

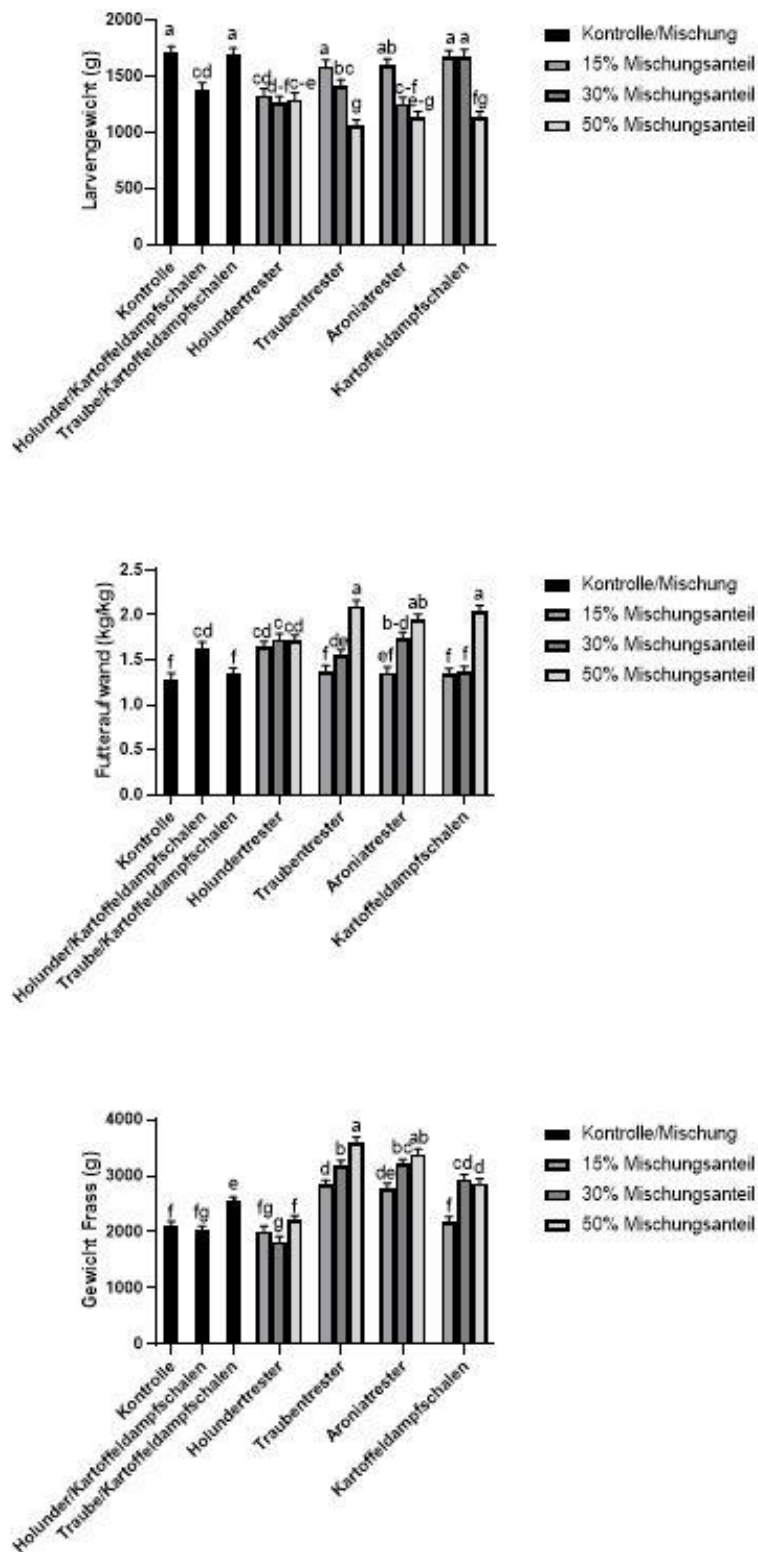


Abbildung 1: Gesamt-Larvengewicht nach Abschluss der Mastphase (a), Futtermittelverbrauch (b) und Gewicht Fraß (c) der Larven der Schwarzen Soldatenfliege, die mit Nebenprodukten der Lebensmittelverarbeitung gefüttert wurden. Unterschiedliche Buchstaben je Graphik zeigen signifikante Unterschiede an ($p < 0,05$).

In Hinblick auf die Überlebensrate zeigte sich, dass sich zu hohe Beimischungsgrade der Nebenprodukte negativ auswirken können (Abbildung 2). Mit Ausnahme der AT-Mischungen verschlechterte sich die Überlebensrate für alle Nebenprodukte beim höchsten Beimischungsgrad.

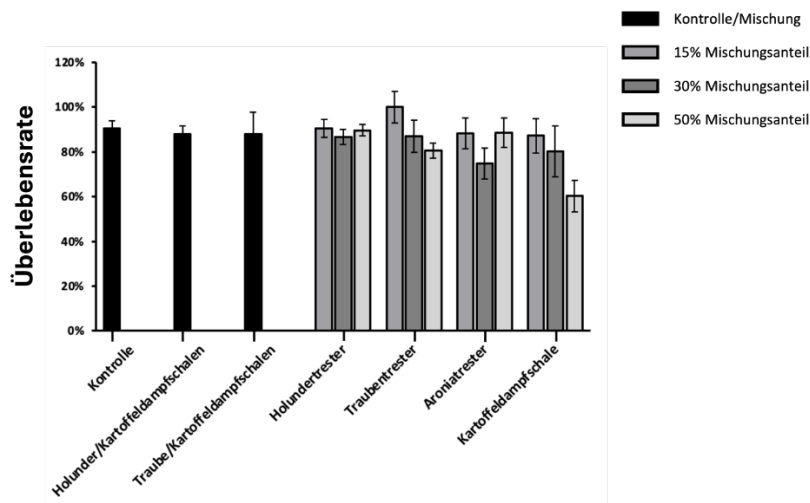


Abbildung 2: Überlebensrate der Larven der Schwarzen Soldatenfliege, die auf unterschiedlichen Futtersubstraten gemästet wurden.

Die Nährstoffzusammensetzung der geernteten Larven wurden im Anschluss an die Mast untersucht (Tabelle 4). Es zeigte sich, dass die Nährstoffzusammensetzung der geernteten Larven in Abhängigkeit des Futtersubstrats variierte. Die Larven, die mit Anteilen von HT gefüttert wurden, hatten im Vergleich zu allen anderen Larven die höchste Konzentration an Rohprotein und Aminosäuren sowie die geringsten Rohfettkonzentrationen. Durch gesteigerte Zulage von TT und KDS verringerte sich die Nährstoffkonzentration der geernteten Larven. Dabei variierte die Rohproteinkonzentration von 318 g/kg (30% KDS) bis 454 g/kg (50% HT) sowie die Rohfettkonzentration von 105 g/kg (50% HT) bis 255 g/kg (30% KDS). Die Nährstoffzusammensetzung vom Fraß wurde ebenfalls im Anschluss an die Mast untersucht (Tabelle 5). Wie bei den Larven war die Nährstoffzusammensetzung vom Fraß nicht konstant und änderte sich in Abhängigkeit des Futtersubstrats.

Tabelle 4: Nährstoffkonzentration (g/kg, Bezug auf 88 % TM) von Larven der Schwarzen Soldatenfliege, die mit unterschiedlichen Futtersubstraten gefüttert wurden.

	Kon- trolle	Trauben-Trester (TT)			Holunder-Trester (HT)			Kartoffeldampfschalen (KDS)			TT/KDS	HT/KDS	Aronia-Trester (AT)		
		15	30	50	15	30	50	15	30	50	25/25	25/25	15	30	50
Mischungsanteil (%)		15	30	50	15	30	50	15	30	50	25/25	25/25	15	30	50
Rohprotein	410	395	373	361	444	457	454	379	318	303	329	417	391	340	286
Rohfett	206	192	190	190	159	135	105	224	255	271	247	155	186	148	132
Rohfaser	55	55	71	65	82	87	100	65	55	50	68	86	74	95	109
Rohasche	101	106	111	106	102	105	115	92	89	89	98	108	112	102	103
Cystein	4,1	4,2	4,1	4,3	4,4	4,9	5,0	3,9	3,4	3,6	3,7	4,8	4,2	4,0	3,7
Asparaginsäure	24,9	23,9	22,8	22,0	27,4	27,1	26,4	21,9	17,6	16,7	19,0	25,1	23,6	21,5	17,4
Methionin	5,8	5,4	5,5	5,2	6,7	6,8	6,7	5,2	3,7	3,6	4,5	5,9	5,7	5,0	3,9
Threonin	13,1	12,0	12,0	11,8	14,3	14,5	14,7	12,1	9,3	9,8	10,8	13,8	13,3	11,6	9,6
Serin	14,6	14,1	13,4	13,6	16,0	16,7	17,0	13,4	10,3	11,9	12,4	15,9	15,2	13,2	11,3
Glutaminsäure	36,6	36,5	37,6	39,3	39,2	39,8	40,5	34,9	29,1	31,1	32,6	38,2	38,2	35,4	32,3
Glycin	17,3	16,3	16,2	15,4	18,8	18,8	19,0	15,3	12,5	13,1	13,6	18,0	17,8	15,6	12,7
Alanin	24,6	22,4	22,0	21,6	24,9	25,3	24,9	22,9	20,0	20,1	19,3	24,2	24,6	20,7	16,9
Valin	17,9	15,7	16,8	16,0	20,5	20,1	20,2	16,0	13,1	13,9	14,1	17,8	19,9	17,2	14,0
Isoleucin	12,5	11,0	12,2	11,9	14,2	13,5	13,6	11,1	9,3	9,7	10,7	13,1	13,4	12,1	10,1
Leucin	21,5	19,9	19,8	20,7	23,8	23,9	23,9	19,0	15,4	16,1	18,1	23,0	22,3	19,5	16,5
Phenylalanin	13,1	12,3	12,5	11,7	15,1	15,5	15,2	11,4	8,9	9,1	10,5	14,7	13,4	12,0	9,6
Lysin	19,6	18,4	17,8	17,2	22,6	22,4	22,7	17,7	13,6	14,3	15,9	21,5	19,8	17,6	14,0
Histidin	10,2	9,5	9,0	8,4	12,4	13,2	13,3	9,5	7,0	7,5	7,7	11,0	9,7	8,3	6,5
Arginin	15,3	14,7	14,4	14,2	17,9	17,6	18,2	14,4	10,2	13,2	13,6	16,4	15,6	14,1	11,9
Prolin	19,7	19,3	20,1	20,3	22,0	22,2	21,8	20,0	17,4	20,8	17,2	20,5	21,2	18,7	17,0

Evaluierung von ausgewählten regionalen Nebenprodukten der 29
 Lebensmittelverarbeitung als Substrat für die Larvenmast

Tabelle 4: Fortsetzung

Calcium	22,1	22,8	24,8	20,4	21,4	22,6	24,4	18,6	19,8	18,8	20,7	23,8	21,9	18,1	18,6
Phosphor	13,5	12,5	11,9	13,9	12,6	12,8	13	12	10,4	9,8	10,3	10,6	13,8	13,3	13,0
Natrium	1,81	1,98	2,01	2,02	1,8	1,95	2,1	1,76	1,78	1,8	1,55	1,68	2,15	2,59	2,13
Magnesium	4,6	4,7	4,6	5,7	4	4,2	4,3	4,4	3,9	3,6	3,9	3,4	5,5	5,1	5,1
Kalium	15,4	15,9	16,1	18,5	14,9	15,7	16,6	13,8	13,1	13,5	14,7	15,3	14,2	13,9	12,3
Schwefel	3,6	3,6	3,4	3,5	4	4,2	4,2	3,2	2,8	2,5	2,7	3,6	3,1	2,9	2,4
Eisen, mg/kg	303,8	253,6	254,2	203,4	271,6	277,3	281,4	252,9	231,6	205,5	187,1	261,8	244,4	215,8	218,0
Kupfer, mg/kg	100,8	114,5	135,1	146,2	110,3	106,6	117,2	126,5	148,5	158,1	131,7	122,7	96,1	100,5	123,4
Zink, mg/kg	269,6	278,6	285,9	314	222,8	226	187	254,1	247,4	256,3	276,4	208,1	335,7	297,1	336,2
Mangan, mg/kg	366,1	340,1	317,1	262,8	346,3	378,2	328,7	309	267,7	207,4	295,4	336,1	374,3	299,4	327,9

Tabelle 5: Nährstoffkonzentration (g/kg, Bezug auf 88 % TM) von Fraß der Schwarzen Soldatenfliege, die mit unterschiedlichen Futtersubstraten gefüttert wurden.

	Kon- trolle	Trauben-Trester (TT)			Holunder-Trester (HT)			Kartoffeldampfschalen (KDS)			TT/KDS	HT/KDS	Aronia-Trester (AT)		
		15	30	50	15	30	50	15	30	50	25/25	25/25	15	30	50
Mischungsanteil (%)		15	30	50	15	30	50	15	30	50	25/25	25/25	15	30	50
Rohprotein	17	17	18	19	19	20	21	17	17	19	18	19	17	16	14
Cystein	2,4	2,6	3,0	3,0	2,8	3,3	3,1	2,6	2,7	2,5	2,5	2,4	2,4	3,2	2,2
Asparaginsäure	6,3	6,2	6,8	7,3	6,7	7,5	7,0	5,9	4,7	5,5	6,7	6,0	6,1	6,9	6,2
Methionin	1,2	1,2	1,4	1,6	1,3	1,6	1,5	1,1	0,8	0,7	1,3	1,2	1,1	1,2	1,1
Threonin	3,1	3,2	3,6	4,0	3,4	4,0	3,7	2,8	2,5	2,4	3,4	3,1	3,1	3,5	3,1
Serin	3,5	3,9	4,5	5,1	3,8	4,6	4,4	3,5	3,1	3,1	4,5	3,6	3,9	4,6	3,9
Glutaminsäure	9,5	12,1	12,8	14,2	10,2	11,2	10,2	9,9	9,2	9,2	12,7	8,8	13,3	14,4	12,0
Glycin	5,6	6,0	6,1	6,0	6,3	7,5	7,3	5,4	4,9	4,2	5,7	5,8	5,7	6,0	4,9
Alanin	5,2	4,9	5,3	5,5	5,4	6,2	5,6	5,4	6,5	5,1	5,3	4,7	4,6	5,1	4,4
Valin	3,8	4,1	4,6	4,6	4,2	4,7	4,2	3,3	2,8	3,1	3,9	3,6	3,4	3,8	3,5
Isoleucin	2,6	2,7	3,0	3,3	2,9	3,1	2,8	2,3	1,9	2,0	2,7	2,6	2,4	2,7	2,8
Leucin	4,7	4,8	5,6	6,3	5,3	6,0	5,6	4,0	3,2	3,4	5,2	4,7	4,6	5,2	5,2
Phenylalanin	2,7	3,2	3,6	4,2	3,2	3,7	3,5	2,4	2,0	2,2	3,4	3,0	3,2	3,5	3,2
Lysin	3,8	3,5	3,7	3,9	4,2	4,4	4,1	3,4	2,7	2,7	3,7	3,6	3,6	4,1	3,7
Histidin	1,7	2,3	2,4	2,4	1,8	1,8	1,5	1,7	1,6	1,4	2,1	1,4	2,1	2,4	1,9
Arginin	4,1	5,1	5,4	5,2	4,6	4,9	4,9	3,8	2,8	2,7	5,0	4,2	5,1	5,8	5,0
Prolin	3,5	4,8	5,4	6,5	3,7	4,4	3,7	3,5	3,8	3,9	4,8	3,5	5,0	5,4	4,1

Tabelle 5: Fortsetzung

Calcium	4,4	4,9	5,7	7,7	5,2	7,9	7,9	5	4,3	6,5	5,6	6,3	4,7	5	5,3
Phosphor	23,1	18,6	13,9	10,9	21,3	19,2	14,9	18,6	15	11,6	13,5	16,1	15,4	11,9	7,7
Natrium	6,34	6,11	5,69	4,92	5,83	6,13	5,54	6,44	5,82	5,39	6,06	7,34	5,06	4,19	3,78
Magnesium	7,9	6,3	5	4,2	8,4	7,7	6,2	6,9	5,5	4,5	5	6,5	5,6	4,5	2,9
Kalium	23,8	26,2	27,9	29,8	21,9	21,4	17,4	24,7	25,9	28,5	33,7	27,8	16,2	12,7	8,2
Schwefel	2,6	2,5	2,4	2,3	2,6	2,8	2,6	2,4	2,2	2,2	2,5	2,6	2	1,7	1,3
Eisen, mg/kg	302,3	264,9	269,7	232,5	367,3	455,3	481,1	295,8	256,3	292,9	283,1	456	289	244,3	212,6
Kupfer, mg/kg	184,5	188	176,4	170,7	201,3	209,1	202,3	187,2	151,7	131,4	172,8	214,9	162,7	132,7	111
Zink, mg/kg	196,1	136,6	113,7	126	189,8	203,3	175,6	170,9	144,2	161,3	128,1	185,7	134,1	106,5	81,9
Mangan, mg/kg	132,9	102,2	88,6	83,3	124,9	125,1	105,5	121	100	117,8	93,3	106,5	106,2	96,1	69,5

2.5 Diskussion und Schlussfolgerung

Durch die im Projekt durchgeführten Mastversuche konnte bestätigt werden, dass die Larven der Schwarzen Soldatenfliege mit unterschiedlichen Nebenprodukten aus der Lebensmittelverarbeitung gemästet werden können. Die unterschiedlichen Einmischraten und die daraus resultierende Verstärkung des Effekts der Nebenprodukte auf das Wachstum haben allerdings gezeigt, dass mit steigendem Beimischungsgrad eine Verschlechterung der Verwertbarkeit des Futtersubstrats durch die Larven einhergeht. Dies verdeutlicht, dass Insekten wie Wirbeltiere einen bestimmten Bedarf an Nährstoffen haben, der durch geeignete Zusammenstellung von Einzelkomponenten gedeckt werden muss. Die Studie hat zudem gezeigt, dass sich das Nährstoffprofil der Larven in Abhängigkeit des eingesetzten Futtersubstrats und dessen Nährstoffzusammensetzung ändert. Wenn die Larven der Schwarzen Soldatenfliege künftig als Rationskomponente in Alleinfuttermischungen für Nichtwiederkäuer eingesetzt werden sollen, müssen sie daher regelmäßig analysiert werden, um bedarfsgerechte Rationen für Nichtwiederkäuer erstellen zu können.

3 Selektion der Larvengenetik zur gesteigerten Futtermittelverwertung von Nebenprodukten der Lebensmittelverarbeitung

3.1 Material und Methoden

Der Fütterungsversuch (siehe 2) hat gezeigt, dass die Larven der Schwarzen Soldatenfliege schlechter wachsen, je höher der Anteil der Nebenprodukte TT und HT im Futtersubstrat ist. Deshalb führte die FarmInsect GmbH Versuche zur Anpassung der Larven der Schwarzen Soldatenfliege an hohe Anteile TT und HAT im Futtersubstrate durch. Das Hauptziel war es, eine Anpassung über mehrere Generationen hinweg zu beobachten, um Erkenntnisse über Veränderungen beim Futteraufwand, Larvenwachstum, der Überlebensrate, der Puppenproduktion und der Eiproduktionsrate zu gewinnen.

Während des Selektionsprozesses erhielten die Larven zunächst für sechs Tage eine spezielle Aufzuchtfuttermischung, in der sich bereits ein erhöhter Trester-Anteil befand (30% der TM). Danach wurden sie für die Produktion der Puppen auf eine Mastfuttermischung mit erhöhtem beigemischtetem Trester-Anteil gesetzt (50% der TM), wobei jeweils 9.000 Larven je Box verwendet wurden. In diesem Zeitraum von weiteren sechs Tagen legten die Larven deutlich an Gewicht zu. Für den abschließenden Entwicklungsabschnitt bis kurz vor dem Schlupf der erwachsenen Fliegen wurden die Larven und Präpuppen für zehn weitere Tage in einer Klimakammer gelagert.

Abschließend wurden diejenigen 30% bis 50% der Puppen ausgewählt, die das höchste Gewicht aufwiesen und diese wurden für die Ei-Produktion der nächsten Generation verwendet. Dieser Prozess ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt und bildet die Grundlage für die kontinuierliche Verbesserung und Selektion der Larvenpopulation.

Die Kennzahlen wurden für jede aufgezogene Generation erhoben, soweit die Prozessierbarkeit der Versuchsergebnisse dies zuließ. Für einige Generationen konnten keine Daten erhoben werden, da die Substrate zu feucht waren und somit nicht alle Larven vom Substrat getrennt werden konnten.



Abbildung 3: Überblick über den Ablauf der Selektionsreihe. Bei den mit „Beobachtung“ gekennzeichneten Entwicklungsabschnitten wurden Daten erhoben, bei „Selektion“ zusätzlich nach Merkmalen (Größe und Gewicht) selektiert.

Als Kontrollgruppe diente die Futtermischung, die hauptsächlich auf Weizenkleie und Wasser basierte und sich an den Futtermischungen aus dem Fütterungsversuch (siehe 2) orientierte (Tabelle 6). Für die Untersuchung der Anpassung von Larven an verschiedene Futtersubstrate wurden die Larven für sechs Generationen selektiert. Während dieses Zeitraums wurden die Larven auf Futtersubstraten mit unterschiedlichen Anteilen an TT und HT (30% in der Aufzucht und 50% in der Puppenproduktion) gehalten.

Tabelle 6: Die für die Selektionsversuche eingesetzten Futtersubstrate.

Name	Kistenanzahl	Weizenkleie [kg]	Weizengrieß [kg]	Hühnerfutter [kg]	Mineralfutter [kg]	Säure [kg]	Traubentrester [kg]	Hollunderreste [kg]	Wasser [l]	Trockenmasse [kg]	Gesamtmasse [kg]	% DM	Anzahl Tieren/ Kiste	Verwendung
LFL-Aufzucht-001	Variabel	0,45	0	0,6	0,03	0	0,45	0	3,5	1,35	5,03	27%	variabel	Seed-Larven-Aufzucht, Selektion
LFL-Aufzucht-002	Variabel	0,45	0,45	0,6	0,03	0	0	0,45	3,5	1,35	5,03	27%	variabel	Seed-Larven-Aufzucht, Selektion
LFL-V2-001	8	0,92	0,53	0	0,06	0,08	1,53	0,00	9,38	2,74	12,50	22%	9.000	Puppenproduktion, Selektion
LFL-V2-002	8	0,92	0,53	0	0,06	0,08	0,00	1,53	9,38	2,74	12,50	22%	9.000	Puppenproduktion, Selektion
LFL-V1-001	6	2,40	0	0	0,044	0,066	0	0	7,49	2,20	10,00	22%	11.000	Mast, Test, Kontrolle
LFL-V1-002	6	2,02	0	0	0,044	0,066	0,36	0	7,51	2,20	10,00	22%	11.000	Mast, Test, Trauben 15%
LFL-V1-003	6	1,64	0	0	0,044	0,066	0,72	0	7,53	2,20	10,00	22%	11.000	Mast, Test, Trauben 30%
LFL-V1-004	6	1,14	0	0	0,044	0,066	1,19	0	7,56	2,20	10,00	22%	11.000	Mast, Test, Trauben 50%
LFL-V1-005	6	2,02	0	0	0,044	0,066	0	0,37	7,49	2,20	10,00	22%	11.000	Mast, Test, Hollunder 15%
LFL-V1-006	6	1,64	0	0	0,044	0,066	0	0,75	7,50	2,20	10,00	22%	11.000	Mast, Test, Hollunder 30%
LFL-V1-007	6	1,14	0	0	0,044	0,066	0	1,24	7,51	2,20	10,00	22%	11.000	Mast, Test, Hollunder 50%

Um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse sicherzustellen, wurde eine Besatzdichte von etwa 9.000 Larven pro Kiste realisiert. Diese Vorgehensweise gewährleistet eine solide und aussagekräftige Datenbasis für die Analyse der Anpassungsfähigkeit der Larven an unterschiedliche Futtersubstrate über mehrere Generationen hinweg.

Folgende Daten wurden erhoben:

- Gesamtgewicht 100 Larven bzw. Puppen: Eine repräsentative Probe von 100 Larven oder Puppen werden abgezählt und anschließend gewogen
- Gesamtgewicht Larven/ Puppen: Das Gesamtgewicht der Larven bzw. Puppen die in einer Kiste aufgezogen wurden, wird nach Separation vom Substrat per wiegen ermittelt
- Gesamtgewicht Fraß: Das Gesamtgewicht des Restsubstrats einer Kiste wird nach Separation per Wiegen ermittelt
- Ei-Ausbeute: Auswiegen der Ei-Mengen aus den Ei-Pappen.
- Dauer des Lebenszyklus: Zeitdauer von gelegtem Ei-Paket bis zur Ablage des ersten Ei-Pakets der drauffolgenden Generation in Tagen.
- Überlebensrate: Die Überlebensrate wird errechnet aus dem Anfangsbesatz und der Anzahl der vorhandenen Larven nach Beendigung des Produktionsabschnitts (z.B. nach der Aufzucht, nach der Mast, etc.).
- Futteraufwand: Für die Berechnung des Futteraufwand wird das Gesamtlebendgewicht der Larven in Relation zur eingesetzten Trockenmasse im Futter gesetzt.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Selektion auf Traubentrester

Die über einen Zeitraum von sechs Generationen auf einem Futtersubstrat mit 50% TT selektierten Fliegenlarven zeigten höhere Werte in Bezug auf das durchschnittliche Gewicht von 100 Puppen und das Gesamtgewicht der produzierten Puppen in der 6. im Vergleich zur 1. Generation. Beim Merkmal der Ei-Mengen sowie der Dauer des Lebenszyklus wurden keine einheitlichen Ergebnisse erzielt (Abbildung 4).

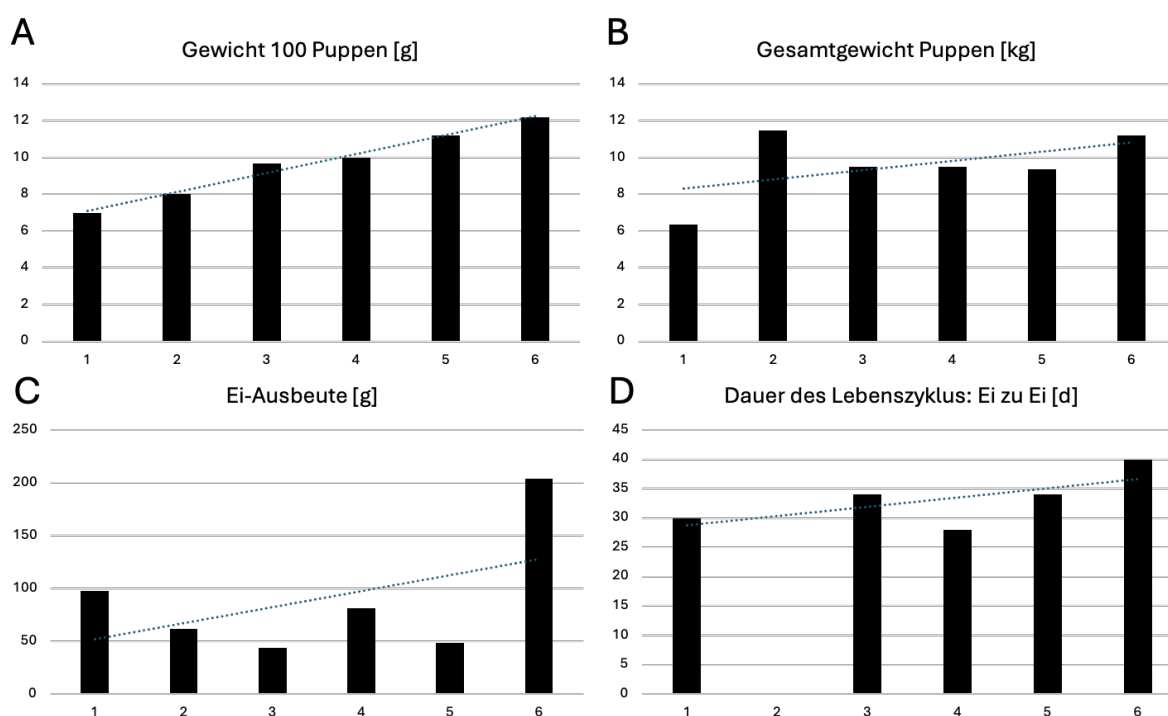


Abbildung 4: Anpassung der Larven an das Futtersubstrat mit Traubentrester über sechs Generationen. **A:** Entwicklung des durchschnittlichen Puppengewichts unter Anpassung an das Futtersubstrat über sechs Generationen. Die lineare Trendlinie (blau) unterstreicht den erkennbaren Anstieg des Puppengewichts über den beobachteten Zeitraum ($R^2=0,98$). **B:** Entwicklung des Gesamtenergiegewichts der Puppenproduktion unter Anpassung an das Traubentrester-Substrat über sechs Generationen. Im Vergleich zu Generation 1, hat das Gesamtgewicht der Puppen aller weiteren Generationen zugelegt. Lineare Regression in blau mit $R^2=0,27$. **C:** Entwicklung der gemessenen Ei-Ausbeute unter Anpassung an das Futtersubstrat mit Traubentrester über sechs Generationen. Nach Reduktion der Ei-Ausbeute zu Beginn der Versuchsreihe, konnte in Generation 6 ein deutlicher Anstieg der Ei-Produktion gemessen werden. Lineare Regression in blau mit $R^2=0,23$. **D:** Beobachtung der Dauer des Lebenszyklus über sechs Generationen unter Anpassung an das Futtersubstrat. Über den Zeitraum von sechs Generationen hat sich die Dauer des Lebenszyklus von Ei zu Ei tendenziell verlängert. Die Ei-Mengen von Generation 2 konnten nicht zweifelsfrei ermittelt werden. Lineare Regression in blau mit $R^2=0,43$.

Bei der Entwicklung des durchschnittlichen Puppengewichts über sechs Generationen wurde eine deutliche Zunahme von 7 g/ 100 Puppen der ersten Generation auf 12,2 g/ 100 Puppen der sechsten Generation beobachtet (Abbildung 4 A). Das entspricht einer Zunahme des Durchschnittsgewichts der Puppen um 74,29% nach nur sechs Generationen. Der hohe Regressionskoeffizient von $R^2 = 0,98$ verdeutlicht die annähernd lineare Zunahme des Puppengewichts über diesen Zeitraum.

Auch bei der Beobachtung der Gesamternte der produzierten Puppen ist eine tendenzielle Anpassung an das Futtersubstrat erkennbar (Abbildung 4 B), wenn auch nicht so deutlich

wie beim durchschnittlichen Individualgewicht der Puppen. Der Anstieg des Gesamterntegewichts verläuft dabei nicht linear ($R^2 = 0,27$), ist im Vergleich der späteren Generationen mit Generation 1 aber erkennbar. Zwischen Generation 1 und Generation 6 beträgt die Zunahme des Puppen-Gesamtgewichts 76,38% (von 6,35 kg auf 11,2 kg).

Die produzierten Ei-Mengen unter Anpassung an TT-Substrat nehmen zunächst von Generation 1 über Generation 2 und 3 stark ab, stabilisieren sich anschließend und zeigen dann einen starken Anstieg in Generation 6 um 108,94% im Vergleich zu Generation 1 (Abbildung 4 C).

Die Dauer des Lebenszyklus, also die Zeitdauer von gelegtem Ei-Paket bis zur Ablage des ersten Ei-Pakets der drauffolgenden Generation, hat sich unter Anpassung an das Futtersubstrat bestehend aus TT tendenziell verlängert (Abbildung 4 D). Während die Anzahl an Entwicklungstagen über die ersten fünf Generationen hinweg konstant bleibt und im Mittel nur um zwei Tage zunimmt (von 30 auf durchschnittlich 32 Tage), weist Generation 6 eine um 10 Tage längere Entwicklungszeit auf als Generation 1, was einer Zunahme von 33,33% entspricht.

3.2.2 Selektion auf Holundertrester

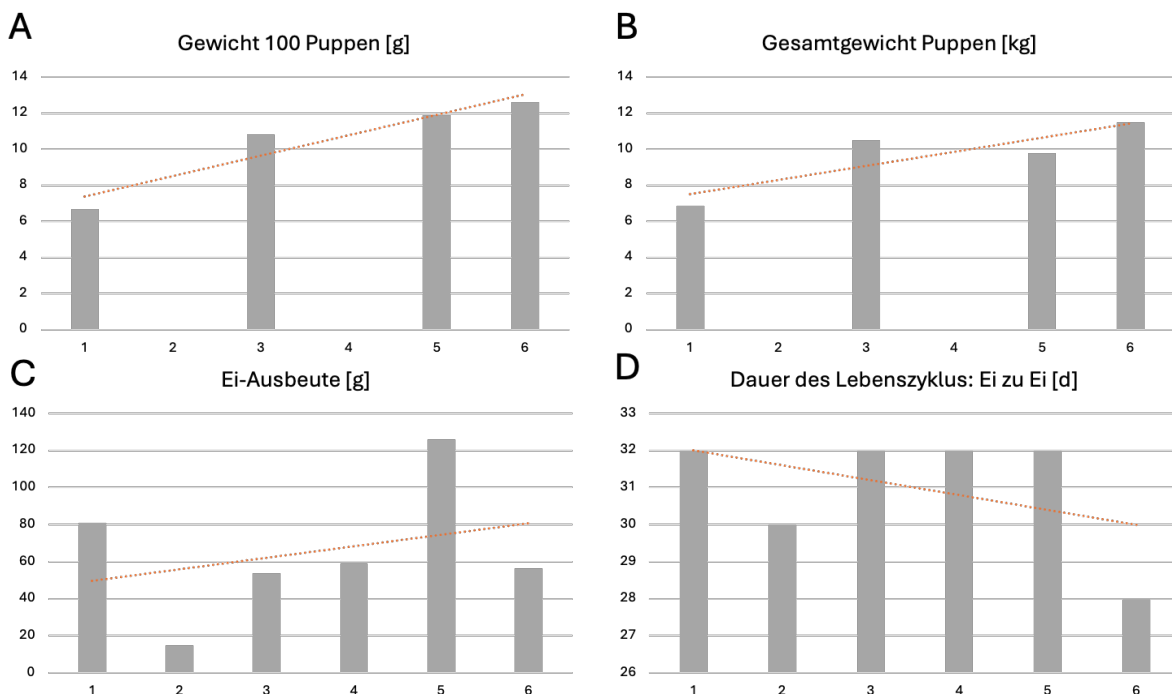


Abbildung 5: Anpassung der Larven an das Futtersubstrat mit Holundertrester über 6 Generationen. **A:** Zunahme des durchschnittlichen Puppengewichts über sechs Generationen auf Holundertrester. Die Gewichtszunahme ist beinahe linear mit $R^2= 0,90$ (orange). **B:** Beobachtete Entwicklung des Gesamtgewichts der auf Holundertrester produzierten Puppen über sechs Generationen. Trotz fehlender Messpunkte für Generation 2 und 4 ist ein Anstieg des Gesamt-Puppengewichts klar erkennbar ($R^2= 0,74$, orange). **C:** Die Ei-Ausbeute über sechs Generationen auf Holundertrester-Substrat. Nach der ersten Generation auf Holundertrester bricht die Ei-Produktion in Generation 2 stark ein und erholt sich danach nicht mehr vollständig innerhalb des Beobachtungszeitraums, auch wenn in Generation 5 ein vergleichsweise hoher Wert gemessen wurde. $R^2= 0,1$ (orange). **D:** Die Dauer des Lebenszyklus von einer Ei-Generation zur nächsten bleibt zunächst nahezu unverändert und verkürzt sich in der sechsten Generation um vier Tage auf insgesamt 28 Tage. $R^2= 0,2$ (orange).

Die Selektion der Larven auf HT-Substrat hatte einen Anstieg des durchschnittlichen Larvengewichts zur Folge (Abbildung 5 A). Über den Beobachtungszeitraum von sechs Generationen wurde eine Zunahme des durchschnittlichen Larvengewichts um 88,05% beobachtet (6,7 g/ 100 Larven in Generation 1 zu 12,6 g/ 100 Larven in Generation 6).

Ähnlich verhält es sich bei der Entwicklung des Gesamtgewichts der produzierten Puppen (Abbildung 5 B). Hier lässt sich ein Zuwachs um 67,88% von Generation 1 zu Generation 6 verzeichnen (von 6,85 g/ 100 Larven zu 11,5 g/100 Larven). Im Vergleich zu Generation 1 zeigen alle darauffolgenden Generationen ein höheres Puppen-Gesamtgewicht.

Über den Verlauf der Entwicklung der Ei-Ausbeute lassen sich weniger klare Aussagen treffen. Die Gesamtmenge der durch die selektierten Fliegen produzierten Eier bricht in der zweiten Generation stark ein. In den nachfolgenden Generationen verzeichnen die produzierten Ei-Mengen tendenziell wieder einen Zuwachs, ohne jedoch an die ursprüngliche Ausbeute von Generation 1 heranzukommen. Eine Ausnahme bildet die Ernte von Generation 5, mit einem Zuwachs von ca. 55% relativ zur 1. Generation (Abbildung 5 C). Das Ergebnis konnte in der 6. Generation nicht bestätigt werden und lag hier ca. 25% unter der Ausbeute aus Generation 1.

Die von Ei zu Ei benötigten Entwicklungszeit reduzierte sich über die Dauer von sechs Generationen um 12,5%, von 32 Tagen (Generation 1) auf 28 Tage (Generation 6; Abbildung 5 D). Hier zeigt sich ein gegenläufiger Trend, als er bei den Selektionsversuchen auf Traubentrester beobachtet wurde (Abbildung 4 D).

3.2.3 Test der selektierten Larven im Mastdurchlauf

Nachdem die Larven für sechs Generationen auf den jeweiligen Nebenprodukten selektiert wurden, wurde der Effekt einer möglichen Anpassung an das Futtersubstrat in einem Mastversuch getestet. Ca. 11.000 Larven wurden pro Mastkiste auf Futtersubstrat gesetzt, das 15%, 30% oder 50% der Nebenprodukte TT und HT enthielt. Die Futtersubstraten wurden wie im Fütterungsversuch (siehe 2) konzipiert und gemischt.

3.2.3.1 Traubentrester

Der Test unter Mastbedingungen zeigte nur geringe Unterschiede zwischen dem durchschnittlichen Larvengewicht und dem Gesamt-Erntegewicht der Larven der 1. Generation und der 6. Generation (Abbildung 6 A und B). Bei einem TT-Anteil von 50% wurde nach sechs Generationen eine höhere Gesamternte erzielt (Abbildung 6 B). Die Überlebensrate der Larven konnte auf allen Substratmischungen über einen Zeitraum von sechs Generationen gesteigert werden (Abbildung 6 C), wohingegen sich der Futteraufwand auf allen Substratmischungen, mit Ausnahme der 50%-Mischung, unverändert zeigte (Abbildung 6 D). Wie bereits beim Fütterungsversuch gezeigt wurde, verstärkte sich der Effekt der beigemischten Nebenprodukte mit steigendem Anteil in der Futtermischung (Abbildung 1). In diesem Fall ist also besonders das Ergebnis der 50%-Mischung hervorzuheben, wo im Vergleich der ersten mit der sechsten Generation eine deutliche Verbesserung der gemessenen Leistungsparameter nach der Selektion erzielt werden konnte.

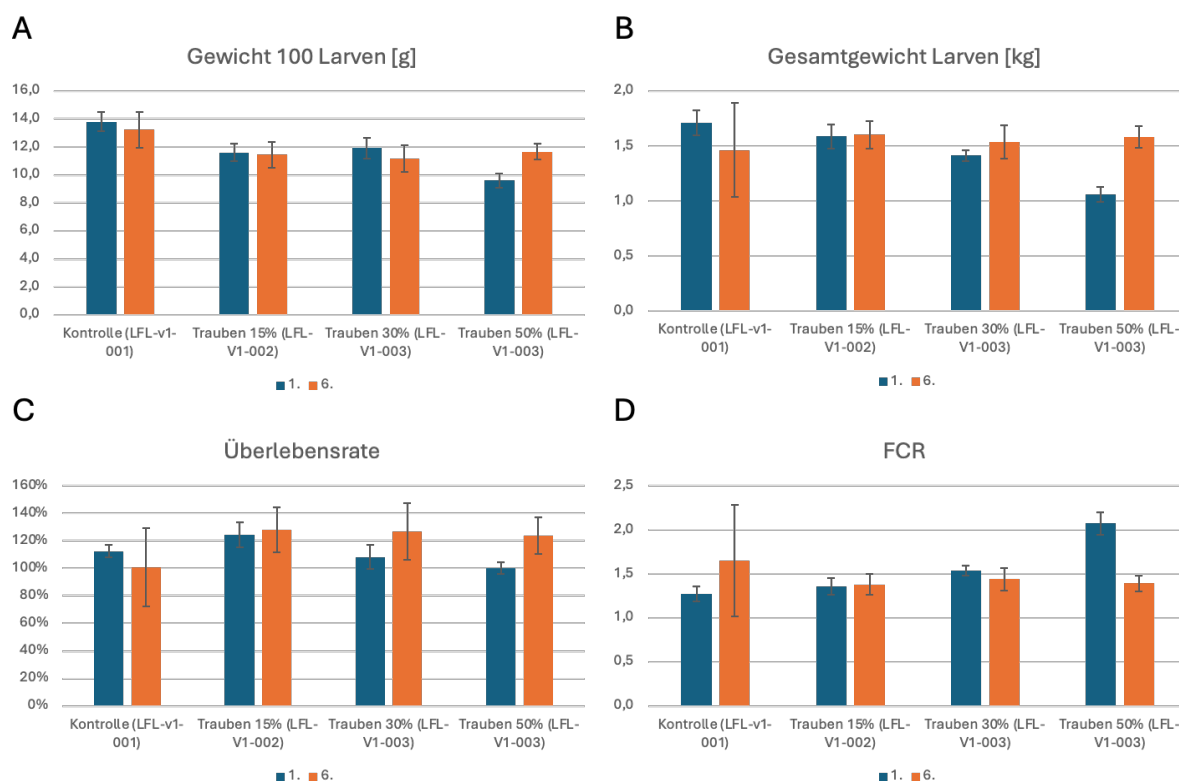


Abbildung 6: Mastversuch mit den auf Traubentrester selektierten Larven. Vergleich der Leistung der 1. Generation zur 6. Generation. **A:** Das Durchschnittsgewicht der Larven nach der Mastphase nach der Selektion über sechs Generationen. Das Larvengewicht zwischen den getesteten Generationen bleibt nahezu gleich. Jedoch wird bei 50% Tresteranteil der Effekt der Selektion gut sichtbar. **B:** Die Selektion der Larven hat nur bei einer Inklusion von 50% Traubentrester im Mastfutter nach der 6. Generation zu einer Steigerung des Erntegewichts geführt und zeigt den positiven Effekt der vorangegangenen Selektion. **C:** Mit Ausnahme des Kontrollfutters, wurden nach sechs Generationen Selektion auf allen Restsubstrat-Mischungen bessere Überlebensraten erzielt als zu Beginn der Versuchsreihe. **D:** Aus den bisher beschriebenen Ergebnissen ergibt sich eine leichte Verbesserung des Futteraufwands bei den niedrigeren Beimischungen und eine Steigerung des Futteraufwands um mehr als 0,5 Einheiten für die 50%-Mischung. Standardabweichungen werden als Fehlerbalken dargestellt.

3.2.3.2 Holundertrester

Der Mastdurchlauf mit den Larven der 6. Generation brachte Larven mit erhöhtem Durchschnittsgewicht gegenüber dem Mastdurchlauf der 1. Generation hervor (Abbildung 7 A). Der Unterschied zwischen der 1. und der 6. Generation wird hierbei mit steigendem Anteil an HT deutlicher, wie es bereits für die Ergebnisse der TT Mast-Versuche beschrieben wurde. Larven der 6. Generation weisen ein höheres Durchschnittsgewicht auf, je mehr HT sich in der Futtermischung befindet (Abbildung 7 A). Dieser Effekt war in der 1. Generation noch umgekehrt: ein höherer Anteil an HT führte hier zu einer Reduktion des Durchschnittsgewichts. Ähnlich verhält es sich mit dem Gesamtgewicht der Larven pro Mastkiste

(Abbildung 7 B). Je höher der Anteil an HT im Futter war, desto höher fiel das Gesamtgewicht pro Mastkiste in der 6. Generation aus. Die Überlebensrate von der 1. zur 6. Generation hat sich kaum verändert (Abbildung 7 C). Der Futteraufwand verbesserte sich über den Selektionszeitraum (Abbildung 7 D). Auch hier ist zu beobachten, dass in der 6. Generation mit steigendem HT-Anteil im Futter eine Verringerung des Futteraufwands einhergeht und dieser Effekt in der 1. Generation noch umgekehrt war (Abbildung 7 D).

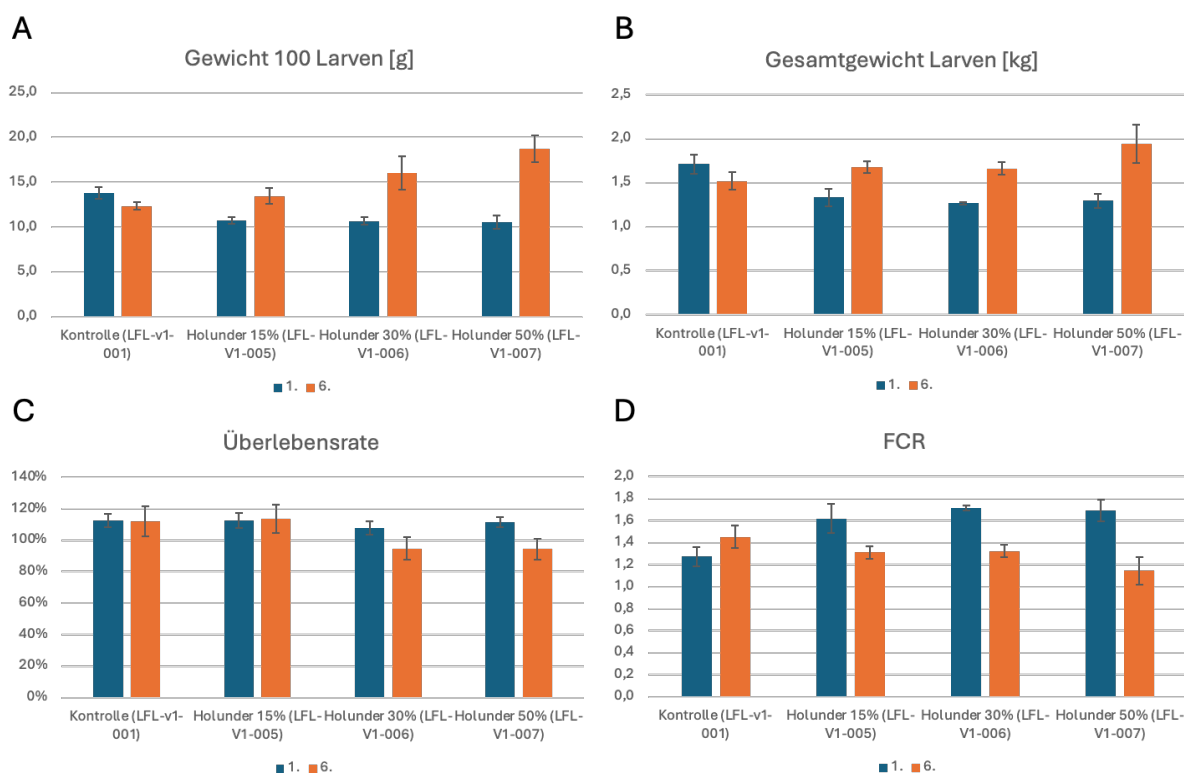


Abbildung 7: Mastversuch mit den auf Holundertrester selektierten Larven. Vergleich der Leistung der 1. Generation zur 6. Generation. **A:** Das durchschnittliche Larvengewicht ist nach sechs Generationen höher als noch in der 1. Generation. Mit zunehmender Inklusion von Holundertrester im Futtersubstrat ist dieser Effekt stärker ausgeprägt. **B:** Das Gesamtgewicht der Larven pro Mastkiste fiel nach der Selektion für alle Futtermischungen höher aus. In der 1. Generation nahm das Gesamtgewicht mit höherem Anteil an Holundertrester im Futter ab, in der 6. Generation ist dieser Effekt umgekehrt. **C:** Die ohnehin bereits hohe Überlebensrate der Larven auf Holundertrester konnte durch die Selektion nicht weiter gesteigert werden. **D:** Nach sechs Generationen Selektion auf Holundertrester zeigt sich bei allen Inklusionsgraden eine Verbesserung der FCR im Vergleich zur 1. Generation. In der 6. Generation bewirkte ein höherer Anteil Holundertrester im Futter eine bessere FCR als niedrigere Inklusionsgrade. Standardabweichungen als Fehlerbalken.

3.3 Diskussion und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse aus den Selektionsreihen lassen vermuten, dass eine Anpassung der Larven an ihr Futtersubstrat über den beobachteten Zeitraum von sechs Generationen stattgefunden hat. Sowohl die Selektion auf TT als auch die auf HT hatten eine Verbesserung der gemessenen Parameter zur Folge. So konnte eine klare Tendenz zum Anstieg des durchschnittlichen Larvengewichts (um 74% bzw. 88%) und der Larven-Gesamternte pro Box beobachtet werden (um 76% bzw. 68%). Diese beiden Parameter verbesserten sich über den Zeitraum von sechs Generationen sukzessive, was für eine Anpassung an das gewählte Futtersubstrat spricht. In Hinblick auf die geernteten Ei-Mengen und die Lebenszyklus-Dauer lässt sich keine klare Aussage über eine Verbesserung durch die Selektion treffen. Im Fall beider Selektionslinien verschlechterte sich die Ei-Produktion nachfolgender Generationen im Vergleich zur 1. Generation mit Ausnahme eines Messpunktes (Generation 6 für TT bzw. Generation 5 für HT). An dieser Stelle gilt es zu bemerken, dass die Ei-Produktion von einer Vielzahl ineinandergreifender Faktoren abhängt, deren Zusammenspiel zum Teil noch nicht vollständig verstanden ist. Es ist also möglich, dass an dieser Stelle trotz aller Sorgfalt, kontrollierte Bedingungen zu schaffen, externe Faktoren das Ergebnis beeinflusst haben könnten. Auch wirken sich kleinere Temperaturfluktuationen auf die Ei-Produktion stärker aus als auf Stadien, in denen sich die Larven in ihrem Futtersubstrat befinden, wodurch Temperaturschwankungen abgepuffert werden. Auch bei der Entwicklung der Lebenszyklus-Dauer über sechs Generationen lässt sich keine eindeutige Aussage treffen. Während die Generationszeit für die TT-Linie über den Selektionszeitraum um 33% (10 Tage) länger wurde, konnte bei der HT-Linie eine Verkürzung der Generationszeit um 12,5% (4 Tage) beobachtet werden. Folglich geht mit dem Anstieg des durchschnittlichen Larvengewichts und des Lebendgewichts pro geernteter Kiste für die TT-Linie eine Verlängerung der Generationszeit einher, wohingegen die HT-Linie eine Erhöhung des Larven-Durchschnittsgewichts und Lebendgewichts pro Kiste bei gleichzeitiger Verkürzung der Generationszeit erreicht. Eine genauere Untersuchung in welchem Stadium die Entwicklung der TT-Linie verzögert ist, könnte mehr Einsicht und Verständnis darüber liefern, ob diese Auswirkungen eine genetische oder ernährungsphysiologische Grundlage besitzen. Im Fall der HT-Linie kann anhand der während der Selektion erhobenen Daten von einer positiven Anpassung an das Futtersubstrat ausgegangen werden. Die TT-Linie zeigt mitunter ebenfalls positive Entwicklungen über eine Anpassung, allerdings sprechen nicht alle Beobachtungen zweifelsfrei dafür, weshalb hier die Fortsetzung der selektierten Linien mehr Aufschluss über etwaige Anpassungseffekte liefern wird.

In den Mast-Versuchen nach der Selektion über sechs Generationen konnten die vielversprechenden Resultate der Selektionsreihe bestätigt werden. Insgesamt haben beide Selektionslinien in der 6. Generation bessere Ergebnisse erzielt als noch in der 1. Generation, wenn sie mit 50% TT bzw. HT gemästet wurden. Differenzierter betrachtet lässt sich zudem feststellen, dass während zu Beginn der Selektionsreihe in Generation 1 eine Erhöhung des Reststromanteils im Futter eine Verschlechterung der Leistung mit sich brachte, dieser Effekt in der 6. Generation der TT-Linie verschwunden ist. Im Fall der HT-Linie wurde er sogar umgekehrt und mit steigender HT-Inklusion ging eine Verbesserung der Ergebnisse

einher. Die Versuchsergebnisse zeigen daher, dass die Schwarze Soldatenfliege durch Selektion an unterschiedliche Futtersubstrate angepasst werden kann.

In der Fachliteratur finden sich bisher kaum Studien, die sich mit der Anpassung der Schwarzen Soldatenfliege an ihr Futtersubstrat beschäftigen. Gligorescu *et al.* (2023) konnten eine solche Adaption nachweisen. Die Wissenschaftler wählten dabei einen ähnlichen Ansatz wie in der vorliegenden Studie, jedoch wurden die Larven auf Substraten selektiert, die viel einfacher formuliert waren und nur eine Komponente plus Wasser enthielten. Die Auswirkungen einer Anpassung könnten in zukünftigen Versuchen mit einem vergleichbaren Ansatz eventuell schneller herausgearbeitet werden, gleichzeitig würde es hierdurch schwieriger, ein verarbeitungsfähiges Substrat herzustellen, bei dem gewisse Eigenschaften unter Kontrolle gehalten werden können. Die Studie von Gligorescu *et al.*, 2023 stellt die gesammelten Daten von insgesamt 13 Generationen vor, mehr als doppelt so viele wie im Rahmen der aktuellen Versuchsreihe möglich waren. Am deutlichsten konnte die Anpassung an das Futtersubstrat anhand des ansteigenden Durchschnittsgewichts der Puppen gezeigt werden (Gligorescu *et al.*, 2023). Mit einer Zunahme des Durchschnittsgewichts um 74% bzw. 88% über sechs Generationen hinweg lässt sich diese Beobachtung auch an den Puppen der TT- bzw. HT-Linie machen. Es spricht daher einiges dafür, die Selektionslinien bei FarmInsect GmbH fortzuführen und weiteren Tests zu unterziehen, um die Anpassungen deutlicher herauszuarbeiten und noch effizientere Zuchtlinien zu generieren.

4 Untersuchungen zur optimierten Prozessierung der Larven und der nährstofflichen Charakterisierung der generierten Produkte

Wie in Kapitel 2 gezeigt, wiesen die Larven der Schwarzen Soldatenfliege einen Rohfettgehalt von bis zu 26% auf. Dies ist zu hoch, um Eiweißfuttermittel wie SES in Futtermischungen für Geflügel durch Larven der Schwarzen Soldatenfliege in hohen Anteilen ersetzen zu können. Aus diesem Grund müssen die Larven der Schwarzen Soldatenfliege vor Einmischung in die Futterrationen entfettet werden, um den Rohproteingehalt zu erhöhen. In folgendem Kapitel werden unterschiedliche Prozessierungsschritte zur optimierten Entfettung vorgestellt.

4.1 Verarbeitung von Insekten

Die etablierten Verarbeitungsmethoden zur Entfettung – das Trocken- und Nassverfahren – die im Rahmen dieser Studie verglichen wurden, wurden im experimentellen Labor des IFF{ XE "IFF" \t "Internationale Forschungsgemeinschaft Futtermitteltechnik e.V." } (Internationale Forschungsgemeinschaft Futtermitteltechnik e.V.) in kleinem halbautomatischem Technikumsmaßstab (Durchsatz ca. 30 – 50 kg/h) durchgeführt.

Beschreibung einer Trocknungskinetik

Zur Beschreibung einer Trocknungskinetik wurde ein Labortrockenschrank verwendet. Hierbei wurden die Temperaturen 70, 80, 100, 120, 130 und 140 °C verwendet. Die Trocknungsmasse belief sich auf 5 kg Larvenmaterial.

Die ermittelten Trocknungskoeffizienten wurden anschließend auf einen Infrarot-Trommel-trockner (FE-Laborbatch; Typ FS 60/60-10; Firma Kreyenborg GmbH & Co. KG, Senden) übertragen.

4.1.1 Trockenverfahren

Für die Herstellung eines Proteinpulvers mittels des Trockenverfahrens (Abbildung 8) wurden inaktivierte Proben von Larven der Schwarzen Soldatenfliege verwendet (tiefgefroren; t: 4 h; T: -20 °C). Die Insektenproben wurden in Chargen von 12 kg (Frischmasse) mit einem Infrarot-Trommel-trockner (FE-Laborbatch; Typ FS 60/60-10; Firma Kreyenborg GmbH & Co. KG, Senden) getrocknet. Der Trocknungsprozess wurde bei 80 °C für 240 min durchgeführt, um die Restfeuchtigkeit auf unter 3 g/100 g zu reduzieren. Die Schneckenpresse (TP 04, Fabrikationsnummer 100 032; Firma Maschinenfabrik Reinartz GmbH & Co. KG, Neuss) wurde vor dem Betrieb auf eine Temperatur von über 60 °C erhitzt, indem das Gehäuse der Presse direkt beheizt wurde. Die Insektenproben wurden während des Prozesses durch indirekte Wärme bei 45 °C für 300 s vorkonditioniert. Diese Behandlung sollte große physikalische Unterschiede zwischen dem Presskuchen (Änderung der Struktur durch Proteinagglomeration) und der Flüssigfraktion (Änderung der Viskosität) erzielen, um den höchstmöglichen Ertrag an Öl und entöltem Presskuchen zu erhalten. Die Larven der Schwarzen Soldatenfliege wurden kontinuierlich in der Schneckenpresse

gepresst, bis Öl austrat, während der Presskuchen (Proteinmehl) den Entölungsbereich durch eine gelochte Scheibe verlassen hat. Für die Austrittsfläche wurden zwei unterschiedliche Scheiben mit einer Austrittsfläche von 791 und 1.017 mm² verwendet. Der stabile Betriebszustand der Maschinen wurde nach ca. 15 min durch konstanten Massenfluss (25 kg/h) erreicht. Die mittlere Verweilzeit in der Presse betrug ca. 300 s.

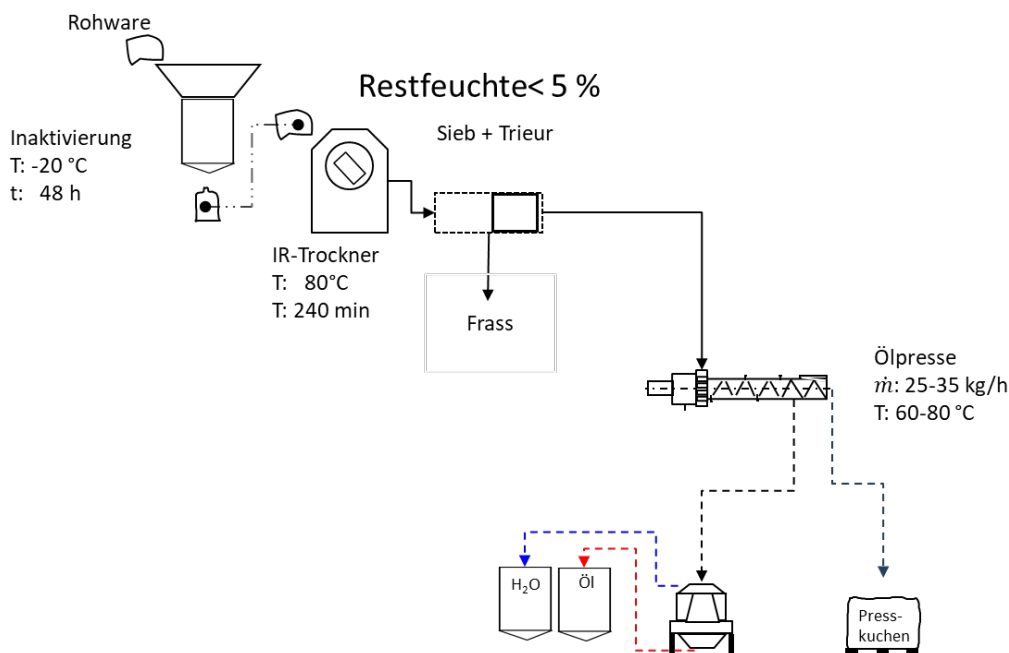


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Trockenverfahrens.

Zur Beurteilung des Effektes der Restfeuchte auf den Pressprozess wurden die Versuche mit beiden Austrittsscheiben mit den Restfeuchtwerten von 3, 4 und 5 g/100 g durchgeführt.

4.1.2 Nassverfahren

4.1.2.1 Ermittlung der Extraktionsbedingungen im Rahmen der batchweisen Nassaufbereitung

Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedene Versuchsbedingungen variiert, um die Effekte von Temperatur, Extraktionsdauer und Salzsäurekonzentration auf den Extraktionsprozess zu untersuchen. Die einzelnen Versuche (V-887/1-V887/6, Tabelle 7) wurden durchgeführt, um detaillierte Einblicke in die optimale Extraktionsmethode zu gewinnen und die Ergebnisse anschließend zu analysieren.

Tabelle 7: Extraktionsparameter für die Extraktion der Insekten mittels Nassverfahren.

	V-887/1	V-887/2	V-887/3	V-887/4	V-887/5	V-887/6
$T_{\text{Kessel}}, \text{ }^\circ\text{C}$	60	60	80	80	100	100
$c_{\text{HCl}}, \text{ M}$	0,04	0,10	0,04	0,10	0,04	0,10
Durchsatzleistung, L/h	27	27	22	22	16	16
Verweilzeit, s	52	52	64	64	88	88
RCF	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Produktmasse in kg	$2,7 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,1$	$2,8 \pm 0,1$

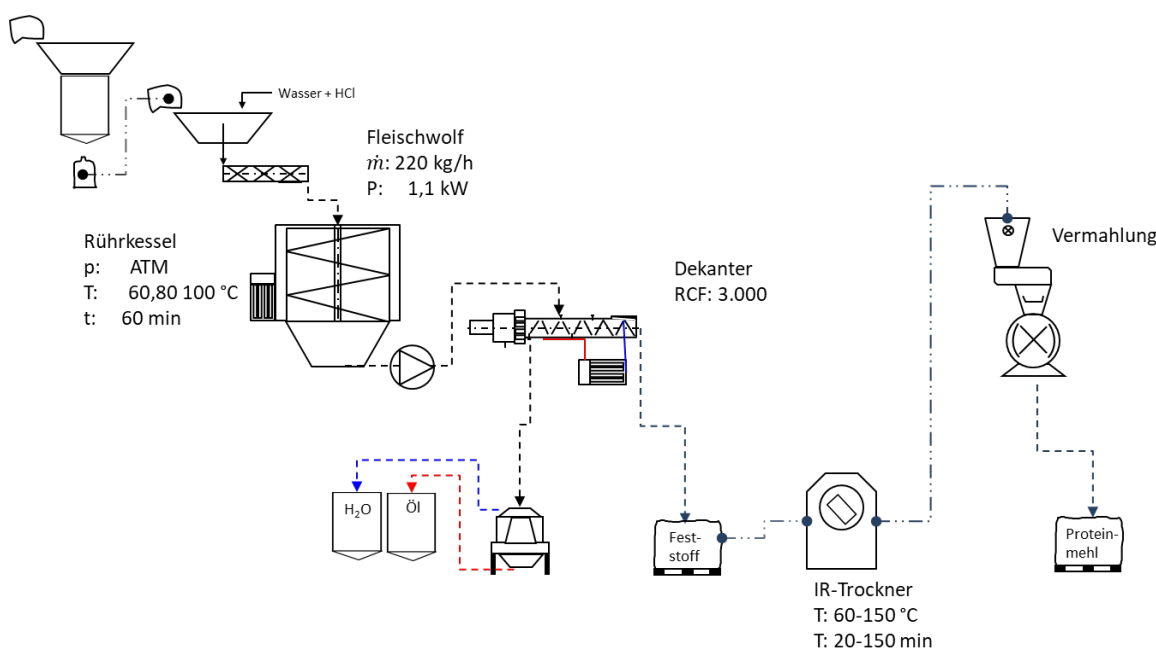


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Nassverfahrens

Im Nassverfahren (Abbildung 9) wurden lebende Larven der Schwarzen Soldatenfliege für den Labormaßstab (m_{lab} : 75 g) verwendet und durch Blanchieren inaktiviert (t : 3 min; T : 100 °C). Für den technischen Maßstab (Chargen von 100 l) wurden BSFL-Insektenproben (m_{tec} : 12 kg) verwendet, die durch Einfrieren inaktiviert wurden (t : 4 h; T : -20 °C). Vor der Fettabscheidung wurden die Insekten mit einem Fleischwolf (FW1100, Lochdurchmesser 3 mm; Firma Beeketal Lebensmitteltechnik GmbH & Co. KG, Rastdorf) zerkleinert. Die gemahlene Insekten wurden für die Fettextraktion im Rührkessel mit 0,1 M oder 0,04 M

Salzsäure versetzt (Labormaßstab, V_{lab} : 150 ml; technischer Maßstab). Dieser Prozess dauerte 60 min, nachdem die Suspension je nach Behandlung 60 °C, 80°C oder 100°C erreicht hatte. Der Aufschluss im Labormaßstab erfolgte in einem Erlenmeyer-Kolben; für den technischen Maßstab wurde ein 97 l beheizbarer Rührkesselreaktor (EBB90RWAA4-M; Heizleistung 12 kW; Firma Inox Behälter GmbH, Delmenhorst) verwendet. Anschließend wurde die heiße Suspension durch eine beheizte Labortrennzentrifuge (Rotina 380 R; Firma Andreas Hettich GmbH & Co. KG, Tuttlingen) oder im Falle des technischen Maßstabs durch eine 2-Phasen-Dekanterzentrifuge (MD80; Firma LemiTech GmbH, Berlin) getrennt. Die mittlere Verweilzeit im Dekanter betrug ca. 70 s. Der Trennvorgang erfolgte bei 60 °C. Nach der Trennung wurde die feste Phase in einem Infrarot-Trommeltrockner (FS-Laborbatch; Typ FS 60/60-10; Firma Kreyenborg GmbH & Co. KG, Senden) bei 80 °C für 60 min getrocknet (Restfeuchte < 14 g/100 g).

4.1.3 Mikrobiologische Untersuchungen

Alle Proben wurden während des stabilen Betriebs des Prozesses oder der Maschinen entnommen. Zur Quantifizierung der Hygieneparameter wurden 50 g der Insekten, Zwischenprodukte und Endprodukte in 450-ml sterilen Beuteln (SteriBag, Chargennummer J090879; Firma Bürkle GmbH, Bad Bellingen) verpackt. Bis zum Beginn der Analyse wurden die Proben bei einer Temperatur unter 5 °C gelagert.

4.1.3.1 Analyseverfahren

Folgende Analysen wurden von der Firma AniCon Labor GmbH, Emstek, durchgeführt: Gesamtkeimzahl DIN EN ISO 4833-2 2014-05 mod. (Spiralplattierungsverfahren), *Salmonella spp.* DIN EN ISO 6579 2020-08, *Enterobacteriaceae* (ENT) DIN EN ISO 21528-2 2019-05 mod. (Spiralplattierungsverfahren), *Escherichia coli* DIN ISO 16649-2 2020-12 mod. (Spiralplattierungsverfahren), Hefen und Schimmelpilze ASU L 01.00-37 1991-12 mod. (Spiralplattierungsverfahren).

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Trocknungstechnologie

Die Trockenverarbeitungstechnologie in dieser Studie ist nicht geeignet, um Insekten mit einem Restfeuchtigkeitsgehalt von ca. 70 g/100 g auf unter 6 g/100 g zu trocknen, da dies eine lange Verweilzeit (> 240 min) für den Trocknungsschritt erfordert. In industriellen Maßstäben erfolgt die Trocknung in der Regel mittels eines Mikrowellentrockners. Trotz der Verweilzeit von 240 min und des Energieverbrauchs (Abbildung 10) ist die beobachtete Dezimalreduktionszeit D (D-Wert{ XE "D-Wert" \t "Dezimalreduktionszeit D" }): TBC: 91 min; ENT: 111 min) immer noch sehr hoch. Der D-Wert entspricht der Zeit in Minuten, die bei einer bestimmten Temperatur notwendig ist, um die Keimzahl auf ein Zehntel des Ausgangswertes zu reduzieren.

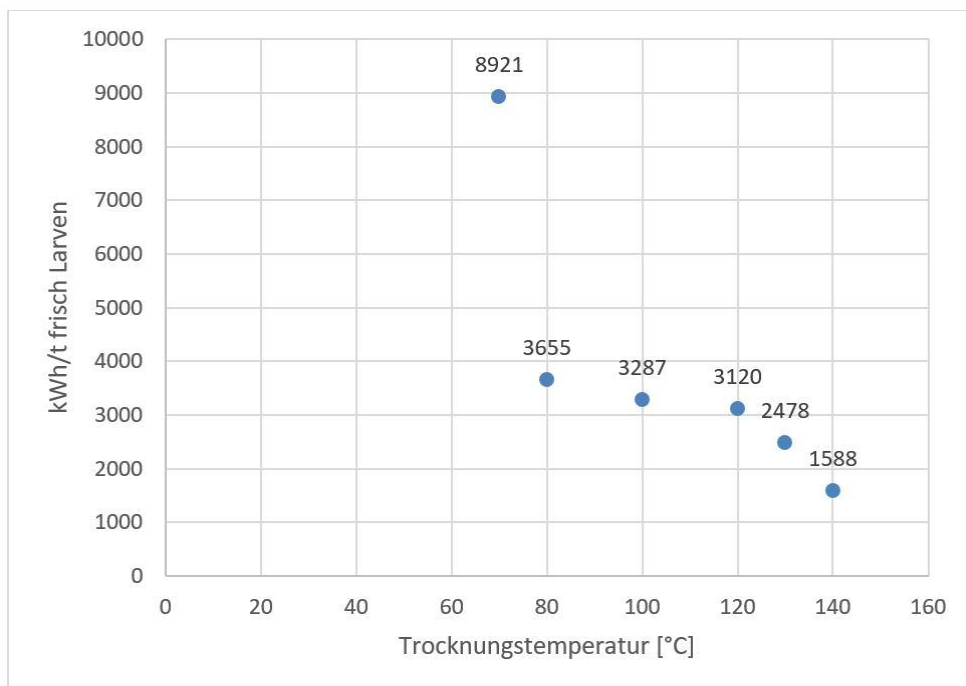


Abbildung 10: Spezifischer Energiebedarf in kWh/t frische Larven bei verschiedenen Trocknungstemperaturen.

Um den D-Wert in diesem Verarbeitungsschritt zu optimieren, ist es möglich, die Temperatur oder die Restzeit im Trockner zu erhöhen. Der D-Wert reagiert empfindlich auf Veränderungen der Prozessbedingungen. Zum Beispiel reduziert eine höhere IR-Trocknungstemperatur den D-Wert erheblich, erzeugt jedoch auch mehr Röstprodukte durch eine beschleunigte Maillard-Reaktion. In Abbildung 11 ist die thermisch induzierte Abnahme der Proteinlöslichkeit dargestellt. Diese ist mit einer verminderten Bioverfügbarkeit korrelierbar.

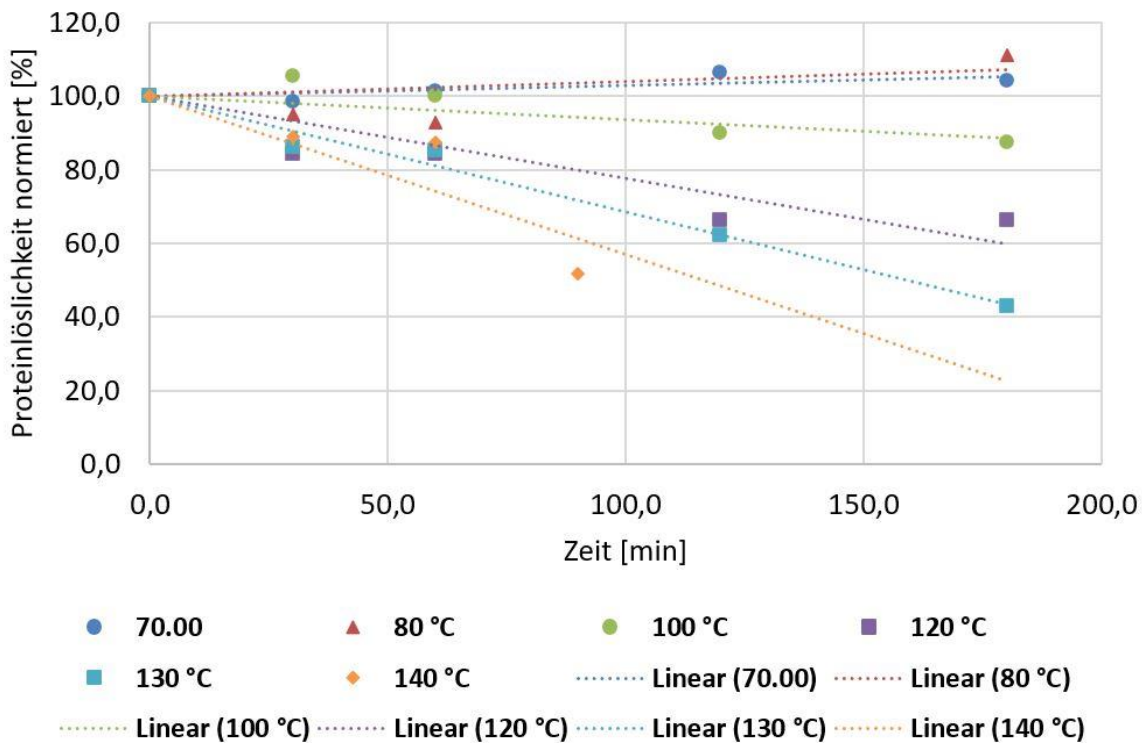


Abbildung 11: Abbaurate der Proteinlöslichkeit (normiert auf 100 % Ursprungslöslichkeit) bei verschiedenen Trocknungstemperaturen.

Des Weiteren lassen sich interessante Beobachtungen zur Bildung von Maillard-Reaktionsprodukten feststellen (Abbildung 12). Diese entstehen durch die Wechselwirkung der Inhaltsstoffe der Hämolymphe, nämlich Trealose und freie Aminosäuren, und sie schaffen ein äußerst geeignetes Reaktionsmedium für diese Prozesse innerhalb der Trocknung.

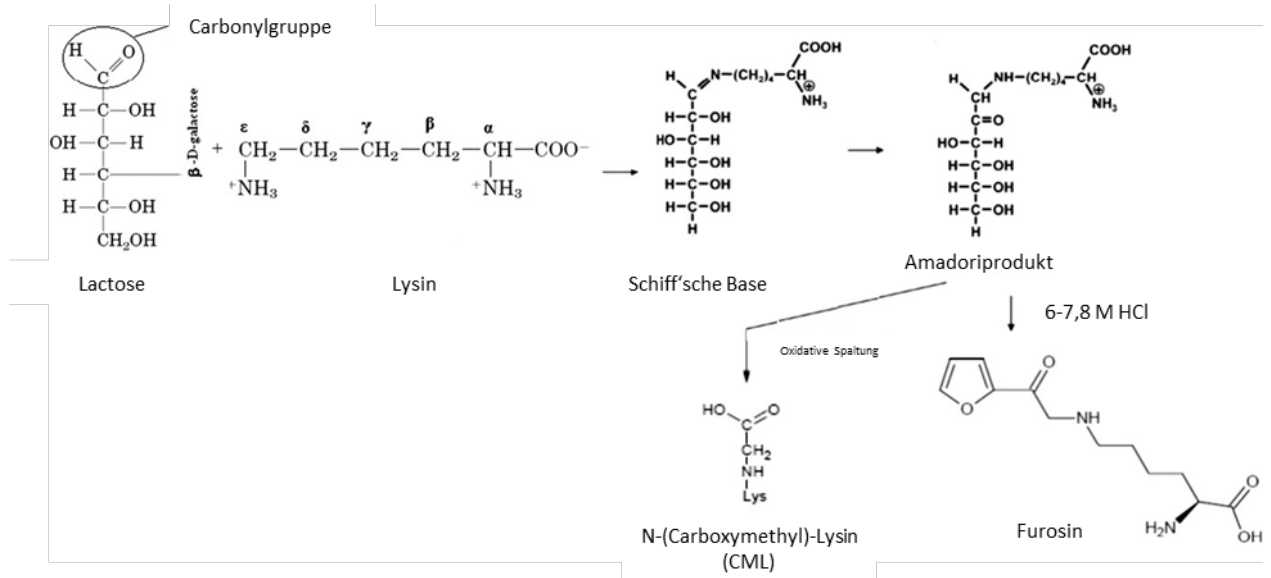


Abbildung 12: Beispiel Maillard-Reaktion mit Lactose und Lysin.

Innerhalb der Versuche wurde der Furosingehalt (Tabelle 8) von ausgewählten Proben bestimmt. Die Veränderung der Konzentration deutet darauf hin, dass mit voranschreitender Trocknung die Maillard-Reaktion zunehmend beschleunigt abläuft und zu einer Verminderung der Bioverfügbarkeit des Rohproteins führt.

Tabelle 8: Bildung von Furosine während der Trocknung von Insekten.

Proben	Temperatur [°C]	Trocknungszeit [min]	Endfeuchtig- keit [%]	Furosine [mg/kg]
V-8188/3-1	140	0	66,0	65
V-8188/3-5	140	30	60,3	39
V-8188/3-7	140	60	46,0	106
V-8188/3-10	140	90	1,1	1711
V-8188/5-1	130	0	66,2	n.n.
V-8188/5-5	130	30	60,4	13
V-8188/5-7	130	60	51,9	394
V-8188/5-10	130	120	12,3	301
V-8188/5-13	130	180	0,8	850
V-8188/1-13	70	210	55,1	21
V-8188/2-13	80	210	34,0	73
V-8188/4-13	100	201	13,5	568
V-8188/6-13	120	150	16,0	226-378

Die Produkte dieser Reaktion haben einen negativen Einfluss auf den Nährwert des Endprodukts. Insgesamt hat der Trocknungsprozess einen positiven Effekt auf die Produkthygiene, aber das Reduktionspotenzial (D-Wert 91/111 min) ist nicht ausreichend, um ein kommerzielles Endprodukt zu erzeugen, da die Menge an ENT immer noch über dem gesetzlichen Grenzwert liegt (3,32 log KbE/g).

Darüber hinaus ist die Wahl der Trocknungstechnologie selbst entscheidend, um einen niedrigen D-Wert zu erreichen. Ein Wechsel von der Infrarot- zur Mikrowellentrocknung führt beispielsweise zu einem völlig anderen Erwärmungsmechanismus, der die Larven von innen heraus erwärmen kann. Die Verwendung von Infrarot ist nur bei glatten Oberflächen effizient möglich. Die Wärmeverteilung auf der Oberfläche der Larve ist selbst in diesem Fall ungleichmäßig, da sie rau und mit Spalten versehen ist. Dies stellt eine Herausforderung dar und erfordert besondere Aufmerksamkeit bei der Wärmeübertragung. Die Auswirkungen von Mikrowellen auf die Mikroorganismen im Darm der Larven sind als intensiver einzuschätzen im Vergleich zum IR-Erwärmungsprozess. In industriellen Maßstäben, in denen allgemein die Mikrowellentrocknung verwendet wird, treten diese akuten Probleme mit Mikroorganismen im Trockenprozess wahrscheinlich seltener auf. Zur vollständigen Validierung dieser Aussage sind weitere Forschungsarbeiten sowie ein systematischer Vergleich der industriellen Prozesse notwendig. Dennoch ist der Trocknungsprozess als ein kritischer Verfahrensschritt zu werten, da hier neben der mikrobiellen Sicherheit auch die Produktqualität maßgeblich beeinflusst werden kann. Darüber hinaus beschreiben Van Looveren et al. (2021), dass die quantitative Reduktion von stark kontaminierten trockenen Insekten mit *C. perfringens* unzureichend ist, wenn verschiedene Trocknungstechniken verwendet werden. Sporenbildende Bakterien stellen eine separate Herausforderung für die Prozesstechnologie dar, die in dieser Studie nicht im Detail behandelt wird.

Die Entölung mittels Seiherschneckenpresse ist eine gängige Technik bei der Verarbeitung von Insekten. Die Verweilzeit im Entölungsbereich beträgt etwa 300 s. Der D-Wert im Entölungsschritt beträgt 3 min für TBC und 18 min für ENT. In dieser Studie wurde keine zusätzliche Reduktion der Mikroorganismenmenge in den Produkten durch diesen Schritt beobachtet. Angesichts der D-Werte bei den Entölungsbedingungen erlaubt die Verweilzeit in der Maschine, die in dieser Studie nicht variiert wurde, keine stärkere Reduktion der Bakterienzahlen in den Produkten. Um den D-Wert innerhalb dieses Prozesses zu erhöhen, müssen maßgebliche Änderungen an der Maschinenkonfiguration (Wendelsteigung, Drehzahl, Durchsatzmenge) durchgeführt werden. Die Vorbehandlung der trockenen Insekten vor dem Einsatz in der Schneckenpresse wurde bei einer Temperatur von 45 °C mithilfe von indirekter Wärme durchgeführt. In dieser Studie war es nicht möglich, ein kommerziell sicheres Endprodukt ohne einen zusätzlichen Hygienisierungsschritt zu erzeugen. Für die Interpretation der Ergebnisse ist es wichtig zu beachten, dass die Verweilzeit, die Temperaturen und der Systemdruck in einem industriellen System viel höher sind als in einem kleinen Laborsystem. Daher sind die D-Werte nicht direkt übertragbar, bieten jedoch einen Ausgangspunkt für die Bewertung kritischer Kontrollpunkte.

Um die Menge der mikrobiellen Kontamination des Rohmaterials zu reduzieren, ist es möglich, Säuren (Ameisensäure, Essigsäure oder Propionsäure) als Futtermittelzusatz in der

Insektenzucht zu verwenden, wie es bei Insekten des Unternehmens FarmInsect GmbH, Bergkirchen, der Fall ist, die ebenfalls in dieser Studie verwendet wurden. Hier sind ENT und *E. coli* während des gesamten Prozesses nicht nachweisbar. Mit diesem Rohmaterial ist es möglich, ein kommerziell sicheres Endprodukt ohne einen zusätzlichen Hygienisierungsschritt zu erzeugen. In Bezug auf den Säurezusatz in der Substratbehandlung ist festzustellen, dass trotz der Bemühungen, den pH-Wert zu reduzieren, keine signifikante Auswirkung auf die Gesamtkeimzahl, die *Enterobacteriaceae* oder die Hefen zu beobachten war. Dies könnte auf eine mögliche Veränderung des pH-Werts des Substrats in den späteren Phasen des Prozesses zurückzuführen sein. Es ist wichtig zu beachten, dass für das Wachstum der Larven ein optimaler pH-Bereich existiert und ein zu niedriger pH-Wert ebenfalls nachteilig sein kann. Möglicherweise wurden bei der Firma FarmInsect GmbH bereits durch die Neugestaltung der gesamten Anlage positive Auswirkungen auf die Hygiene erzielt.

Dies lässt den Schluss zu, dass die kritischen Kontrollpunkte (CCP { XE "CCP" \t "kritische Kontrollpunkte" }) im Trockenverfahren die Rohware, die Trocknung und die Entölung sind. Diese Faktoren erfordern eine besonders gründliche Bewertung und Überwachung innerhalb eines HACCP-Konzepts, um die Qualität und Sicherheit des Endprodukts sicherzustellen.

4.2.2 Presskuchen aus dem Trockenverfahren

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass der Pressvorgang von Larven der Schwarzen Soldatenfliege im Rahmen des Trockenverfahrens bei einer Rohwarefeuchtigkeit von unter 3 – 5 % zusammenbricht. Mit Zusammenbruch des Prozesses lässt sich keine Separation von Öl und Feststoff mehr erzeugen.

4.2.2.1 Nährstoffkonzentrationen

In Tabelle 9 sind die Analysedaten sowohl für die Rohware als auch für die hergestellten Presskuchen dargestellt. Generell lässt sich aus den Daten erkennen, dass die Feuchtigkeits- und a_w -Werte der Presskuchen unabhängig von den gewählten Prozessparametern gleich sind. Die Ölausbeute im Pressprozess ist am größten, wenn eine kleine Austrittsmatrize (791 mm²) verwendet wird und die Produktfeuchtigkeit bei 5 % liegt. Eine Vergrößerung der Austrittsmatrize (1.017 mm²) führt zu einer signifikanten Reduzierung der Ölausbeute auf unter 10 %.

Tabelle 9: Analysedaten sowohl für die Rohware als auch für die hergestellten Presskuchen.

Parameter	Rw	Rw (trocken)	791 mm ²			1017 mm ²		
			3 %	4 %	5 %	3 %	4 %	5 %
Feuchte	74,1	3,8	2,4	2,4	2,7	2,2	2,4	2,8
a _w -Wert		0,319	0,101	0,124	0,137	0,098	0,106	0,184
Rohprotein	47,5	44,3	46,8	48,9	48,4	46,8	48,0	47,6
PDI		29,8	22,7	22,3	22,5	23,5	23,1	22,3
Rohfett	26,3		25,2	22,3	21,8	23,9	23,8	24,3
Ausbeute			4,0	14,9	17,0	8,9	9,5	7,5
Rancimat			0,03	0,04	0,06	0,02	-	-
Asche	11,2	10,1	10,9	11,1	11,1	11,2	11,1	11,1
Rohfaser	9,3		6,6	7,0	7,2	6,5	6,7	6,9
Chitin	7,7		6,5	7,2	7,4	6,6	7,3	7,1

Die Proteinkonzentration im Presskuchen steigt mit zunehmender Ölausbeute und erreicht maximal 48,4 %. Dies bedeutet eine Aufkonzentration von +10 % im Vergleich zur Rohware. Die Proteinlöslichkeit zeigt keine signifikanten Unterschiede bei allen Prozessparametereinstellungen. Aufgrund der geringen Ausbeute wurden für den Rohfasergehalt und den Chitingehalt keine signifikanten Aufkonzentrationsraten erzielt.

4.2.2.2 Mikrobiologische Untersuchungen

Gemäß der EU-Verordnung (142/2009) und unter Berücksichtigung eines *Enterobacteriaceae*-Gehalts von 2,48 % sowie der Nichtnachweisbarkeit von *Salmonella spp.* und *Clostridium perfringens* sind die Hygienedaten am Produktionstag und nach 90 Tagen Lagerung bei 25 °C und 60 % relativer Luftfeuchtigkeit in der Tabelle 10 dargestellt.

Am Herstellungstag wurden leicht erhöhte *Enterobacteriaceae*-Gehalte festgestellt. Im Zuge der trockenen Verarbeitung ist nur in den energieintensiven Prozessschritten wie der Trocknung ein Rückgang der Keimbelastung zu erwarten (gemäß Regulierung IGF). Daher ist es entscheidend, hygienische Maßnahmen zu etablieren, um ein sicheres Futtermittel herzustellen. Eine Dampfkonditionierung mit ausreichender Verweilzeit während der Pressung kann dies sicherstellen.

Tabelle 10: Analysedaten der mikrobiologischen Untersuchungen.

Parameter	Rw	Rw (trocken)	791 mm ²			1017 mm ²		
			3 %	4 %	5 %	3 %	4 %	5 %
GKZ	7,83	5,86	4,53	4,79	3,79	5,08	4,18	3,20
<i>Enterobac.</i>	6,00	2,48	2,30	3,15	2,60	3,04	2,48	2,30
<i>Salmonella spp.</i>	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ
<i>C. perfringens</i>	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
90 d								
GKZ	-	-		4,72	3,70	3,83	3,86	2,30
<i>Enterobac.</i>	-	-	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ
<i>Salmonella spp.</i>	-	-	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ
<i>C. perfringens</i>	-	-	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

Auffällig ist, dass in keiner der Proben nach 90 Tagen Enterobakterien, Salmonellen oder *Clostridium perfringens* nachgewiesen werden konnten. Ebenso ist der Gesamtgehalt nicht angestiegen. Daher lässt sich feststellen, dass die Proben über einen Zeitraum von 90 Tagen keiner erneuten Kontamination oder Instabilität unterliegen.

4.2.2.3 Energiebedarf

Die Beschreibung des Energiebedarfs bezogen auf eine Tonne Frischmasse zeigt den Energieverbrauch in Kilowattstunden (kWh) pro Tonne Frischmasse für verschiedene Prozesse (Tabelle 11).

Tabelle 11: Energiebedarf in Kilowattstunden pro Tonne Frischmasse.

	kWh/t		Luftmenge m ³ /t
Trocknung	1.500	- 3.000	39.000-45.500
Presse	29	- 35	
Summe	1.529	- 3.035	

Der Energiebedarf für die Trocknung beträgt zwischen 1.500 und 3.000 kWh pro Tonne Frischmasse. Dieser Wert variiert je nach dem Grad der Feuchtigkeit des Ausgangsmaterials, der Art der Trocknungsmethode und den spezifischen Anforderungen des Trocknungsprozesses. Für den Pressprozess liegt der Energiebedarf bei ca. 30 kWh pro Tonne Frischmasse. Dieser Wert ist abhängig von der Art der Presse, dem Druck, der auf das Material ausgeübt wird, und anderen prozessspezifischen Parametern.

4.2.3 Nassverfahren

4.2.3.1 Nährstoffkonzentrationen

In Tabelle 12 sind die Analysedaten sowohl für die Rohware als auch für die hergestellten Proteinmehle dargestellt. Im Rahmen der Studie wurden verschiedene Prozessparameter wie der pH-Wert der Aufschlusslösung und die Temperatur variiert. Durch diese Variationen kann die Koagulation und Denaturierung der enthaltenen Proteine und hierdurch die Separation von Fett und Protein verbessert werden. Der Begriff „pH Proteinfällung“ bezieht sich auf den pH-Wert, bei dem Proteine in einer Lösung ausgefällt werden. Proteine haben unterschiedliche isoelektrische Punkte (pH-Werte, bei denen sie neutral geladen sind), so dass bei einem bestimmten pH-Wert Proteine ihre Löslichkeit verlieren und aus der Lösung ausfallen können. Dies geschieht, weil sich die elektrische Ladung der Proteine ändert und sie sich gegenseitig anziehen, was zu ihrer Ausfällung führt.

Der pH-Wert, bei dem die Proteinfällung auftritt, hängt von der spezifischen Proteinstruktur und den Umgebungsbedingungen ab, wie z. B. der Ionenstärke der Lösung und der Temperatur. In verschiedenen Anwendungen wie der Biotechnologie, Lebensmittelverarbeitung oder der Proteinreinigung werden spezifische pH-Werte verwendet, um Proteine gezielt auszufällen und zu trennen.

Tabelle 12: Analysedaten der Rohware sowie der im Nassverfahren hergestellten Presskuchen.

Parameter	0,04 M HCl						0,10 M HCl					
	Rw	60 °C	Rw	80 °C	Rw	100 °C	Rw	60 °C	Rw	80 °C	Rw	100 °C
Feuchte	74,1	6,3	74,4	4,7	74,8	3,4	74,1	7,3	74,9	3,4	75,5	5,4
Rohprotein	47,5	43,3	47,7	44,5	53,6	44,2	47,5	46,0	51,4	45,5	51,0	50,7
PDI	15,4	12,1	22,3	8,8	18,5	8,2	15,4	10,5	12,9	7,5	13,4	8,5
Rohfett	26,3	30,6	24,2	33,5	34,5	36,9	26,3	31,1	32,7	34,5	26,1	18,0
Asche	11,2	9,3	10,9	10,5	12,3	9,7	11,2	10,5	12,0	9,7	12,2	10,1
Rohfaser	9,3	9,3	10,2	10,1	10,7	9,2	9,3	9,6	8,4	8,9	13,9	10,9
Chitin	7,7	8,4	12,1	8,7	13,9	8,4	7,7	8,8	8,0	8,0	8,6	9,5

Bei der Separation von Insektenfett und -protein ist auffällig, dass es zu einer Abnahme der Proteinkonzentration kommt. Die lässt sich durch die Löslichkeit von Proteinen in der Extraktionslösung erklären. Die weiterführende Technik zur Aufkonzentration der wässrigen Phase wurde im Rahmen der Vorstudie nicht berücksichtigt. Eine technologisch relevante Ölausbeute konnte lediglich bei der Versuchseinstellung 0,1 M HCl und 100 °C

Aufschlussstemperatur erzielt werden. Hierbei konnte ein Restfettgehalt von ca. 18 % im Proteinmehl erzielt werden. Die anderen Versuchsbedingungen führten zu einer technologisch nicht relevanten Ausbeute.

4.2.3.2 Mikrobiologische Untersuchungen

Während der Nassverarbeitung nimmt die Bakterienzahl innerhalb der Verarbeitungsschritte stetig ab (Tabelle 13), wobei die stärkste Reduzierung der mikrobiellen Belastung im getrockneten Presskuchen (GKZ{ XE "GKZ" \t "Gesamtkeimzahl" } 3,91 log KbE/g und Entobac. 2,30 log KbE/g) aus dem Aufschluss bei der höchsten Temperatur gefunden wurden.

Tabelle 13: Analysedaten der mikrobiologischen Untersuchungen.

Parameter	0,04 M HCl						0,10 M HCl					
	Rw	60 °C	Rw	80 °C	Rw	100 °C	Rw	60 °C	Rw	80 °C	Rw	100 °C
GKZ	7,83	6,18	7,79	5,62	7,93	3,91	7,79	6,20	7,86	4,86	7,00	4,72
<i>Enterobac.</i>	6,00	LOQ	5,36	LOQ	6,00	2,30	6,00	LOQ	6,00	LOQ	6,00	3,58
<i>Salmonella</i> <i>spp.</i>	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ
<i>C. perfringens</i>	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
28 d												
GKZ		6,20		5,65		4,11		6,28		4,53		5,86
<i>Enterobac.</i>		2,30		LOQ		2,00		2,90		2,00		2,00
<i>Salmonella</i> <i>spp.</i>		LOQ		LOQ		LOQ		LOQ		LOQ		LOQ
<i>C. perfringens</i>		n.n.		n.n.		n.n.		n.n.		n.n.		n.n.
60 d												
GKZ		6,67		6,08		3,91		6,69		4,95		4,79
<i>Enterobac.</i>		LOQ		LOQ		2,78		2,60		LOQ		LOQ
<i>Salmonella</i> <i>spp.</i>		LOQ		LOQ		LOQ		LOQ		LOQ		LOQ
<i>C. perfringens</i>		n.n.		n.n.		n.n.		n.n.		n.n.		n.n.
90 d												
GKZ		6,69		5,70		4,00		6,61		4,89		5,95
<i>Enterobac.</i>		LOQ		LOQ		LOQ		LOQ		LOQ		2,48
<i>Salmonella ssp.</i>		LOQ		LOQ		LOQ		LOQ		LOQ		LOQ
<i>C. perfringens</i>		n.n.		n.n.		n.n.		n.n.		n.n.		n.n.

Das Blanchieren reduziert abhängig von der Prozesstemperatur die GKZ um etwa 1,7 – 4,0 log Kbe/g. Durch das Blanchieren der BSFL können diese zum einen devitalisiert werden und zum anderen werden endogene Enzyme (Phenoloxidase, Protease usw.) inaktiviert. Somit beugt das Blanchieren einem enzymatischen Bräunungsprozess und dem

Proteinabbau vor. Der Blanchierprozess hat einen D-Wert von 57 s für TBC (IGF Projekt 21763 N). Anschließend werden die Larven mittels Fleischwolf zerkleinert. Dieser Schritt der Handhabung des empfindlichen Produkts hat keinen Einfluss auf die mikrobielle Belastung. Die darauffolgende Fettschmelze zur Verbesserung der Fettausbeute hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die mikrobielle Belastung des Produktes, hier können Reduktionsraten von 2,6 log-Zyklen und mehr beobachtet werden (IGF Projekt 21763 N). Nach der Fettschmelzung und der Fetttrennung durch Zentrifugation liegt die GKZ in der flüssigen Phase (Rohöl + Prozesswasser) unter 2,0 und im Proteinpulver bei 6,0 – 4,0 log KbE/g. Für die Fettschmelze und -separation wurde ein D-Wert von 29 min für GKZ im Rahmen des IGF-Projektes 21763 N ermittelt. Dieses Experiment ermöglichte die Beschreibung der Kontrollpunkte im technischen Maßstab. Dazu gehören das Rohprodukt, die blanchierten BSFL, Verarbeitungszwischenprodukte nach der Fetttrennung und das trockene Endprodukt.

Im technischen Maßstab wurden BSFL verwendet, die durch Einfrieren devitalisiert wurden. Unter der Annahme, dass die Fettschmelze unter den Prozessbedingungen ein ausreichend hohes Hygienisierungspotenzial hat, ist es möglich, den Blanchierschritt im Verfahrensschema zu umgehen. Unter den ausgewählten Prozessbedingungen war es in der Regel möglich, ein sicheres Futtermittel zu erzeugen. Für den gesamten Prozess (Fettschmelze und -trennung) wird ein D-Wert von 68 min für TBC und 92 min für ENT beschrieben (IGF Projekt 21763 N). Das feuchte Proteinpulver wurde durch Infrarotstrahlung (t: 240 min; T: 80 °C) auf eine Restfeuchtigkeit von unter 14 g/100 g getrocknet. Im getrockneten Endprodukt waren keine bis geringe Mengen (2,3 log KbE/g) ENT, Hefen oder Pilze nachweisbar. Die Trocknung des Zwischenprodukts zeigt D-Werte für GKZ von 92 min und für ENT von 111 min auf (IGF Projekt 21763 N). Die bakterielle Kontamination des getrockneten Produkts erfüllte somit in der Regel die Anforderungen der Verordnung (EU) Nr. 142/2011. Die kritischen Kontrollpunkte (CCP) in diesem Prozess sind nach dem IGF-Projekt 21763 N:

1. **Rohware (Larven):** Dies ist der Ausgangspunkt des Prozesses. Hier sollte sichergestellt werden, dass bereits die Rohware eine möglichst niedrige mikrobielle Belastung aufweist.
2. **Blanchieren:** Dieser Schritt dient dazu, die Larven zu devitalisieren und Enzyme zu inaktivieren: die Gesamtbakterienzahl (TBC { XE "TBC" \t "Gesamtbakterienzahl" }) wird um etwa 3,2 log KbE/g verringert und hat einen D-Wert von 57 s für TBC. Das Blanchieren ist ein wichtiger CCP, um die Hygiene zu gewährleisten.
3. **Fettschmelze und -separation:** Dieser Schritt hat einen erheblichen Einfluss auf den mikrobiellen Gehalt des Produkts mit Reduktionsraten von 2,6 log-Zyklen und mehr. Ein D-Wert von 29 min wurde für TBC ermittelt. Daher sind die Fettschmelze und -separation ein weiterer entscheidender CCP.
4. **Fertigware (getrocknetes Endprodukt):** Hier wird sichergestellt, dass das Endprodukt die mikrobiellen Anforderungen gemäß der Verordnung (EU) Nr. 142/2011

erfüllt. Nach der Trocknung waren keine *Enterobacteriaceae* (ENT), Hefen oder Pilze nachweisbar.

4.2.3.3 Energiebedarf

Die Beschreibung des Energiebedarfs bezogen auf eine Tonne Frischmasse zeigt den Energieverbrauch in Kilowattstunden (kWh) pro Tonne Frischmasse für verschiedene Prozesse.

Tabelle 14: Energieverbrauch in Kilowattstunden (kWh) pro Tonne Frischmasse.

	60 °C; 0,04 M	60 °C; 0,1 M	80 °C; 0,04 M	80 °C; 0,1 M	100 °C; 0,04 M	100 °C; 0,1 M
Zerkleinerung kWh/t	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10
Kessel kWh/t ± 10 %	204	204	325	325	385	385
Fettseparation	21	26	28	23	26	26
Trocknung	700 – 900 kWh/t					
Summe	930 – 1.316 kWh/t					

Der Energiebedarf für die Trocknung beträgt zwischen 700 und 900 kWh pro Tonne Frischmasse. Dieser Wert variiert je nach dem Grad der Feuchtigkeit des Ausgangsmaterials, der Art der Trocknungsmethode und den spezifischen Anforderungen des Trocknungsprozesses. Für den Aufschluss und Separationsprozess liegt der Energiebedarf bei ca. 220 – 400 kWh pro Tonne Frischmasse, abhängig von der Art der Rührkessel und der Aufschlusstemperatur. Somit entsteht ein summierter Energiebedarf pro Tonne Rohware von 930 – 1.316 kWh.

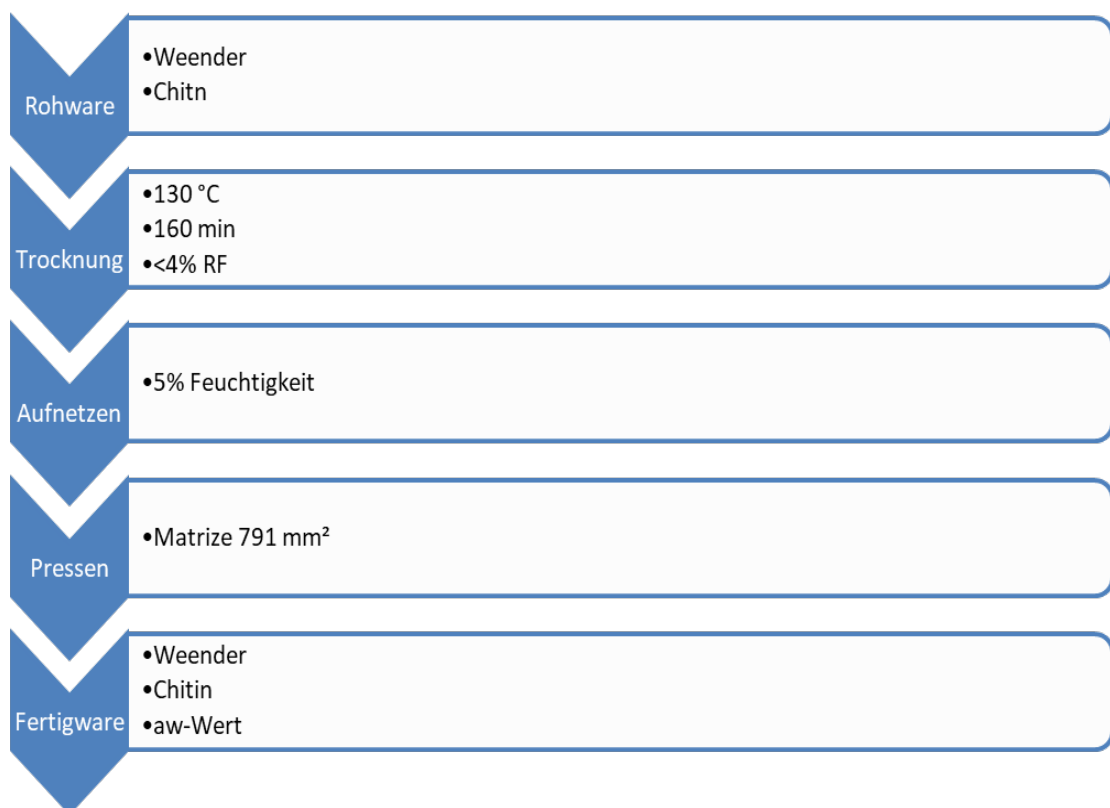
Diese energiespezifischen Angaben wurden auf einer Technikumsanlage ermittelt und sind in der Regel nicht auf industrielle Prozesse skalierbar. Bei Erhöhung der Tonnagen auf einen industriellen Maßstab ist ein deutlich verringerter Energiebedarf zu erwarten. Dieser lässt sich allerdings nicht generell skalieren und muss für jedes Anlagenschemata separat ermittelt werden. Grundsätzlich ist aber zu erkennen, dass der Energiebedarf bei der nassen Verarbeitung deutlich geringer ausfällt (ca. um den Faktor 2) als beim Trockenverfahren (1.500 – 3.000 kWh/t).

4.3 Anwendungsempfehlung

Für die Herstellung von Proteinkonzentraten aus Larven der Schwarzen Soldatenfliege mittels Nass- und Trockenverfahren unter den angegebenen Parametern werden folgende Vorgehensweisen empfohlen:

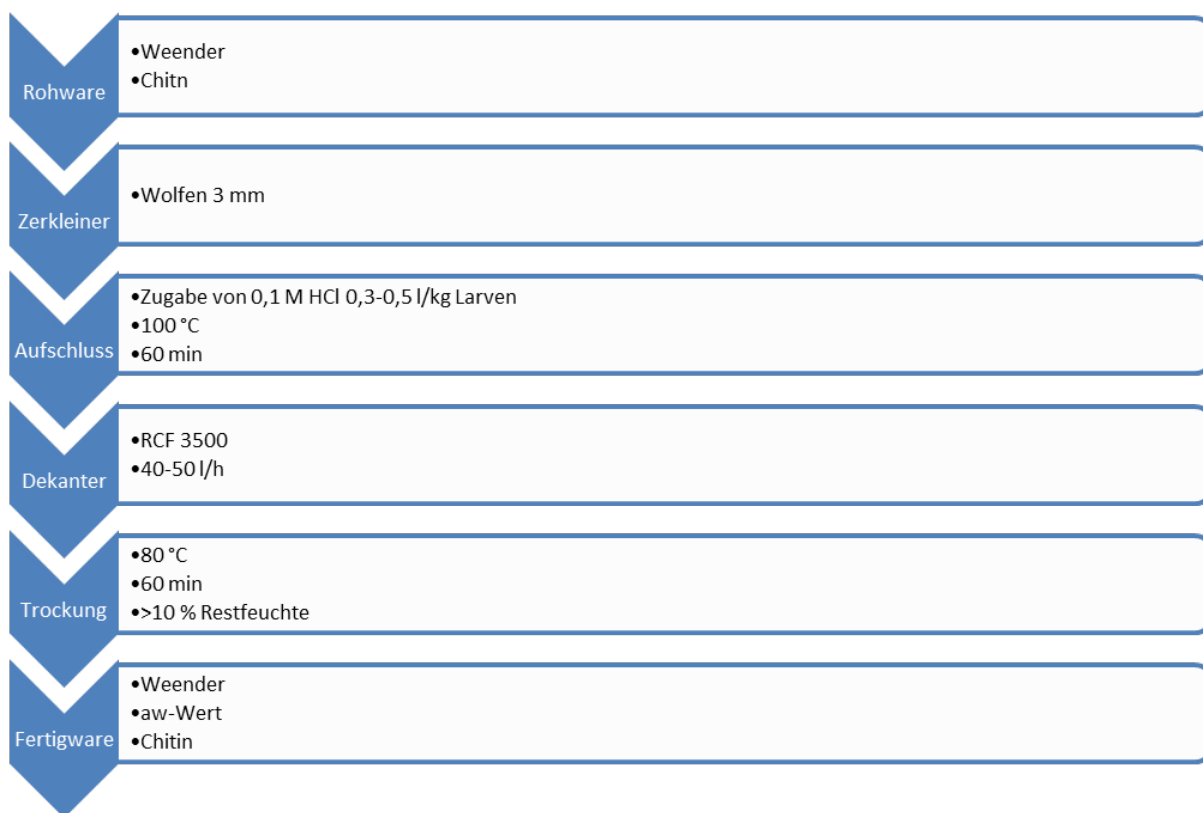
Trockenverfahren:

1. Trocknung: 130 °C für 160 Minuten bis die Restfeuchte der Larven weniger als 4 % beträgt.
2. Vorkonditionierung: Bei Temperaturen von über 50 °C, um die Larven für den Trocknungsprozess vorzubereiten.
3. Mahlen: Getrocknete Larven zu einem feinen Pulver zerkleinern unter Verwendung einer Matrice mit einer Fläche von 791 mm².
4. Feuchtigkeitsgehalt: Endprodukt etwa 5 %.



Nassverfahren:

1. Aufschluss: Larven mit 0,1 M HCl-Lösung bei einer Temperatur von 100 °C für 60 Minuten behandeln, um die Zellwände aufzubrechen und die Proteine freizusetzen.
2. Separation: aufgeschlossene Larven von der Lösung durch Zentrifugation mit einem relativen Zentrifugalkraftwert von 3500 trennen.
3. Trocknung: Extrahierte Proteine bei einer Temperatur von 80 °C für 60 Minuten trocknen, um ein Proteinkonzentrat zu erhalten.



Durch diese spezifischen Verfahrensschritte unter den angegebenen Parametern können hochwertige Proteinkonzentrate aus Larven der Schwarzen Soldatenfliege hergestellt werden.

5 Ökobilanzielle Bewertung von Insektenprotein

5.1 Hintergrund

Das größte Potenzial, um die negativen Umweltwirkungen der konventionellen Erzeugung von Futtermitteln für die Nutztierhaltung durch den Einsatz von Insektenprotein signifikant zu verringern, wird in der Auswahl der Nährsubstrate für die Insektenlarven gesehen. Die ökobilanzielle Bewertung der aus den oben beschriebenen Versuchen im volltechnischen (Aufzucht und Mast der Insekten) bzw. Technikums-Maßstab (Larvenverarbeitung) soll erste wissenschaftlich belastbare Daten dazu liefern, ob und in welchem Maße es möglich wäre, durch den Einsatz von Insektenprotein die Bereitstellung von Futtermitteln für die Tierhaltung in Bayern, insbesondere die Haltung von Geflügel und Schweinen, umweltschonender zu gestalten.

5.2 Material und Methoden - Durchführung der Studie

Die Arbeitsgruppe Technikfolgenabschätzung am Institut für Landtechnik und Tierhaltung (ILT) der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) wurde mit der Durchführung der ökobilanziellen Bewertung im Projekt InseG betraut. Die Ökobilanz stützt sich hierbei möglichst auf Primärdaten, welche aus den experimentellen Untersuchungen im Projekt gewonnen werden.

5.3 Zielgruppe

Die Zielgruppe der Ökobilanzstudie umfasst neben dem Auftraggeber insbesondere Landwirte, die sich für einen eventuellen Einstieg in die Insektenerzeugung interessieren, sowie andere Stakeholder, die beurteilen möchten, welche Umweltwirkungen unterschiedliche Futtermittel in der Tierhaltung haben und ob durch den Einsatz von Insektenprotein ein Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung der Tierhaltung hierzulande geleistet werden kann.

5.4 Beschreibung des zu untersuchenden Produktsystems

Das Produktsystem zur Herstellung eines Eiweißfuttermittels aus Insektenlarven wurde in drei Abschnitte untergliedert, wie in Abbildung 13 schematisch dargestellt. Der erste Abschnitt umfasst die Bereitstellung der Nährsubstrate für die Fütterung der Insektenlarven. Bei diesen Nährsubstraten handelt es sich um verschiedene Nebenprodukte aus der Lebensmittelverarbeitung. Diese wurden von externen Lieferanten bezogen und anschließend aufbereitet, um die geeignete Zusammensetzung und Konsistenz für die Larvenfütterung zu gewährleisten.

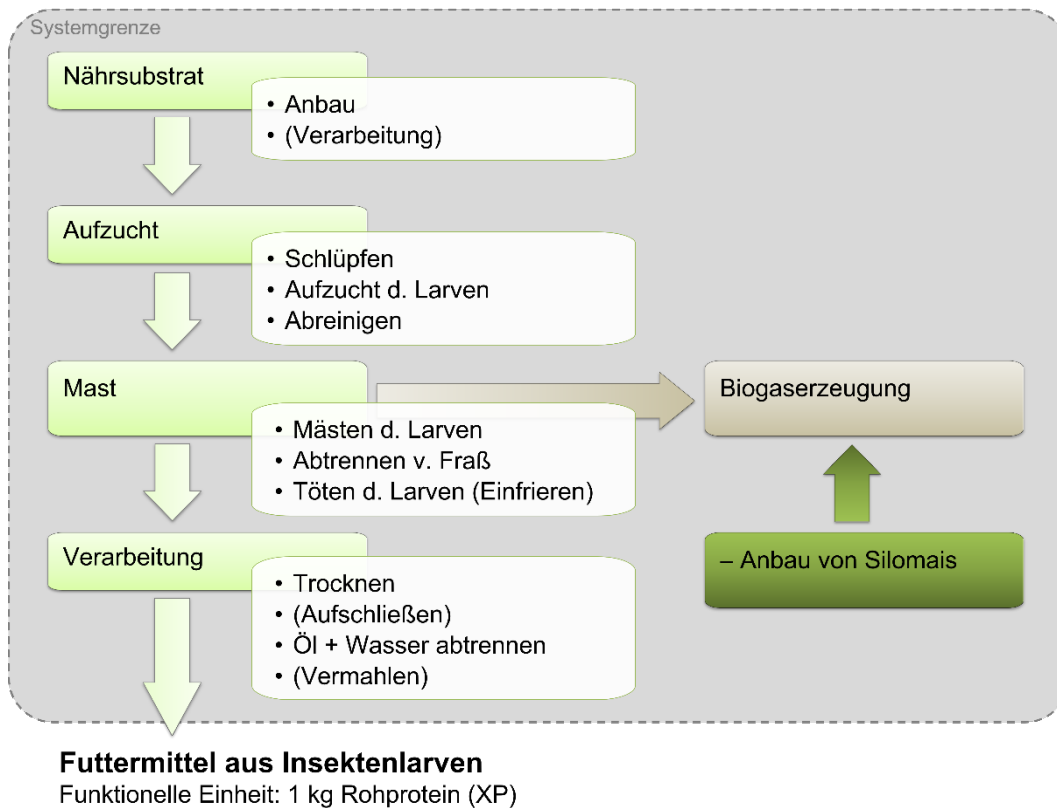


Abbildung 13: Schematische Darstellung des zu untersuchenden Produktsystems für die Erzeugung und Aufbereitung von Insektenlarven als Futtermittel, einschließlich der Verwertung von Fraß als Substitut für Maissilage zur Biogasproduktion.

Die eigentliche Insektenmast beginnt mit dem Schlüpfen der Larven. Die Larven werden anschließend in speziellen Kisten auf dem vorbereiteten Nährsubstrat als Hauptfutterquelle gehalten. Während der Phase des Mästens der Larven werden die Wachstumsbedingungen, speziell die Umgebungstemperatur, die Luftfeuchte und die Belüftungsrate, entsprechend ihrem Entwicklungsstadium optimiert. Am Ende der Wachstumsphase werden die Larven von Kot, Futterresten und Exuvien getrennt und schließlich getötet, ehe die weitere Verarbeitung zur Herstellung eines Proteinfuttermittels erfolgen kann. Die Tötung der Larven kann durch unterschiedliche Methoden erfolgen, in der Regel jedoch durch Abkühlen und anschließendes Einfrieren, da hierdurch zugleich eine chemische Stabilisierung gewährleistet wird.

Alternativ können die Larven ohne weitere Aufbereitung konserviert und später verfüttert werden. Auch die als besonders tiergerecht geltende Lebendverfütterung ist möglich. In der vorliegenden Studie wurde die Aufbereitung der Larven deshalb getrennt bilanziert. Den für die Bilanzierung verwendeten Stoffstromplan für das Produktsystem bis zur Bereitstellung der vom Fraß gereinigten Larven zeigt Abbildung 14.

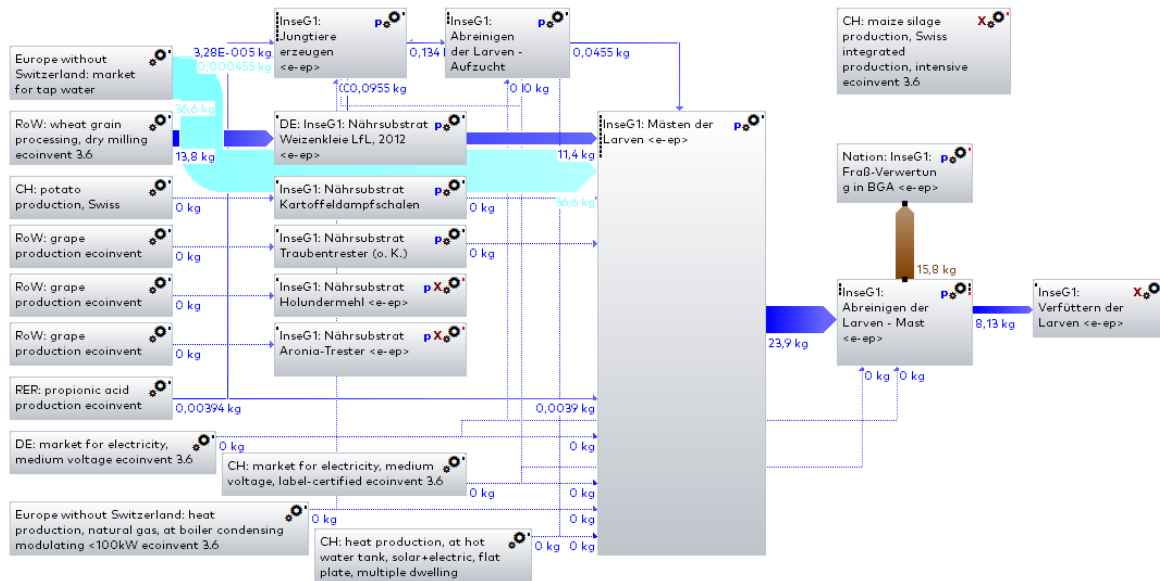


Abbildung 14: Prozess- und Stoffstromplan des bilanzierten Produktsystems für die Bereitstellung von Insektenlarven zum direkten Verfüttern, einschließlich der Verwertung von Fraß zur Biogaserzeugung im Austausch für Maissilage; funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein in Larven-Frischmasse. Plan erstellt unter LCA for Experts Version 10.7.1.28 (Sphera Solutions GmbH).

5.5 Beschreibung der Versuche als Basis für die Sachbilanz

Die Bilanzierung der Energie- und Stoffströme im untersuchten Produktsystem erfolgte primär auf Basis der Versuchsdaten, die im Rahmen des Projekts gewonnen wurden. Die Modellierung der wesentlichen Vorketten erfolgte unter Verwendung von Daten aus [7].

5.5.1 Erprobung verschiedener Nebenprodukte aus der Lebensmittelverarbeitung als Nährsubstrate

Das Ziel dieser Versuche bestand darin, die grundsätzliche Verwertbarkeit verschiedener Nebenprodukte bzw. Reststoffe aus der Lebensmittelverarbeitung als Nährsubstrat für die Insektenmast zu evaluieren, wobei insgesamt 15 unterschiedliche Mischungen aus vier verschiedenen Nebenprodukten erprobt wurden. Gleichbleibende Bestandteile in den Futtermischungen aller Versuchsreihen waren zwei Prozent Mineralfutter und drei Prozent Futtersäuren (Propionsäure und Ameisensäure). Die Hauptkomponente bildete einmal ausschließlich das Futtermittel „A“ (Müllerei-Nebenprodukte aus Weizen) und in weiteren Ansätzen jeweils eine Mischung aus variierenden Anteilen von „A“ und einem bzw. zwei Nebenprodukt(en) aus der Lebensmittelverarbeitung als Futtermittel „B“ bzw. „C“ zu gleichen Masseanteilen.

Die Nebenprodukte wurden für den Versuchsansatz zusätzlich durch Mahlen oder Häckseln aufgeschlossen. Die notwendigen Daten zur Auswertung des Masterfolgs umfassten: Anfangs- und Endgewicht der Larven (insgesamt und je Einzeltier), Futteraufwand sowie Endgewicht des Komposts. Für weitergehende chemische Analysen wurden vor Versuchsbeginn Proben von der Futtermischung und am Versuchsende Proben von dem verbleibenden Fraß und von den Larven entnommen, tiefgefroren und bis zur Analyse gelagert.

Folgende Nebenprodukte wurden zur Larvenmast eingesetzt:

- Kartoffeldampfschalen: diese entstehen als Nebenprodukt bei der industriellen Verarbeitung von Kartoffeln;
- Traubentrester;
- Holunder-Nebenprodukt: geplant war der Einsatz von (frischem) Holundertrester, tatsächlich für die Versuche eingesetzt wurde jedoch Holundermehl, welches eine hohe Wertschöpfung als Nahrungsergänzungsmittel erzielt und daher *realiter* nicht als Futtermittel eingesetzt werden würde;
- Aroniabeeren-Trester: für dieses Nebenprodukt gilt Gleiches wie beim Holunder.

Der Einsatz der hochwertigen Nebenprodukte aus Holunder- und Aroniabeeren wurde aus versuchstechnischen Gründen gewählt (trockene Produkte im Vergleich zu Trestern mit hohem Restfeuchtegehalt). Da der Einsatz der Nebenprodukte aus Holunder- und Aroniabeeren als Futtermittel fern der Realität am Markt erschien, wurden die Ergebnisse aus den entsprechenden Mastversuchen nicht für die Ökobilanzierung verwendet.

5.5.2 Züchtung durch Selektion zur Verbesserung der Futtermittelverwertung von Reststoffen

In einer weiteren Versuchsreihe sollte ermittelt werden, wie schnell die Larven durch Züchtung mittels einfacher Selektion an die Verwertung verschiedener Reststoffe angepasst werden können. Dazu wurden zwei möglichst unterschiedliche Reststoffe aus den Mastversuchen ausgewählt, mit denen die Züchtung über sechs Generationen beobachtet wurde.

Während der Züchtungsversuche wurden folgende Werte erfasst: das Anfangs- und Endgewicht der Larven (insgesamt und je Einzeltier), der Futteraufwand, das Endgewicht des Komposts, der Temperaturverlauf im Mastsubstrat und die Größenverteilung der Larven. Wie in der ersten Versuchsreihe wurden Proben vor Beginn und am Ende der Mast sowie nach Versuchsende entnommen und tiefgefroren bis zur Analyse im Labor gelagert.

5.5.3 Erprobung von Verfahren zur Herstellung eines Proteinfuttermittels aus Insektenlarven

Für die Herstellung eines Eiweißfuttermittels aus den gemästeten und von Fraß gereinigten Insektenlarven wurden ein Verfahren zur „nassen“ und ein Verfahren zur „trockenen“ Verarbeitung erprobt. Die Endprodukte beider Verarbeitungsverfahren wurden auf ihre Lagerstabilität über einen Zeitraum von 90 Tagen getestet.

5.5.3.1 Nasse Verarbeitung

Die durch Tiefkühlen abgetöteten Larven wurden aufgetaut und unter Zugabe von Wasser und verdünnter Salzsäure mit einem Fleischwolf zerkleinert („mazeriert“). Die zerkleinerte Larvenmasse wurde in einem Rührkessel bei 60, 80 oder 100 °C und Atmosphärendruck für eine Stunde aufgeschlossen. Anschließend erfolgte die Separierung in eine flüssige und eine feste Phase mittels eines Dekanters. Die feste Phase wurde getrocknet und schließlich zum Endprodukt „Proteinmehl aus Insektenlarven“ vermahlen. Die verschiedenen Probenstufen, einschließlich Rohware, aufgeschlossener Rohware, flüssiger Phase, fester Phase und

Proteinmehl, wurden analysiert. Den Prozessplan für die nasse Verarbeitung aus dem Stoffstrommodell zeigt Abbildung 15.

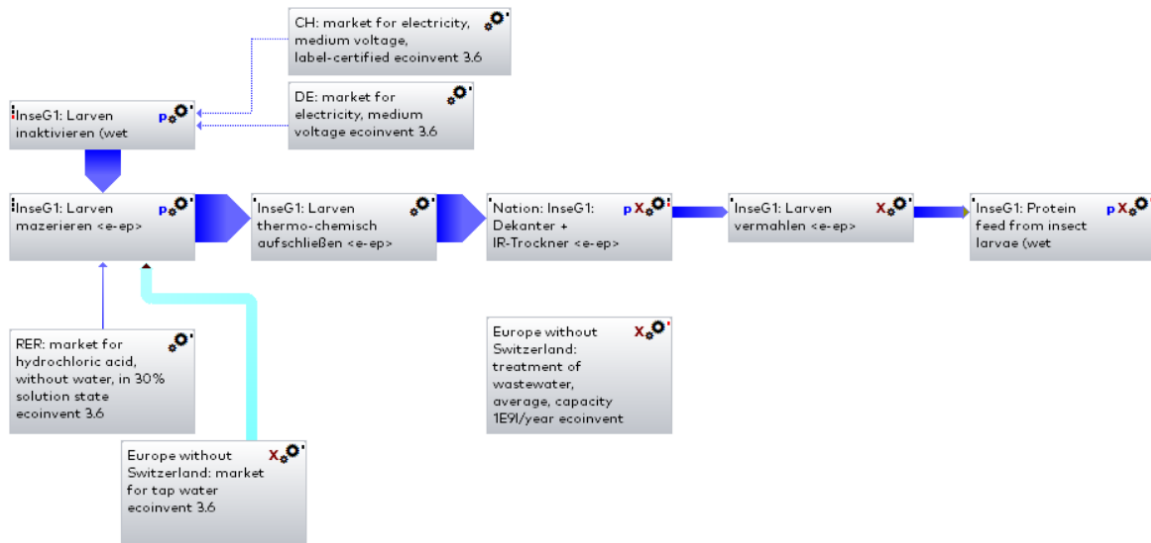


Abbildung 15: Prozessplan des Verfahrens zur nassen Verarbeitung der Larven im Stoffstrommodell.

5.5.3.2 Trockene Verarbeitung

Die durch Tiefkühlen abgetöteten Larven wurden in zwei Stufen getrocknet und verbliebene Restmengen an Fraß wurden mittels Sieb und Trieur abgetrennt. Da die Larven für das anschließende Auspressen mindestens drei Prozent Feuchte aufweisen müssen, wurden diese gegebenenfalls vor dem Pressen wieder angefeuchtet. Das Auspressen erfolgte bei einem Feuchtegehalt von drei, vier oder fünf Prozent mit zwei verschiedenen Matrizen. Das Endprodukt bei der trockenen Verarbeitung stellt der Presskuchen aus der Larvenmasse dar. Den Prozessplan für die trockene Verarbeitung aus dem Stoffstrommodell zeigt Abbildung 16.

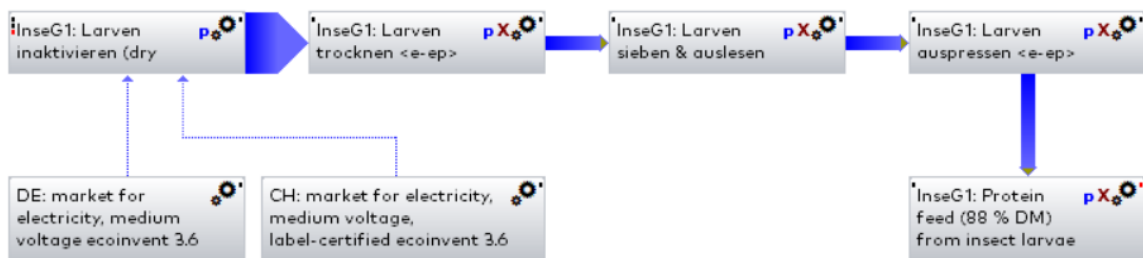


Abbildung 16: Prozessplan des Verfahrens zur trockenen Verarbeitung der Larven im Stoffstrommodell.

5.6 Funktionale Einheit

Die funktionale Einheit (FE) bildet die Bezugsgröße für die zu bilanzierenden Umweltwirkungen, auf Basis derer ein Vergleich mit alternativen Produkten erfolgen kann. Da Protein aus Insektenlarven als Alternative zu herkömmlichen Proteinfuttermitteln in der Nutztierhaltung bewertet werden soll, wurde als funktionale Einheit gewählt:

1 kg Rohprotein (Trockenmasse – TM) im Futtermittel (d. h. in der Frischmasse der abgereinigten Insektenlarven bzw. im aufbereiteten Produkt aus Insektenlarven).

Unterschiede in der Proteinwertigkeit werden mit dieser FE vernachlässigt. Im vorliegenden Forschungsprojekt lagen zur Verwertungseffizienz von Proteinfuttermitteln aus Insektenlarven noch keine Versuchsergebnisse vor.

5.7 Vergleichssystem: Bereitstellung von Sojaextraktionsschrot

Als Vergleichssystem für die ökobilanzielle Bewertung des Insektenproteins wird ein modelliertes Produktsystem zur Erzeugung von SES herangezogen, da dieser eine etablierte Eiweißquelle und eines der häufigsten Proteinfuttermittel in der Nutztierhaltung darstellt. Durch den Vergleich der Umweltwirkungen von Insektenprotein mit denjenigen von SES können die postulierten ökologischen Vorteile der Verwendung von Insekten als alternative Proteinquelle identifiziert werden. Wie die Sachbilanz für das Vergleichssystem aufgestellt wurde, wird im Detail in Abschnitt 5.16 erläutert.

5.8 Nebenprodukte aus der Lebensmittelverarbeitung und Allokationsverfahren

In diesem frühen Stadium der Bewertung von Eiweißfuttermitteln aus Insektenlarven wurde eine simple Allokation der Umweltwirkungen nach Masse vorgenommen. Für die Bilanzierung der zur Larvenmast eingesetzten Nebenprodukte aus der Lebensmittelverarbeitung bedeutet dies, dass die Nährsubstrate einen erheblichen Anteil der Umweltwirkungen des Anbaus der Hauptfrüchte mitbringen.

Während der Aufzucht und Mast der Insektenlarven entsteht der sogenannte Fraß, ein Gemisch aus den Exkrementen der Insekten, toten Insekteneiern und -individuen sowie Resten von Nährsubstrat. Fraß ist im zu untersuchenden System kein Produkt, sondern ein Reststoff und wird daher für die Allokation nicht berücksichtigt.

Der Fraß, welcher in der Aufzucht- und Mastanlage von FarmInsect anfällt, wird derzeit zur energetischen Verwertung an eine Biogasanlage abgegeben. Die Messung des Biogaspotenzials ergab eine mittlere Methanausbeute von 306 Litern je kg organische Trockenmasse im Fraß, vergleichbar mit der Methanausbeute aus der oTM von Maissilage (mit mäßiger Qualität). Es wurde daher in einem vereinfachten Ansatz die Substitution einer äquivalenten Menge an Maissilage zur Biogaserzeugung durch Fraß modelliert. Hierfür wurde der aggregierte Prozess [maize silage production, Swiss integrated production, intensive, CH] nach [13] verwendet und eine Korrektur entsprechend den mittleren Ertragsverhältnisse für Oberbayern vorgenommen.

Schließlich fällt aus der weiteren Verarbeitung der Larven neben der proteinreichen Fraktion eine Öl-Fraktion an (gelöste Substanzen in eventuellen Abwasserströmen wurden für die Sachbilanz nicht berücksichtigt): beim „nassen“ Prozess am Dekanter, beim „trockenen“ Prozess an der Ölpresse. Da derzeit kein Markt für die Öl-Fraktion aus der Insektenverarbeitung besteht, wird diese in der vorliegenden Studie als Abfall klassifiziert und darauf keine Allokation vorgenommen.

Sojaextraktionsschrot ist ein Nebenprodukt aus der Gewinnung von Sojaöl durch Lösungsmittlextraktion. In dem hier verwendeten Modellprozess [soybean meal and crude oil production, RER] [13] werden folgende Masseströme spezifiziert:

Eingabe: 0,81 kg Sojabohnen je 1 kg Sojaextraktionsschrot bzw. 1,87 kg Sojabohnen je 1 kg Sojaöl

⇒ Verhältnis der Ausbeute von Soja-Extraktionsschrot zu Sojaöl: $(1/0,81) / (1/1,87) = 2,31$. Somit liegt den Berechnungen für das Vergleichssystem ein Allokationsfaktor von $2,31 / 3,31 \approx 0,70$ zu Grunde.

Für eine Zuordnung der Umweltwirkungen, welche der wirtschaftlichen Realität näher kommt, wäre eine Systemerweiterung vorzunehmen. Hierbei wird betrachtet, welche Marktverschiebung durch das zusätzliche Angebot aus dem untersuchten Produktsystem ausgelöst wird bzw. welches alternative oder „marginale“ Produkt hierdurch verdrängt wird (*engl.* „consequential life-cycle assessment“). Im Falle des Vergleichssystems der Erzeugung von SES würde das ebenfalls produzierte Sojaöl in Konkurrenz mit anderen pflanzlichen Ölen treten, vorzugsweise mit Rapsöl oder Palmöl [15].

5.9 Varianten und Sensitivitätsanalyse

Für die Lebenszyklusanalyse des Produktsystems „Insektenlarven zur direkten Verfütterung“ wurde das folgende Szenario als Basis betrachtet (Vergleiche Abbildung 14):

- Bezug von elektrischer Energie als Strommix aus dem Mittelspannungsnetz;
- Wärmeerzeugung aus Erdgas, Brennwert-Therme;
- Nährsubstrat: ausschließlich Weizenkleie.

Als Varianten wurde das Basis-Szenario mit folgenden Veränderungen ausgewertet:

1. Bezug von zertifiziertem Ökostrom und Wärmeerzeugung aus solarthermischer Anlage mit elektrischer Zusatzheizung;
2. Nährsubstrat: 50 % Weizenkleie + 50 % Kartoffel-Dampfschalen;
3. Nährsubstrat: 50 % Weizenkleie + 50 % Traubentrester.

Für die anschließende Verarbeitung der Insektenlarven zu einem Eiweißfuttermittel wurde in den Basis-Szenarien jeweils der Bezug von elektrischer Energie als Strommix aus dem Mittelspannungsnetz und als Variante der Bezug von zertifiziertem Ökostrom ausgewertet.

Mittels einer Sensitivitätsanalyse können die Auswirkungen veränderter Prozessparameter, beispielsweise des Energiebedarfs für die Mast oder die Verarbeitung der Larven, auf die Bewertungsergebnisse quantifiziert werden. Um eine solche Analyse mit möglichst geringem Aufwand durchführen zu können, wurde das Stoffstrommodell entsprechend parametrisiert. Ansatzpunkte für eine zukünftige Optimierung der Insektenmast und -verarbeitung im volltechnischen Maßstab können auf qualitativer Ebene bereits anhand der Betrachtung der oben beschriebenen Varianten identifiziert werden. Für die vorliegende Studie wurde dies angesichts der Einschränkungen hinsichtlich Datengrundlage und Tiefe der Modellierung als ausreichend erachtet und es wurde deshalb auf eine weitergehende Sensitivitätsanalyse verzichtet.

5.10 Methode der Wirkungsabschätzung

Bei der Ökobilanzierung oder Lebenszyklusanalyse, wie die korrekte wissenschaftliche Bezeichnung der Methode lautet, sind Sachbilanz und Wirkungsbilanz voneinander zu unterscheiden. Die Sachbilanz (oder: das sogenannte Inventar) umfasst die gemessenen („Primärdaten“) oder auf Basis von Literaturwerten modellierten / abgeschätzten („Sekundärdaten“) Stoff- und Energieströme des betrachteten Lebenszyklus. Um die Wirkungsbilanz aufzustellen, werden aus der Sachbilanz mittels sogenannter Charakterisierungsfaktoren, welche aus Modellierungen abgeleitet werden, Indikatoren für die verschiedenen Wirkungen des zu bilanzierenden Produktsystems auf die Umwelt berechnet. Als wichtige Umweltwirkungen sind beispielsweise die globale Erwärmung / der Klimawandel, die Versauerung von Ökosystemen oder die Bildung von Feinstaub zu nennen.

Hierbei ist zusätzlich zu unterscheiden, an welcher Stelle bzw. an welchem Objekt entlang der Kette von den Ursachen zu den Wirkungen der entstehende Schaden charakterisiert werden soll. „Midpoint“-Charakterisierungsfaktoren beziehen sich auf eine Stelle „mitten in der Wirkungskette“, an der eine (weitgehende) Vereinheitlichung des Wirkungsmechanismus einzelner Stoffströme eingetreten ist, z. B. die Vermischung eines Treibhausgases in der Atmosphäre. „Endpoint“-Faktoren beziehen sich hingegen typischer Weise auf die drei definierten Schutzgüter „menschliche Gesundheit“, „Ökosystemzustand“ und „Ressourcenknappheit“. Prinzipbedingt steigt die Unsicherheit der Charakterisierung an, je weiter man sich entlang der Kette von der Ursache zur Wirkung fortbewegt.

Da es im vorliegenden frühen Stadium der Lebenszyklusanalyse eines Produktsystems für Insektenprotein keinen Sinn ergibt, zu der faktischen Unsicherheit der Sachbilanz noch ein hohes Maß an methodischer Unsicherheit der Charakterisierung hinzuzufügen, wurde für die Wirkungsabschätzung die Methode „ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H)“ verwendet [14]. Diese ist zudem in Forschung und Anwendung sehr gebräuchlich, was die Aufgabe erleichtert.

5.11 Aufstellung der Sachbilanz

Die Sachbilanz beschreibt die Stoff- und Energieströme im Produkt- und Vergleichssystem, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, aus denen die Umweltwirkungsbilanz ermittelt wurde.

5.12 Nährsubstrate für die Insekten

Für die Zwecke der Ökobilanzierung wurde der Bedarf an den verschiedenen getesteten Nährsubstraten aus den insgesamt 15 Versuchsreihen (Vergleiche Abschnitt 2.2) mittels folgenden Vereinfachungen modelliert (Tabelle 15):

- Bildung des Mittelwertes des Substratbedarfs (TM Substrat / FM gemästete Larven) über die verschiedenen Nährsubstrate jeweils für Ansätze mit gleichen Massenanteilen (85/15, 70/30, 50/50);
- Bildung des Mittelwertes für das Verhältnis der FM von Fraß und gemästeten Larven über alle Ansätze.

Tabelle 15: Zur Modellierung des Mastprozesses verwendete Parameter, welche aus den Versuchsergebnissen durch Mittelwertbildung abgeleitet wurden (TM: Trockenmasse; FM: Frischmasse).

TM (Substrat)/FM (gemästete Larven) für jeweilige Ansätze:	Weizenkleie	anderes Substrat
85/15	1,08	0,21
70/30	0,94	0,44
50/50	0,83	0,90

Die Stoffströme und Umweltwirkungen der Bereitstellung der als Nährsubstrate eingesetzten Nebenprodukte aus der Lebensmittelverarbeitung wurden auf Basis von Modellprozessen aus [13] bilanziert, wobei gegebenenfalls Anpassungen an die Ertragsverhältnisse für Bayern vorgenommen wurden (Vergleiche die Parameterliste in Tabelle 16). Insbesondere für den Anbau von Holunderbeeren und Aroniabeeren ist die Datenverfügbarkeit diesbezüglich sehr eingeschränkt: ein weiterer Grund dafür, dass die entsprechenden Mastversuche nicht in die vorliegende Ökobilanzierung eingeschlossen wurden.

Tabelle 16: Auflistung der in der Sachbilanz verwendeten Parameter zur Modellierung der Bereitstellung der eingesetzten Nährsubstrate.

Erläuterung, Einheit	Parameterwert
Zugabe von Propionsäure je kg gemästete Larven, g	0,48
Menge an Kleie aus der Vermahlung von 1 kg Weizenkörnern nach [18], g	160
Menge an Mehl aus der Vermahlung von 1 kg Weizenkörnern nach [18], g	800
TS-Gehalt Weizenkorn (Lager) wie in [wheat grain production, DE] [13] spezifiziert	85,5
TS-Gehalt Weizenkorn: Bezugswert Agrarstatistik [19], %	86
Weizenkorn-Ertrag wie in [wheat grain production, DE] [13] spezifiziert, kg/ha	7.567
Weizenkorn-Ertrag: Mittel für Oberbayern 2018-2022 [19], kg/ha	7.100
TS-Gehalt Kartoffeln (Lager) wie in [potato prod., Swiss integr. prod., CH] [13] spezifiziert	22
Kartoffel-Ertrag wie in [potato prod., Swiss integr. prod., CH] [13] spezifiziert	37.770
Kartoffel-Ertrag: Mittel für Bayern 2016-2021 [19], kg/ha	42.870
Schälverluste beim Dampfschälen von Kartoffeln [20], %	11,5
TS-Gehalt Kartoffel-Dampfschalen frisch [20], %	13
TS-Gehalt frischer Traubentrester, %	39
Anteil Schalen im Trester, %	75
Tresteranfall (Schalen + Kerne) aus Weintrauben, kg/kg	0,25
Traubenertrag wie in [grape production, RoW] [13] spezifiziert, kg/ha	30.000

5.13 Aufzucht und Mast der Insektenlarven

Auf Basis der Messungen und Erfahrungswerte, die von der Anlage der Firma FarmInsect in Oberbergkirchen erhoben werden konnten, wurden die Energie- und Stoffströme zur Aufzucht und Mast von Insektenlarven modelliert. Die hierfür relevanten Parameter sind in Tabelle 17 aufgelistet und erläutert (Vergleiche zudem den Prozessplan in Abbildung 14).

Tabelle 17: Auflistung der in der Sachbilanz erfassten Parameter für die Prozesse zur Bereitstellung vom Fraß gereinigter Larven, exklusive der eingesetzten Nährsubstrate.

Erläuterung, Einheit	Parameterwert
Elektr. Energiebedarf zur Beleuchtung je kg FM gemästete Larven, MJ	0,0072
Elektr. Energiebedarf zur Belüftung je kg FM gemästete Larven, MJ	0,103
Elektr. Energiebedarf zum Futter Mischen je kg FM gemästete Larven, MJ	0,0206
Nennleistung des Siebes zur Abtrennung von Fraß, kW	2,75
Durchsatz von Larven (FM) im Fraß-Sieb, kg/h	650
Wasserbedarf für die Mast je kg FM gemästete Larven, kg	4,5
Wasserbedarf für die Aufzucht je kg FM gemästete Larven, kg	0,01
Wärmebedarf je kg FM gemästete Larven, MJ	0,463
Relation des spezifischen Energiebedarfs für Jungtiere vs. Larven (Schätzwert)	1,5
Massenverhältnis Junglarven / gemästete Larven	0,0056
Mittlere Ammoniak-Konzentration in der Abluft aus der Mastkammer, ppm/m ³	7
Mittlerer Abluftstrom aus der Larvenmast, m ³ /h	6000
Molare Masse Ammoniak, g/mol	17
Jahresproduktionsmenge an Larven, t	150
TM-Gehalt Rohware gemästete abgereinigte Larven, %	25,9

Die Aufzucht der zu mästenden Insektenlarven wurde analog dem Mastprozess modelliert. Abweichend vom Mastprozess wurde hierfür angenommen, dass (1) ausschließlich Weizenkleie als Nährsubstrat verwendet wird und (2) der spezifische Bedarf an Nährsubstrat und Energie je kg FM Jungtiere um 50 % höher ist als der entsprechende Bedarf je kg FM gemästete Larven.

5.14 Verarbeitung der gemästeten Larven zu einem Proteinfuttermittel

Die Versuche zur „nassen“ und „trockenen“ Verarbeitung der gemästeten und von Fraß gereinigten Larven erfolgten in einer Technikumsanlage der Internationalen Forschungsgemeinschaft Futtermitteltechnik e.V. (IFF, Braunschweig). Grundsätzlich ist der spezifische Energiebedarf im Technikumsmaßstab wesentlich höher als bei der Umsetzung des Verfahrens („Scale-up“) im industriellen Maßstab. Da hierfür jedoch keine genauen Verhältniszahlen angegeben werden können, wurden für die Sachbilanz direkt die originalen, an der

Technikumsanlage erhobenen Parameterwerte für diejenige Versuchsvariante eingesetzt, die sich als die effektivste erwies (Vergleiche Abschnitt 4.3):

- Nasse Verarbeitung: Zugabe von 0,3 Liter 0,1 M HCl je kg Larvenmasse; Aufschluss bei 100 °C für 60 Minuten; Trocknen bei 80 °C für 60 Minuten;
- Trockene Verarbeitung: Trocknen bei 130 °C für 160 Minuten; 791 mm²-Matrize für das Auspressen.

Tabelle 18: Auflistung der in der Sachbilanz verwendeten Parameter zur Modellierung der Verarbeitungsprozesse von Insektenlarven.

Erläuterung, Einheit	Parameterwert
Geschätzter elektr. Energiebedarf zum Tiefkühlen je FM Larven, kWh/t	25
Feuchtegehalt der Larven vor Inaktivierung, %	74,1
<u>„Nasse“ Verarbeitung:</u>	
Elektr. Energiebedarf zum Mazerieren je FM Larven, kWh/t	7,5
Elektr. Energiebedarf für den Aufschluss im Rührkessel je FM Larven, kWh/t	380
Elektr. Energiebedarf Dekanter je FM Larven, kWh/t	26
Elektr. Energiebedarf zur Trocknung je FM Feststoff aus Dekanter, kWh/t	800
Elektr. Energiebedarf zum Vermahlen der aufgeschlossenen Larvenmasse, kWh/t	5
Feuchtegehalt der aufgeschlossenen Larvenmasse, %	75,5
Feuchtegehalt des getrockneten Feststoffs aus dem Nass-Aufschluss, %	5,4
Bezugswert für Molarität HCl im Rührkessel	0,1
molare Masse von HCl, g/mol	36,46
Dichte 0,1 M HCl-Lösung, kg/L	1
Dichte 9,64 M (30,1 %) HCl-Lösung, kg/L	1,15
Liter 0,1 M HCl je kg FM Larven	0,3
Rohfett-Gehalt aufgeschlossene Larvenmasse, %	26,1
Rohfett-Gehalt aufgeschlossene Larvenmasse nach Dekantieren und Trocknen, %	18,0
TS-Gehalt Larvenmehl, %	94,6
Rohprotein-Gehalt Larvenmehl (Bezugswert TS-Gehalt: 88 %), %	44,7
<u>„Trockene“ Verarbeitung:</u>	
Elektr. Energiebedarf zur IR-Trocknung je FM Larven, kWh/t	2.250
Elektr. Energiebedarf zur Pressung je FM Larven, kWh/t	32
Feuchtegehalt der Larven nach IR-Trocknung, %	3,8
kg Presskuchen je kg ausgepresste Larvenmasse	0,925
kg Öl je kg ausgepresste Larvenmasse	0,075
TS-Gehalt Larven-Presskuchen, %	95,0

Rohprotein-Gehalt Larven-Presskuchen (Bezugswert TS-Gehalt: 88 %), %	44,8
--	------

5.15 Verwertung von Fraß

Wie in Abschnitt 5.8 beschrieben, wird der anfallende Fraß aus der Anlage der Firma FarmInsect in einer Biogasanlage verwertet. Die Substitution von Silomais zur Biogaserzeugung durch Fraß wurde in einem stark vereinfachten Ansatz schlicht auf Basis derjenigen Menge an Fraß berechnet, welche den äquivalenten Methanertrag liefern könnte (Siehe hierzu Abschnitt 5.8). Die hierfür verwendeten Parameter sind in Tabelle 19 aufgelistet. Transport und eine eventuell erforderliche Behandlung des Fraßes vor dem Einsatz in der Biogasanlage blieben unberücksichtigt, wie auch mögliche Veränderungen des Biogasprozesses.

Tabelle 19: Auflistung der verwendeten Parameter zur Modellierung der Substitution von Maissilage für die Biogaserzeugung durch Fraß.

Erläuterung, Einheit	Parameterwert
Massenverhältnis Fraß / Larven	1,94
oTS-Gehalt Fraß, %	3,55
Methanausbeute aus der oTM von Fraß, L/kg	306
oTS-Gehalt Maissilage, %	33,5
Methanausbeute aus der oTM von Maissilage, L/kg	306
TM-Ertrag Silomais wie im ecoinvent-Datensatz spezifiz., t/ha	17,2
Masseverlust Silomais im Lager (zusätzl. Anzuwenden auf ecoinvent-Datensatz), %	8
TM-Ertrag Silomais im Mittel der letzten Jahre für Oberbayern, t/ha	17,1

5.16 Vergleichssystem Sojaextraktionsschrot

Laut Marktbericht Futtermittel der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) [8] wird der allergrößte Teil des in Deutschland verfütterten Sojaschrotes entweder aus importierten Sojabohnen hergestellt oder aber als Schrot importiert. Für die inländische Erzeugung von Sojaschrot weist das „Protein Balance Sheet“ für 2021/22 der BLE [9] allerdings eine Menge von null aus. Das „Protein Balance Sheet“ auf Ebene der Europäischen Union [10] gibt an, dass der in der EU erzeugte und als Futtermittel verwendete Sojaschrot zu rund 3 % aus in der EU angebauten bzw. zu rund 32 % aus importierten Sojabohnen gewonnen wurde (: dritte Spalte). Für die Modellierung der Herkunft von in Deutschland verfüttertem Sojaschrot wurden entsprechend diese Anteile angewandt; für die Herkunft der Sojabohnen für die Erzeugung von Sojaschrot in der EU bzw. des importierten Sojaschrots wurden hingegen die Angaben gemäß [8] angesetzt (Siehe Tabelle 22 bzw. Tabelle 21: Spalten 4 und 5).

Tabelle 20: Herkunft und Charakterisierung des innerhalb der EU als Futtermittel verwendeten Rohproteins aus Sojaschrot für 2022/23 (verändert nach [10][8]).

	Futtermittel: Verbrauch, 10 ⁶ t	Sojaschrot: Verbrauch, %	Futtermittel: Herkunft aus EU, 10 ⁶ t	Protein- gehalt, %	Rohprotein: Verbrauch, 10 ⁶ t	Rohprotein: Verbrauch, %
Sojaschrot aus in der EU produzierten Sojabohnen	0,9	3,44	0,9	43,0	0,38	3,2
Sojaschrot aus importierten Sojabohnen	8,5	32,44	0,0	45,5	3,87	32,6
Importiertes Sojaschrot	16,8	64,12	0,0	45,5	7,63	64,2
Sojabohnen-Proteinkonzentrat	0,3	-	0,0	62,5	0,19	-*

*) Im Stoffstrommodell vernachlässigt.

Tabelle 21: Aufteilung der Importe an Sojabohnen nach Deutschland im Jahr 2022 nach Herkunft (Spalten 1 bis 3, verändert nach [8]) sowie Modellierung im Vergleichssystem (Spalten 4 und 5).

Region / Land	Menge, 1.000 t	Mengenanteil, %	Region i. Modell	Mengenanteil i. Modell, %
Nordamerika	0,1	./.		
Südamerika	1.373,7	58,93		
<i>davon Brasilien</i>	<i>1.226,5</i>	<i>52,62</i>	Brasilien (Mato Grosso)	59,0
Österreich	23,8	1,02	Schweiz	1,0
Rest der Welt	933,3	40,04	Rest der Welt	40,0
Insgesamt	2.330,9	100,0		100,0

Tabelle 22: Aufteilung der Importe an Sojaschrot nach Deutschland im Jahr 2022 nach Herkunft (Spalten 1 bis 3, verändert nach [8]) sowie Modellierung im Vergleichssystem (Spalten 4 und 5).

Region / Land	Menge, 1.000 t	Mengenanteil, %	Region i. Modell	Mengenanteil i. Modell, %
Nordamerika	2.041,5	59,7	USA	60,0
Südamerika	985,8	28,8		
<i>davon Brasilien</i>	<i>965,4</i>	<i>28,3</i>	Brasilien	29,0
Österreich	16,4	0,5		
Rest der Welt	373,4	11,0	Rest der Welt	11,0
Insgesamt	3.417,1	100,0		100,0

Es wurde somit eine Aufteilung des in Deutschland verfütterten Sojaschrots in drei Ströme modelliert:

- 1) aus in der EU angebauten Sojabohnen in der EU hergestelltes SES;
- 2) aus importierten Sojabohnen in der EU hergestelltes SES und
- 3) als solches in die EU importiertes SES.

Da Sojabohnen-Proteinkonzentrat vernachlässigt wurde, ergibt sich daraus für die Herkunft des in Deutschland verfütterten Rohproteins aus SES ein rechnerischer Anteil von Soja aus Anbau in der EU von $0,38 / 11,88 = 3,2 \%$ (Vergleiche Tabelle 20: Spalte ganz rechts). Für die Modellierung der transportbedingten Emissionen der obengenannten drei Materialströme wurden die in Tabelle 23 zusammengestellten Annahmen getroffen. Bezüglich der weiteren Aufteilung der Herkunft siehe Tabelle 21 und Tabelle 22.

Tabelle 23: Annahmen zur Modellierung der transportbedingten Emissionen für die Materialströme von Sojaextraktionsschrot (Quellen: [11],[12] bzw. wie in Tabelle angegeben).

Materialstrom	Region / Destination bzw. Modellprozess [13]	Transportmix	Mittlere Transportdistanz, km
1) in der EU hergestelltes Schrot aus in der EU angebauten Sojabohnen	[market for soybean, Swiss integrated production, CH]	Lieferung von Sojabohnen aus der Schweiz	
2) in der EU hergestelltes Schrot aus importierten Sojabohnen	<u>Brasilien (Mato Grosso):</u> [market for transport, freight train, RoW]	Transport von Sojabohnen zur Ölmühle und zum Seehafen: 74 % LKW, 26 % Güterzug	Straße: 1.500, Schiene: 750
	[market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3, RoW]		
	[market for transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods, global (GLO)]	Verschiffung nach Rotterdam: Schüttgutfrachter	11.000
	[market for soybean, Rest of World (RoW)]	Lieferung von Sojabohnen auf dem Weltmarkt	
3) in die EU importiertes Sojaschrot	<u>USA:</u> [transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6, US]	Transport von Sojabohnen zur nächstgelegenen Ölmühle: LKW	100
	[transport, freight train, diesel, US]	Transport von Schrot zum Seehafen: Güterzug (Diesel-Lok)	2.400
	[market for transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods, global (GLO)]	Verschiffung nach Rotterdam: Schüttgutfrachter	7.400
	<u>Brasilien, Mato Grosso:</u> Transport von Sojabohnen zur Ölmühle am Seehafen	wie bei 2)	
	Verschiffung von Schrot nach Rotterdam	wie bei 2)	
	[market for soybean meal, Rest of World (RoW)]	Lieferung von Soja-Extraktionsschrot auf dem Weltmarkt	

Weitere Material- und Stoffströmen wurden prinzipiell berücksichtigt und unter Verwendung von Prozessen aus [7] modelliert (Vergleiche Abbildung 17, Abbildung 18, Abbildung 19):

- Bereitstellung von Hexan für den Extraktionsprozess,
- Bereitstellung von Strom aus dem öffentlichen Mittelspannungsnetz,
- Bereitstellung von Wärmeenergie aus Erdgas und anderen Energieträgern,
- Infrastruktur einer industriellen Ölmühle.

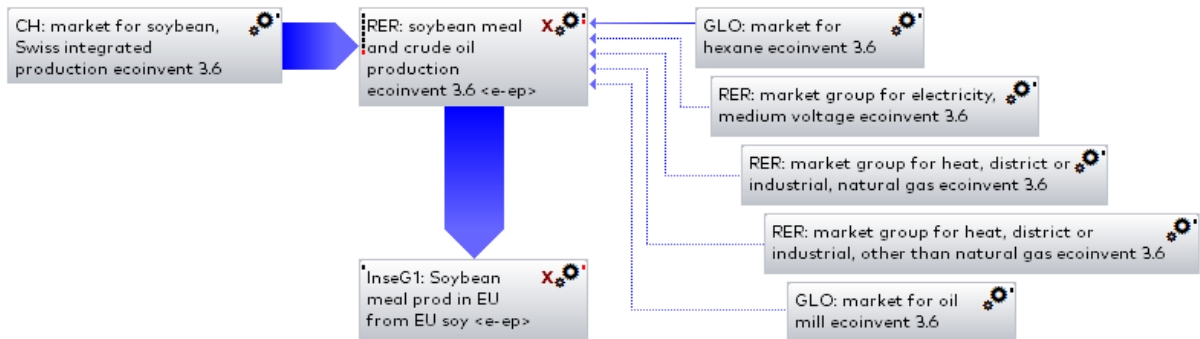


Abbildung 17: Stoffstrommodell für Sojaextraktionsschrot, welches in der EU aus in der EU angebauten Sojabohnen hergestellt wurde.

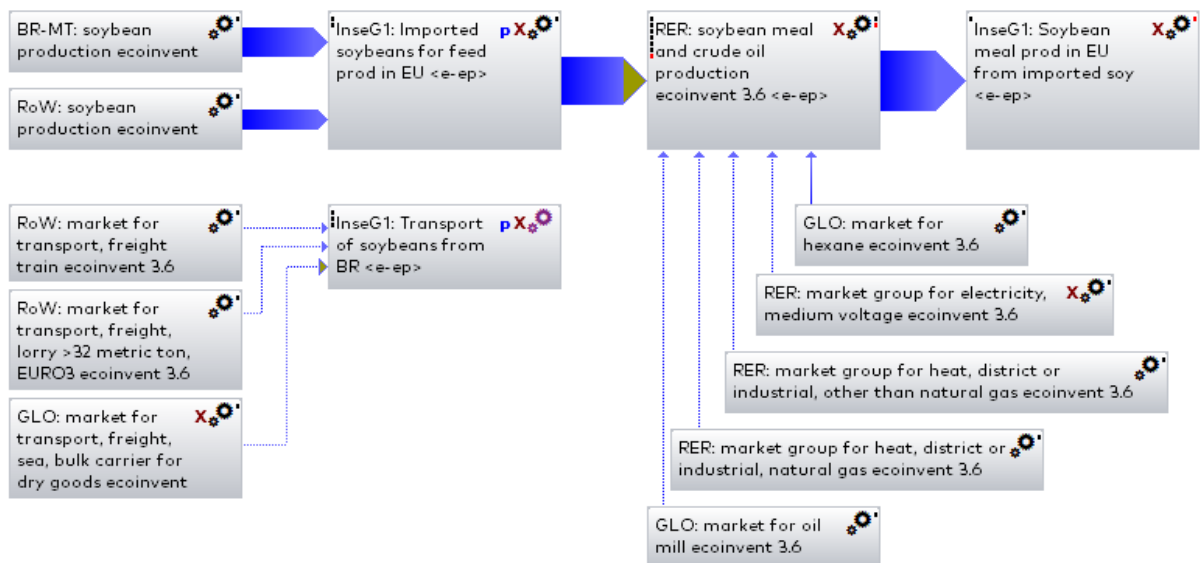


Abbildung 18: Stoffstrommodell für Sojaextraktionsschrot, welches in der EU aus importierten Sojabohnen hergestellt wurde.

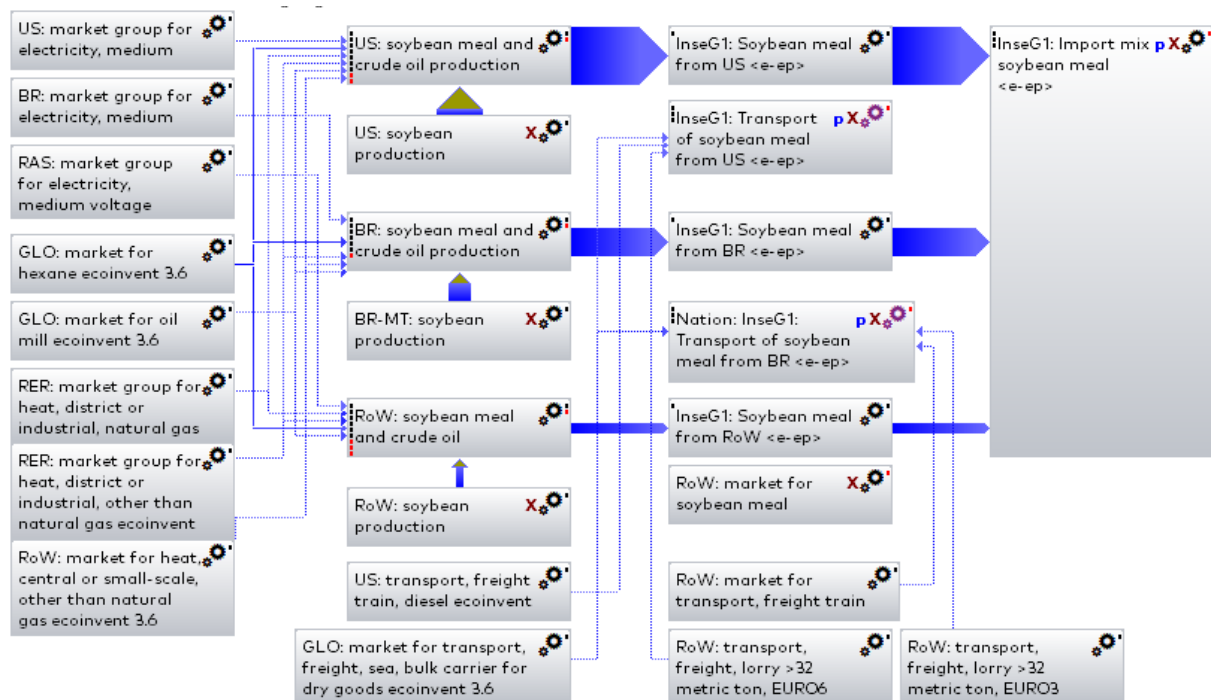


Abbildung 19: Stoffstrommodell für Sojaextraktionsschrot, welches als solches in die EU importiert wurde.

5.17 Ergebnisse der Umweltwirkungsbilanz

Die Umweltwirkungsbilanz ergibt sich aus der Anwendung der gewählten Methode der Charakterisierung oder Wirkungsabschätzung (Siehe Abschnitt 5.10) auf die Sachbilanz der zu untersuchenden Produktsysteme.

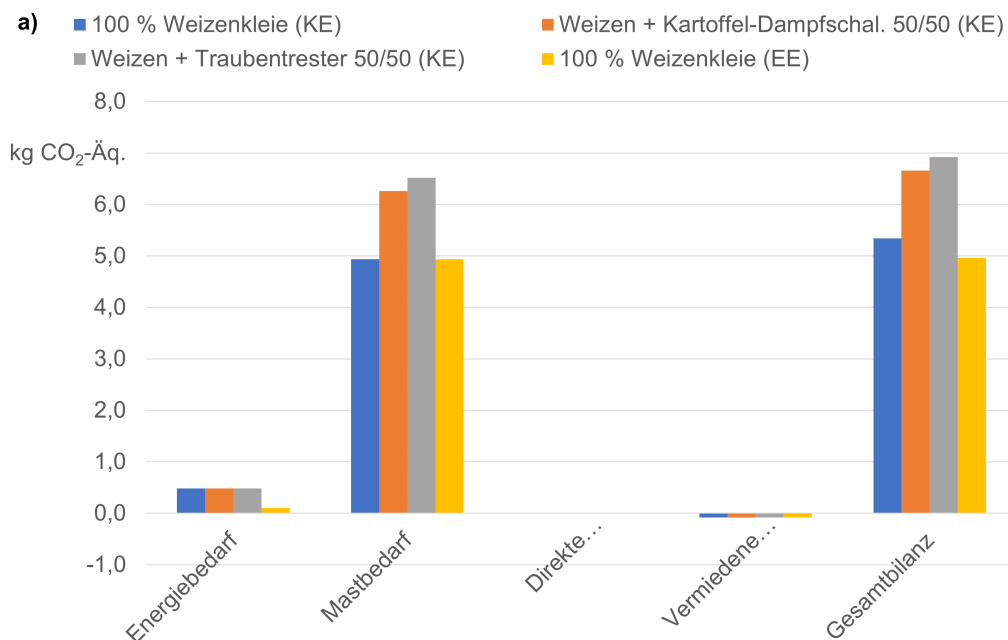
5.17.1 Produkt „Insektenlarven zur direkten Verfütterung“

Das Ergebnis der Bilanzierung für das Basis-Szenario des Produkts „Insektenlarven zur direkten Verfütterung“, d. h. für eine Energieversorgung aus dem Strommix bzw. aus Erdgas und den ausschließlichen Einsatz von Weizenkleie als Nähr-/Mastsubstrat ist für sechs ausgewählte Umweltwirkungskategorien in Tabelle 24 zusammengefasst.

Tabelle 24: Ergebnisse für ausgewählte Umweltwirkungen des Produktsystems „Insektenlarven zur direkten Verfütterung“ im Basis-Szenario mit Aufteilung in die Kategorien Energiebedarf, Mastfutter, direkte Emissionen und vermiedene Umweltwirkungen, bewertet nach ReCiPe2016v1.1 Midpoint (H) [14]; funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein.

Wirkungskategorie	Indikator-einheit	Energiebedarf	Mastfutter	Direkte Emissionen	Vermiedene Emissionen	Gesamtsystem
Klimawandel, ausschl. biog. Kohlenstoff	kg CO ₂ -Äq.	4,81E-01	4,94E+00	0,00E+00	-8,02E-02	5,34E+00
Feinstaubbildung	kg PM2.5-Äq.	1,76E-04	1,21E-02	8,14E-04	-2,49E-04	1,29E-02
Verbrauch fossiler Ressourcen	kg Öl-Äq.	1,75E-01	8,58E-01	0,00E+00	-1,24E-02	1,02E+00
Süßwasser-Eutrophierung	kg P-Äq.	3,00E-04	3,67E-03	0,00E+00	-2,52E-05	3,95E-03
Terrestrische Versauerung	kg SO ₂ -Äq.	5,51E-04	5,92E-02	6,64E-03	-1,43E-03	6,49E-02
Terrestrische Ökotoxizität	kg 1,4-DB-Äq.	1,92E-01	1,74E+01	0,00E+00	-2,07E-01	1,73E+01

In Abbildung 20 sind die Bilanzergebnisse aller vier Varianten des Produktsystems „Insektenlarven zur direkten Verfütterung“ für die Umweltwirkungen „Klimawandel (ausschl. biog. Kohlenstoff)“ und „Terrestrische Versauerung“ einander gegenübergestellt. Für die Versauerung, wie auch für die nicht dargestellte Feinstaubbildung, erkennt man einen erheblichen Beitrag der Ammoniakemission aus der Insektenmast.



5.18

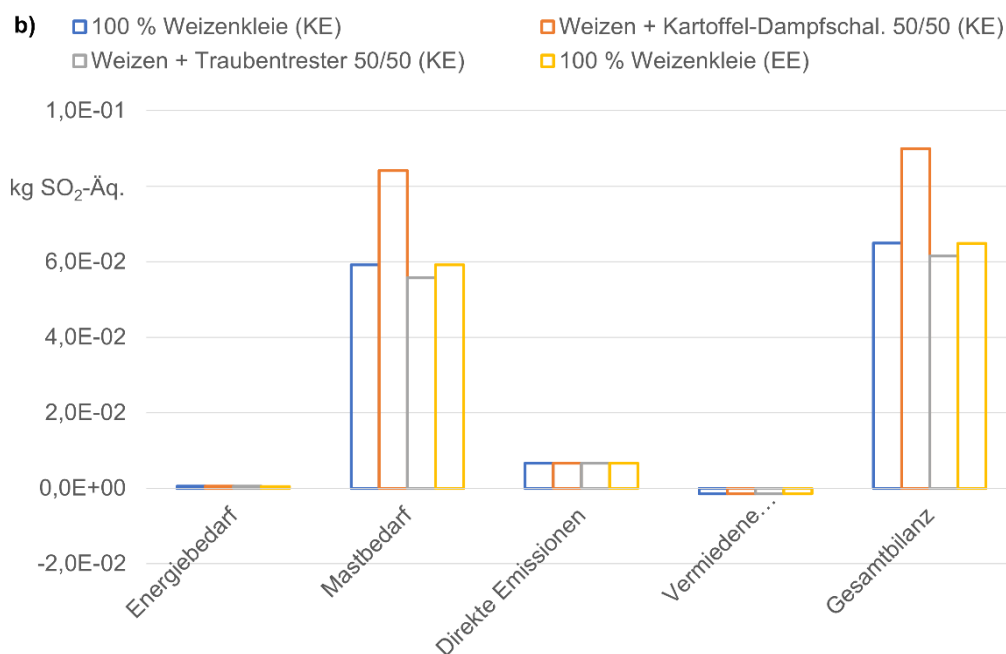


Abbildung 20: Gegenüberstellung der Bilanzwerte für die Umweltwirkung a) Klimawandel (ausschl. biog. Kohlenstoff) bzw. b) Terrestrische Versauerung im Basis-Szenario und in den drei Varianten des Produktsystems „Insektenlarven zur direkten Verfütterung“, unterteilt nach Energiebedarf (KE: konventionelle Energieversorgung; EE: erneuerbare Energieversorgung), Mastfutter, direkte Emissionen und vermiedene Emissionen durch Fraßverwertung; bewertet nach ReCiPe2016v1.1 Mid-point (H); funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein.

In den nachfolgenden Kreisdiagrammen wird für die Variante 1 (Weizenkleie + Kartoffel-dampfschalen) verdeutlicht, wie sich die Umweltwirkungen in den Kategorien Klimawandel (ausschließl. biog. C), Feinstaubbildung und Terrestrische Versauerung auf die einzelnen Prozesse (ohne vermiedene Umweltwirkungen durch Substitution) im

Stoffstrommodell aufteilen. Hieraus wird deutlich, dass die Umweltwirkungen des Produktsystems von den Nährsubstraten dominiert werden, wenn auf letztere die anteiligen Umweltwirkungen aus dem Anbau der jeweiligen Frucht (Weizen, Kartoffeln oder Trauben) nach Masse alloziert werden.

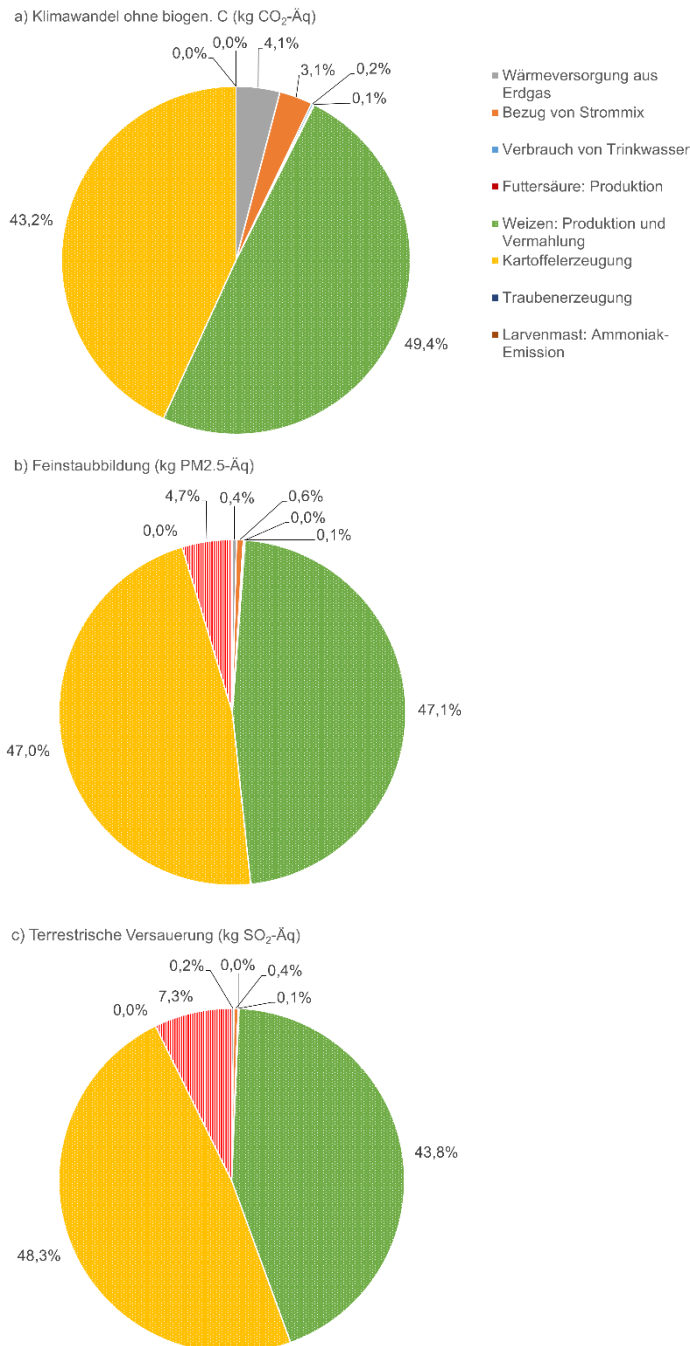


Abbildung 21: Aufteilung der Umweltwirkungen a) Klimawandel (ausschließl. biog. C), (b) Feinstaubbildung und c) Terrestrische Versauerung auf die einzelnen Prozesse im Produktsystem „Insektenlarven zur direkten Verfütterung“ in der Variante 1 – Weizenkleie + Kartoffel-Dampfschalen; bewertet nach ReCiPe2016v1.1 Midpoint (H); funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein.

5.18.1 Produkt „Eiweißfuttermittel aus Insektenlarven“

Die Ergebnisse der Bilanzierung für die nasse bzw. trockene Verarbeitung der Larven zu einem Eiweißfuttermittel sind für sechs ausgewählte Umweltwirkungskategorien in Tabelle 25 zusammengefasst. Die zusätzlichen Umweltwirkungen, die durch die Verarbeitung entstehen, sind gegenüber denjenigen aus der Larvenerzeugung und -mast beträchtlich (Vergleiche Tabelle 24).

Tabelle 25: Ergebnisse für ausgewählte Umweltwirkungen der Verarbeitung der Insektenlarven zu einem Eiweißfuttermittel im nassen und trockenen Verfahren mit Energieversorgung aus dem Strommix, bewertet nach ReCiPe2016v1.1 Midpoint (H) [8]; funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein.

Wirkungskategorie	Indikatoreinheit	Nasse Verarbeitung	Trockene Verarbeitung
Klimawandel, ausschl. biog. C	kg CO ₂ -Äq.	7,81E+00	1,15E+01
Feinstaubbildung	kg PM2.5-Äq.	1,09E-02	6,07E-03
Verbrauch fossiler Ressourcen	kg Öl-Äq.	2,72E+00	4,38E+00
Süßwasser-Eutrophierung	kg P-Äq.	1,37E-02	1,62E-02
Terrestrische Versauerung	kg SO ₂ -Äq.	3,13E-02	1,98E-02
Terrestrische Ökotoxizität	kg 1,4-DB-Äq.	2,19E+01	6,37E+00

Bedingt durch den höheren Energiebedarf zur Trocknung der Larvenrohware ergeben sich für die trockene Verarbeitung beim Bezug von Netzstrom erheblich größere Umweltwirkungen in den Kategorien Klimawandel, Verbrauch fossiler Ressourcen und Süßwasser-Eutrophierung als für die nasse Verarbeitung (Tabelle 25). Wird der Prozess-Strombedarf mit Öko-Strom gedeckt, rücken im Stoffstrommodell für die nasse Verarbeitung die Umweltwirkungen der Behandlung des Abwassers aus dem Dekantieren der aufgeschlossenen Larvenmasse in den Vordergrund (Vergleiche Abbildung 22). Allerdings sind hierin auch Umweltwirkungen aus dem Strombedarf der Abwasserbehandlung enthalten, welche nicht separat für Öko-Strom bilanziert wurden.

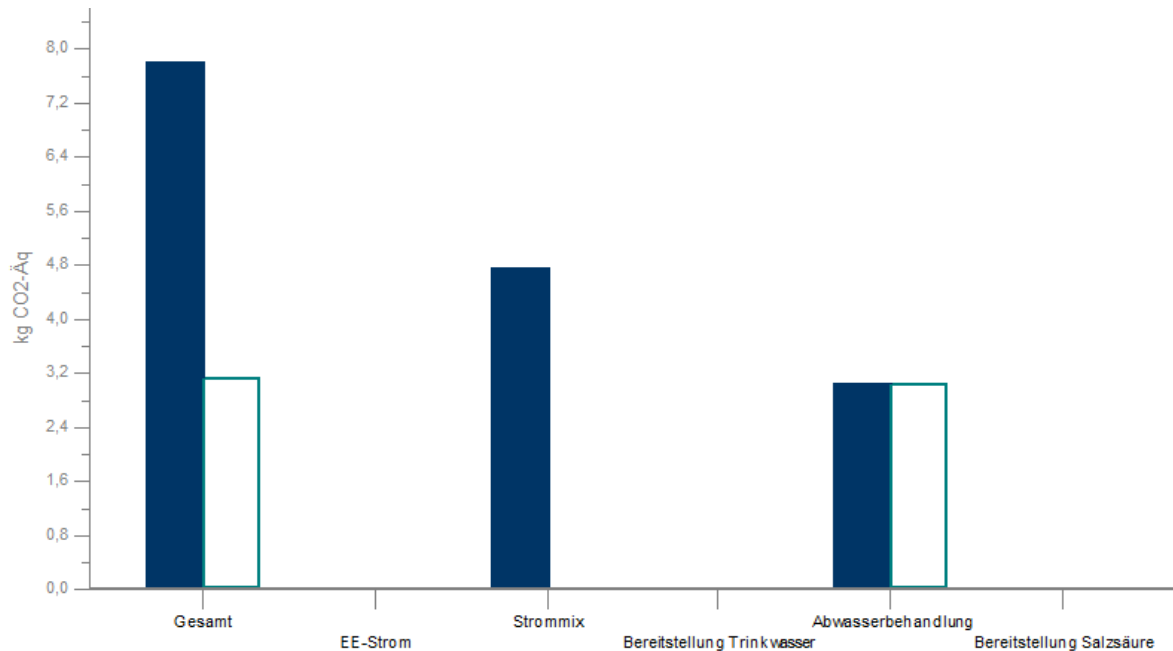


Abbildung 22: Aufgliederung der Bilanzwerte für die Umweltwirkung Klimawandel (auschl. biog. C) für die Larvenverarbeitung im „nassen“ Verfahren für die Variante Strommix (ausgefüllte dunkelblaue Säulen) vs. EE-Strom (türkis umrandete Säulen); bewertet nach ReCiPe2016v1.1 Midpoint (H); funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein.

5.18.2 Vergleichsprodukt Sojaextraktionsschrot

Eine Auswahl der bilanzierten Umweltwirkungen des Vergleichsprodukts „Proteinfuttermittel-Mix aus SES“ (Siehe Abschnitt 5.7), bewertet nach der Methode „ReCiPe2016v1.1 Midpoint (H)“ [14], ist in Tabelle 26 wiedergegeben: die spezifischen Umweltwirkungen in der Spalte „Futtermittel-Mix“ ergeben sich dabei als Linearkombination aus den entsprechenden Werten für die drei modellierten Herkunftsströme „Schrot aus EU“, „Schrot aus importierten Sojabohnen“ und „Importiertes Sojaschrot“. Die Unterschiede zwischen den spezifischen Umweltwirkungen dieser drei Stoffströme können an dieser Stelle nicht im Einzelnen diskutiert werden.

Tabelle 26: Ergebnisse für ausgewählte Umweltwirkungen des Vergleichssystems „Proteinfuttermittel-Mix aus Sojaextraktionsschrot (SES)“ bewertet nach ReCiPe2016v1.1 Midpoint (H) [14]; funktionale Einheit: 1 kg Rohprotein.

Wirkungskategorie	Indikatoreinheit	Schrot aus EU	Schrot aus importierten Sojabohnen	Importiertes Schrot	SES-Mix
Klimawandel, ausschl. biog. Kohlenstoff	kg CO ₂ -Äq.	1,32E+00	1,40E+00	1,49E+00	1,45E+00
Feinstaubbildung	kg PM2.5-Äq.	2,62E-03	9,11E-03	5,71E-03	6,72E-03
Verbrauch fossiler Ressourcen	kg Öl-Äq.	2,04E-01	2,34E-01	2,82E-01	2,64E-01
Süßwasser-Eutrophierung	kg P-Äq.	5,93E-04	1,91E-03	1,09E-03	1,34E-03
Terrestrische Versauerung	kg SO ₂ -Äq.	1,09E-02	9,68E-03	7,23E-03	8,15E-03
Terrestrische Ökotoxizität	kg 1,4-DB-Äq.	2,78E+00	5,78E+00	6,18E+00	5,94E+00

Um das Ergebnis auf Plausibilität zu prüfen, wurden zumindest für die Wirkungskategorie Klimawandel (ausschl. biog. C) Werte aus der wissenschaftlichen Literatur und anderen Quellen herangezogen, wie in Abbildung 23 dargestellt. Hierbei ist als methodische Einschränkung zu beachten, dass von den veröffentlichten Zahlenwerte nicht alle auf dieselbe Charakterisierungsmethode umgerechnet werden konnten und deshalb kein exakter Vergleich möglich ist. Dennoch kann der Schluss gezogen werden, dass der in der vorliegenden Studie bilanzierte Wert für das modellierte Vergleichssystem (Säule ganz links in Abbildung 23) absolut plausibel erscheint.

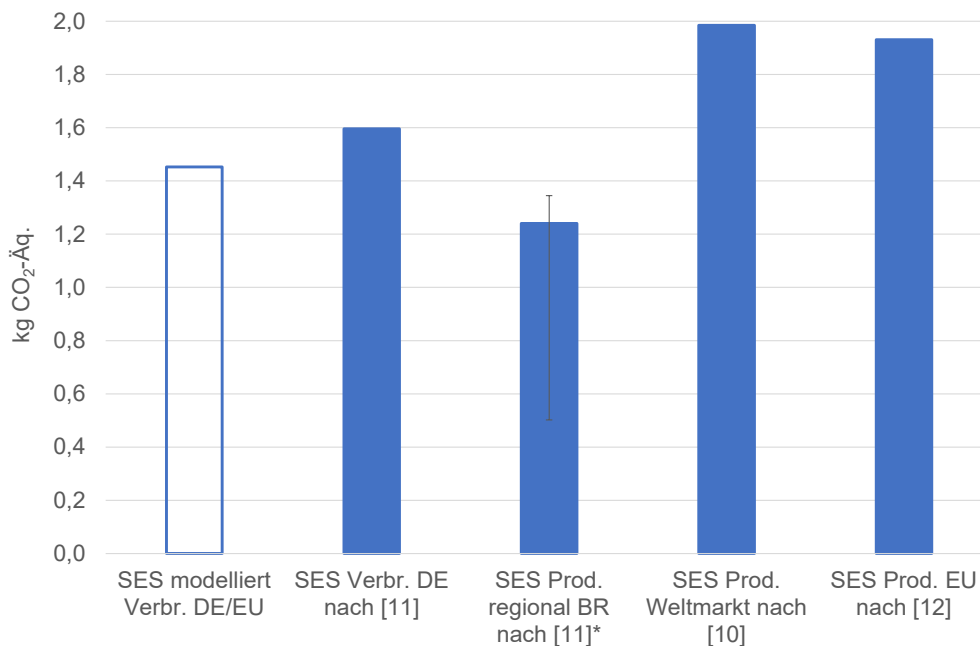


Abbildung 23: In der vorliegenden Studie berechneter Wert zur spezifischen Umweltwirkung von Soja-Extraktionsschrot auf den Klimawandel (Säule ganz links ohne Füllung) im Vergleich zu Literaturwerten (Anmerkungen: Die veröffentlichten Zahlenwerte konnten nicht alle auf dieselbe Charakterisierungsmethode umgerechnet werden und sind deshalb nicht exakt vergleichbar. *) Säule markiert den Mittelwert, angedeutet ist zusätzlich der Wertebereich zwischen dem 10. und 90. Perzentil); Bezugswert: 1 kg Rohprotein.

5.19 Diskussion und Schlussfolgerung

Um die Umweltwirkungen bei der Erzeugung von Insekten als Proteinquelle für die Tierhaltung zu beurteilen, wurde ein Stoffstrommodell für das Produktsystem zur Aufzucht, Mast und Verarbeitung von Larven der Schwarzen Soldatenfliege einschließlich der wesentlichen Vorketten erstellt. Die Sachbilanz für dieses Stoffstrommodell basiert auf den im Projekt verfügbaren Messdaten, ergänzt um Modellprozesse, die gegebenenfalls an die Verhältnisse der landwirtschaftlichen Produktion in Bayern angepasst wurden. Die Ergebnisse der Ökobilanzierung bestätigen im Wesentlichen den wissenschaftlichen Befund, dass die Auswahl der Nährsubstrate der entscheidende Hebel sind, um das Potenzial von Insektenprotein als nachhaltigere Alternative zu herkömmlichen Futtermitteln auszuschöpfen [21].

In der vorgelegten Lebenszyklusanalyse sind je nach Wirkungskategorie etwa 90 bis 95 Prozent der Umweltwirkungen aus der Erzeugung von Insektenlarven zur direkten Verfütterung den eingesetzten Nährsubstraten zuzuschreiben. Für die Beurteilung dieses Ergebnisses ist es besonders wichtig, die folgenden Aspekte zu bedenken:

1. Die vorgenommene Allokation der Umweltwirkungen nach Masse bedingt eine erhebliche Wirkungslast der als Nährsubstrate eingesetzten Nebenprodukte (Weizenkleie, Kartoffeldampfschalen, Traubentrester); diese Nebenprodukte können jedoch für die Ökobilanzierung nicht einfach „emissionsfrei“ gestellt werden, da für sie tatsächlich ein Markt besteht.

2. Die im Projekt erhobenen Daten zur Aufzucht und Mast von Insektenlarven von der Anlage der Firma FarmInsect unterliegen einer gewissen Unsicherheit. Zugleich wurde diese Anlage systematisch optimiert. Wenn das von Firma FarmInsect angebotene System zur Insektenmast auf einem landwirtschaftlichen Betrieb erstmals umgesetzt wird, ist zunächst von einem weniger effizienten Prozess auszugehen.

Qualitativ folgt daraus, dass durch den methodischen Effekt (1) die vorliegende Umweltwirkungsbilanz vergleichsweise ungünstig ausfällt, während der technische Effekt (2) in die entgegengesetzte Richtung wirkt. Quantitativ sind die hier vorgelegten Ergebnisse für die spezifischen Umweltwirkungen von Insektenprotein mit einem deutlichen Vorbehalt versehen. Es wurde deshalb darauf verzichtet, einen direkten Vergleich von Insektenlarven und SES abzubilden.

Was die weitergehende Verarbeitung der Insektenlarven zu einem proteinreichen Futtermittel angeht, legen die Bilanzierungen nahe, dass diese unter dem Aspekt der Umweltbelastung nur dann sinnvoll ist, wenn der Energiebedarf aus Öko-Strom gedeckt wird. Die vorliegenden Ergebnisse aus Versuchen im Technikumsmaßstab sind nur sehr eingeschränkt auf eine mögliche Umsetzung im industriellen Maßstab übertragbar. Zusätzlich müssten technische Lösungen für die Verwertung der Reststoffe und Abwasserströme aus der Larvenverarbeitung gefunden werden, die im Projekt unberücksichtigt blieben.

In zukünftigen Arbeiten zur Ökobilanzierung von Insektenprotein sollte im Fokus stehen, das Produktsystem möglichst realitätsnah zu definieren, insbesondere was die Bewertung der eingesetzten Nährsubstrate betrifft. Das im Projekt erarbeitete Stoffstrommodell bildet hierfür eine sehr gute Grundlage, da es bereits entsprechend parametrisiert wurde und mit relativ geringem Aufwand erweitert bzw. verfeinert werden kann. Wünschenswert wäre es, einen konkreten Fall der Umsetzung der Larvenerzeugung auf einem landwirtschaftlichen Betrieb zu bilanzieren. Optimaler Weise könnte direkt an einer solchen Anlagen gemessen und könnten die konkreten Bezugswege von Nährsubstraten nachverfolgt werden.

6 Verwertungsmöglichkeit der Ergebnisse und Erfolgsaussichten nach Projektende

Die vorliegende, Studie mit einer Laufzeit von lediglich einem Jahr sollte als Vorstudie für ein größer angelegtes Nachfolgeprojekt dienen. In diesem Nachfolgeprojekt „InseG2“ sollen auf Grundlage der hier generierten Ergebnisse geeignete Varianten von entfetteten Larven der Schwarzen Soldatenfliege ausgewählt werden, um sie als Futtermittel beim Masthuhn einzusetzen. Hierbei sollen neben der Verdaulichkeit der Insektenmehle beim Masthuhn die Mast- und Schlachtmerkmale erfasst werden. Darüber hinaus soll eine Lebenszyklusanalyse für die Erzeugung von Masthühnern unter Einsatz von Insektenmehl durchgeführt werden. Die im vorliegenden Projekt InseG generierten Daten liefern wertvolle Erkenntnisse, die in InseG2 direkt eingesetzt und weiter bearbeitet werden können. Somit ist eine Verwertung der Ergebnisse nach Projektende gegeben.

Literaturverzeichnis

- [1] Ertl, P. (2016). The net contribution of dairy cows to human food supply and feeding industrial by-products as a potential strategy for improvement. Thesis - University of Natural Resources and Life Sciences.
<https://dafne.at/content/publication/ea7fa329-97e3-4512-a5dc-2c22f322b0e3.pdf>
- [2] Flachowsky G., Meyer U., Südekum K. H. (2017). Land use for edible protein of animal origin—A review. *Animals*, 7(3), 25.
- [3] Gligorescu A, Chen L, Jensen K, Moghadam NN, Kristensen TN, Sørensen JG. Rapid Evolutionary Adaptation to Diet Composition in the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*). *Insects*. 2023;14(10):821. doi: 10.3390/insects14100821. PMID: 37887833; PMCID: PMC10607891.
- [4] Hartinger, K., Greinix, J., Thaler, N., Ebbing, M. A., Yacoubi, N., Schedle, K., & Gierus, M. (2021). Effect of Graded Substitution of Soybean Meal by *Hermetia illucens* Larvae Meal on Animal Performance, Apparent Ileal Digestibility, Gut Histology and Microbial Metabolites of Broilers. *Animals*, 11(6), 1628.
- [5] Moula, N., Detilleux, J. (2019): A meta-analysis of the effects of insects in feed on poultry growth performances. In: *Animals*, 9, 201
- [6] Schäfer, B., Bandick, N., Epp, A., Hirsch-Ernst, K.-I., Pucher, J., Schumann, R. et al. (2016): BfR-Symposium „Insekten als Lebens- oder Futtermittel: Nahrung der Zukunft?“ Bericht zum Symposium am 24. Mai 2016. In: *J. Verbr. Lebensm.* 11 (3), S. 281–289. DOI: 10.1007/s00003-016-1038-0
- [7] Wernet, Gregor; Bauer, Christian; Steubing, Bernhard; Reinhard, Jürgen; Moreno-Ruiz, Emilia; Weidema, Bo (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *Int J Life Cycle Assess* 21 (9), S. 1218–1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8.
- [8] Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL) in der BLE (2023): Marktbericht Futtermittel 2023. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Futter/Marktbericht_Futtermittel_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- [9] Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (2023): Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL): Futter. Protein Balance Sheet. Online verfügbar unter https://www.ble.de/DE/BZL/Daten-Berichte/Futter/Futter_node.html#doc9764130bodyText3, zuletzt aktualisiert am 22.06.2023, zuletzt geprüft am 24.01.2024.725Z.
- [10] European Commission (2024): Agriculture and rural development: Balance sheets by sectors - Oilseeds and protein crops. Online verfügbar unter https://agriculture.ec.europa.eu/data-and-analysis/markets/overviews/balance-sheets-sector/oilseeds-and-protein-crops_en, zuletzt geprüft am 24.01.2024.971Z.
- [11] Meade, B.; Puricelli, E.; McBride, W.; Valdes, C.; Hoffman, L.; Foreman, L.; Dohlman, E. (2016): Corn and Soybean Production Costs and Export Competitiveness in Argentina, Brazil, and the United States. U.S. Department of Agriculture (Economic Information Bulletin, 154). Online verfügbar unter www.ers.usda.gov/publications/eib-economic-information-bulletin/eib-154.

-
- [12] U.S. Department of Agriculture (2024.000Z): The Role of Rail in Agricultural Transportation. Shipment Distances. Online verfügbar unter <https://agtransport.usda.gov/stories/s/25z9-isvp>, zuletzt aktualisiert am 29.01.2024.000Z, zuletzt geprüft am 29.01.2024.524Z.
- [13] ecoinvent (2019): [Activity name], [Reference product], [Geography]. ecoQuery - Version 3.6 Cutoff. Zürich. Online verfügbar unter <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.6/cutoff/search>, zuletzt geprüft am 20.02.2024.210Z.
- [14] Huijbregts, Mark A. J.; Steinmann, Zoran J. N.; Elshout, Pieter M. F.; Stam, Gea; Veronesi, Francesca; Vieira, Marisa et al. (2017): ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. In: *Int J Life Cycle Assess* 22 (2), S. 138–147. DOI: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- [15] Dalgaard, Randi; Schmidt, Jannick; Halberg, Niels; Christensen, Per; Thrane, Mikkel; Pengue, Walter A. (2008): LCA of soybean meal. In: *Int J Life Cycle Assess* 13 (3), S. 240–254. DOI: 10.1065/lca2007.06.342.
- [16] Escobar, Neus; Tizado, E. Jorge; Ermgassen, Erasmus K.H.J. zu; Löfgren, Pernilla; Börner, Jan; Godar, Javier (2020): Spatially-explicit footprints of agricultural commodities: Mapping carbon emissions embodied in Brazil's soy exports. In: *Glob Environ Change* 62 (5), S. 102067. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102067.
- [17] Donau Soja: Minus 82%: Europe Soya certified soybean meal avoids CO₂ emissions. Wien, www.donausoja.org. Online verfügbar unter https://www.donausoja.org/wp-content/uploads/2023/06/DS_Factsheet_ATK_EN.pdf, zuletzt geprüft am 26.02.2024.
- [18] LfL Tierernährung; Bayerischer Müllerbund e.V. (2012): Futterwert und Fütterung von Nebenerzeugnissen der Mehlmüllerei. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Freising-Weihenstephan. Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/merkblaetter/p_43795.pdf.
- [19] Bayerisches Landesamt für Statistik (2023): Ernte der Feldfrüchte und des Grünlandes in Bayern 2022. Stichprobenerhebung (Statistische Berichte, C II 1 j 2022). Online verfügbar unter https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/veroeffentlichungen/statistische_berichte/c2102c_202200.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2024.
- [20] KATALYSE Institut e.V. (2024): Industrielle Kartoffelverarbeitung. Online verfügbar unter <https://chemie-in-lebensmitteln.katalyse.de/industrielle-kartoffelverarbeitung/>, zuletzt geprüft am 16.02.2024.699Z.
- [21] Vauterin, A.; Steiner, B.; Sillman, J.; Kahiluoto, H. (2021): The potential of insect protein to reduce food-based carbon footprints in Europe: The case of broiler meat production. In: *J Clean Prod* 320 (2), Artikel 128799. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128799.