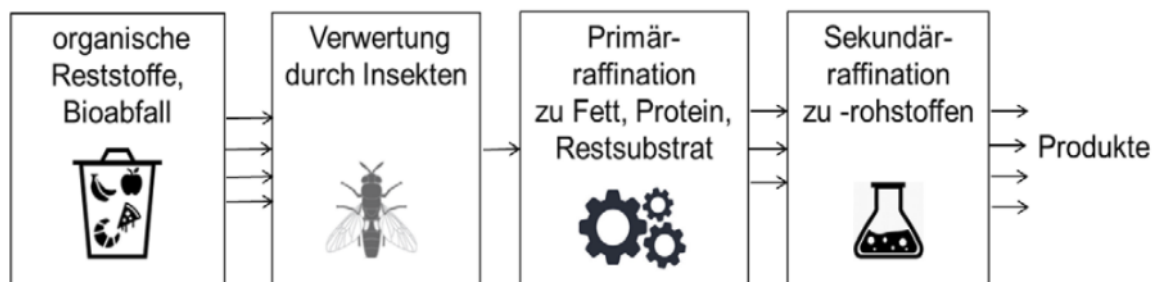


Gemeinsamer Sachbericht zur
Insektenbioraffinerie InBiRa im Rahmen des
EFRE-Programms Baden-Württemberg: Bio-Ab-Cycling –
Bioraffinerien zur Gewinnung von Rohstoffen aus Abfall
und Abwasser für den Zeitraum 10/2021 – 10/2024

Die Insektenbioraffinerie



**InBiRa – Die Insektenbioraffinerie: Von der Verwertung organischer Reststoffe
und Abfälle bis hin zur Herstellung von Produkten**



Koordinatorin des Verbundvorhabens:

Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB

Dr.-Ing. Susanne Zibek – Gruppenleiterin Industrielle Biotechnologie/ Bioprozessentwicklung

Nobelstr.12, 70569 Stuttgart

Gefördert
durch



Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft



**Kofinanziert von der
Europäischen Union**

Inhalt

Tabellenverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis.....	V
1 Beschreibung des Vorhabens und der modularen Bioraffinerie	1
2 Einleitung	2
2.1 Motivation und Problemstellung	2
2.2 Stand der Technik zu Projektbeginn und Ansatz des Vorhabens	2
2.3 Ziel und Zweck des Vorhabens.....	3
3 Durchführung des Projekts.....	3
3.1 Aufgabenstellung, Planung und Ablauf des Vorhabens	3
3.2 Zeitlicher Ablauf der Arbeitspakete, deren Ziele und Meilensteine	4
4 Erzielte Ergebnisse und deren Bewertung	6
4.1 Auslegung, Planung und Bau des Pilotanlagenkomplexes (AP1-6).....	6
4.2 Futtermittelaufbereitung (AP1)	11
4.2.1 Anforderungen an Futtermittel und Festlegung der Aufbereitung (TP1.1)	11
4.2.2 Ergebnisse Herstellung Futtermittel im Labormaßstab (TP1.2-TP1.5) sowie Haltbarmachung und Emissionen (TP1.6)	11
4.2.3 Ergebnisse Pilotierungen (TP1.7) und Konzept für Industrieanlage (TP1.8)	13
4.3 Larvenwachstum (AP2)	15
4.3.1 Ergebnisse Lebensmittlrückläufer (TP2.2)	15
4.3.2 Ergebnisse Kantinenabfälle (TP2.2)	18
4.3.3 Ergebnisse Bioabfall (TP2.2).....	19
4.3.4 Zusammenfassende Bewertungen mit Emissionsmessungen im Labormaßstab (TP2.2 und TP2.3) ..	21
4.3.5 Ergebnisse Pilotierungen (TP2.2) und Emissionsmessungen (TP2.3).....	22
4.4 Primärraffination (AP2, AP3) - Siebung (TP2.4), Devitalisierung, (TP2.5) Trocknung (TP2.5), Pressen (TP3.2)	25
4.4.1 Ergebnisse Labor-/Technikumsmaßstab der Siebung (TP2.4) und Trocknung (TP2.5)	25
4.4.2 Ergebnisse der Pilotierungsversuche der Siebung (TP2.4), Trocknung (TP2.5) und Pressung (TP3.2) ..	26
4.5 Fettraffination (TP3.3) und Konversion (AP4)	28
4.5.1 Fettraffination – Herstellung verschiedener Fettqualitäten (TP3.3)	28
4.5.2 FAME (Biodiesel) und Schmierstoffe (Fettsäureester) (TP4.1-4.5).....	29
4.5.3 Herstellung von Seifen (TP4.1-4.5).....	30
4.5.4 Herstellung von biobasierten Epoxiden (TP4.1-4.5)	31
4.5.5 Fermentative Herstellung von Biotensiden (TP4.1-4.5).....	32
4.6 Proteinentfettung (TP3.4) und -hydrolyse (AP5)	34
4.6.1 Ergebnisse Labor- und Technikumsmaßstab (TP5.3)	34
4.6.2 Ergebnisse im Pilotmaßstab (TP5.4-5.5)	36
4.7 Chitinaufreinigung und Chitosanherstellung (TP6.1-6.2).....	38
4.7.1 Charakterisierung der Rohstoffe (TP6.1)	38
4.7.2 Ergebnisse Labormaßstab (TP6.2)	39
4.7.3 Ergebnisse Pilotmaßstab (TP6.2)	40
4.8 Evaluierung weiterer Verwertungswege des Restsubstrats (Frass) (TP6.3)	41
4.9 Ökobilanzierung (AP7).....	43
4.10 Rechtliches (AP8)	46
4.11 Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation (AP9)	47

4.12	Massenbilanzierung für Industrieanlage (AP1-6)	48
5	Praktische Anwendbarkeit und Roll-out	50
5.1	Voraussichtlicher Nutzen, Übertragbarkeit und Verwertung.....	50
5.1.1	Leistungsfähigkeit - Kapazität der Pilotanlage und deren Stoffströme	50
5.1.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten und Nutzungsmöglichkeiten.....	50
5.1.3	Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten und Anschlussfähigkeit.....	51
5.1.4	Übertragbarkeit des Vorhabens.....	52
5.2	Was wird benötigt, um Verfahren und Technologie in die Anwendung zu bringen?	52
6	Ausblick und Entwicklungsperspektive	52
7	Anhang	53
7.1	Ausführlicher Stand der Technik zu Projektbeginn	53
7.1.1	Organische Reststoffe und Bioabfälle	53
7.1.2	Insektenmast	53
7.1.3	Aufarbeitung von Insekten (Primärraffination)	53
7.1.4	Technische Nutzung von Insektenfett (Sekundärraffination)	54
7.1.5	Technische Nutzung von Insektenprotein (Sekundärraffination)	55
7.1.6	Nutzung von nichtverwertetem Restsubstrat – Biogasproduktion	55
7.1.7	Chitosanherstellung	55
7.1.8	Nachhaltigkeitsbewertung.....	56
7.2	Detaillierte Auflistung der Öffentlichkeitsarbeit im Projekt	56
7.2.1	Pressearbeit in Abhängigkeit vom Projektfortschritt	56
7.2.2	Stakeholder-Analyse und zielgruppenspezifische Veranstaltungen	56
7.2.3	Soziale Medien zur Sichtbarmachung und Verbreitung	58
7.3	Ergänzende Tabellen und Abbildungen	60
8	Literatur	67
9	Autorenliste	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Meilensteinplan von InBiRa.	4
Tabelle 2: Gesamt Arbeits-und-Zeitplan.	5
Tabelle 3: Prozesseinheiten für die Insektenbioraffinerie-Pilotanlage.....	6
Tabelle 4: Nährwertverteilung der Futtermittel (FM) und der Restsubstrate (RS) aus den 6 Pilotierungsexperimenten (P#1-P#6).	13
Tabelle 5: Vergleich der spezifischen Emissionsfaktoren der relevanten Gase.....	25
Tabelle 6: Vergleich der spezifischen Emissionsfaktoren von Treibhausgasen (THG).	25
Tabelle 7: Übersicht über den Chitinaufreinigungsprozess im Pilotmaßstab mit Chitingehalt nach jedem Schritt und Biomassewiederfindung bezogen auf die bereits entfettete Biomasse.	40
Tabelle 8: Spezifischer Biogasertrag, Methananteil und -ausbeute sowie Kohlendioxidanteil nach Vergärung der Futtermischungen (FM) und Restsubstrate (RS) aus den Pilotierungsläufen (P#1-P#6); oTS: organische Trockensubstanz.	41
Tabelle 9: Heizwertanalyse mit Futtermischungen und den entsprechenden Restsubstraten. Nomenklatur Pilotierung: 1. Schweinefutter, 2. Kantinenabfälle, 3. Lebensmittelrückläufer, 4. Kantinenabfälle (Wdh.), 5. 80 % Kantinenabfälle / 20 % Bioabfälle, 6. 90 % Kantinenabfälle / 10 % Bioabfälle.	42
Tabelle 10: Fettkennzahlen der Roh- und Raffinierten Fette der sechs Pilotierungsexperimente (PEx).	61
Tabelle 11: FAME-Analytik der Fette aus Pilotierungsexperimente (PEx) 1, 4 und 5 im Vergleich zur Regulation EN 14214.	61
Tabelle 12: Stoffströme zur Sachbilanz des InBiRa-Verfahrens für die Ökobilanzierung, ohne Abwärmenutzung und mit Schweinefutter als Futtermittel in der Reproduktion.	63
Tabelle 13: Alle Autoren, die bei der Erstellung des Berichts mitgewirkt haben.	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über die Umwandlung von organischen Abfallströmen in hochwertige Produkte im Projekt InBiRa, der Insektenbioraffinerie.	1
Abbildung 2: Detailliertes Fließbild für Pilotanlage mit Prozesseinheiten und beispielhafte Massenströmen basierend auf den durchgeführten Pilotierungsläufen.	10
Abbildung 3: Konzept zur Futtermittelaufbereitung für 1.500 t/a getrocknete Larvenbiomasse.	14
Abbildung 4: Vergleich der Larvenfütterung mit und ohne Additivzugabe. (Bilder 1-4 links) Verunreinigungsgrad der unterschiedlichen Futtermischungen. (Diagramm rechts) Larven-Frischmasse aus den unterschiedlichen Futtermischungen. A – Additiv	17
Abbildung 5: Auswertung der Lebensmittelrückläufer-Mischungen. Dargestellt ist das Larvenwachstum (Links), die geernteten frische Larven-Biomasse (Mitte) sowie die Futtermittelaufbereitungsrate (Rechts) von 3 unabhängigen Fütterungen, mit jeweils 3 technischen Replikaten. Die Fehlerbalken stellen den Mittelwert $\pm$ SEM dar; one-way ANOVA Dunnett-Test; ns = nicht signifikant, * = $p < 0.033$	18
Abbildung 6: Auswertung der Kantinenabfall-Mischungen. Dargestellt ist das Larvenwachstum (Links), die geernteten frische Larven-Biomasse (Mitte) sowie die Futtermittelaufbereitungsrate (Rechts) von drei unabhängigen Fütterungen, mit jeweils drei technischen Replikaten. Die Fehlerbalken stellen den Mittelwert $\pm$ SEM dar; one-way ANOVA Dunnett-Test; ns = nicht signifikant, * = $p < 0.033$, ** = $p < 0.002$	19
Abbildung 7: Auswertung der Bioabfall-Mischungen. Dargestellt ist das Larvenwachstum (Links), die geernteten frische Larven-Biomasse (Mitte) sowie die Futtermittelaufbereitungsrate (Rechts) von zwei unabhängigen Fütterungen, mit jeweils drei technischen Replikaten. Die Fehlerbalken stellen den Mittelwert $\pm$ SEM dar; one-way ANOVA Dunnett-Test; * = $p < 0.033$, ** = $p < 0.002$, *** = $p < 0.001$	20
Abbildung 8: Auswertung der Bioabfall-Kantinenabfall-Kombinationsmischungen. Dargestellt ist das Larvenwachstum (Links), die geernteten trockene Larven-Biomasse (Rechts) von zwei unabhängigen Fütterungen, mit jeweils einem technischen Replikate im zwei kg Maßstab. Die Fehlerbalken stellen den Mittelwert $\pm$ SD dar.	21
Abbildung 9: Korrelationsanalyse und Auswertung der Emissionsmessungen der Labormischungen. (Links) Korrelation zwischen gebildeter Larven-Trockenmasse (g) und Rohfett in der Futtermischung (%). Dargestellt ist die Regressionsgerade mit Konfidenzintervallen. Two-tailed Pearsons Korrelationsanalyse. (Rechts) Emissionen an CO ₂ und NH ₃ während der Fütterungen mit verschiedenen Mischungen.	22
Abbildung 10: Auswertung der Pilotierungs-Fütterungen. Dargestellt ist das Larvenwachstum (Oben), die geernteten getrocknete Larven-Biomasse bezogen auf 1.000 kg Futter (Unten, links) sowie die Futtermittelaufbereitungsrate (Unten rechts). Die Fehlerbalken stellen den Mittelwert $\pm$ SD (Oben) und Mittelwert $\pm$ SEM (Unten links, rechts) dar.	24
Abbildung 11: Ergebnisse der Vorversuche mit überhitztem Wasserdampf im Batch-Trockner.	26
Abbildung 12: Schritte der Fettraffination und erhaltene Nebenprodukte/Reststoffströme.	28
Abbildung 13: Erzielte MEL-Konzentrationen aus Fett der unterschiedlichen Pilotierungsexperimenten im Vergleich zur Referenz Rapsöl.	33
Abbildung 14: Verlauf der Konzentrationen an Triglyceriden, freien Fettsäuren und MEL für die Fermentation mit Fett aus Pilotierungsexperiment 3 im Technikums-Bioreaktor (7-L). Im Bioreaktor erfolgte ein zusätzlicher Mediumsfeed (schraffierter Bereich) von 48-64 h und eine zweifache Ölzugabe nach 65 und 138 h (vertikale Striche).	33
Abbildung 15: Prozessschema der Proteinhydrolyse und nachfolgenden -aufreinigung.	34
Abbildung 16: Einfluss von Flottenverhältnis und NaOH-Konzentration auf die Effizienz der Proteinhydrolyse bezogen auf die eingesetzte Menge entfettetem und getrockneten Presskuchen.	35
Abbildung 17: Aminosäureprofil des Proteinhydrolysats der auf Schweinefutter gewachsenen Larven. ...	37
Abbildung 18: Gegossene Proteinfilme von Pilotierungsexperiment Nr. 1 mit 15 % Glycerin (links), Pilotierungsexperiment 6 ohne Additive (Mitte und rechts).	37
Abbildung 19: Reproduktion der Schwarzen Soldatenfliege inkl. Seitenströme und Massenbilanzierung.	38
Abbildung 20: Der Chitingehalt nach den jeweiligen Schritten der Aufreinigung (links) für Puppenexuvien und toten adulten Fliegen; Wiederfindung nach jedem Prozessschritt bezogen auf die zu Anfang eingesetzte Biomasse (Mitte); visuelle Darstellung der Chitine aus Puppenexuvien (rechts oben) und Larvenexuvien (rechts unten).	39

Abbildung 21: Systemrahmen Vergleichssysteme. Die potenziell durch die gezeigten Produkte substituierbaren konventionellen Produkte (grün) gehen mit negativem Vorzeichen in die Bilanz ein.	44
Abbildung 22: Wirkungsabschätzungsergebnis für die Wirkungskategorie Klimawandel.	45
Abbildung 23: Strukturelle Übersicht der Insektenbioraffinerie und deren Stoffströme	50
Abbildung 24: Newsletter-Aufrufe, LinkedIn-Newsletter »Unboxing InBiRa«	59
Abbildung 25: Auswertung der Pilotierungs-Futtermischungen im 10 kg Labormaßstab. Dargestellt ist das Larvenwachstum (Oben), die geernteten getrocknete Larven-Biomasse (Unten, links) sowie die Futtermittelnutzung (Unten, rechts). Die Fehlerbalken stellen den Mittelwert $\pm$ SD dar.	60
Abbildung 26: GC-FID Spektrum der unterschiedlichen Fette der sechs Pilotierungsexperimenten.	62
Abbildung 27: Konzept für Industrieanlage mit Prozesseinheiten und Massenströmen.	66

1 Beschreibung des Vorhabens und der modularen Bioraffinerie

Stoffströme aus Kantinen, dem Lebensmittelhandel oder der Biotonne werden in Deutschland zumeist Kompostieranlagen zugeführt oder auch zur Herstellung von Biogas genutzt. Es gibt jedoch die Möglichkeit diese Stoffströme in eine weitere höhere Wertschöpfung zu bringen, indem man neue Produkte für unterschiedliche Branchen herstellt.

Mit der Installierung einer Insektenbioraffinerie als Pilotanlage, haben wir die stoffliche Umwandlung der organischen Stoffströme durch die Schwarze Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) in hochwertige Produkte forciert. Schematisch ist dies mit den Hauptkonversionsschritten und -produkten in Abbildung 1 dargestellt.

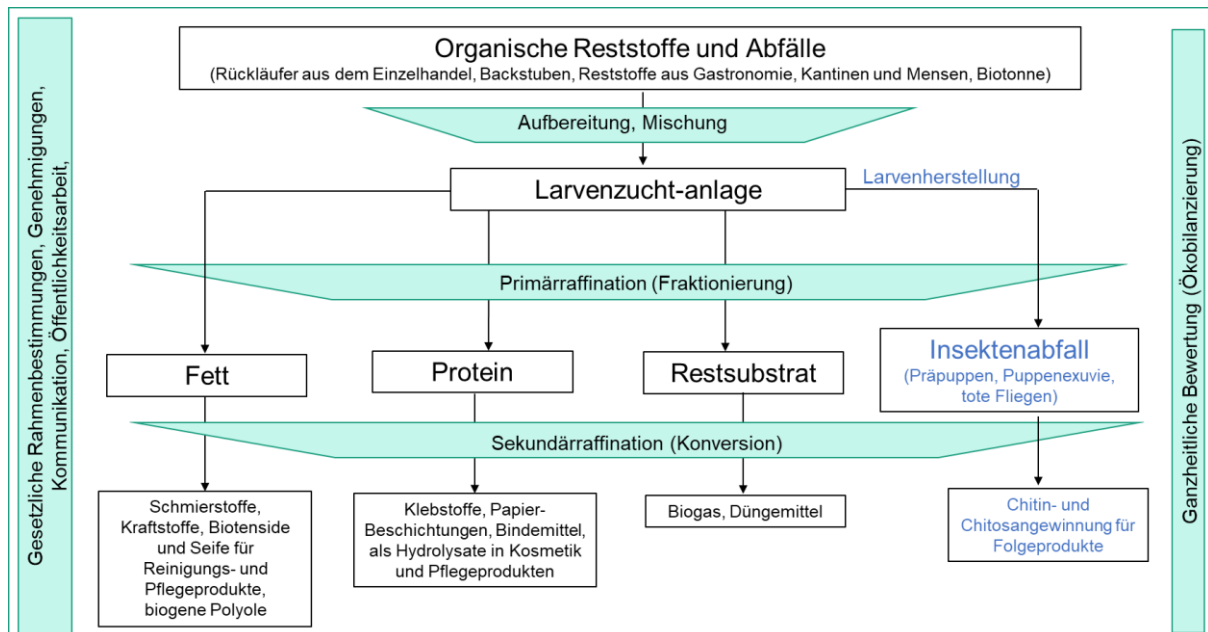


Abbildung 1: Übersicht über die Umwandlung von organischen Abfallströmen in hochwertige Produkte im Projekt InBiRa, der Insektenbioraffinerie.

Die Pilotanlage startete mit einer Aufbereitung von Abfall- und Restströmen, damit diese für die Larven der Schwarzen Soldatenfliege verwertbar waren. Die anschließende Separation der Larven ermöglichte die Gewinnung des nichtverwerteten Restsubstrats (Cellulose, Insektenexkrement, Larvenhäutungsprodukte) als Stoffstrom, welcher hinsichtlich der Biogasproduktion evaluiert wurde. Ein weiterer Verwertungspfad war die Konversion der resultierenden Exuvien zu Chitin und Chitosan. Während des Projekts ergab sich außerdem eine Erweiterung des Konzepts der InBiRa um die Larvenreproduktion, bei der ebenfalls wertvolle Insektennebenprodukte zur Chitin- und Chitosangewinnung anfielen.

Im Rahmen der Primärraffination wurde die Insektenbiomasse in fett- und proteinreiche Ströme separiert, raffiniert und anschließend in der Sekundärraffination weiterverarbeitet. Insbesondere wurde untersucht, welche verschiedenen Verwertungsoptionen möglich waren: So ließ sich die Fettfraktion beispielsweise nach einer chemischen oder enzymatischen Umwandlung zu Schmierstoffinhaltsstoffen, Seifen, Tensiden für Reinigungs- und Pflegeprodukte weiterverarbeiten. Der proteinreiche Stoffstrom wiederum konnte als Hydrolysat als Klebstoff für Papier und Holz untersucht werden.

Mit der Sekundärraffination der Fett- und Proteinfraction wurde damit eine neue Wertschöpfungskette aus organischen Abfallströmen erschlossen. Im Rahmen des Projekts wurden zunächst Untersuchungen im Labormaßstab durchgeführt, später dann auf den Technikums- und den Pilotmaßstab übertragen.

2 Einleitung

2.1 Motivation und Problemstellung

In Deutschland werden in der Regel organische Haushaltsabfälle aus der Biotonne oder gewerbliche Lebensmittelreste kompostiert oder einer kombinierten Vergärung zugeführt. Für diese organischen Abfälle könnte jedoch das Potenzial im Rahmen einer höheren stofflichen Verwertung ausgeschöpft werden. Hier bietet der Aufbau einer Insektenbioraffinerie die Chance, neue Produkte für eine höhere Wertschöpfung zu entwickeln und dem Markt vorzustellen.

In der Natur werden organische Stoffe, wie verdorbene Lebensmittel durch Insekten verwertet, was natürlicherweise primär der eigenen Viabilität und Vermehrung dient. Die Vermehrung selbst ist ein Teil des Lebenszyklus der Insekten: Dieser beinhaltet neben der Eiablage und dem Larvenwachstum, auch die Metamorphose und Entstehung eines adulten Insekts.

Insbesondere die gezielte industrielle Larvenzucht hat in den letzten Jahren einen immer höheren Stellenwert eingenommen, da Fett und Proteine für die Tierernährung aber auch zukünftig für die Humanernährung hergestellt werden können. Neben der Stubenfliege *Musca domestica* und dem Schwarzkäfer *Tenebrio molitor* wird vor allem die Schwarze Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) zur Insekten-basierten Futtermittelproduktion eingesetzt [1]. Der Vorteil von *H. illucens* liegt dabei in der Diversität an pflanzlichen und tierischen Futterquellen, die von dem Insekt genutzt werden können: Neben organischen Abfällen [2], wie Gülle [3], Kaffeepulpe [4], Sojaquark-Resten [5] und Restaurant-Abfällen [6] können auch kommunale organische Abfälle [7], Stroh [8] und Sorghumhirsen mit Kuhbohnen [9] verwertet werden. Aktuell werden in der EU allerdings nur zugelassene Futtermittel für die Larvenaufzucht und -mast verwendet, da durch die EU-Verordnungen 1069/2009 und 2017/893 überlagerte Stoffe der Agrarindustrie und der lebensmittelverarbeitenden Betriebe (z. B. fisch- und fleischhaltige Essensreste) nicht zugelassen sind. Gefüttert werden dürfen aber auch überlagerte Lebensmittel (Obst, Gemüse, Backwaren, Eier, Milchprodukte etc.). Hier kommt es allerdings auch immer wieder zu Diskussionen, ob die mit überlagerten Lebensmitteln gefütterten Larven in die Nahrungskette, z. B. als Tierfutter, eingespeist werden dürfen. Daher fokussierten wir uns in Rahmen der „Insektenbioraffinerie“ darauf, Produkte zur technischen Anwendung zu generieren. Unsere Untersuchungen können dazu dienen, dass zukünftig auch fisch- und fleischhaltige sowie überlagerte Lebensmittel und auch Abfälle aus der Biotonne für die Fütterung der Insekten verwendet werden.

Unser Ansatz, beginnend bei der Nutzung organischer Reststoffe und Bioabfälle über die Larvenherstellung bis hin zur Produktion technisch nutzbarer Stoffe, ist hierbei hervorzuheben. Bisher gibt es keine Prozesskette im Pilotmaßstab, die organische Restströme und Abfälle so mischt bzw. aufbereitet, sodass damit eine Larvenmast möglich ist. Der Vorteil der Pilotanlage besteht auch in dem Ansatz, der sowohl die Primärraffination zur Separation aller Stoffströme als auch die Sekundärraffination zur chemischen oder biotechnischen Konversion zu höherwertigen Sekundärprodukten verfolgt. Ziel war es daher, eine Pilotanlage zu bauen, um möglichst viele Daten und Informationen zu gewinnen, damit die Unbedenklichkeit einer größeren Verfahrenskette dargestellt wird und so auch die Herstellung von Mustermengen für die Bewertung der Endprodukte erstmals ermöglicht wird.

2.2 Stand der Technik zu Projektbeginn und Ansatz des Vorhabens

In Deutschland werden organische Stoffströme, wie Bioabfälle bisher überwiegend in Biogas- und Kompostierungsanlagen verwertet, in welchen Energie und nährstoffreicher Kompost entsteht. Eine innovative Alternative stellt die Nutzung organischer Abfälle durch Insekten dar. Dabei besitzen vor allem Larven der Schwarzen Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) ein hohes Potenzial, da diese die Bioabfälle effizient in hochwertige Produkte wie Protein, Fett und Dünger umwandeln können.

Derzeit betreibt Hermetia Baruth die einzige größere Produktionsanlage in Deutschland, die Larven

industriell züchtet, bislang jedoch auf Basis von Schweinefutter, einem zugelassenen Futtermittel. Ziel des geförderten Projekts InBiRa war es, erstmals komplexe Bioabfälle wie überlagerte Lebensmittel oder Mischabfälle als Substrat einzusetzen. Nach der Mast der Larven erfolgt in der Regel die Primärraffination: Die Larven werden mechanisch vom Restsubstrat getrennt, getrocknet und in einer Presse in Fett und proteinreichen Presskuchen aufgetrennt. Das Fett kann technisch weiterverarbeitet werden, z. B. zu Biodiesel, Seifen oder Biotensiden, da es ähnliche Eigenschaften wie Kokos- oder Palmkernfett besitzt. Die Nutzung als regionaler Ersatz für tropische Fette ist ökologisch besonders interessant.

Auch das Insektenprotein bietet Potenzial für technische Anwendungen wie Klebstoffe, kosmetische Inhaltsstoffe oder biologisch abbaubare Folien. Zusätzlich kann das nicht verwertete Restsubstrat zur Biogaserzeugung oder als Dünger eingesetzt werden. Eine weitere Wertschöpfung stellt die Chitinextraktion aus Insektenhüllen dar, woraus sich Chitosan gewinnen lässt – ein vielseitig einsetzbarer Biopolymer. Insgesamt zeigt das Projekt neue, nachhaltige Verwertungspfade für organische Abfälle durch die Nutzung der Schwarzen Soldatenfliege auf.

Ausführliche Details zum aktuellen Stand der Technik sind im Anhang 7.1 zu finden.

2.3 Ziel und Zweck des Vorhabens

Das Alleinstellungsmerkmal unseres Vorhabens ist, dass wir erstmals das gesamte Konzept einer Insektenbioraffinerie definiert und in einer Pilotanlage in Baden-Württemberg umgesetzt haben. Diese Pilotierung beinhaltet die Aufarbeitung von verschiedenen Stoffströmen aus der Lebensmittelbranche, Kantinen oder der Biotonne und die Konversion dieser durch *H. illucens*-Junglarven. Hierzu wurde eine behördliche Genehmigung erteilt. Neben den Restsubstraten (für Dünger, Biogas, Chitosanherstellung) wird aus der Primärraffination Protein und Fett erhalten, welche mehrstufig raffiniert und zu einer hohen Qualität aufgereinigt werden, um anschließend zu hochwertigen Sekundärrohstoffen für die (Chemie-)Industrie veredelt zu werden. Systematisch wurde ein solcher Ansatz bisher noch nicht verfolgt. Basierend auf den Daten können Wissenschaftler und die Industrie von der Pilotanlage profitieren und können Folgeexperimente durchführen. Diese Experimente dienen einer möglichen Gesetzesänderung der zugelassenen Futtermittel für Insekten und der Prozessevaluierung der einzelnen Schritte für eine mögliche Planung einer Industrieanlage.

Somit ist die Zukunftsfähigkeit der Insektenbioraffinerie im Pilotmaßstab und vielleicht auch von Industrieanlagen für den Standort in Baden-Württemberg gegeben. Diese geht auch mit der Landesstrategie „Nachhaltige Bioökonomie“ einher, biologische Ressourcen verstärkt in die Wertschöpfungsketten von Industrieprodukten zu integrieren.

3 Durchführung des Projekts

3.1 Aufgabenstellung, Planung und Ablauf des Vorhabens

Aufgabenstellung

- Ziel: Aufbau einer Insektenbioraffinerie als Pilotanlage zur Verwertung organischer Reststoffe und Abfälle, um hochwertige Produkte zu erzeugen (z. B. Fette, Proteine, Chitin).
- Technologielücke: Schließen der Lücke in der stofflichen Verwertung organischer Abfälle, die bisher nur in Biogasanlagen oder Kompostierungsanlagen verwertet werden.
- Herstellung von zahlreichen Zwischenprodukten aus Fett, Protein und Insektenexuvien; vom Labormaßstab bis zur Pilotierung.

Planung

- Planung, Auslegung, Bau und Inbetriebnahme einer modular aufgebauten ganzheitlichen Insektenbioraffinerie.

- Entwicklung von mechanischen, thermischen, chemischen und biotechnologischen Verfahren zur Aufreinigung der Stoffströme und Umwandlung der chemischen Struktur in höherwertige Produkte (Primär- und Sekundärraffination).
- Durchführung von Laborexperimenten zur Futtermittelherstellung aus Abfallströmen, die Larvenmast und -trennung, Devitalisierung, Trocknung, Pressen der Larven, mehrstufige Raffination von Fett, Protein und Exuvien, chemische Konversion zu komplexen Fettsäuremethylester, Epoxiden, Seifen, Biotensiden, Proteinhydrolysaten und erste Charakterisierung.
- Durchführung von sechs Pilotexperimenten mit je 1 t Futtermittel

Zeitlicher Ablauf

- Projektzeitraum: 10/2021 – 10/2024
- Auslegung, Planung, Bau von 19 Pilotanlageneinheiten mit Peripherie (Integration von ~300 Komponenten) (2022 – 2024)
- Laborexperimente (2022 – 2023)
- Inbetriebnahme der Pilotanlage und Durchführung mehrerer Pilotversuche mit verschiedenen Futtermittelzusammensetzungen (2024)
- Abschlusskonferenz und Ergebnispräsentation (Oktober 2024)

3.2 Zeitlicher Ablauf der Arbeitspakete, deren Ziele und Meilensteine

InBiRa war in zwei Projekt-begleitende und acht wissenschaftlich-technische Arbeitspakete untergliedert. Die in InBiRa fälligen Meilensteine können Tabelle 1 entnommen werden, Tabelle 2 zeigt einen Überblick über die Arbeitspakete selbst, den Zeitplan und die Fälligkeit der Meilensteine innerhalb dieser Arbeitspakete.

Tabelle 1: Meilensteinplan von InBiRa.

Meilenstein	Titel
M1	Geeignete Futtermischungen identifiziert
M2	Ökobilanz Referenzsysteme erstellt
M3	Eine Pressemitteilung und populärwissenschaftlicher Fachartikel veröffentlicht
M4	Larvenherstellung im Labormaßstab evaluiert
M5	Primärraffination im Labormaßstab gezeigt
M6	Festlegung Futtermittelmischung für Pilotierung
M7	Sekundärraffination im Labormaßstab evaluiert
M8	Bestellung der Pilotanlagenkomponenten initiiert
M9	1. Scale-up der Larvenherstellung bis 15 kg erfolgreich
M10	1. Scale-up der Primärraffination erfolgreich
M11	1. Scale-up der Sekundärraffination erfolgreich
M12	System Insektenbioraffinerie für Ökobilanz erstellt
M13	Pilotanlagenkomponenten in Betrieb genommen
M14	2. Scale-up der Larvenherstellung bis 150 kg erfolgreich
M15	2. Scale-up der Primärraffination erfolgreich
M16	Zwei Veranstaltungen in teils partizipativem Format (Workshop, Tagung, o. Ä.) mit vorausgehender Stakeholder-Analyse zur gezielten Teilnehmerakquise haben stattgefunden
M17	2. Scale-up der Sekundärraffination erfolgreich
M18	Ökobilanzierung abgeschlossen, Nachhaltigkeitsbewertung
M19	Konzept für die Industrieanlage fertig
M20	Eine Pressemitteilung und populärwissenschaftlicher Fachartikel veröffentlicht

Tabelle 2: Gesamt Arbeits-und-Zeitplan.

[illegible]

4 Erzielte Ergebnisse und deren Bewertung

In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt eine detaillierte Ergebnisdarstellung für die einzelnen Themengebiete.

4.1 Auslegung, Planung und Bau des Pilotanlagenkomplexes (AP1-6)

Der Anlagenkomplex unserer Insektenbioraffinerie besteht aus 19 Prozesseinheiten. Folgende Apparaturen wurden vom Fraunhofer IGB für die Insektenbioraffinerie-Pilotanlage (1 Tonne Futtermittel pro Batchansatz) im Rahmen der Teilarbeitspakete 2.1, 3.1, 4.1, 4.2, 5.1, 5.2 und 6.2 ausgelegt, gebaut und in Betrieb genommen und damit die **Meilensteine M8** und **M13** erfolgreich erreicht (Tabelle 3):

Tabelle 3: Prozesseinheiten für die Insektenbioraffinerie-Pilotanlage.

Prozesseinheit	Pilotanlagen	Verwendung
PU-01: Herstellung der Futtermischungen (AP1)	Anlagenkomplex für Futtermittelherstellung. - Unit I: 1000 L – IBC-Container - Unit II: Schneckengetrieberührwerk für hochviskose Fluiden - Unit III: Containerheizung, Bodenheizmatte und Steuereinheit.	Aufbereitung, Durchmischung, Heizung und Aufbewahrung von Futtersubstraten aus Lebensmittelrückläufern, Kantinenabfällen und Bioabfällen
	Exzentrerschneckenpumpen + Peripherie: Exzentrerschneckenpumpen für hochviskose Fluiden	Umpumpen von viskosen Medien in oder aus IBC. Portionierung der Futtermittelmischungen.
	Misch-Automatenwolf mit Zusatzausstattung	Zerkleinerung und Mischung von Futtermittel.
	Industriewaage und Palettenwaage	Abwiegen von Futtermittelproben, Futtersubstraten, Portionierung in Zuchtboxen
	Mischbehälter aus Edelstahl mit Rührwerk, Thermostat und Schaltschrank	Mischung, Temperierung und Aufbewahrung von Futtermittel, Proben oder Chemische Reaktionen
PU-02: Insektenmast (AP2)	Insektenmastcontainer für 1 Tonne Produkt mit Zu- und Abluft, Heizung, Luft-, Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren, Steuercomputer mit Fernzugriff und 2-LAN-Überwachungskameras.	Mast von Insektenlarven, von Jungenlarven bis zum Mastlarven
	Wannen für Larvenzucht (Zuchtboxen)	Bestückung der Larven mit Futtermittel für Mast in Insektenmastcontainer
	Wärmebildkamera und CO ₂ -Messgerät	Überprüfung der Wärmeverteilung der Larven und Emissionsmessung der CO ₂ im Mastcontainer
	Trockenschränke aus Edelstahl, mit Umluft und Temperaturüberwachung.	Trocknung / Inaktivierung von Larven und Restsubstrate (Frass). Massenbilanzierung in AP6
	Analysenwaage	Abwiegen von Larven
	Hand- und Hochhubwagen	Handling/ Transport der Mastboxen zum Insektenmastcontainer
	Spülmaschine	Reinigung von Mastboxen und Arbeitsmaterialien (AP6)
	Autoklav	Deaktivierung/Hygienisierung und Entsorgung von K3-Materialien und Frass (AP6)
	Tiefkühltruhe	Einfrieren von Proben und Restsubstrate zur Deaktivierung (AP6)
PU-03/ PU-04: Sieb- und Devitalisierung (AP2)	Separationsanlage mit Steuerungsschrank	Abtrennung der Larven aus dem Restsubstrate
	Devitalisierungsanlage mit Heißwasserbad und Heißwasserboiler	Devitalisierung/Inaktivierung der Larven
	Analysesiebmaschine mit vers. Siebgrößen	Bestimmung der Größenverteilung für die Auslegung der Separationsverfahren.
PU-05 Trocknung (AP3)	Bandtrocknungsanlage mit überhitztem Dampf	Trocknung von Larven

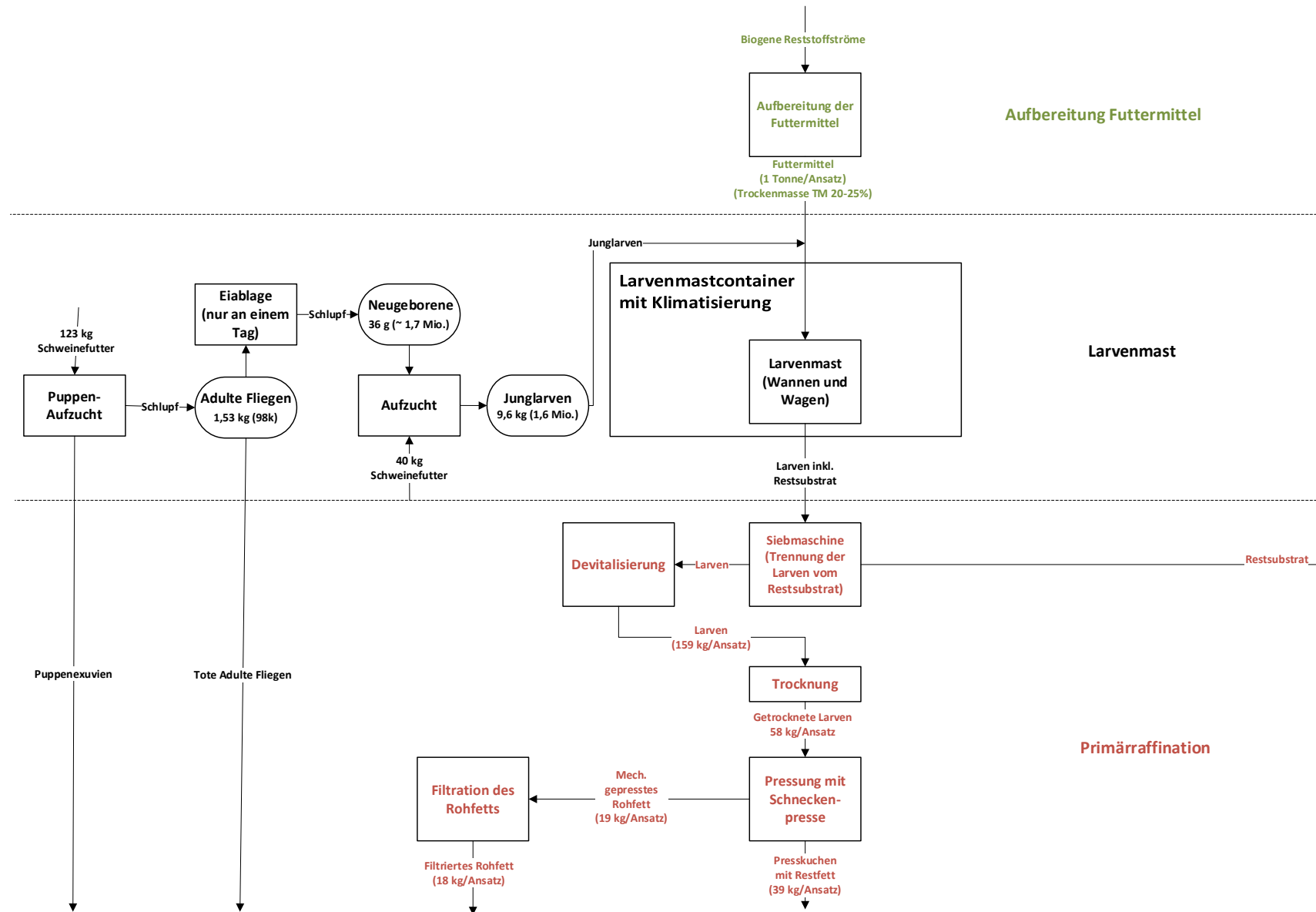
Prozesseinheit	Pilotanlagen	Verwendung
PU-06 Pressen der Larven /PU-07 Filtrieren des Larvenfetts (Primärraffination (AP3))	- Schneckenpresssystem bis - Kammerfilterpresse mit Lagertank, Heizung und Rührwerk	Pressen von Larven zur Fettgewinnung und Filtration von Larvenfett.
PU-08 Extraktion (AP3)	Fest-/ Flüssigextraktion, Soxhlet-Verfahren mit Heizpilz und Temperaturregler + Umlaufkühler	Extraktion von Restfett aus Proteinkuchen oder aus chitinhaltigen Stoffströmen (Fliegen, Exuvien)
PU-10 Lösemittelverdampfung (AP3)	Lösemittelverdampfer als kontinuierlicher Rotationsverdampfer	Automatisches Abdampfen von Lösemittel. Diverse Schlauchverbindungen und Verrohrung zum sicherheitskonformen Umgang mit Lösemitteln
PU-11 Reaktionsreaktor (AP3, AP4, AP5, AP6)	Rotationsreaktor + Zubehör	Reaktor mit Rückfluss für Sekundärraffination
PU-12 Hochdruckreaktor (AP3, AP4, AP6)	Hochdruckreaktor	Chemische Reaktionen (Konversion) unter Hochdruck (Hydrierung, Chitosanherstellung)
PU13 Reaktionsreaktor für leicht brennbare Lösemittel + Peripherie (AP3, AP4)	20-L Doppelwandiger Glasreaktor mit ATEX-Zulassung und Thermostat	Chemische Reaktionen für Sekundärraffination (Fett/Protein-Konversion)
	Umlaufkühler für Glasreaktor	Kühlungssystem für chemischen Reaktionen
	- Chemiemembranpumpe mit ATEX - Kolbenschieberpumpe für Hochvakuum-Destillation mit Kühlfalle - Schlauchpumpe	Transport von Chemikalien und Produkten zu und von Reaktoren. Destillation von Fettsäuren im Zuge der Primär und Sekundärraffination
	Kühlschrank	Aufbewahrung von Proben/ Chemikalien aus chemischen Reaktionen
	Heizplatten mit Hebebühnen	Analytik Sekundärraffination
	Wasserbad	Wasserbad für Temperierung Insektenfett für große Gebinde
	Waagen: Präzisionswaage) und Sartorius CUBIS Waagen	Abwiegen von Proben / Chemikalien, Substrat/Permeat während Reaktionen
	Geräte für Laborversuche: 3x Vakuumpumpen, 2x Heizplatten mit Magnetrührer und 1x Kälte-Umwälzthermostat	Chemische Reaktionen für Sekundärraffination (Fett-/ Protein und Chitinkonversion) im Labormaßstab
PU-14 Reaktionsreaktor zur Nutzung von säure- und laugenkatalysierten Reaktionen (AP5, AP6)	50-L Doppelwandige Glasreaktor, mit Vakuumpumpe und Thermostat bis 200 °C	Chemische Reaktionen für Sekundärraffination (Chitin-Konversion)
	Einhausung mit Rollen und Schiebefenstern	Sicherheitskonforme Einhausung für 50L Reaktor
	Schlauchpumpe	Dosierung von Chemikalien (Lösemittel geeignet)
	Umlaufkühler -20 bis 40 °C	Kühlungssystem für chemischen Reaktionen
	pH und Ionenanalysator	Auswertung von pH und Ionenanalysen, für Chitin-Aufarbeitung (Neutralisation etc.)
PU-15 Mikrofiltrationsanlage (AP4)	Crossflow-Filtrationssystem + Pumpen und Gehäuse	Aufreinigung/ Filtration von kleinen Partikeln der Fermentationsbrühen oder (Bio) Suspensionen
PU-16 Filtrationsanlage (AP4, AP5, AP6)	Filtergehäuse mit Pumpe	Filtration von Partikeln nach der chemischen Konversion
PU-17 Zerkleinerung / Zentrifugation (AP3, AP4, AP5, AP6)	- Ultrazentrifugalmühle - Dispergiergerät und Inlinedispergierer	Feinzerkleinerung von verschiedenen Feststofffraktionen (Larven, Exuvien etc.), Homogenisierung von Proben
PU18 Windsichtanlage (AP2)	Windsichtventilator + Zubehör	Trocknung/Reinigung/Trennung der Larven von Exuvien vor und nach Devitalisierung

Prozesseinheit	Pilotanlagen	Verwendung
PU-19: Bioreaktor (AP4)	Bioreaktor mit Dosierpumpen	Mikrobiologische Umwandlung von Larvenfett zu Biotensiden.
	Schaumfraktionierungstank für Bioreaktor mit Anschlussmöglichkeiten von Sensoren und sicherheitskonforme Verrohrung zum Bioreaktor	Als Überlaufschutz während der Durchführung von Fermentationsprozessen mit Verrohrung zum Anschluss mit Bioreaktor
	Mikroskopkamera	Erkennung von Zellmorphologie und potenziellen Kontaminationen
	Prozessthermostat -	Temperierung Reaktionen im Bioreaktor und kleineren Chemiereaktoren
Automatisierung und Analytik (AP3, AP4, AP5, AP6)	UV/VIS Spektrophotometer	Überwachung und Analyse von Wachstumsparametern (OD) in Bioreaktorprozessen, Durchführung von enzymatischen Assays zur Bestimmung von gelösten Molekülen
	Blockthermostat	Probeninkubation zur Veresterung der Fett- und MEL-Proben zur GC-Analyse mit Methanol.
	Biochemische Analysator mit Control Unit	Messung von Fermentations- und Bioraffinationsparametern (Glucose, Ammonium, Triglyceriden, Glycerol, Gesamtprotein).
	Automatische Entwicklungskammer ADC 2 + Plattenheizer + Software	Analytik von Fetten, Fettderivaten und Biotensiden
	Inkubations-Tischschüttler mit Kühlung	Kultivierung von Biotensiden, sowie als Schüttler bei der Extraktion bzw. Raffination.
	OD-Sonde mit Zubehör für online-Biomassemessung im Bioreaktor	Messung von gelöstem Sauerstoff und optischer Dichte
	Schmelzpunktmessgerät	Messungen Schmelzpunkt von Fetten /Schmierstoffen
	Automatische Probenahme für Fermenter und Chemiereaktoren	Für Bioreaktor und Chemiereaktoren zur automatischen Probenahme über Nacht oder Wochenende
	Labmanager Automatisierung für Reaktoren	Zur Steuerung und Datenverarbeitung der Reaktorsysteme

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme aller Komponenten der Anlage wurden folgende Pilotierungen durchgeführt:

Batch #1	Inokulation auf Schweinefutter im Februar 2024
Batch #2	Inokulation auf Kantinenabfällen im April 2024
Batch #3	Inokulation auf Lebensmittelrückläufern im Mai 2024
Batch #4	Inokulation auf Kantinenabfällen im August 2024
Batch #5	Inokulation auf 80 % Kantinenabfällen mit 20 % Biotonne im September 2024
Batch #6	Inokulation auf 90 % Kantinenabfällen mit 10 % Biotonne im Oktober 2024

Das allgemeine Konzept der Pilotanlage mit Darstellung der Prozesseinheiten und detaillierten Massenbilanzen aus den InBiRa-Pilotierungsläufen ist in Abbildung 2 dargestellt. Hierfür wurde eine exemplarische Massenbilanz der Versuche im Pilotierungsmaßstab (in den nachfolgenden Kapiteln detailliert dargestellt) verwendet.



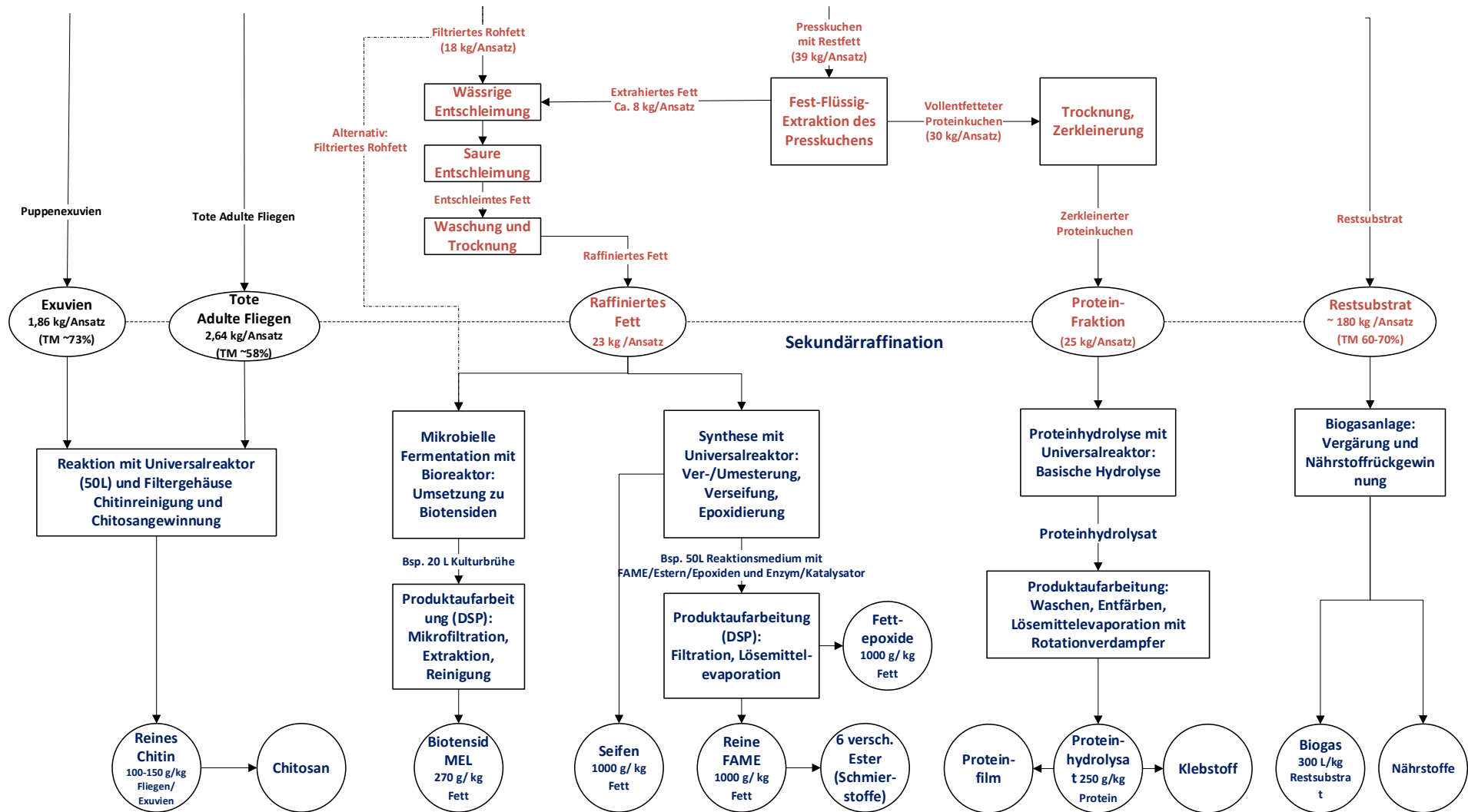


Abbildung 2: Detailliertes Fließbild für Pilotanlage mit Prozesseinheiten und beispielhafte Massenströmen basierend auf den durchgeführten Pilotierungsläufen.

4.2 Futtermittelaufbereitung (AP1)

Für die experimentellen Untersuchungen wurden die benötigten organischen Reststoffströme bereitgestellt. Die organischen Materialien wurden in drei übergeordnete Kategorien unterteilt: (1) Lebensmittelrückläufer (LMR), differenziert in die Subkategorien „Gemüse und Obst“ (GO), „Backwaren“ (BW), „Molkereiprodukte“ (MP) sowie „Fisch und Fleisch“ (FF); (2) Kantinenabfälle (KA); sowie (3) Bioabfälle aus der kommunalen Biotonne (BA). Die Bereitstellung der LMR und KA erfolgte durch PreZero, während das Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA) die Versorgung mit BA in Kooperation mit der Biovergärungsanlage in Backnang übernahm.

4.2.1 Anforderungen an Futtermittel und Festlegung der Aufbereitung (TP1.1)

Zunächst wurden die Spezifikationen der Substratparameter für den Einsatz in der Larvenzucht definiert (TP1.1). Zentrale Anforderung war ein Wassergehalt des Futtermittels im Bereich von 75 bis 80 % bzw. eine Trockenmasse von 20-25 %. Neben dem Wassergehalt stellte die Korngrößenverteilung des eingesetzten Futtermittels einen weiteren kritischen Parameter für die Praxis der Larvenzucht dar. Die Korngröße beeinflusste maßgeblich sowohl die physikalische Handhabung des Substrats als auch die Effizienz der späteren Separationsschritte. Kleinere Partikelgrößen begünstigten die homogene Verteilung des Futtermittels im Mastbehälter und unterstützten die Nahrungsaufnahme der Larven. Darüber hinaus erleichterte eine geeignete Korngrößenverteilung die mechanische Abtrennung von Larven und Frass durch Siebverfahren. Als technischer Richtwert galten Partikelgrößen zwischen 1-4 mm.

Zu Projektbeginn war eine modulare "Futtermühle" zur Aufbereitung verschiedenartiger Substrate für die Larvenmast vorgesehen, jedoch konnte aufgrund von hohen Investitionskosten und technologischen Einschränkungen keine Komplettlösung realisiert werden. Angesichts der technischen Herausforderungen bei der Verarbeitung faserreicher organischer Abfälle wurde entschieden, die Komponenten zur Substrataufbereitung individuell auszuwählen und zusammenzustellen, um eine prozessichere und energieeffiziente Substratkonditionierung zu gewährleisten.

Für die Zerkleinerung der Substrate im Labormaßstab wurden verschiedene mechanische Verfahren getestet, einschließlich Häcksler, Küchenmixer und Fleischwolf. Der Fleischwolf erwies sich als robust und skalierbar, wobei die feinsten Partikelgrößen erreicht wurden. Eine exemplarische Mischung aus Lebensmittelrückläufern wurde fünfmal durch den Fleischwolf mit 8 mm-Aufsatz zerkleinert, was zu einer geeigneten Partikelgröße für die Larvenmast im Labormaßstab führte. Großtechnische Lösungen wurden ebenfalls evaluiert. Eine Mazeratorpumpe zur Feinerzkleinerung von verflüssigtem Bioabfall zeigte initial vielversprechende Ergebnisse, jedoch war die Pilotierung nicht erfolgreich aufgrund technischer Herausforderungen wie erhöhter Faseranteile. Die Flüssigkeitshammermühle bestätigte ihre Eignung zur Zerkleinerung auf eine Partikelgröße im Bereich von 2–3 mm, wobei ein signifikanter Kunststoffanteil die Anwendung hinderte und diese Variante nicht weiterverfolgt wurde.

4.2.2 Ergebnisse Herstellung Futtermittel im Labormaßstab (TP1.2-TP1.5) sowie Haltbarmachung und Emissionen (TP1.6)

Zur objektiven Bewertung der chemischen und physikalischen Eigenschaften der im Projekt hergestellten Futtermischungen (TP1.2 – TP1.5) sowie des Restsubstrats wurde eine umfassende Analytik durchgeführt. Die Untersuchungen wurden an externe, akkreditierte Prüflabore vergeben, um eine normgerechte und unabhängige Analyse sicherzustellen.

Die Proben wurden gemäß den im Projekt definierten Standardverfahren entnommen und sowohl in Frisch- als auch als Trockensubstanz untersucht. Die durchgeführte Analytik umfasste unter anderem die Bestimmung von Trockenmasse (TM), organischer Trockensubstanz (oTS), Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF), Aschegehalt sowie pH-Wert und Leitfähigkeit. Darüber hinaus wurden bei ausgewählten Proben auch Schwermetalle und hygienisch relevante Parameter geprüft. Die Werteangaben erfolgten auf

Trockensubstanzbasis (TM), um eine Vergleichbarkeit mit Literaturdaten sicherzustellen. Die stickstofffreien Extraktstoffe (NfE) umfassen die fraktionierbaren, leicht verdaulichen Kohlenhydrate eines Substrats, darunter insbesondere Zucker und Stärke. Ihre Bestimmung erfolgt nicht durch direkte Messung, sondern rechnerisch als Differenzmethode auf Basis der übrigen Analyseparameter.

Die Berechnungsformel lautet: **NfE [% TM] = 100 % – Rohprotein – Rohfett – Rohfaser – Asche**

Für einige Proben lag keine gesonderte Bestimmung des Rohfasergehalts vor. Daher konnten für diese nur Summenangaben gemacht werden, wobei NfE und Faseranteile gemeinsam ausgewiesen wurden als „**NfE + Faser**“.

Im Labormaßstab wurden zunächst verschiedene Futtermischungen aus Lebensmittelrückläufern (LMR), Kantinenabfällen (KA) und Bioabfällen (BA) analysiert. Die LMR-Mischungen wurden aus den Unterkategorien Gemüse und Obst (GO), Backwaren (BW), Fisch und Fleisch (FF), sowie Molkereiprodukten (MP) zusammengestellt. Reine Backwaren-Mischungen (BW) wurden ferner in Kategorien wie Weißmehlprodukte, Vollkornprodukte und süß- und fetthaltige Backwaren unterteilt.

Die Backwaren zeigten sehr variable Fettgehalte zwischen 1,6 % und 24,6 % i.d.TM, wobei die süß-fettige Mischung den höchsten Wert hatte und die anderen eher im Bereich bis 10 % i.d.TM lagen. Der Proteingehalt variierte ebenfalls von 6,7 % bis 15,8 % i.d.TM. Die Trockenmasse lag zwischen 89,8 % und 98,8 % und damit sehr hoch, was eine Wasserzugabe erforderlich machte, um ein geeignetes Substrat zu erhalten.

Für die Mischungen aus Gemüse, Obst und Backwaren (BW/GO) wurde ein Mischungsverhältnis von 86 % Gemüse und Obst (GO) zu 14 % Backwaren (BW) festgelegt. Die BW/GO Mischungen zeigten Fettgehalte von 6,4 % bis 10,9 % i.d.TM und Proteingehalte zwischen 12,7 % und 14,3 % i.d.TM, mit einer sehr günstigen Trockenmasse von 17,7 % bis 26 %.

Mischungen aus Gemüse, Obst, Backwaren und Molkereiprodukten (BW/GO/MP) wurden im Verhältnis 69 % GO, 11 % BW und 20 % MP hergestellt. Diese zeigten Fettgehalte von 6,4 bis 19,3 % i.d.TM und Proteingehalte zwischen 12,6 und 27,2 % i.d.TM, wobei sehr große Unterschiede in den Replikaten waren. Die Trockenmasse lag zwischen 19–21 % und damit für die Larvenmast günstig.

Futtermischungen aus Gemüse, Obst, Backwaren und Fisch und Fleisch (BW/GO/FF) hatten Fettgehalte von 3,4 % bis 16,6 % i.d.TM und Proteingehalte von 26,7 % bis 29,5 % i.d.TM. Die Trockenmasse lag zwischen 16,3 % und 21,1 %.

Mischungen aus allen LMR-Kategorien (BW/GO/MP/FF), die im Verhältnis 69 % GO, 11 % BW, 10 % MP, 10 % FF gemischt wurden, hatten Fettgehalte von 11,1 % bis 18,3 % i.d.TM, Proteingehalte von 20,2 % bis 28,9 % i.d.TM und Trockenmassen zwischen 17,4 % und 21,1 %. Der Aschegehalt lag zwischen 5,3 % und 8,6 % i.d.TM.

Trotz identischer prozentualer Zusammensetzung zeigten die Replikate der Mischungen der LMR teils signifikante Unterschiede im Nährwertprofil. Dies ist auf die natürliche Heterogenität der angelieferten Reststoffe zurückzuführen, deren Nährstoffgehalte nicht standardisiert sind und chargenabhängig stark schwanken können.

Die aus Kantinenabfällen (KA) hergestellten Futtermischungen zeichneten sich ebenfalls durch eine besonders hohe Inhomogenität aus, die sowohl auf die stark variierende Zusammensetzung der enthaltenen Speisereste als auch auf die fehlende Rückverfolgbarkeit der Einzelkomponenten zurückzuführen ist. KA-Mischungen hatten Fettgehalte von 15,2 % bis 26,8 % i.d.TM, Proteingehalte von 13,8 % bis 29,8 % i.d.TM sowie Trockenmassen zwischen 17 % und 25,2 %.

Futtermischungen mit reinem Bioabfall (BA) wiesen signifikante Schwankungen im Fett- und Proteingehalt auf, mit Werten von 4,3 bzw. 15,7 % Fett und 11,5 % bzw. 27 % i.d.TM-Protein. In beiden Replikaten lagen hohe Aschegehalte bis 31,6 % i.d.TM vor. Der Aschegehalt lag damit bei allen BA-Mischungen deutlich über den Werten der übrigen Futtermischungen, die auf anderen organischen Reststoffen (z. B.

LMR oder KA) basieren.

Aufgrund der insgesamt schlechteren Futterverwertung der reinen BA-Mischungen durch die Larven (siehe Kapitel 4.3) wurden Mischungen aus KA und BA erstellt, wobei der BA-Anteil schrittweise in 10-Prozentschritten mit KA ausgetauscht wurde. Hier zeigte sich insbesondere ein Rückgang des Fettgehalts mit steigendem Anteil an BA, während der Aschegehalt im Gegenzug stark zunahm, was aufgrund der vorherigen Analysen der Reinfractionen zu erwarten war.

Emissionen und Haltbarkeit (TP1.6) wurden durch Gärsäuren sowie TOC und CSB bewertet. Die Viskosität der Mischungen wurde aufgrund methodischer Einschränkungen nicht systematisch gemessen, jedoch wurden qualitative Beobachtungen während der Verarbeitung durchgeführt.

Die Analyse der Gärsäurefraktionen zeigte, dass Essigsäure in allen untersuchten Proben nachweisbar war, mit Konzentrationen von 0,19 bis 2,1 g/kg OS. Hohe Werte lassen auf den Beginn fermentativer Prozesse schließen, vermutlich initiiert durch das Vorhandensein leicht verfügbarer Kohlenhydrate. Die übrigen untersuchten Gärsäuren zeigten ein deutlich geringerer Präsenz: Propionsäure, Valeriansäure sowie iso-Valeriansäure lagen in sämtlichen Proben unterhalb der jeweiligen analytischen Nachweisgrenzen, was auf eine nur begrenzte mikrobiologische Umsetzung in Richtung dieser Fermentationsprodukte hindeutet. Buttersäure sowie n-Caprinsäure wurden ausschließlich in den Proben mit BW-Futtermischung detektiert. In allen anderen Fällen lagen die Konzentrationen dieser Verbindungen unterhalb der Nachweisgrenze. Iso-Buttersäure konnte lediglich in einer Probe aus BW detektiert werden. Diese Muster deuten darauf hin, dass unter den gegebenen Bedingungen keine signifikante Fehlgärung oder mikrobiologisch bedingte Verderbnis stattgefunden hat. Die punktuell erhöhten Gehalte einzelner Gärsäuren – insbesondere in Proben mit BW-haltiger Rezeptur – lassen sich plausibel auf substratspezifische Ausgangsbedingungen zurückführen.

Die Analyse des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) und des organisch gebundenen Kohlenstoffs (TOC) zeigte, dass die Futtermischungen eine hohe Variabilität in beiden Parametern aufweisen. Der TOC-Gehalt variierte von 33,8 % i.d.TM bei 100 % Bioabfällen (BA) bis 52,9 % i.d.TM bei süß- und fetthaltigen Backwaren (BW). Der höchste CSB-Wert wurde in einer LMR-basierten Mischung mit 1700 mg O₂/g gemessen. BA-Proben zeigten niedrigere TOC- und CSB-Werte, was auf einen geringeren organischen Gehalt hinweist und mit den hohen Aschegehalten korreliert. Ein Zusammenhang zwischen TOC und CSB ist erkennbar, wobei höhere Werte eine größere mikrobielle Umsetzbarkeit und ein erhöhtes Risiko für mikrobiellen Verderb unter ungünstigen Lagerbedingungen bedeuten. Durch die hier dargestellten Ergebnisse wurde der **Meilenstein M1** erreicht.

4.2.3 Ergebnisse Pilotierungen (TP1.7) und Konzept für Industrieanlage (TP1.8)

Basierend auf den Laborergebnissen der Larvenmast für die unterschiedlichen Futtermischungen wurden sechs Pilotierungen mit unterschiedlichen Futtermischungen durchgeführt. Die Festlegung der Futtermittelmischungen (**Meilenstein M6**) erfolgte dabei jeweils ca. drei bis vier Wochen vor den Pilotierungsläufen. Die Nährwertanalysen zu den Futtermischungen und den nach der Mast erhaltenen Restsubstraten sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Nährwertverteilung der Futtermittel (FM) und der Restsubstrate (RS) aus den 6 Pilotierungsexperimenten (P#1-P#6).

Futtermittel mischung	Fett [% i.d.TM]	Protein [% i.d.TM]	Faser [% i.d.TM]	NfE [% i.d.TM]	Asche [% i.d.TM]	TM [%]
FM-P#1	3,9	21,0	11,8	49,0	14,3	22,9
RS-P#1	2,0	23,6	21,6	42,3	10,4	58,4
FM-P#2	23,6	19,0	13,9	29,2	14,3	21,6
RS-P#2	23,6	21,1	23,6	9,3	22,4	78,7
FM-P#3	28,7	18,2	15,6	23,8	13,7	19,2

Futtermittel mischung	Fett [% i.d.TM]	Protein [% i.d.TM]	Faser [% i.d.TM]	NfE [% i.d.TM]	Asche [% i.d.TM]	TM [%]
RS-P#3	8,3	17,0	33,7	23,8	17,2	68,7
FM-P#4	22,8	20,8	16,2	23,9	16,4	24,1
RS-P#4	25,8	21,3	27,3	4,6	21,0	74,0
FM-P#5	23,9	24,2	10,9	30,1	10,9	25,3
RS-P#5	24,7	24,9	22,7	14,6	13,0	68,1
FM-P#6	19,5	25,7	6,6	41,2	7,0	21,0
RS-P#6	21,6	22,5	30,8	13,1	12,0	78,0

Aus der Tabelle kann entnommen werden, dass der Gehalt an Fasern in den Restsubstraten durchweg höher als im Futtermittel lag, während die NfE (Kohlenhydrate etc.) niedriger als im Futter waren. Dies lässt auf eine Umsetzung der Kohlenhydrate durch die Larven schließen, während Fasern nicht metabolisiert wurden. Bei Protein- und Fettgehalt zeigen sich keine eindeutigen Differenzen zwischen Futter- und Restsubstrat. Die Trockenmasse der Futtermischungen lag zwischen 19,2 bis 25,3 %. Die Restsubstrate hatten eine stark erhöhte Trockenmasse von 58,4 bis 78,7 %.

Für die geplante Erzeugung von jährlich 1.500 Tonnen Larvenmasse stellt die Entwicklung einer effizienten, hygienisch sicheren und prozessstabilen Fütterungsstrategie einen zentralen Innovationsbaustein des Vorhabens dar (TP1.8). Der technologische Fokus liegt dabei auf der prozessintegrierten Handhabung heterogener organischer Reststoffe, deren variierende Zusammensetzung gezielt in ein standardisiertes, larvengerechtes Futtersubstrat überführt werden muss. Dieser Prozess erfordert ein hohes Maß an technischer Präzision, Rückverfolgbarkeit und Flexibilität, insbesondere im Hinblick auf die dynamischen Eigenschaften biogener Materialien. Ein entsprechendes Konzept ist in Abbildung 3 dargestellt.

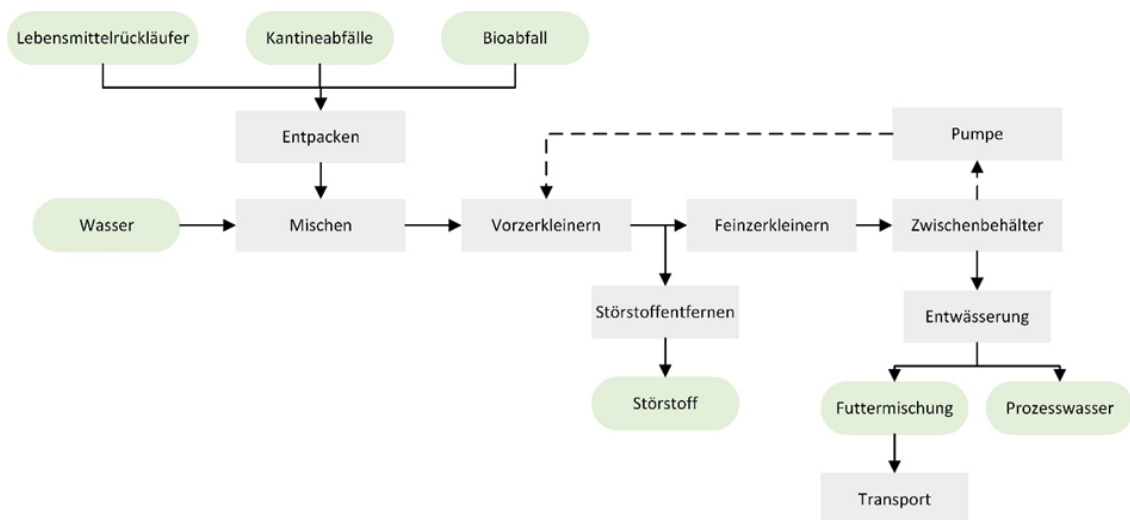


Abbildung 3: Konzept zur Futtermittelaufbereitung für 1.500 t/a getrocknete Larvenbiomasse.

Die Substratanlieferung erfolgt in drei klar getrennten Stoffströmen, die jeweils in separaten, ebenerdig ausgeführten Anliefermulden mit einem Volumen von je 30 m³ bereitgestellt werden. Diese Modularität erlaubt eine differenzierte Behandlung unterschiedlicher Reststoffarten und schafft die Grundlage für eine kontrollierte Prozessführung. Die Entleerung und Überführung der Materialien in die Prozesslinie erfolgt über einen Radlader, der die Stoffströme gezielt und bedarfsgerecht einer zentralen Zerkleinerungseinheit zuführt. Die Trennung der Stoffströme bis zur Zerkleinerung erlaubt eine gezielte Prozesskontrolle, während die integrierte Wiegeeinheit im Trichter der Zerkleinerungseinheit die präzise Erfassung der Inputmengen gewährleistet. Auf diese Weise wird eine belastbare Datengrundlage für die spätere Substratrezeptur geschaffen.

Im Anschluss an die mechanische Aufbereitung erfolgt die Homogenisierung und kontinuierliche Förderung des zerkleinerten Materials durch ein robust ausgelegtes Mehrwellenschneckensystem. Diese technische Lösung stellt nicht nur eine gleichmäßige Materialstruktur sicher, sondern gewährleistet auch die kontinuierliche Versorgung der nachgelagerten Prozesse mit einem definierbaren Substratstrom. Zur gezielten Steuerung der physikalischen Substrateigenschaften ist zudem eine Dosiereinheit integriert, die sowohl Wasser als auch strukturgebende Additive bedarfsgerecht einbringt. Diese Einheiten dienen der Optimierung von Feuchtegehalt und Textur, wodurch die biologische Verwertbarkeit durch die Larven signifikant verbessert wird. Das fertige Substrat wird in standardisierte IBC-Container mit einem Volumen von 1 m³ überführt. Diese mobilen Behälter ermöglichen eine flexible Zwischenlagerung sowie die automatisierte und hygienisch sichere Fütterung. Ein integriertes System zur Viskositätsmessung vor dem Fütterungsprozess dient als Qualitätssicherungsmaßnahme, um die Förderfähigkeit und damit die technische Prozessstabilität abzusichern.

Ein zentrales Element der geplanten Prozesskette ist die Einhaltung einer maximalen Verarbeitungsdauer von 48 h zwischen Anlieferung und Fütterung. Dieses Zeitfenster stellt sicher, dass Nährstoffverluste und mikrobiologische Risiken minimiert werden. Zur Realisierung dieses Anspruchs wird ein just-in-time-basiertes Logistikkonzept verfolgt, das auf einer engen Abstimmung mit den Substratlieferanten beruht. Ziel ist eine möglichst frische und bedarfsgerechte Bereitstellung der Eingangsstoffe bei gleichzeitiger Minimierung von Zwischenlagerungszeiten. Durch diese Strategie wird nicht nur die Substratqualität erhöht, sondern auch eine gleichbleibend hohe Effizienz und Hygiene in der Larvenproduktion sichergestellt.

4.3 Larvenwachstum (AP2)

Im Rahmen des Projektes sollten organischen Restströme und Abfälle hinsichtlich ihrer Nutzung für die Insektenlarvenmast der Schwarzen Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) untersucht werden. Entsprechend ihres Ursprungs lassen sich 3 verschiedene Kategorien an Restströmen aufgliedern: Lebensmittelrückläufer, Kantinenabfälle und Bioabfälle. Die Abfälle aus der Biotonne, sowie die Kantinenabfälle können nicht zugelassene Substrate gemäß der der EU-Gesetzgebung für tierische Nebenprodukte (VO (EG) Nr. 1069/2009) enthalten und fallen damit unter die Kategorie 3 der tierischen Nebenprodukteverordnung. Substrate der Kategorie 3 dürfen nicht an Nutztiere, wie Larven der Schwarzen Soldatenfliege, verfüttert werden. Da eine Trennung dieser Stoffströme in vegetarische und nicht-vegetarische Bestandteile nicht umsetzbar ist, musste für die Untersuchung dieser Stoffströme zunächst die Beantragung einer Genehmigung für die Einsatz von Fisch / Fleisch und Abfällen (Biotonne) als Futtermittelzusatz erfolgen. Dennoch konnte zu Beginn des Projekts mit Untersuchungen von vegetarischen Fraktionen, wie Obst und Gemüse, und zur Insektenmast zugelassenen Lebensmittel, wie Backwaren, Eier und Milchprodukte, gestartet werden. TP1.1 der Bau der Anlage wird gemeinsam mit den anderen Anlagenkomplexen in Kapitel 4.1 dargestellt.

4.3.1 Ergebnisse Lebensmittelrückläufer (TP2.2)

Zunächst sollten die Lebensmittelrückläufer auf ihr Potential als Futtermittel für Larven der Schwarzen Soldatenfliege geprüft werden. Diese Mischungen setzten sich aus den Einzelstoffströmen Backwaren, Gemüse & Obst sowie Molkereiprodukten zusammen. Nach Erteilung der Genehmigung wurden der Stoffstrom Fisch & Fleisch ergänzt. Die 2-Komponenten-Mischungen aus Backwaren (BW) und Gemüse & Obst (GO) setzten sich aus dem Verhältnis von 86 % zu 14 % zusammen. In den Mehr-Komponenten-Mischungen lag der Anteil von Gemüse & Obst bei 68,8 %, während Backwaren 11,2 % ausmachten. Die verbleibenden Anteile von 20 % setzten sich entweder ausschließlich aus Molkereiprodukten (MP) oder Fisch & Fleisch (FF) zusammen oder wurden zu gleichen Teilen (10 %) aus beiden Komponenten zusammengesetzt. Die Zusammensetzung der Einzelstoffströme basierte auf den tatsächlich anfallenden Mengen der Lebensmittelrückläufer. Um eine optimale Konsistenz und einen geeigneten Trockenmassegehalt der Futtermischung zu gewährleisten, wurden diese Vorgaben im niedrigen Prozentbereich auf die genannten Werte angepasst. Die hergestellten Futtermischungen sind charakterisiert

durch eine flüssige Konsistenz ohne die Bildung von freiem Wasser auf der Oberfläche des Futters, welches zum Ertrinken der zugegebenen Junglarven führen könnte. Eine flüssige Konsistenz sorgte für eine kontinuierliche Futteraufnahme und -verwertung während des gesamten Larvenwachstums bis zur Abtrocknung des Restsubstrates. Sobald das Restsubstrat eine trockene und sandige Konsistenz erreicht hatte, kann eine Abtrennung der Larvenfraktion von der Restsubstratfraktion über ein Sieb erfolgen (Ergebnisse siehe Kap. 4.4) Für die Abtrennung wurde die Maschenweite so gewählt, sodass die Larven auf dem Sieb verbleiben und das Restsubstrat das Sieb passiert und somit abgetrennt wird.

Während der Fütterung der BW/GO und BW/GO/MP/FF Mischungen wurde die Bildung von larvengroßen Futter- und Restsubstratagglomeraten beobachtet, die zu einer Verunreinigung der Larvenfraktion führte (Abbildung 4, oben, links und Mitte). Die Verunreinigung nach Fütterung der BW/GO Mischung lag bei 13,3 % und erhöhte sich bei der fisch- und fleischhaltigen Mischung auf 45,7 %. Diese Verklumpungen sollten aus Qualitätsgründen möglichst vermieden werden. Zudem steht das verklumpte Futter den Larven nicht mehr als Nahrungsquelle zur Verfügung und führt zu einer reduzierten Futterverwertung und Larvenausbeute. Der Zusatz eines Additivs in einer Konzentration von 3 % zur Futtermischung führte zu einer deutlichen Reduktion der Futterverklumpungen. Infolgedessen konnte das Additiv die Verunreinigung ersichtlich auf 0,4 % bei der BW/GO Mischung und auf 2,9 % bei der BW/GO/MP/FF Mischung reduzieren (Abbildung 4, unten, links und Mitte). Die noch verbleibenden Verunreinigungen setzten sich hauptsächlich aus Larvenhäuten und Überresten von Obst- und Gemüsehäuten zusammen, welche im Produktionsprozess durch Windsichten von der Larvenfraktion abgetrennt werden könnten. Die Zugabe des Additivs hatte die Bildung von Futter- und Restsubstratagglomeraten erfolgreich verhindert. Dadurch blieb das Futter für die Larven zugänglich und verwertbar und stand für die Umwandlung in Biomasse zur Verfügung. Dies zeigte sich durch einen deutlichen Anstieg der geernteten Larven und einer verbesserten Futterverwertung bei Zugabe des Additivs im Vergleich zur Kontrolle (Abbildung 4, rechts). Mit dem Zusatz des Additivs konnte die Larvenmasse aus der BW/GO Mischung von 1343 g auf 1531 g gesteigert werden, eine Zunahme von ca. 14 %. In der BW/GO/MP/FF Mischung konnte die Masse von 1013 g auf 1822 g erhöht werden, was einer relativen Verbesserung von 79,8 % entspricht.

Eine höhere Larvenmasse und verbesserte Futterverwertung bei gleichbleibendem Futtereinsatz bringen sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Vorteile mit sich. Folglich wurde das Additiv dauerhaft in die Futtermischungen integriert, um Verklumpungen zu vermeiden und das volle Leistungspotential der zu untersuchenden Futtermischungen zu analysieren.

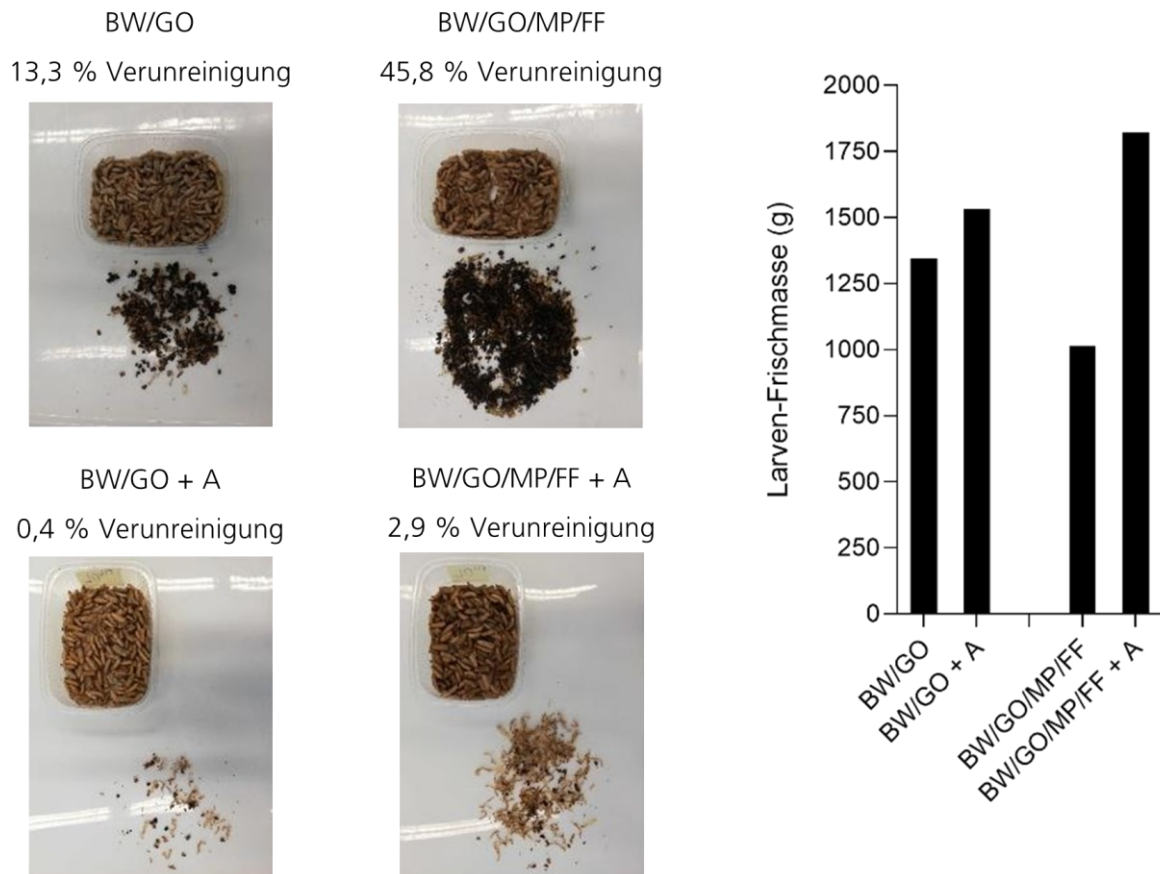


Abbildung 4: Vergleich der Larvenfütterung mit und ohne Additivzugabe. (Bilder 1-4 links) Verunreinigungsgrad der unterschiedlichen Futtermischungen. (Diagramm rechts) Larven-Frischmasse aus den unterschiedlichen Futtermischungen. A – Additiv

Bei der Analyse der Zwei- und Mehr-Komponenten-Mischungen mit Additivzugabe wurden 3 biologische Replikate bestehend aus jeweils 3 technischen Replikaten im 10 kg Maßstab untersucht. Die erhaltenen Larven nach Ende der Fütterung mit der GO/BW Mischung zeigten das geringste durchschnittliche Einzellarvengewicht von $71,4 \pm 4,9$ mg (Abbildung 5, links). Die Beimischung von Molkereiprodukten (BW/GO/MP) führte zu einem Einzellarvengewicht von $79,7 \pm 4,9$ mg. Die höchsten Einzellarvengewichte erzielten Larven aus den Fütterungen der BW/GO/FF und BW/GO/MP/FF Mischungen mit jeweils $101,8 \pm 2,6$ mg und $96,2 \pm 7,3$ mg. Die Ergänzung der vegetarischen Futtermischung mit tierischem Protein aus Molkereiprodukten und Fisch & Fleisch führte zu einem deutlichen Anstieg des Einzellarvengewichts. Der ausgeprägte Standardfehler der drei biologischen Replikate lässt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf schwankende Zusammensetzungen der anfallenden Rückläufer bei den Abholungen und saisonale Variabilität zurückzuführen.

Bei der Auswertung der geernteten Larvenmassen wurde die geringste Frischmasse mit den BW/GO Mischungen mit 1473 ± 136 g erreicht (Abbildung 5, Mitte). Die Zugabe tierischer Proteine durch Molkereiprodukte führte zu einer leicht erhöhten, jedoch nicht signifikant höheren Larvenfrischmasse von 1681 ± 75 g gegenüber der vegetarischen Futtermischung. Die Beimischung von Fisch & Fleisch steigerte die Larvenfrischmasse auf 2046 ± 80 g, während die Kombination beider Stoffströme zu einer Larvenmasse von 2043 ± 128 g führte. Die Zugabe von Fisch & Fleisch einzeln oder in Kombination mit Molkereiprodukten führte zu einer signifikant höheren Masse im Vergleich zur vegetarischen Futtermischung.

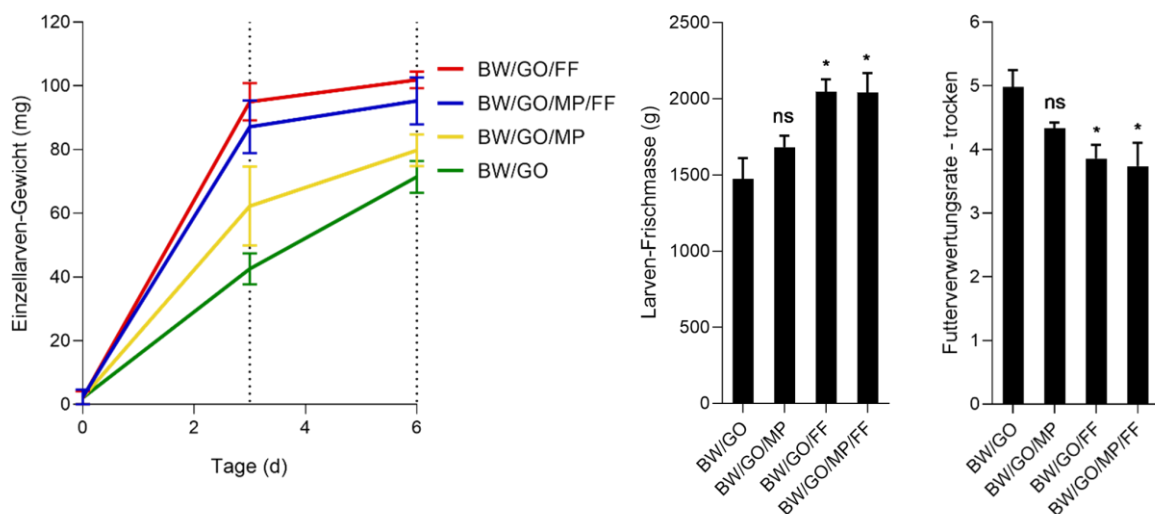


Abbildung 5: Auswertung der Lebensmittlrückläufer-Mischungen. Dargestellt ist das Larvenwachstum (Links), die geernteten frische Larven-Biomasse (Mitte) sowie die Futterverwertungsrate (Rechts) von 3 unabhängigen Fütterungen, mit jeweils 3 technischen Replikaten. Die Fehlerbalken stellen den Mittelwert $\pm$ SEM dar; one-way ANOVA Dunnett-Test; ns = nicht signifikant, * = $p < 0.033$.

Die verschiedenen Mischungen wurden mittels Futterverwertungsrate (FCR) miteinander verglichen (Abbildung 5, rechts), welche das Verhältnis der aufgenommenen Trockenmasse des Futters zur erzeugten Trockenmasse an tierischer Biomasse beschreibt. Die verfütterte Trockenmasse wird dabei durch die Zunahme an tierischer Trockenmasse geteilt. Ein niedriger FCR-Wert weist auf eine effiziente Futterverwertung hin und bedeutet, dass mit weniger Futter dieselbe Menge an Biomasse erzeugt werden kann.

Die Fütterung der BW/GO Mischungen erzielte die geringste Futterverwertungsrate von $4,9 \pm 0,2$, gefolgt von den BW/GO/MP Mischungen mit $4,3 \pm 0,09$ und den BW/GO/FF Mischungen mit $3,8 \pm 0,2$. Die höchste Futterverwertungsrate erzielten die BW/GO/MP/FF Mischungen mit $3,7 \pm 0,3$. Im direkten Vergleich der Substratmischungen konnte eine signifikant höhere Futterverwertungsrate in den Varianten festgestellt werden, die den Stoffstrom Fisch & Fleisch enthielten, sowohl bei isolierter Zugabe als auch in Kombination, verglichen mit der vegetarischen Mischung BW/GO.

4.3.2 Ergebnisse Kantinenabfälle (TP2.2)

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde der Reststrom der Kantinenabfälle detailliert im Labormaßstab untersucht. Die zur Verfügung gestellten Abfälle wurden in dem angelieferten Zustand entsprechend zerkleinert und erzielten ohne weitere Anpassungen die optimale Trockenmasse und Konsistenz zur Verfütterung an die Larven der Schwarzen Soldatenfliege.

Für die Bewertung des Reststroms Kantinenabfall wurden 3 biologische Replikate bestehend aus jeweils 3 technischen Replikaten im 10 kg Maßstab untersucht. Die Auswertung des Larvenwachstums ergab ein durchschnittliches Einzellarvengewicht von $95,3 \pm 3,7$ mg, das sowohl im Wachstumsverlauf als auch in der Gewichtsentwicklung den Larven aus der Fütterung mit den BW/GO/MP/FF Mischungen vergleichbar ist (Abbildung 6, links). Die durchschnittliche Larvenmasse aus den Fütterungen der Kantinenabfälle lag bei 2043 ± 168 g und führte zu einer vergleichbaren Frischmasse gegenüber der fisch- und fleischhaltigen Lebensmittlrückläufer Mischungen (Abbildung 6, Mitte). Dabei wurden signifikante Unterschiede in der Larvenmasse im Vergleich zu den BW/GO Mischungen festgestellt. Trotz der hohen Variabilität der Larvenmasse, die sich in einem ausgeprägten Standardfehler innerhalb der drei biologischen Replikate widerspiegelt, weist die Futterverwertungsrate mit einem Wert von $3,56 \pm 0,06$ einen geringen

Standardfehler auf (Abbildung 6, rechts). Insgesamt zeigten die Ergebnisse, dass die Kantinenabfall-Mischungen hinsichtlich der Larvenmasse und der Futterverwertung vergleichbare Ergebnisse erzielten wie die fisch- und fleischhaltigen Lebensmittlrückläufer-Mischungen unabhängig davon, ob diese einzeln oder kombiniert eingesetzt wurden.

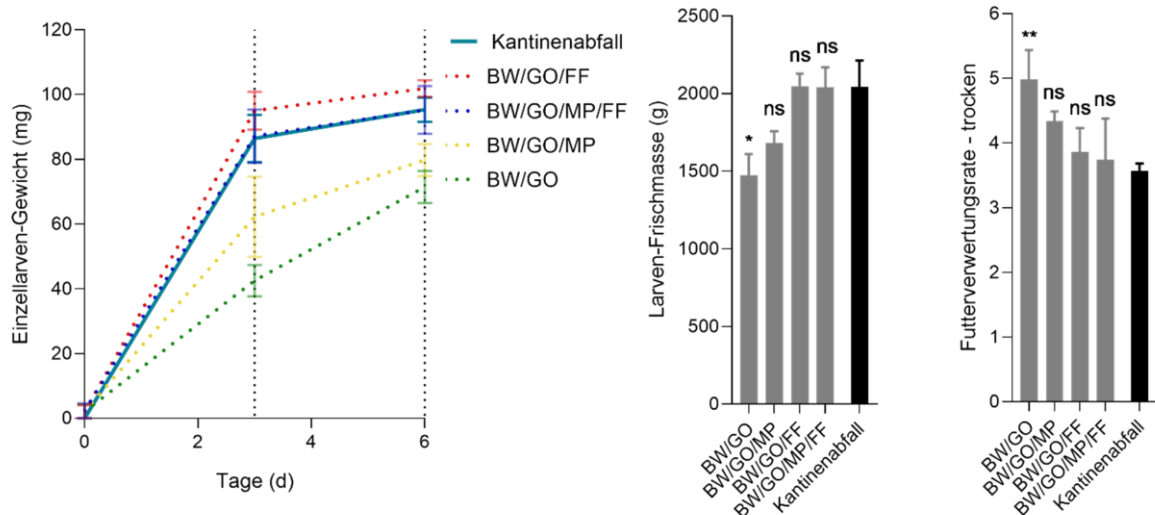


Abbildung 6: Auswertung der Kantinenabfall-Mischungen. Dargestellt ist das Larvenwachstum (Links), die geernteten frische Larven-Biomasse (Mitte) sowie die Futterverwertungsrate (Rechts) von drei unabhängigen Fütterungen, mit jeweils drei technischen Replikaten. Die Fehlerbalken stellen den Mittelwert $\pm$ SEM dar; one-way ANOVA Dunnett-Test; ns = nicht signifikant, * = $p < 0.033$, ** = $p < 0.002$.

4.3.3 Ergebnisse Bioabfall (TP2.2)

Der abschließend zu analysierende Reststrom waren die Reststoffe aus der Biotonne. Die Herstellung von Futtermischungen aus diesem Reststrom gestalteten sich als äußerst herausfordernd, da die angewandte Zerkleinerungsverfahren Schwierigkeiten hatte, die in hohen Maßen enthaltenen Fasern ausreichend zu fragmentieren.

Aufgrund der geringen Wasserhaltekapazität dieses Reststromes wurde die Futtermischung mit einem höherem Trockenmassegehalt hergestellt, um die Bildung einer wässrigen Phase zu vermeiden und ein Ertrinken der Larven zu verhindern. Abgesehen von der eingeschränkten Pumpfähigkeit und festen Konsistenz zeigten die Larven eine gute Akzeptanz der Futtermischung.

Für die Einschätzung des Reststroms Bioabfall wurden 2 biologische Replikate im 10 kg Maßstab untersucht. Dabei bestand das erste aus drei technischen Replikaten, während die zweite lediglich ein technisches Replikat umfasste. Im Verlauf der Fütterung erzielten die Larven ein durchschnittliches Einzellarvengewicht von $38,7 \pm 2,4$ mg (Abbildung 7, links). Während bei den Futtermischungen aus Lebensmittlrückläufern und Kantinenabfällen eine deutliche Volumenreduktion zu beobachten war, blieb das Substratvolumen über den Fütterungszeitraum von Bioabfall weitgehend konstant. Das daraus resultierende erhöhte Restsubstratvolumen führte zu einer Verlängerung der Fütterungsdauer von einem Tag. Die anschließende Ernte führte mit einer Ausbeute von 859 ± 29 g zu einer signifikanten geringeren Larven-Biomasse gegenüber den anderen Restströmen (Abbildung 7, Mitte). Die Futterverwertungsrate weist mit $14,0 \pm 2,9$ einen hohen Standardfehler auf, was auf erhebliche Schwankungen in der Trockenmasse der geernteten Larven zurückzuführen ist (Abbildung 7, rechts). Diese Variabilität lässt sich vermutlich durch eine geringe Nährstoffverfügbarkeit des eingesetzten Bioabfalls erklären, welche eine ineffizientere Substratumsetzung zur Folge hat. Infolgedessen ist gegenüber den anderen Restströmen ein bis zu 3,6-fach höherer Substrateinsatz erforderlich, um eine vergleichbare Menge an Insektentrockenmasse zu erzeugen.

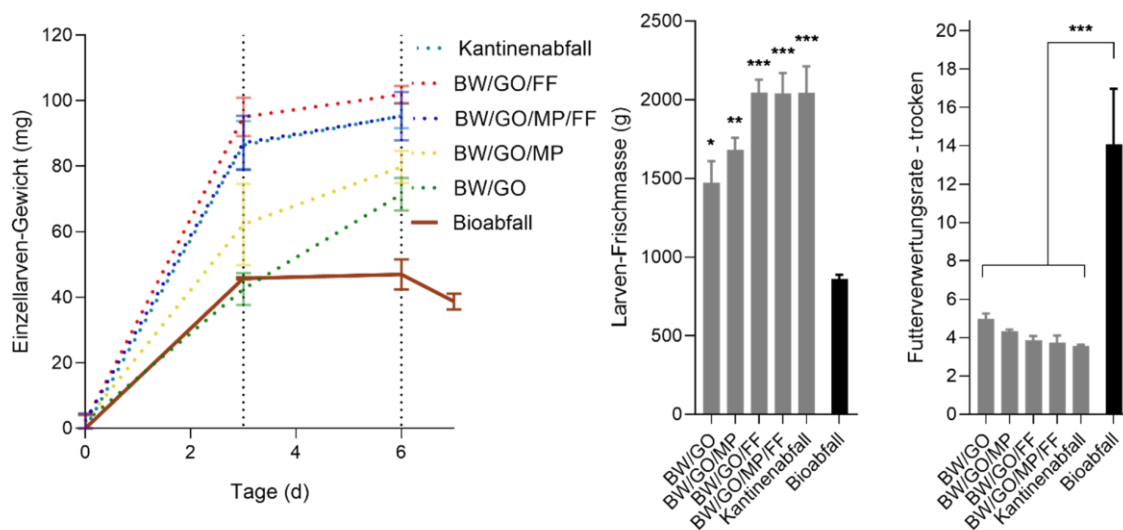


Abbildung 7: Auswertung der Bioabfall-Mischungen. Dargestellt ist das Larvenwachstum (Links), die geernteten frische Larven-Biomasse (Mitte) sowie die Futterverwertungsrate (Rechts) von zwei unabhängigen Fütterungen, mit jeweils drei technischen Replikaten. Die Fehlerbalken stellen den Mittelwert $\pm$ SEM dar; one-way ANOVA Dunnett-Test; * = $p < 0.033$, ** = $p < 0.002$, *** = $p < 0.001$.

Aufgrund der geringen Futterverwertung der Reststoffe aus der Biotonne sowie der herausfordernden Zerkleinerung und der unzureichenden Pumpfähigkeit, sollte dieser Reststrom mit einem effizienteren und prozesskompatiblen Reststrom substituiert werden. Die bisherigen Ergebnisse zeigten, dass der Reststoff aus Kantinenabfällen eine sehr effiziente Futterverwertungsrate aufweist und in allen drei biologischen Replikaten mit einem geringen Standardfehler konsistente Ergebnisse lieferte. Basierend darauf wurde der Reststrom Bioabfall schrittweise in 10-Prozentschritten mit dem Reststrom Kantinenabfall substituiert.

Die Wachstumsverläufe der Larven zeigten deutliche Unterschiede in Abhängigkeit des jeweiligen Bioabfallgehaltes in den Futtermischungen (Abbildung 8, links). Das höchste durchschnittliche Larvengewicht sowie Trockenmasseausbeute von jeweils $76,4 \pm 1,7$ mg und 149 ± 3 g wurde nach der Fütterung der 0 % Bioabfall-Mischung erreicht, die vollständig aus Kantinenabfall bestand (Abbildung 8, rechts). Mit steigenden Bioabfallanteil im Substrat zeigte sich ein klarer Rückgang im Larvenwachstum. Das geringste Larvenwachstum wurde bei der 100 % Bioabfall-Mischung erzielt, mit einem Larvengewicht von $46,5 \pm 1,0$ mg und einer Trockenmasseausbeute von $68,5 \pm 0,7$ g.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass ein hoher Anteil von Bioabfall im Substrat das Larvenwachstum und die Biomassebildung deutlich negativ beeinflusst. Bis zu einem Anteil von etwa 30 % Bioabfall ist jedoch eine relativ stabile Entwicklung zu beobachten. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass Bioabfall in begrenztem Umfang als Substratbestandteil einsetzbar ist, ohne die biologische Leistungsfähigkeit der Larven maßgeblich zu beeinträchtigen.

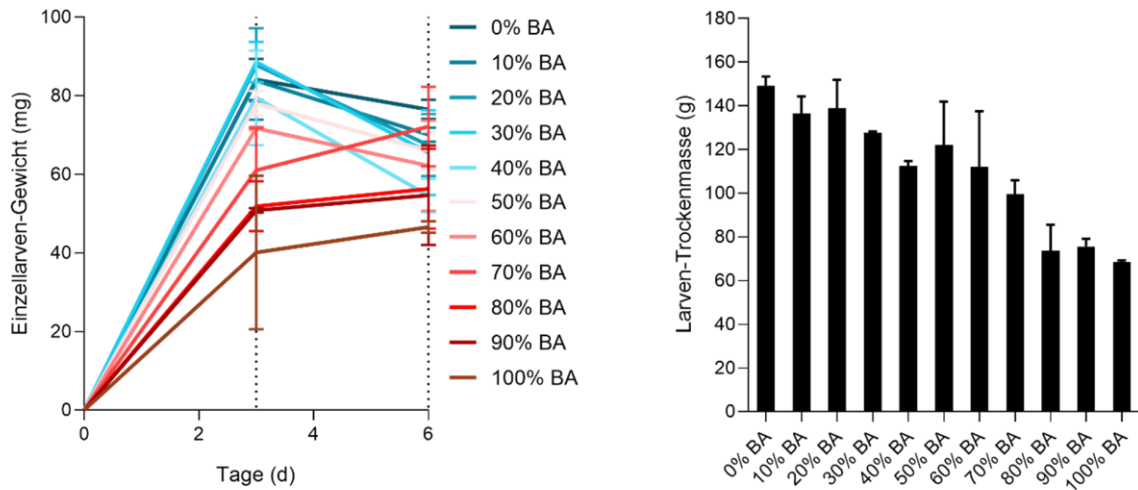


Abbildung 8: Auswertung der Bioabfall-Kantinenabfall-Kombinationsmischungen. Dargestellt ist das Larvenwachstum (Links), die geernteten trockene Larven-Biomasse (Rechts) von zwei unabhängigen Fütterungen, mit jeweils einem technischen Replikat im zwei kg Maßstab. Die Fehlerbalken stellen den Mittelwert $\pm$ SD dar.

4.3.4 Zusammenfassende Bewertungen mit Emissionsmessungen im Labormaßstab (TP2.2 und TP2.3)

In den Kapiteln 4.2.1-4.2.3 wurden alle Laborexperimente zur Fütterung mit **Meilenstein M4** erfolgreich abgeschlossen. Zur Bewertung des Einflusses der verschiedenen Restströme und Zusammensetzungen von Restströmen auf das Larvenwachstum wurden die Ergebnisse der Fütterungsversuche weiterführend ausgewertet. Mit Hilfe einer Korrelationsanalyse sollten potenzielle Zusammenhänge zwischen substratspezifischen Parametern und der erzielten Ausbeute identifiziert und eine mögliche Vorhersage der Ausbeute auf Basis von Substratanalysen ermöglicht werden.

Die Korrelationsanalyse zeigt einen signifikanten positiven Zusammenhang zwischen dem Rohfettgehalt in der Futtermischung und der resultierenden Larven-Trockenmasse (Abbildung 9, links). Dies weist darauf hin, dass höhere Rohfettgehalte im Futtersubstrat mit einer erhöhten Biomassebildung der Larven einhergehen. Im Gegensatz dazu konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Proteingehalt der Futtermischungen und der Larvenausbeute festgestellt werden.

Zur Bewertung der potenziellen Umweltauswirkungen wurden im Verlauf der Fütterungen die CO_2 - und NH_3 -Emissionen kontinuierlich gemessen. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den getesteten Futtermischungen (Abbildung 9, rechts). Während die CO_2 -Emissionen in allen Fütterungsvarianten zyklische Schwankungen aufwiesen, traten bei den Futtermischungen mit tierischen Bestandteilen höhere Emissionswerte auf. Die NH_3 -Emissionen traten erst nach einer Fütterungszeit von 4 Tagen auf. Die verzögerten NH_3 -Emissionen könnten durch den zeitlich versetzten Abbau stickstoffreicher Substratbestandteile sowie durch den Aufbau mikrobieller Aktivität und steigenden Larvenmetabolismus zu erklären sein.

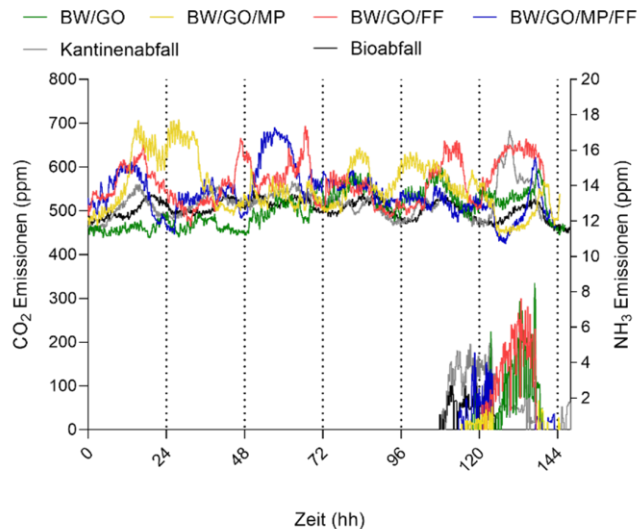
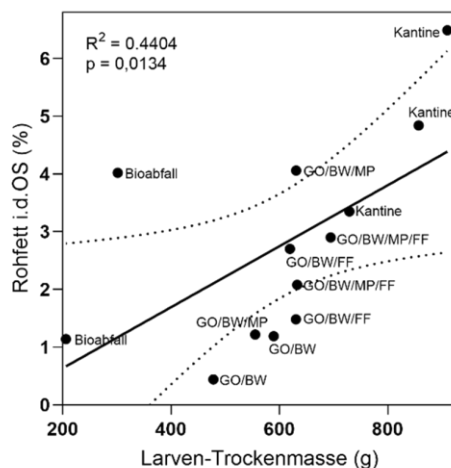


Abbildung 9: Korrelationsanalyse und Auswertung der Emissionsmessungen der Labormischungen. (Links) Korrelation zwischen gebildeter Larven-Trockenmasse (g) und Rohfett in der Futtermischung (%). Dargestellt ist die Regressionsgerade mit Konfidenzintervallen. Two-tailed Pearsons Korrelationsanalyse. (Rechts) Emissionen an CO₂ und NH₃ während der Fütterungen mit verschiedenen Mischungen. *Ergebnisse Pilotierungen (TP2.2) und Emissionsmessungen (TP2.3)*

Die zu testenden Futtermischungen für die Pilotierungsversuche und deren Zusammensetzung wurden basierend auf den Laborergebnisse festgelegt. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse wurde der Reststrom Kantinenabfall für die Pilotierungsphase ausgewählt und in zwei Durchläufen eingehend analysiert. Zudem wurde eine Lebensmittlrückläufermischung, bestehend aus allen vier Komponenten (GO/BW/MP/FF), in die Pilotierungsversuche einbezogen. Diese Mischung erzielte in den Laborversuchen die besten Ergebnisse und entspricht dem realistisch anfallenden Verhältnis der Lebensmittlrückläufer in der Praxis. Der Reststrom Bioabfall wurde hingegen aus prozesstechnischen Gründen und vergleichsweise geringer Ausbeuten lediglich in reduzierten Anteilen von 10 % bzw. 20 % eingesetzt und mit dem Reststrom Kantinenabfall substituiert. Zur Verbesserung der Prozessführung erfolgte eine Zugabe von ~20 % Wasser zu allen Pilotierungsmischungen. Für die Inbetriebnahme der Anlage zur Larvenzucht kam zur Stabilisierung der Prozessparameter zunächst eine standardisierte Mischung aus Basis von Schweinefutter zum Einsatz. Während der Futtermitteldosierung für die Pilotversuche wurden zusätzlich jeweils dreimal 10 kg der eingesetzten Futtermischungen entnommen und im Labormaßstab verfüttert. Ziel dieser begleitenden Laborversuche war es, die Übertragbarkeit der im kleinen Maßstab erzielten Ergebnisse auf größere Versuchsanlagen zu überprüfen.

Die Auswertung der Laborversuche ergab in Bezug auf das Larvenwachstum ein durchschnittliches Einzellarvengewicht von $113,3 \pm 10,1$ mg bei der Mischung aus Lebensmittlrückläufern, $90,5 \pm 8,4$ mg bei Verwendung von reinem Kantinenabfall, $119,8 \pm 18,9$ mg bei der Mischung mit 10 % Bioabfallzusatz sowie $85,6 \pm 1,6$ mg mit 20 % Bioabfallzusatz (Abbildung 25, Anhang). Die höchste Larvenausbeute wurde mit der Mischung Kantinenabfall mit 10 % Bioabfallzusatz erzielt und lag bei 2246 ± 224 g. Im Vergleich dazu fielen die Ausbeuten der übrigen Mischungen mit 1865 ± 114 g bei Lebensmittlrückläufern, 1802 ± 73 g mit Kantinenabfall und 20 % Bioabfallzusatz, sowie 1752 ± 17 g bei reinem Kantinenabfall deutlich geringer aus. Unter Berücksichtigung der Trockenmasse erzielte die Mischung Kantinenabfall mit 10 % Bioabfallzusatz die effizienteste Futtermittelnutzung mit $3,5 \pm 0,3$ (Abbildung 25, Anhang). Die Mischungen Kantinenabfall mit 20 % Bioabfallzusatz ($4,5 \pm 0,1$) und Lebensmittlrückläufer ($4,2 \pm 0,1$) zeigten eine schlechtere Futtermittelnutzung, gefolgt von der Mischung mit reinem Kantinenabfall ($5,5 \pm 0,2$). Somit wurde die erste Skalierungsbewertung mit Meilenstein M9 erfolgreich abgeschlossen.

Die Ergebnisse der Laborversuche zu den Pilotierungs-Futtermischungen bestätigen, dass Bioabfall in

geringen Mengen die Futterverwertung nicht negativ beeinflusst. Darüber hinaus kann Bioabfall sogar als Strukturgeber dienen. Die beobachtete Variabilität der Kantinenabfallmischungen ist mit hoher Wahrscheinlichkeit primär auf die heterogene Zusammensetzung der jeweiligen Lieferungen zurückzuführen, während der Einfluss des zugesetzten Bioabfallanteils als nachrangig einzustufen ist.

In den 6 Pilotversuchen (1.000 kg Maßstab) zeigte die im 10 kg Maßstab erfolgreichste Mischung aus Kantinenabfall mit 10 % Bioabfall zwar das geringste durchschnittliche Larvengewicht ($108,1 \pm 22$ mg), verglichen mit den Mischungen der Lebensmittlrückläufer ($145,8 \pm 23,5$ mg), reinem Kantinenabfall ($135,4 \pm 12,6$ mg und $128,4 \pm 11,5$ mg) sowie Kantinenabfall mit 20 % Bioabfall ($126,9 \pm 17,5$ mg) (Abbildung 10, oben). Dennoch erzielte die Mischung aus Kantinenabfall mit 10 % Bioabfall die höchste Gesamtausbeute von 55 kg und effizienteste Futterverwertungsrate von 4,31 gegenüber allen getesteten Reststrommischungen (Abbildung 10 unten, rechts und links). Die beiden Pilotierungen mit reinem Kantinenabfall wiesen bei einer mittleren Larvenausbeute von $54,5 \pm 9,1$ kg eine hohe Standardfehler auf. Im Gegensatz dazu zeigte die auf die Futtertrockenmasse bezogene Futterverwertungsrate mit $5,05 \pm 0,07$ einen geringen Standardfehler. Sowohl die Mischung aus Lebensmittlrückläufern als auch die Kombination aus Kantinenabfall mit 20 % Bioabfall erzielten mit 48,4 kg und 50,1 kg vergleichbare Larvenausbeuten, mit entsprechenden Futterverwertungsraten von 4,64 und 5,06. Insgesamt zeigten die Fütterungsversuche im 10 kg und im 1.000 kg Maßstab vergleichbare Ergebnisse. Zwar fiel die Futterverwertung im großtechnischen Maßstab tendenziell etwas schlechter aus, dennoch lässt sich eine grundsätzliche Übertragbarkeit der Ergebnisse vom kleinen auf den großen Maßstab ableiten. Dabei ist jedoch zu beachten, dass jede Lieferung von Restströmen individuelle Zusammensetzungen aufweisen kann, was sich entsprechend auf die erzielten Ausbeuten auswirkt. Im Rahmen der 6 Pilotierungen ließ sich keine Korrelation zwischen Larvenmasse und den Gehalten an Rohfett oder -protein in der Futtermischung feststellen. Künftige Forschungsprojekte könnten durch detailliertere Futtermittelanalysen, etwa hinsichtlich des Aminosäurespektrums, weitere Erkenntnisse liefern.

Im Vergleich zu den Reststrommischungen ergab die Fütterung mit der standardisierten Schweinefuttermischung die höchste Larvenausbeute von 61 kg, sowie die effizienteste Futterverwertungsrate von 3,76. Trotz der im Vergleich weniger effizienten Futterverwertung der Restströme zeigt sich jedoch ein deutliches Einsparpotenzial bei den Substratkosten gegenüber kommerziellen und derzeit zugelassenen Futtermitteln in der Insektenmast.

Im Rahmen des InBiRa-Projekts konnte in dem Meilenstein M14 somit erfolgreich gezeigt werden, dass der Einsatz bislang nicht zugelassener Futtersubstrate wie überlagerter Lebensmittel, Speisereste und organischer Abfälle aus kommunalen Biotonnen für die Insektenmast zur Wertschöpfung aus Reststoffen beitragen kann. Die Verwertung dieser Reststoffe ermöglicht nicht nur eine signifikante Reduktion organischer Abfälle, sondern unterstützt auch die Schließung biologischer Stoffkreisläufe. Gleichzeitig eröffnet sie wirtschaftliche Potenziale durch niedrigere Substratkosten im Vergleich zu konventionellen Futtermitteln in der Insektenmast.

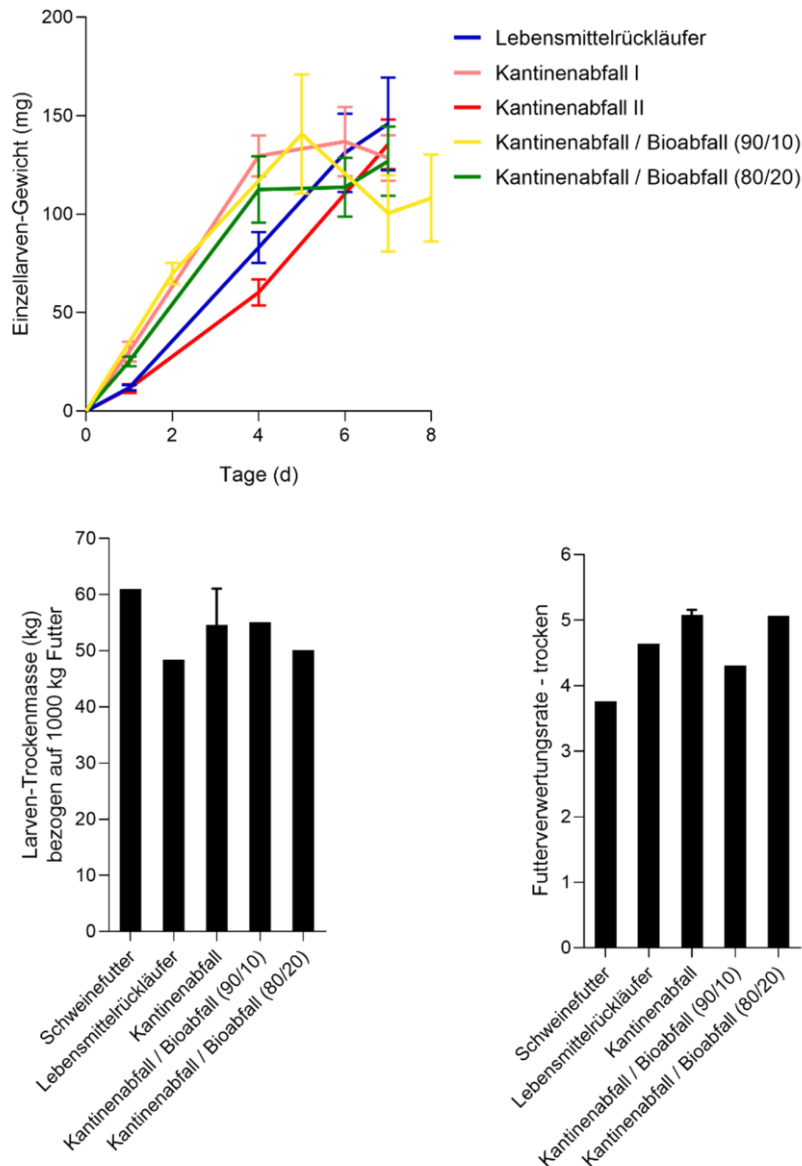


Abbildung 10: Auswertung der Pilotierungs-Fütterungen. Dargestellt ist das Larvenwachstum (Oben), die geernteten getrocknete Larven-Biomasse bezogen auf 1.000 kg Futter (Unten, links) sowie die Futtermittelnverwertung (Unten rechts). Die Fehlerbalken stellen den Mittelwert $\pm$ SD (Oben) und Mittelwert $\pm$ SEM (Unten links, rechts) dar. Bei allen Pilotierungen wurden die Konzentrationen von Kohlendioxid und Ammoniak in der Raumluft über Sensoren im Insektencontainer erfasst. Zur Abschätzung der über einen Versuchszeitraum entstehenden gasförmigen Emissionen im Pilotmaßstab (TP2.3) wurden zusätzlich bei Pilotierungsversuch 6 die Abgaskonzentrationen von Kohlendioxid, Methan, Lachgas und Ammoniak über eine Sonde und angeschlossene FTIR-Spektrometrie im Abgaskamin des Containers erfasst. Trotz der Vorkehrungen zum Schutz des Analysators gab es zwei Ausfälle der Analytik aufgrund zu großen Kondensatmenge. Abgesehen davon konnten die Messungen erfolgreich durchgeführt werden. Eine Einordnung der Relevanz dieser Ergebnisse kann am besten über den Vergleich der Emissionen bei der Verwertung ähnlicher Substrate mit anderen biologischen Verfahren erfolgen. Am naheliegendsten ist ein Vergleich mit der Kompostierung von Bioabfall. Die über den Versuchszeitraum von ca. 180 h aufsummierten Gasmengen bezogen auf die Masse der Futtermischung von 1.185 kg und die in der Literatur (Studie des UBA, UBA-Texte 39/2015) für die Kompostierung genannten, mittleren spezifischen Emissionsfaktoren (EF) sind in Tabelle 5 dargestellt:

Tabelle 5: Vergleich der spezifischen Emissionsfaktoren der relevanten Gase.

Gas	EF Pilotierungsexperiment 6 InBiRa [g/Mg Input]	EF Kompostierung [g/Mg Input]
Lachgas	3,4	91
Methan	3,9	2.600
Ammoniak	86	242

Den wichtigsten Bezug zur Umweltrelevanz der Emissionen liefert dabei die Umrechnung der emittierten Massenströme in Kohlendioxid-Äquivalente unter Berücksichtigung des Global Warming Potentials (GWP) gemäß des 6. Assessment Reports des IPCC [IPCC AR 6, 2020]. Die Emissionen von Kohlendioxid müssen dabei nicht berücksichtigt werden, da dieses bei den verwendeten Substraten und Verfahren konventionsgemäß als klimaneutral zu betrachten ist. Tabelle 6 zeigt den Vergleich der spezifischen Masse an Treibhausgasemissionen.

Tabelle 6: Vergleich der spezifischen Emissionsfaktoren von Treibhausgasen (THG).

EF Pilotierungsexperiment 6 InBiRa [g CO ₂ /Mg Input]	EF Kompostierung [g CO ₂ /Mg Input]
1,6	81.600

Anhand der Daten ist erkennbar, dass die Gasemissionen während des Pilotierungsversuchs nur beim Ammoniak vergleichbare Größenordnungen zur Kompostierung erreichen. In allen anderen Kategorien sind die Gasemissionen der InBiRa vernachlässigbar niedrig und wesentlich geringer als bei der Kompostierung.

4.4 Primärraffination (AP2, AP3) - Siebung (TP2.4), Devitalisierung, (TP2.5) Trocknung (TP2.5), Pressen (TP3.2)

Die Larven wurden nach der Mast zunächst mittels eines Rüttelsiebs (TP2.4) von den Reststoffen, dem sogenannten Frass, abgetrennt. Dabei entstanden drei Fraktionen mit unterschiedlicher Partikelgröße: Die Larvenfraktion, eine Frass-Fein- und eine Frass-Grobfraktion. Anschließend wurden die Larven devitalisiert (TP2.5) und von an den Larven haftenden Verunreinigungen gereinigt. Für die weitere Prozessierung erfolgte die Trocknung der Larven mittels überhitzten Dampfs (engl. *superheated steam*, SHS). Hierbei wurden die Larven in einem am Fraunhofer IGB entwickelten kontinuierlichen Trockner in eine Dampf-Atmosphäre mit über 110 °C geführt (TP2.5). Durch die physikalischen Eigenschaften von überhitztem Wasserdampf erfolgte eine schonende und schnelle Trocknung der Larven unter Sauerstoffausschluss. Aufgrund der höheren Wärmekapazität und niedrigeren Viskosität von Dampf im Vergleich zu heißer Luft konnte die Trocknung energieeffizienter erfolgen. Die getrockneten Larven enthielten nach wie vor wenige Bestandteile des Restsubstrats, die aufgrund von Adhäsion oder ähnlicher Größe während der ersten Siebung nicht abgetrennt wurden. Die getrockneten Komponenten wurden anschließend erneut mittels eines Rüttelsiebs separiert.

Für den finalen Schritt der Primärraffination wurde eine Seiherstab-Schneckenpresse (TP3.2) verwendet, ähnlich wie sie beim Pressen von Ölsaaten wie Sonnenblumenkernen zum Einsatz kommt. Dabei werden die Larven unter mechanischem Druck in eine Rohfettfraktion und den Presskuchen aufgetrennt.

4.4.1 Ergebnisse Labor-/Technikumsmaßstab der Siebung (TP2.4) und Trocknung (TP2.5)

Zur Auslegung der Siebvorrichtung für die Pilotanlage wurden zunächst Larven aus den Fütterungsvorversuchen (siehe Kapitel 4.3) gemeinsam mit dem Frass im Analysesieb gesiebt. Dabei kamen Siebe mit unterschiedlichen Maschenweiten zum Einsatz, um geeignete Abtrennungsgrößen zu ermitteln.

Die Analysesiebung erfolgte mit einer Vibrationssiebmaschine, wodurch eine fraktionierte Verteilung der Mischprobe erzielt wurde. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde festgestellt, dass zwei Siebböden erforderlich sind: ein oberes Sieb mit einer Maschenweite von 10 mm zur Abtrennung grober Bestandteile wie Futteragglomerate und ein unteres Sieb mit 3,5 mm Maschenweite zur Entfernung des feinen Frasses. Die Larven verbleiben dabei zwischen den beiden Sieben, wodurch eine effektive Trennung erreicht wird und die Grundlage für die technische Umsetzung der Siebung in der Pilotanlage geschaffen wurde. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde damit **Meilenstein M5** erreicht. Zur Bestimmung der Parameter des überhitzten Dampftrockners zur effizienten und schonenden Trocknung (TP2.5) der Larven wurden verschiedene Vorversuche mit Larven - welche mit Schweinefutter (Referenzfutter) gefüttert wurden – durchgeführt und die Resultate mit Ergebnissen der konventionellen Heißlufttrocknung der Larven verglichen.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine Trocknung mit überhitztem Wasserdampf innerhalb von 70 min mit dem am IGB vorhandenen Batch-Trockner möglich ist. Bei Temperatur 1 konnte die Zielfeuchtigkeit von unter 5 % bezogen auf die Trockenmasse, erreicht werden (Abbildung 11). **Meilenstein M5** wurde damit erfolgreich für die Trocknung erreicht. Diese wurde vom Hersteller der Seierstabpresse für die nachfolgende Pressung als Zielwert vorgegeben.

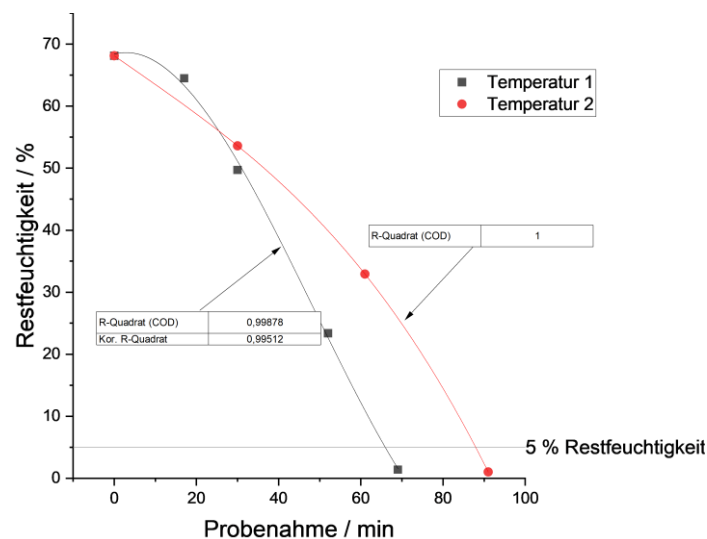


Abbildung 11: Ergebnisse der Vorversuche mit überhitztem Wasserdampf im Batch-Trockner.

4.4.2 Ergebnisse der Pilotierungsversuche der Siebung (TP2.4), Trocknung (TP2.5) und Pressung (TP3.2)

Es wurden Daten der Pilotierungsversuche vom Futtermittel bis zur Primärraffination in Fett bzw. Presskuchen erhoben. Anhand dieser Daten konnten die Massenbilanzen der Primärraffinationsschritte aufgestellt und für eine weitere Skalierung auf eine Industrieanlage herangezogen werden.

Pilotierungsexperiment 1 wurde zur Inbetriebnahme zunächst mit 500 kg Referenzfuttermischung (Schweinefutter) durchgeführt. Für die weiteren Pilotierungsexperimente 2-6 wurden dann jeweils 800 bzw. 1000 kg der neu entwickelten Futtermischungen (Lebensmittelmüll, Kantinenabfälle, Bioabfall und Mischungen) verwendet.

Wie in den Laborexperimenten festgelegt, wurde die Siebanlage mit zwei Siebböden mit drei Trennebenen ausgelegt. Bei der Siebung in TP 2.4 der Larven vom Restsubstrat fiel in der ersten Pilotierung mit Reststoffströmen (Pilotierungsexperiment 2 mit Rückläufern) auf, dass aufgrund der noch nicht optimierten Mastbedingungen der Feuchtigkeitsgehalt im Frass noch zu hoch war. Dieser betrug im Fein-Frass 39 % und im Grob-Frass 63 % (Gewichtetes Mittel: 51 %). Diese hohen Feuchtigkeitswerte führten dazu, dass der Frass während der Siebung agglomerierte, was die Effizienz der Trennung verringerte und dazu führte, dass die gesiebte Larvenfraktions-Gesamttrockenmasse aus 12 % Frass bestand. Es wurde daher in den

nachfolgenden Versuchen auf eine ausreichende Trockenheit des Restsubstrats zum Ende der Mast geachtet. Bei Pilotierungsexperiment 3, 4 und 6 wurde dann auch am Ende der Mast eine Feuchtigkeit des Restsubstrates von 18-26 % erreicht. Dies war niedrig genug, um eine effiziente Abtrennung des Frass zu gewährleisten und damit auch geringe Werte von 1-4 % Frass in der Larvenfraktion zu erzielen. Für Pilotierungsexperiment 5 wurde ein Feuchtigkeitsgehalt von 26 % gemessen. Bei diesen Experimenten kam es zu Agglomerat-Bildung von dem Futtermittel während der Mast, diese konnten nicht erfolgreich abgesiebt werden, wodurch 18 % Frass in den gesiebten Larven verblieb. Dieses Frass sollte dann nochmals abgetrennt werden, wenn diese Larvenfraktion getrocknet war. Damit mussten einige Siebungen erneut nach der Trocknung durchgeführt werden. Hier stellte sich allerdings heraus, dass der Frass mit den Larven Agglomerate gebildet hatte, die nicht mehr abtrennbar waren. Der Frass-Anteil hatte einen signifikanten Einfluss auf die anschließende Pressung und gesamte Prozesskette.

Bei anschließenden Versuchen mit dem kontinuierlichen Trockner (TP2.5) zeigte sich, dass bei Temperatur 2 bei einer Verweilzeit der Larven von 70 min ausreichte, um eine Endfeuchtigkeit von unter 2 % zu erreichen. Diese Parameter wurden somit für die Pilotierungen übernommen. **Meilenstein M10** wurde damit erfolgreich erreicht. Dabei konnten die Larven kontinuierlich bei Temperatur 3, welche eine leicht erhöhte Temperatur 2 darstellt, und einer Verweilzeit von 57 min mit einem Durchsatz von 31 kg Feuchtmasse pro Stunde bis zu einer Endfeuchtigkeit von unter 1 % getrocknet werden.

Beim Trocknen der Larven mittels überhitzten Wasserdampfes wurde allgemein beobachtet, dass die Larvenmorphologie sich stark von den mit dem konventionellem Heißluft-Trocknungsverfahren getrockneten Larven unterscheidet. Diese strukturelle Veränderung der Larven sowie der variierende Frassanteil führten zu einer inhomogenen Schüttdichte der Chargen, die zwischen 350 und 430 kg/m³ schwankten. Durch den erhöhten Frassanteil und inhomogene Schüttdichte wurde die Effizienz der nachfolgenden Fettgewinnung bei der Pressung beeinflusst. Die resultierende ungleichmäßige Verteilung innerhalb der Pressenzuführung könnte eine entscheidende Ursache für die Variabilität des Fettgehalts im Presskuchen sowie der Menge des extrahierten Fetts sein, da die Pressparameter (Temperatur, Pressspalt, Vorschubgeschwindigkeit und Zufuhrgeschwindigkeit) weitestgehend konstant gehalten wurden. Zusätzlich kann es während des Pressvorgangs zu Temperaturschwankungen kommen, da die Temperaturregelung der verwendeten Presse nur eingeschränkt präzise ist und sich das Pressgut durch den Pressdruck noch zusätzlich erwärmte. Um diesen Einfluss zu minimieren, wurden die Larven vor dem Pressen in einem Trockenschrank vortemperiert. Ziel dieser Maßnahme war es, eine möglichst homogene Ausgangstemperatur des Pressguts zu gewährleisten und dadurch potenzielle Variationen in der Fettgewinnung zu reduzieren. Diese Maßnahme wurde ab Batch 4 eingeführt. Allerdings konnte kein signifikanter Unterschied im Restfettgehalt festgestellt werden. Aufgrund der ausgeprägten Batch-zu-Batch Schwankungen ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse nur eingeschränkt möglich.

Die Pressung des Rohfetts konnte bei allen Pilotierungsversuchen grundsätzlich erfolgreich durchgeführt werden. Die gepressten Larven besaßen ein Gesamtfett von 12,5–23,9 kg pro Pilotierungsexperiment. Aus den Larvenmengen ohne Frass, welche zwischen 30,5 kg (Pilotierungsexperiment 1) und 54,1 kg (Pilotierungsexperiment 5) betrugen, konnten zwischen 10,5 kg und 16,5 kg Rohfett gewonnen werden. Dies entspricht einem Fettanteil von ca. 27-32 % bezogen auf die jeweilige Larventrockenmasse. Trotz weitgehend konstanter Pressparameter zeigte sich jedoch eine signifikante Streuung des Restfettgehalts im Presskuchen. Während dieser im Pilotierungsexperiment 1 bei ca. 10 % lag, stieg dieser bei Pilotierungsexperiment 5 auf 24 % an, was bei einem Fettgehalt der Larven von 37 % einer Extraktionseffizienz von 35 % entspricht. Für die nachfolgende Sekundärraffination des Fetts und des Presskuchens standen so genügend Ausgangsmaterial zur Verfügung für die Raffination und chemischen und biotechnischen Umwandlungen in AP3,4 und 5. **Meilenstein M15** wurde somit für die Siebung, Trocknung und Pressung erfolgreich gezeigt.

4.5 Fettraffination (TP3.3) und Konversion (AP4)

4.5.1 Fettraffination – Herstellung verschiedener Fettqualitäten (TP3.3)

Die Raffination des Insektenfettes nach der Pressung diente der Entfernung unerwünschter Begleitstoffe und der Erhöhung der Fettqualität für nachfolgende Anwendungen. Das Rohfett wurde in mehreren Stufen verarbeitet, um Verunreinigungen gezielt zu reduzieren.

Es wurden unterschiedliche Reinheitsstufen des Fettes untersucht, um den minimal erforderlichen Raffinationsgrad für die Weiterverarbeitung zu bestimmen. Ziel war es, möglichst einfache Methoden einzusetzen, um eine wirtschaftliche Nutzung des Insektenfettes zu gewährleisten.

Prozesskette der Fettraffination:

Die Raffination zur Herstellung unterschiedlicher Fettqualitäten aus dem Rohfett umfasst folgende Schritte: Zunächst wurde das gepresste Insektenfett gefiltert um vorhandene Schwebstoffe wie z.B. Exuvien und Frass-Partikel, welche beim Pressvorgang nicht durch die Seiherrstäbe der Presse herausgefiltert werden konnten, zu entfernen. Anschließend erfolgt die Entschleimung durch Kochen mit Wasser [10], um hydratisierbare Phospholipide zu entfernen. Anschließend erfolgte eine Säurebehandlung, um nicht-hydratisierbare Phospholipide abzutrennen.

Die Schleimstoffe wurden dabei nach jedem Prozessschritt durch Zentrifugation entfernt. Weiter wurde das Fett mit vollentsalztem Wasser gewaschen, um säurehaltige Nebenprodukte zu eliminieren. Als letzter Schritt erfolgte eine Trocknung unter vermindertem Druck. Dies reduzierte die Restfeuchtigkeit, erhöhte damit einerseits die Lagerstabilität und bereitete andererseits das Fett auf die FAME-Synthese vor, welche durch Wasser inhibiert wird.

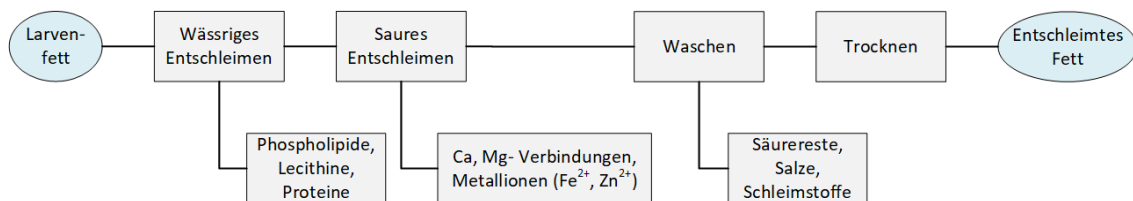


Abbildung 12: Schritte der Fettraffination und erhaltene Nebenprodukte/Reststoffströme.

Die Fettkennzahlen wurden nach jedem Schritt analytisch bestimmt, um den FFA-Gehalt zu ermitteln und die optimale Reaktionsführung für die folgende FAME-Synthese abzuleiten.

4.5.1.1 Ergebnisse Labormaßstab

Für die saure Entschleimung wurde Insektenfett von Larven, die auf Schweinefutter gewachsen sind, im 250 mL-Maßstab untersucht. Dabei wurde unterschiedliche Phosphorsäurekonzentration verwendet, während der Wasseranteil konstant gehalten wurde. Die Behandlungsergebnisse wurden anhand der freien Fettsäurezahl (FFA), der Verseifungszahl (VZ), des Wassergehalts und der Ausbeute bewertet. Die Versuche wurden im Duplikat durchgeführt. Die FFA diente zur Überwachung möglicher Hydrolyseprozesse – ein Anstieg würde auf eine ungewollte Spaltung von Triglyceriden hindeuten. Die FFA, VZ und Iodzahl (IZ) zeigten keine nennenswerten strukturellen Veränderungen der Fettsäurefraktion während der Raffination. Die Peroxidzahl (POZ) wurde zur Erfassung der Lipidoxidation gemessen, zeigte auch hier keinen relevanten Anstieg. Schon ein geringer Gehalt an Phosphorsäure führte bereits zu einer deutlichen optischen Verbesserung durch Entfernung von Schleimstoffen – das Fett war danach klar. Zusätzlich kam es zudem zu einer Reduktion der FFA ohne Einbußen bei der Fettrückgewinnung. Bei Erhöhung der Säuremenge sank die Fettmenge hingegen merklich. Für die Pilotierung wurde daher eine Säuremenge von <1 Gew% als optimaler Wert festgelegt. Der Wassergehalt konnte durch Trocknung unter Vakuum auf unter 150 ppm reduziert werden. Die molare Masse des Fettes, berechnet aus VZ und FFA, stieg zunächst durch Entfernung von Verunreinigungen und stabilisierte sich bei etwa 803 g/mol. Insgesamt konnten durch die Raffination

bis zu 20 % des Rohfetts in Form von Schleimstoffen entfernt werden. Die optimalen Bedingungen und Kriterien der Raffination konnten somit ermittelt und damit **Meilensteine M5 und M10** erfolgreich gezeigt werden.

4.5.1.2 Ergebnisse Pilotierung

Die Erkenntnisse wurden daraufhin gemäß **Meilenstein M15** in den 25-L-Maßstab auf skaliert (siehe Anhang Tabelle 10). Die Entschleimung des Fetts erfolgte direkt nach der Filtration unter Einsatz von Wasser, H_3PO_4 , sowie einem abschließenden 1:1-Wasserschritt. Je nach verwendetem Futtermittel variierten die Massen an abgetrennten Schleimstoffen (bezogen auf die Rohfettmasse) deutlich: Schweinefutter (Pilotierungsexperiment 1): 20 %, Pilotierungsexperiment 4: 39 %, Pilotierungsexperiment 5: 47 %. Pilotierungsexperimente 4 und 5 wiesen zudem den höchsten Restfettanteil von 19 % bzw. 24 % sowie die höchsten Feststoffgehalte im Fett von 14 % bzw. 16 % auf. Im Vergleich dazu zeigte Pilotierungsexperiment 1 hier den geringsten Wert in dieser Kategorie. Nach der Entschleimung war das Fett klar und variierte farblich von bernsteinfarben (Pilotierungsexperiment 1) bis dunkelbraun (Pilotierungsexperiment 5). Die Fettsäurezusammensetzung des entschleimten Fetts unterschied sich je nach Futtermittel deutlich. Pilotierungsexperiment 1, basierend auf Schweinefutter, zeigte mit etwa 60 % den höchsten Laurinsäureanteil (C12:0), gefolgt von Pilotierungsexperiment 3 mit etwa 40 %. Caprinsäure (C10:0) wurde nur in den Experimenten 3 und 4 mit jeweils über 1 % nachgewiesen. Gesättigte Fettsäuren wie Myristinsäure (C14:0) und Palmitinsäure (C16:0) lagen in allen Proben unter 20 %. Hingegen zeigten die Fette aus den Pilotierungsexperimenten 2, 4, 5 und 6 einen hohen Anteil an ungesättigten Fettsäuren (C18:1, C18:2) von rund 45 % (Anhang Abbildung 26).

Auch die physikalischen Eigenschaften des Fetts variierten stark: Der Schmelzpunkt des entschleimten Fetts aus Pilotierungsexperiment 1 zeigte mit 32,2 °C den höchsten Schmelzpunkt, das aus Pilotierungsexperiment 4 mit 18,4 °C den niedrigsten. Insgesamt zeigte sich eine negative Korrelation zwischen Schmelzpunkt und den Anteilen an ungesättigten Fettsäuren.

Die Iodzahl, ein Maß für die Anzahl der Doppelbindungen, war bei Pilotierungsexperiment 1 mit etwa 20 g $I_2/100g$ am niedrigsten und bei Pilotierungsexperiment 4/5 mit Werten von über 63 g $I_2/100g$ am höchsten. Weitere Qualitätsparameter zeigten ebenfalls deutliche Unterschiede. Pilotierungsexperiment 3 wies mit 234 mg KOH/g die höchste Verseifungszahl sowie mit etwa 1 mg KOH/g den niedrigsten Gehalt an freien Fettsäuren (FFA) auf. Dagegen zeigten Pilotierungsexperimente 2 und 5 erhöhte FFA-Werte von bis zu 25,7 mg KOH/g, was auf stärkere Fettzersetzung hinweist. Durch die Raffination konnte in allen Proben eine deutliche Reduktion der Peroxidzahlen erreicht werden, wodurch die Fettqualität und Haltbarkeit zusätzlich verbessert wurde.

4.5.2 FAME (Biodiesel) und Schmierstoffe (Fettsäureester) (TP4.1-4.5)

Durch die Literaturrecherche wurde ein Anforderungskatalog für die eingesetzten Fettqualitäten, Prozessparameter und Produktportfolio erstellt (TP4.1-4.2). Die Fettqualitäten sollten möglichst hoch sein, was durch die Arbeiten in TP3.3 erreicht wurde. Als Produkte wurden Fettsäuremethylester (FAME, Biodiesel) und verschiedene Fettsäureester für die Möglichkeit einer Schmierstoffherstellung ausgewählt.

Eines der Zielprodukte aus dem raffinierten Insektenfett war der Fettsäuremethylester (FAME, Biodiesel). Dabei wurde das aufgereinigte Fett einer Um- und Veresterungsreaktion unterzogen. Je nach Gehalt an freien Fettsäuren mit einer einstufigen basischen Umesterung oder in einer zweistufigen sauren Veresterung und basischen Umesterung. Betrug der Gehalt an freien Fettsäuren weniger als 2 mg/g, wurde eine einstufige basische Umesterung angewendet. Dabei kam es jedoch zur Verseifung der freien Fettsäuren, was verstärktes Schäumen verursachte und als unerwünschte Nebenreaktion galt. Bei Fetten mit einem FFA-Gehalt von über 0,5 Gew% [11] wurde ein zweistufiges Verfahren verwendet. Zunächst wurden die freien Fettsäuren durch eine saure Veresterung in FAME umgesetzt. Anschließend erfolgte die vollständige Umsetzung der Triglyceride in einer basischen Umesterungsreaktion.

4.5.2.1 Ergebnisse Labor- und Technikumsmaßstab (TP 4.3)

In Vorversuchen im 250–1000 mL-Maßstab zur basischen Umesterung von raffiniertem Insektenfett (FFA: 1,3 mg/g) wurde eine optimale Ausbeute von 85 % bei 1 % NaOH, 1:10 Methanolüberschuss, 85 °C und 1 h Reaktionszeit erzielt. Bei Fetten mit >50 mg/g FFA ist eine saure Vorveresterung notwendig, um Seifenbildung zu vermeiden. Auch bei Fetten mit moderatem FFA-Gehalt erwies sich die saure Veresterung im Labor als sinnvoll, da sie die FFA reduzierte und die Aufreinigung erleichterte. Bei höheren FFA-Gehalten (>10 mg/g) zeigten Laborversuche trotz Literatur-gemäßer Umsetzung deutliche Seifenbildung, weshalb eine vorgeschaltete saure Veresterung mit H₂SO₄ durchgeführt wurde, um den FFA-Gehalt zu senken.

Zur Herstellung von Schmierstoffen wurden aus dem FAME sechs verschiedene Polyolester mit Alkoholen und Polyolen verschiedener Kettenlängen und Anzahl an Hydroxylgruppen synthetisiert. Im Gegensatz zum festen Insektenfett zeigten die meisten Polyolester bei Raumtemperatur eine flüssige Konsistenz und eine höhere Viskosität als FAME. Dies verbessert ihre Anwendbarkeit als Schmierstoffe, z. B. in Hydraulik- oder Motorölen. Eine niedrige Erstarrungstemperatur (pour point) ist dabei essenziell, um die Einsatzfähigkeit auch bei niedrigen Umgebungstemperaturen zu gewährleisten. Durch die Polyolestersynthese konnten die Viskositäten gegenüber dem FAME-Ausgangsstoff (2,59 mPas) deutlich gesteigert werden, insbesondere mit mehrwertigen Alkoholen (bis zu 21,5 mPas). Die ein- und zweiwertigen Alkoholester zeigten nur geringe Änderungen. Diese Produkte sind bei Raumtemperatur meist flüssig und weisen verbesserte Fließeigenschaften und reduzierte Erstarrungstemperaturen auf. Damit eignen sie sich potenziell für Schmierstoffe in Hydraulik-, Getriebe- und Motorölanwendungen. Somit wurde **Meilenstein M7** erfolgreich gezeigt.

4.5.2.2 Ergebnisse im Pilotmaßstab (TP4.4-4.5)

Für die Pilotierung im 25-L-Maßstab wurde Herstellung von FAME selektiert und die in den Laborversuchen bestimmten Parameter verwendet. Die raffinierten und getrockneten Fette der Pilotierungsexperimente 4 und 5 wurden einer sauren Veresterung unterzogen, um die FFA zu reduzieren und somit einer Seifenbildung entgegenzuwirken. Dabei gelang es die FFA um mehr als ein Zehntel auf ≤0,44 mg/g zu reduzieren. Die Umesterungen erfolgten jeweils mit 1 Gew% NaOH bezogen auf das eingesetzte raffinierte und getrocknete Fett, einem zehnfachen Methanolüberschuss. Bedingt durch das hohe Volumen der Reaktionsmischung und Reaktordoppelmantels betrug die Gesamtreaktionszeit im Reaktor 3 h, davon 1 h bei 85°C.

Die Bewertung der FAME-Produkte erfolgte gemäß der europäischen Norm EN 14214 (siehe Anhang Tabelle 11). Das aus Pilotierungsexperiment 1 stammende BSFL-Fett (aus mit Schweinefutter gefütterten Larven) wies die höchste Ausbeute von 92 % und Messwerte auf, die im angegebenen Normbereich lagen: FFA 0,06 %, VZ 238 mg KOH/g, IZ 25,8, POZ 0,10 meq O₂/kg, Wassergehalt 290 ppm, Dichte 872 kg/m³ und ein Estergehalt von 97,2 %. Die Viskosität war mit 2,70 mm²/s unter dem geforderten Bereich von 3,5 bis 5,0 mm²/s. Pilotierungsexperimente 4 und 5, basierend auf organischen Abfällen, erzielten geringere Ausbeuten (84 % und 77 %) und höhere FFA-Werte (0,13 % und 0,21 %). Ihre Viskositäten lagen mit 3,44 mm²/s nur wenig unterhalb des geforderten Normbereichs. Diese Unterschiede zur Norm können durch mehrere Faktoren beeinflusst werden, darunter die Qualität und Art der verwendeten Substrate, Fütterungsstrategien, Verarbeitungstechniken, Hydrolysegrade im Rohfett und Lagerbedingungen. Trotz der Unterschiede erfüllten alle Pilotierungsexperimente, mit Ausnahme der Viskosität, die Anforderungen der EN 14214. Daher konnte die Eignung von BSFL-Fett aus verschiedenen Substraten für die FAME-Produktion und damit auch das Erreichen des **Meilensteins M17** bestätigt (siehe Anhang Tabelle 11) werden. Es konnten auch Mustermengen hergestellt werden, die potenziellen Anwendern zur Verfügung gestellt werden können (TP4.5).

4.5.3 Herstellung von Seifen (TP4.1-4.5)

Seifen sind Alkalisalze von Fettsäuren, wobei das eingesetzte Kation – üblicherweise Natrium oder Kalium

– die physikalischen Eigenschaften der resultierenden Seife beeinflusst. Während Natriumseifen tendenziell feste Produkte bilden, sind Kaliumseifen weicher oder flüssig.

Für die Herstellung von Seifen wurde zunächst ein Anforderungs- und Kriterienkatalog erstellt (TP4.1-4.2). Zur Herstellung von Insektenfettseifen wurden aus dem Fett im Labormaßstab (200 g Fett) und aus dem Pilotierungsexperiment 1 (500 g Fett) jeweils drei Seifen mit Kaliumhydroxid (KOH) sowie drei Seifen mit Natriumhydroxid (NaOH) in jeweils unterschiedlichen molaren Verhältnissen synthetisiert. Somit wurden die **Meilensteine M7** und **M17** erfolgreich erreicht. Es konnten auch Mustermengen hergestellt werden, die potenziellen Anwendern zur Verfügung gestellt werden können (TP4.5).

Die experimentellen Ergebnisse zeigten, dass die hergestellten Seifen aus Pilotierungsexperiment 1 je nach verwendeter Base (NaOH oder KOH) unterschiedliche pH-Werte aufwiesen. Die mit Kaliumhydroxid verseiften Proben zeigen im Mittel höhere pH-Werte als die entsprechenden Natriumhydroxid-Seifen. Die gemessenen pH-Werte für die NaOH-Seifen lagen im Bereich von etwa 9,9, während die KOH-Seifen pH-Werte um 10,4 aufwiesen. Ein Einfluss des Fettüberschusses auf den pH-Wert ist innerhalb des untersuchten Bereichs (0–10 % überschüssiges Fett) nicht signifikant ausgeprägt, da die Werte weitgehend konstant blieben. Dies deutete darauf hin, dass der verbleibende nicht verseifte Fettanteil in dieser Konzentration keinen wesentlichen Einfluss auf die Alkalität der Seifenlösung hat.

Die Seifenherstellung aus dem Fett des Pilotierungsexperiments 1 verlief erfolgreich. Sowohl mit Natrium- als auch mit Kaliumhydroxid konnten stabile Seifenprodukte synthetisiert werden. Die unterschiedlichen molaren Ansätze führten zu reproduzierbaren Produkten mit konsistenten pH-Werten im erwarteten Bereich, was auf eine kontrollierte und weitgehend vollständige Verseifung hinweist. Die gemessenen pH-Werte der Produkte nach zweimonatiger Reifung belegen die chemische Stabilität und bestätigen die Eignung sowohl als feste Kernseife (NaOH) als auch als weiche Schmierseife (KOH).

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass der Einfluss eines leichten Fettüberschusses auf den pH-Wert im getesteten Bereich (0–10 %) vernachlässigbar ist, was die Prozessrobustheit unterstreicht. Aufgrund der guten Reproduzierbarkeit und der eindeutigen Produktcharakteristika lässt sich ableiten, dass die entwickelte Methode auch für eine Umsetzung im größeren Maßstab geeignet ist, etwa im Technikums- oder Produktionsmaßstab. Damit stellt die Seifenherstellung aus Insektenfett nicht nur eine vielversprechende stoffliche Verwertungsmöglichkeit dar, sondern bietet auch wirtschaftliches Potenzial für nachhaltige Anwendungen in der Kosmetik oder Reinigung.

4.5.4 Herstellung von biobasierten Epoxiden (TP4.1-4.5)

Für die Herstellung von Epoxiden wurde ein Anforderungs- (TP4.1) und Kriterienkatalog (TP4.2) erstellt. Die Epoxidierung wurde ausgewählt, damit die Doppelbindungen aus den Fettsäuren zunächst in Oxiranringe umgewandelt werden. Zukünftig können diese in späteren Prozessen geöffnet werden, um Polyole oder Epoxidharze (Klebstoffe) herzustellen. Zudem wirken sich Doppelbindungen negativ im Bereich der Schmierstoffe aus (kurze Haltbarkeit), so dass dies eine alternative Nachprozessierung von Schmierstoffen darstellen könnte.

4.5.4.1 Ergebnisse Labor- und Technikumsmaßstab (TP4.3)

Im Laborversuch wurde die chemo-enzymatische Epoxidierung mit drei ausgewählten, vorher raffinierten Fetten aus den Pilotierungen 1, 4 und 5 im 250 mL Maßstab untersucht. Hierzu wurden je ca. 100 g der drei Fette nach einem am IGB etablierten Protokoll mit Ölsäure und Toluol gemischt und anschließend das immobilisierte Enzym (Lipase) sowie Wasserstoffperoxid für die chemo-enzymatische Epoxidierung zugegeben. Während des Prozesses konnte die Iodzahl der Fette signifikant reduziert werden, wobei der höchste Wert von etwa 69,2 g I₂/g auf etwa 2,9 g I₂/g verringert wurde. Zudem wurde die Peroxidzahl der Fette erhöht, mit einem maximalen Anstieg von etwa 3,27 mmol O₂/kg Fett. Das Fett aus Pilotierungsversuch 5 zeigte die höchste Umsetzungsrate von etwa 81 % in Bezug auf die vorhandenen Doppelbindungen. Somit wurde **Meilenstein M7 und M11** erfolgreich gezeigt.

4.5.4.2 Ergebnisse im Pilotmaßstab (TP4.4-4.5)

Zur Übertragung der vorangegangenen Ergebnisse in den Pilotmaßstab wurde das raffinierte Fett aus Pilotierungsexperiment 5 ausgewählt, da hier im Labormaßstab die höchsten Epoxid-Ausbeuten erzielt wurden. Die chemo-enzymatische Epoxidierung wurde nun in einem 1-L Rührkesselreaktor mit Strombrechern durchgeführt. Das immobilisierte Enzym lag hierbei in einem rotierenden Festbettrührer vor und musste somit am Ende der Synthese nicht separat getrennt werden. Das hierbei eingesetzte Insektenfett konnte auf eine Iodzahl von 1,0 g I₂/g reduziert und der Peroxidsauerstoff auf 4,01 mmol O₂ / kg_{Fett} erhöht werden. Dies entspricht einer Umsetzung von 99 % der vorhandenen Doppelbindungen. Somit wurde **Meilenstein M17** erfolgreich gezeigt. Es konnten auch Mustermengen hergestellt werden, die potenziellen Anwendern zur Verfügung gestellt werden können (TP4.5).

4.5.5 Fermentative Herstellung von Biotensiden (TP4.1-4.5)

Die fermentative Herstellung von Biotensiden aus Insektenfett ist eine weitere hochwertige Veredelungsmöglichkeit. Hierbei wird das Fett zusammen mit einem Kulturmedium und den mikrobiellen Zellen in Bioreaktoren zu Biotensiden umgesetzt.

Durch die Literaturrecherche wurde zunächst ein Anforderungskatalog für die eingesetzten Fettqualitäten, Prozessparameter und Produktportfolio erstellt (TP4.1-4.2). Das Fett muss für die Umsetzung zu Biotensiden nicht notwendigerweise hochrein sein. Als Produkt der Wahl wurde Mannosylerythritollipid (MEL), ein Glycolipid-Biotensid, mit Hilfe von Pilzen der Gattung Ustilaginaceae aus dem Fett hergestellt.

4.5.5.1 Ergebnisse Labor- und Technikumsmaßstab (TP4.3)

Zunächst wurden sowohl verschiedene Reinheitsstufen des Insektenfetts als auch Insektenfett resultierend aus unterschiedlichen Futtermischungen im Labormaßstab (1-L Schüttelkolben) untersucht, um anschließend ein repräsentatives Fett für die Pilotierung auswählen zu können. Ziel war es, möglichst das Fett ohne Raffination einsetzen zu können, um den Prozess so einfach und kostengünstig wie möglich zu gestalten.

In einem ersten Laborversuch wurde Insektenfett mit 5 unterschiedlichen Qualitätsstufen, welches aus Referenzfutter hergestellt wurde, eingesetzt. Die Qualitätsstufen waren hierbei wie folgt: (1) Ungefiltertes Rohfett, (2) Gefiltertes Fett, (3) Teilentschleimtes Fett, (4) Vollentschleimtes Fett, (5) Freie Fettsäuren. Beim Vergleich der 5 Qualitätsstufen der Fette für die MEL-Herstellung zeigte sich kein Unterschied. Es wurde daher für den Vergleich der Pilotierungen das mechanisch gepresste, ungefilterte Rohfett verwendet.

In einem zweiten Versuch wurden anschließend die unraffinierten Rohfette aus den ersten fünf Pilotierungen eingesetzt und verglichen. Es war zu sehen, dass im Verlauf der Kultivierung durch die Lipaseaktivität der Mikroorganismen die ursprüngliche Konzentration an Fett bzw. Triglyceriden kontinuierlich abnahm, während immer mehr freie Fettsäuren und in der Folge auch MEL entstanden. Ein Vergleich der erzielten MEL-Konzentrationen am Prozessende für die unterschiedlichen Pilotierungsexperimente und Rapsöl ist in Abbildung 13 dargestellt.

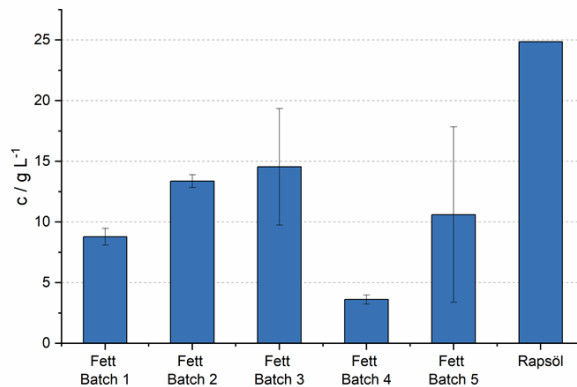


Abbildung 13: Erzielte MEL-Konzentrationen aus Fett der unterschiedlichen Pilotierungsexperimenten im Vergleich zur Referenz Rapsöl.

Es konnte somit erfolgreich gezeigt werden, dass mit allen InBiRa-Fetten MEL produziert wurde. Die Mittelwerte der erzielten Konzentrationen unterschieden sich allerdings. Die insgesamt höchste Konzentration von 24,9 g/L wurde mit der Referenz Rapsöl erzielt. Bei den Insektenfetten erzielten Pilotierungsexperiment 2 und 3 mit 13,4 bzw. 14,5 g/L die höchsten MEL-Konzentrationen, wobei bei Pilotierungsexperiment 3 eine sehr hohe Abweichung im Duplikat vorlag. Die deutlich niedrigste Konzentration erzielte das Fett aus Pilotierungsexperiment 4 mit lediglich 3,6 g/L.

Erklärt werden können die Unterschiede in den MEL-Konzentrationen eventuell durch die unterschiedlichen Zusammensetzungen der Fette. Diese unterscheiden sich sowohl in den Kennzahlen wie Iod-, Säure- und Verseifungszahl, aber auch in der Fettsäurezusammensetzung und ganz allgemein in ihrem Aggregatzustand bei Raumtemperatur, vgl. Ergebnisse in Tabelle 10 (Anhang). Somit wurden die **Meilensteine M7** und **M11** im Hinblick auf die Biotensidproduktion erfolgreich erreicht.

4.5.5.2 Ergebnisse im Pilotmaßstab (TP4.4-4.5)

Basierend auf den Ergebnissen der Laborversuche wurde das Fett aus Pilotierungsexperiment 3 für die Demonstration im begasten Rührkessel-Bioreaktor mit 7,6 L Totalvolumen durchgeführt.

Wie schon im Laborversuch wurde auch im Bioreaktor eine erfolgreiche Hydrolyse des zugegebenen Fetts zu freien Fettsäuren und in der Folge eine Umsetzung zum Biotensid MEL beobachtet (Abbildung 14). Zum Prozessende konnte eine MEL-Konzentration von 40,1 g/L erzielt werden. Die Ausbeute bezogen auf das eingesetzte Fett lag dabei zum Fermentationsende bei 0,27 g/g und die Reinheit des Rohextrakts bei 63 %.

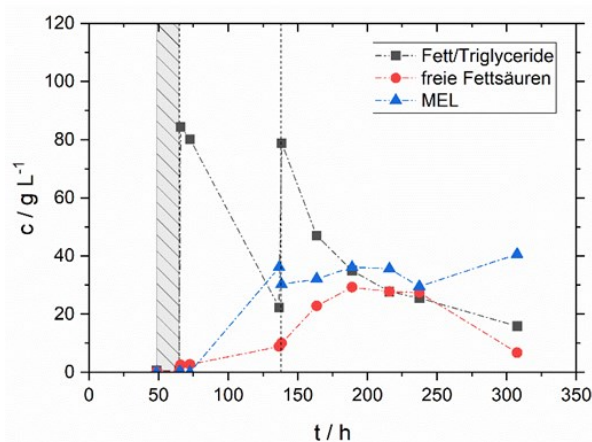


Abbildung 14: Verlauf der Konzentrationen an Triglyceriden, freien Fettsäuren und MEL für die Fermentation mit Fett aus Pilotierungsexperiment 3 im Technikums-Bioreaktor (7-L). Im Bioreaktor erfolgte ein zusätzlicher Mediumsfeed (schraffierter Bereich) von 48-64 h und eine zweifache Ölzugabe nach 65 und 138 h (vertikale Striche).

Die Aufreinigung der Biotenside erfolgte in einem mehrstufigen Verfahren, wobei zunächst die Fermentersuspension durch Mikrofiltration aufkonzentriert wurde, um überschüssiges Wasser zu entfernen. Anschließend wurde die konzentrierte Suspension in einer zweistufigen Flüssig-Flüssig-Extraktion mit organischem Lösemittel extrahiert und das Lösemittel verdampft. Der so erhaltene Rohextrakt kann dann final mittels Adsorptionschromatographie von den verbliebenen Fettsäuren gereinigt werden, wodurch reines MEL erhalten wird. Somit wurde **Meilenstein M17** erfolgreich gezeigt. Es konnten auch Mustermengen hergestellt werden, die potenziellen Anwendern zur Verfügung gestellt werden können (TP4.5).

4.6 Proteinentfettung (TP3.4) und -hydrolyse (AP5)

Durch die Literaturrecherche wurde ein Anforderungskatalog für die eingesetzten Qualitäten, Prozessparameter und Produktportfolio erstellt (TP5.1-5.2). Die Proteinqualität sollten möglichst hoch sein und damit das Fett abgetrennt werden. Als Produkte wurden Proteinhydrolysate ausgewählt, die vielseitig anwendbar sind.

Der Presskuchen wurde nach mechanischer Entfettung in der Presse weiter raffiniert, da die noch vorhandenen Restlipide die nachfolgenden Proteinverarbeitung insbesondere durch die Verseifung mit Natriumhydroxid während der alkalischen Hydrolyse negativ beeinflusst. Um diese Nebenreaktion zu vermeiden, wurde der Presskuchen vor Proteinhydrolyse mit organischen Lösungsmitteln wie Ethylacetat oder Ethanol vollständig entfettet. Dies erfolgte durch eine Fest/Flüssig-Extraktion (TP3.4). Anschließend wurde der vollentfettete Presskuchen der Proteinhydrolyse (TP5.3-5.5) zugeführt. Ziel war es die Proteine nach milder Hydrolyse aufzureinigen und danach die Eignung für technische Anwendungen zu bewerten. Nach der Hydrolyse erfolgt eine mehrstufige Aufarbeitung des hydrolysierten Proteins, bestehend aus Waschen, Reinigen, Entfärben, Entwässern und Trocknen (Abbildung 15). Um die Zusammensetzung des entfetteten Proteins zu charakterisieren, wurde eine Aminosäureanalyse durchgeführt.

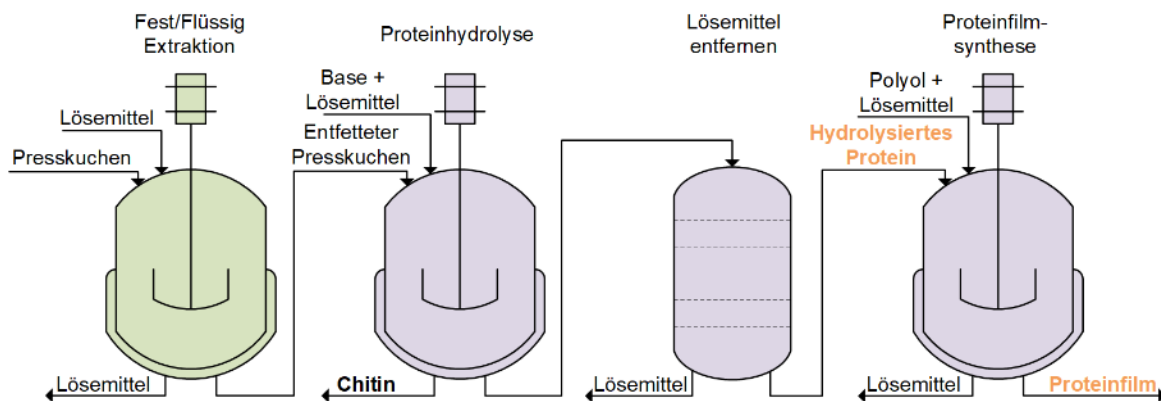


Abbildung 15: Prozessschema der Proteinhydrolyse und nachfolgenden -aufreinigung.

Die Effizienz der Hydrolyse von Insektenprotein hing maßgeblich von den gewählten Prozessparametern ab. Insbesondere das Flottenverhältnis, also das Verhältnis von Lösungsmittel zu Feststoff sowie die Konzentration der eingesetzten Lauge beeinflussen den Grad des Proteinaufschlusses und die Eigenschaften der resultierenden Proteinfraktion.

4.6.1 Ergebnisse Labor- und Technikumsmaßstab (TP5.3)

Zur Entfernung verbliebener Lipidfraktionen im Presskuchen wurde eine Fest-Flüssig Extraktion mittels Soxhlet-Apparatur im 500 mL Maßstab durchgeführt. Dieses Verfahren erlaubt eine kontinuierliche Extraktion von unpolaren Verbindungen aus festen Verbindungen. Hierfür wurden diverse organische Lösemittel (Ethanol, Essigsäureethylester, Hexan und Cyclohexan) verwendet und auf ihre Extraktionseffizienz getestet. *n*-Hexan diente hierbei aufgrund seiner etablierten Verwendung in der

Lipidextraktion und hohen Affinität zu unpolaren Verbindungen als Referenz. Es zeigte sich, dass Essigsäureethylester eine vergleichbare Extraktionsleistung wie *n*-Hexan aufweist. Nach sechs Zyklen konnten 97 % der mit *n*-Hexan extrahierten Menge zurückgewonnen werden, 85 % bei Ethanol und 78 % bei Cyclohexan. Zusätzlich besitzt Essigsäureethylester eine nur gering höhere Verdampfungsenthalpie (360 kJ/kg gegen 334 kJ/kg *n*-Hexan) und Siedepunkt 77 °C (69 °C *n*-Hexan). Ein zusätzlicher Vorteil liegt in seiner Herstellung aus nachwachsenden Rohstoffen, wohingegen *n*-Hexan ein CMR-Stoff petrochemischen Ursprungs ist. Essigsäureethylester stellt somit eine umweltfreundlichere und toxikologisch unbedenklichere Alternative für die Lipidextraktion dar.

Im Anschluss wurde der entfettete Presskuchen einer basischen Hydrolyse unterzogen, um die optimalen Reaktionsparameter für die Proteinfreisetzung zu bestimmen. Die Ergebnisse dieser Versuche im 100 mL Maßstab (Siehe Abbildung 16) zeigten, dass ein Flottenverhältnis von 1:13 eine effiziente Hydrolyse bei gleichzeitig geringem Chemikalieneinsatz ermöglichte, da geringere Flottenverhältnisse nicht in einer höheren Ausbeute resultierten. Bei einem Flottenverhältnis >1:6 konnte die entstandene Suspension nicht mehr gerührt werden. Eine NaOH-Konzentration von 0,5 mol/L erwies sich dabei als ausreichend, um eine effektive Spaltung der Proteine zu gewährleisten, ohne gleichzeitig unerwünschte Nebenreaktionen zu begünstigen. Bei höheren NaOH-Konzentrationen stieg das Risiko einer verstärkten Fragmentierung der Polypeptidketten aufgrund der harschen Reaktionsbedingungen deutlich an, was die klebenden bzw. filmbildenden Eigenschaften des Hydrolysats beeinträchtigen kann. Die im Rahmen dieser Arbeit erzielte Ausbeute von 15 Gew% hydrolysiertem Protein lag im Bereich vergleichbarer Literaturangaben (12–20 %)[12] und stellte einen geeigneten Kompromiss zwischen Effizienz und funktioneller Qualität dar. Besonders bei Anwendungen wie Klebstoffen oder Proteinfilmen ist die Erhaltung mittlerer Peptidketten entscheidend – zu harsche Bedingungen führen zu Fragmentierung und Verlust der technischen Performance.

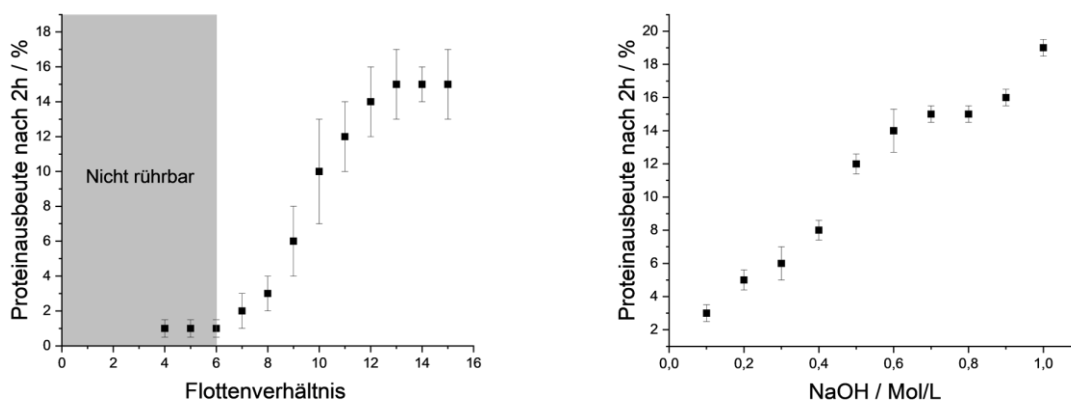


Abbildung 16: Einfluss von Flottenverhältnis und NaOH-Konzentration auf die Effizienz der Proteinhydrolyse bezogen auf die eingesetzte Menge entfettetem und getrockneten Presskuchen.

Zur Aufreinigung wurde der Überstand mit dem Proteinhydrolysat zunächst vom unlöslichen Rückstand abgetrennt und das hydrolysierte Protein anschließend je nach Verwendungszweck unterschiedlich weiter aufgereinigt:

Für **Klebstoffanwendungen** wurde das Protein mit dem vierfachen Volumen an Ethanol versetzt. Das ausgefallene Proteinhydrolysat wurde erneut abzentrifugiert und mit Wasser gewaschen. Die so gewonnene Fraktion wurden hinsichtlich ihrer Klebewirkung untersucht. Hierzu wurden Papierproben miteinander verklebt und die mechanische Stabilität sowie Flexibilität der Klebestellen getestet. Die erzielte Peptidkettenlänge erwies sich als geeignet für Anwendungen wie Papier- und Holzverklebungen. Die Klebefugen konnten, im Fall vom Papierkleber, gebogen werden, ohne aufzubrechen, und ließen sich nur durch Zerstörung des Papiers selbst wieder lösen – ein Hinweis auf die hohe Klebewirkung und Belastbarkeit des Proteinklebers. Genaue Zahlenwerte (z. B. maximale Bruchkraft in N oder MPa) wurden in dieser

Voruntersuchung nicht erhoben, sollen aber im Rahmen weiterführender Materialprüfungen bestimmt werden.

Für die **Herstellung von Proteinfilmen** wurde die Lösung mit Salzsäure auf pH 4,5 eingestellt – ein Bereich, der in der Nähe des isoelektrischen Punkts vieler saurer Aminosäuren liegt. Dies bewirkte eine Neutralisierung der Nettoladung, wodurch das Protein minimale Löslichkeit besaß und ausfiel [14]. Diese Wahl des Fällungspunkts wurde basierend auf der zuvor bestimmten Aminosäurezusammensetzung getroffen. Die Analyse (Abbildung 17) zeigte einen hohen Anteil an Glutaminsäure (~12 %), Asparaginsäure (~10 %), Glycin (~11 %) sowie Alanin (~11 %) – Aminosäuren mit überwiegend saurem oder neutralem Charakter. Daraus ergibt sich ein erwarteter isoelektrischer Bereich von pH 4–5 [13].

Das ausgefallene Hydrolysat wurde erneut abzentrifugiert, mit Wasser gewaschen, getrocknet und mechanisch zerkleinert. Die Trocknung vor der Lösung in NaOH diente dazu, die Fraktion lagerfähig und exakt dosierbar zu machen. Je nach Anwendung wurde das Material mit 3 % Wasserstoffperoxid gebleicht. Das erhaltene hydrolysierte Protein wurde in verdünnter Natronlauge gelöst und zur Herstellung von homogenen Proteinfilmen verwendet. Durch Verdampfen des Lösungsmittels konnten erfolgreich Proteinfilme hergestellt werden. Diese wiesen jedoch bislang eine vergleichsweise geringe Zugfestigkeit auf (Zerbrechen bei leichtem Verbiegen), was ihre Einsatzmöglichkeiten in technischen Anwendungen einschränken kann. Die reduzierte mechanische Stabilität ist auf die Fragmentierung der Proteinstruktur während der Hydrolyse zurückzuführen. Die Zugabe von Glycerin als Additiv verbesserte die Eigenschaften des Films, insbesondere dessen Flexibilität, wodurch die Sprödigkeit deutlich reduziert wurde. Die unterschiedlichen Fällungs- und Aufarbeitungsschritte beeinflussen sowohl die Zusammensetzung als auch die funktionellen Eigenschaften des hydrolysierten BSFL-Proteins. Während die Ethanol-Fällung gezielt für die Herstellung von Klebstoffen geeignet ist, bietet die Fällung am isoelektrischen Punkt einen praktikablen Weg zur Filmproduktion. Die Aufbereitung verlief reproduzierbar, skalierbar und liefert Produkte mit vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten. Mit den Experimenten konnte der **Meilenstein M7 und M11** erfolgreich erreicht werden.

4.6.2 Ergebnisse im Pilotmaßstab (TP5.4-5.5)

Die für die im 50 L Pilotierungsmaßstab benötigten Mengen an entfettetem Presskuchen wurden mit Hilfe einer 5 L Soxhletextraktionseinheit mit Essigsäureethylester gewonnen. Die Hydrolyse im 50 L Reaktor erfolgte zu den in den Vorversuchen bestimmten optimalen Prozessparametern, wurde jedoch bei 45 °C über einen Zeitraum von 3 h durchgeführt. Dabei wurden 2 kg entfetteter und getrockneter Presskuchen in 20 L 0,5 M NaOH für 1 h bei 45 °C gerührt. Dabei konnten bis zu 25 Gew% hydrolysiertes Protein bezogen auf den eingesetzten Presskuchen erhalten werden. Nach Abtrennung der ungelösten Feststoffe wurde das erhaltene Proteinhydrolysat filtriert und unter vermindertem Druck getrocknet.

Mit dem Proteinhydrolysat aus dem 1. Pilotexperiment, bei dem die Larven mit konventionellem Schweinefutter gefüttert wurden, wurde eine Aminosäureanalyse durchgeführt. Da die Analyse extern beauftragt wurde, konnte aus regulatorischen Gründen nur das Hydrolysat des Referenzfutters untersucht werden. Die übrigen Proben basierten auf alternativen Futtermitteln und unterlagen der K3-Klassifizierung, wodurch ein Verlassen des Fraunhofer IGB nicht gestattet war. Das Ergebnis der Aminosäureanalyse ist in Abbildung 17 dargestellt.

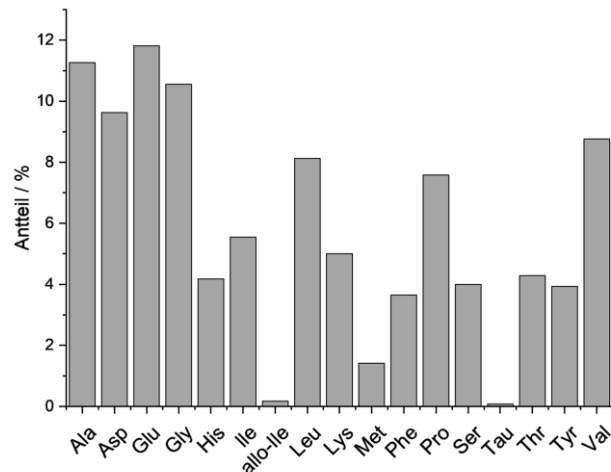


Abbildung 17: Aminosäureprofil des Proteinhydrolysats der auf Schweinefutter gewachsenen Larven.

Das Aminosäureprofil zeigt, dass Glutaminsäure mit 11,8 % die dominierende Komponente im Protein darstellt, gefolgt von Alanin (11,3 %), Glycin (10,6 %) und Asparaginsäure (9,6 %). Diese vier Aminosäuren machen zusammen rund 43 % der Gesamtzusammensetzung aus und sind entscheidend für die Löslichkeit, Wasserbindung und Filmbildung. Weitere relevante Anteile entfallen auf Valin (8,8 %), Prolin (7,6 %), Leucin (8,1 %), und Isoleucin (5,5 %). Insgesamt ergibt sich ein ausgewogenes Verhältnis zwischen hydrophoben (z. B. Leucin, Isoleucin, Valin) und polaren Aminosäuren (z. B. Asparagin-, Glutaminsäure, Serin, Threonin), was sich günstig auf Kohäsion (innere Festigkeit) und Adhäsion (Oberflächenhaftung) auswirken kann.

Die ausgewogene Zusammensetzung legt nahe, dass das hydrolysierte Protein als natürlicher Bioklebstoff geeignet ist, beispielsweise für Anwendungen wie Papierverklebungen, Etiketten (z. B. Flaschen) oder Briefumschläge/Briefmarken, bei denen eine starke, aber flexible und ggf. reversible Bindung gewünscht ist. Erste Anwendungstests zeigten jedoch, dass gezielte Formulierungsanpassungen oder nachträgliche Modifikationen – beispielsweise durch Additive oder Vernetzungsmittel – notwendig sind, um die mechanischen Eigenschaften wie Zugfestigkeit oder Feuchtigkeitsbeständigkeit der Proteinfolien zu verbessern.

Zudem besitzen die gegossenen Proteinfilme von Pilotierungsexperimente 1 und 6 unterschiedliche Sprödigkeit. Während der Film von Pilotierungsexperiment 1 in seiner Bruchfestigkeit gegossenem Zucker ähnelt, weist der Film aus Pilotierungsexperiment 6 eine Flexibilität auf, die ein Verbiegen ohne Bruch ermöglicht.

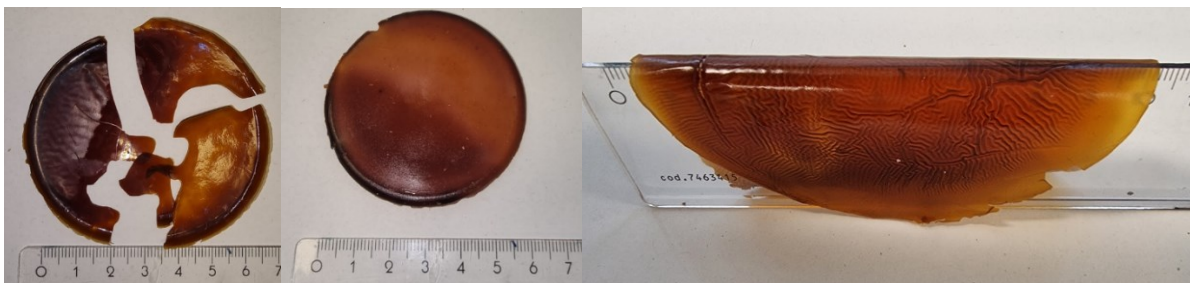


Abbildung 18: Gegossene Proteinfilme von Pilotierungsexperiment Nr. 1 mit 15 % Glycerin (links), Pilotierungsexperiment 6 ohne Additive (Mitte und rechts).

Die bisherigen Ergebnisse bestätigen damit grundsätzlich die technische Eignung des hydrolysierten Insektenproteins für den Einsatz als biobasierter Werkstoff. Besonders im Bereich der Proteinfilme besteht jedoch noch weiterer Entwicklungsbedarf. Denkbar wäre eine potenzielle Nutzung des Proteinhydrolysats beispielsweise als Feuchthaltemittel in kosmetischen Formulierungen, als Proteinfolie (z. B. Mulchfolie) oder

als Bindemittel in Dispersionsfarben und soll in Zukunft näher betrachtet werden. Somit wurde **Meilenstein M17** erfolgreich gezeigt. Es konnten auch Mustermengen hergestellt werden, die potenziellen Anwendern zur Verfügung gestellt werden können (TP5.5).

4.7 Chitinaufreinigung und Chitosanherstellung (TP6.1-6.2)

Die Aufreinigung des Chitins ist ein mehrstufiger Prozess, bei dem verschiedene Kontaminanten entfernt werden. Sinnvoll ist es daher, Ressourcen einzusetzen, welche bereits einen hohen Gehalt an Chitin und damit auch initial einen höheren Reinheitsgrad aufweisen. Ein weiteres Kriterium zur Auswahl einer geeigneten Chitinguelle ist jedoch nicht nur der Chitingehalt an sich, sondern die Gesamtmenge bzw. -masse des Stroms aus dem das Chitin gewonnen werden soll.

4.7.1 Charakterisierung der Rohstoffe (TP6.1)

Zunächst galt es die Reststoffströme zu identifizieren, bei denen eine Chitingewinnung vielversprechend ist. Aus vorhergehenden Untersuchungen bzw. aus der Literatur war bekannt, dass insgesamt vier Reststoffströme der Larvenreproduktion und -mast für eine Chitingewinnung in Frage kommen: 1. Larvenexuvien aus der Reproduktion, 2. Puppenexuvien aus der Reproduktion, 3. Tote adulte Fliegen aus der Reproduktion und 4. Larvenexuvien aus der Larvenmast (im Frass).

Zu einem Vergleich der verschiedenen Reststoffströme hinsichtlich der Chitingewinnung kann vereinfacht das Produkt aus Chitingehalt des Reststoffs und die jeweiligen anfallenden Mengen des Reststoffs betrachtet werden. Die Reststoffströme wurden dazu im Rahmen einer Massenbilanz in Zusammenarbeit mit *Hermetia* quantifiziert. Die Massenbilanz bezieht sich dabei – wie auch in anderen Kapiteln dargestellt – auf die Mast mit 1 Tonne Substrat selbst. Zudem wird auch die vorherige Reproduktion von so vielen Larven betrachtet, die für eine solche Mast benötigt werden. In folgender Abbildung 19 ist die Reproduktionsphase inklusive der Seitenströme, schematisch dargestellt.

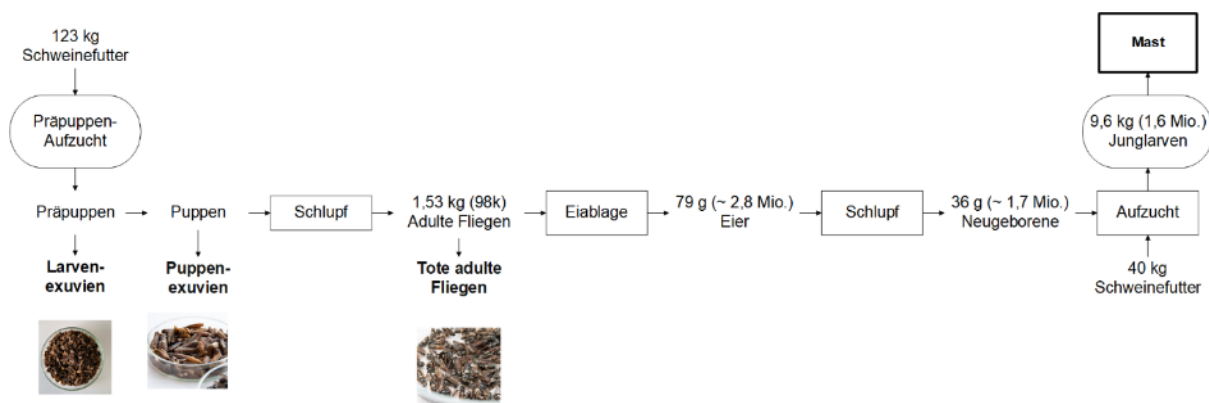


Abbildung 19: Reproduktion der Schwarzen Soldatenfliege inkl. Seitenströme und Massenbilanzierung.

Zunächst werden 123 kg Schweinefutter zur Präpuppenaufzucht eingesetzt. Die Entwicklung in Präpuppen und auch Puppen führt, durch die Häutung der Larven zu den Seitenströmen Larvenexuvien und Puppenexuvien. Nach dem 1. Schlupf resultieren 1,53 kg (98.000) Adulte Fliegen, die 79 g (~2,8 Mio. Eier) legen. Aus Synchronisierungsgründen werden Eier für die Umsetzung von 1 Tonne Substrat in der Larvenmast nur an einem einzigen Tag gesammelt. Da man theoretisch sieben Tage in Folge Eier zur Aufzucht von Junglarven sammeln könnte, würde dies aus auch in einer industriellen Umsetzung angestrebt werden. Dies würde sich zusätzlich positiv auf Ökobilanz und ökonomische Daten auswirken, wurde jedoch hier nicht weiter betrachtet. Nach der Eiablage sterben die adulten Fliegen, die den Seitenstrom „Tote adulte Fliegen“ bilden. Aus den Eiern schlüpfen Neugeborene, die mit 40 kg Schweinefutter zu 9,6 kg Junglarven aufgezogen werden. Diese werden in der Mast zur Verwertung von 1 Tonne Futtermittel eingesetzt.

Dass aus der Larvenmast nur ein Chitin-haltiger Reststoffstrom resultiert, ist dem geschuldet, dass in der Mast nicht der ganze Lebenszyklus durchlaufen wird, sondern lediglich das Wachstum von den Junglarven

zu den älteren Larven.

Die Larvenbiomasse selbst hat noch einen geringen, aber relevanten Anteil an Chitin ($\leq 8\%$). Die Larven werden im Schritt der Separation jedoch nahezu vollständig von dem Frass separiert, so dass im Restsubstrat optimalerweise keine Larven mehr vorhanden sind. Die Fraktionen „Puppenexuvien“ sowie „Tote Adulte Fliegen“ sind hinsichtlich anfallender Trockenmasse gegenüber den Larvenexuvienfraktionen um den Faktor 3,9 bzw. 4,5 erhöht. Von diesem Parameter ausgehend sind dementsprechend auch Puppenexuvien und Tote Adulte Fliegen – auch wenn diese noch weitere Bestandteile in der Fraktion beinhalten – bevorzugte Ressourcen zur Chitingewinnung.

Die Larvenexuvien sind stark homogenisiert bzw. zerkleinert und können derzeit daher nur manuell vom Frass separiert werden, die Entwicklung eines automatisierten Prozesses zur Gewinnung wäre aufwendiger als für die anderen Quellen. Die Larvenexuvien aus der Mast besitzen zudem den Nachteil, dass die 0,35 kg Trockenmasse mit Larven generiert wurden, welche 1 Tonne Futtermittel verwerten sollen. Das heißt: Gegenüber den Larvenexuvien aus der Reproduktion, die aus der Verwertung von 123 kg Futtermittel entstehen, haben die Larvenexuvien aus der Mast eine um den Faktor 8 geringere Massenkonzentration im Restsubstrat.

Eine Verwertung der einzelnen Fraktionen ist jedoch nicht nur von der anfallenden Menge abhängig, sondern auch von dem Chitingehalt an sich. Daher wurde von den einzelnen Fraktionen die Gesamtzusammensetzung bestimmt. In der Annahme, dass sich die chemische Zusammensetzung der Larvenexuvien in Reproduktion und Mast nur geringfügig ändert wurde lediglich die Zusammensetzung der Larvenexuvien resultierend aus der Reproduktion analysiert.

Hierfür wurden jeweils einmal wöchentlich über 10 Wochen hinweg Proben der Seitenströme aus der Reproduktion (Larvenexuvien, Puppenexuvien und tote Fliegen) von *Hermetia* bereit- und dem IGB zur Verfügung gestellt. Als Substrat wurde Schweinefutter verwendet.

Der Chitingehalt ist für Larvenexuvien im Mittel am höchsten, für die Adulten Fliegen am niedrigsten. Der Chitingehalt von den Puppenexuvien liegt dazwischen. In Kombination mit der Gesamtmasse, die aus der Reproduktion entsteht, sind Puppenexuvien die für eine Chitinextraktion geeignetste Biomasse. Da auch Adulte Fliegen eine – in Verbindung mit der hohen resultierenden Masse aus der Reproduktion – geeignete Chitinquelle darstellen, wird diese auch im weiteren Verlauf zur Chitingewinnung genutzt.

4.7.2 Ergebnisse Labormaßstab (TP6.2)

Aufgrund der vorangegangenen Untersuchungen wurde die Chitingewinnung für Puppenexuvien und Tote Adulte Fliegen verfolgt. Hierzu wurde zunächst im Labormaßstab ein geeigneter Prozess entwickelt, der auf die zu entfernenden Kontaminanten angepasst wurde. Die folgenden Prozessschritte sind enthalten: Entfettung zur Entfernung von Fetten und Wachsen, Demineralisierung zur Entfernung von Mineralien, Deproteinisierung zur Hydrolyse der Proteine und Bleichen um das Chitin aufzuhellen und die Catecholamine zu entfernen. Die Ergebnisse können Abbildung 20 entnommen werden.

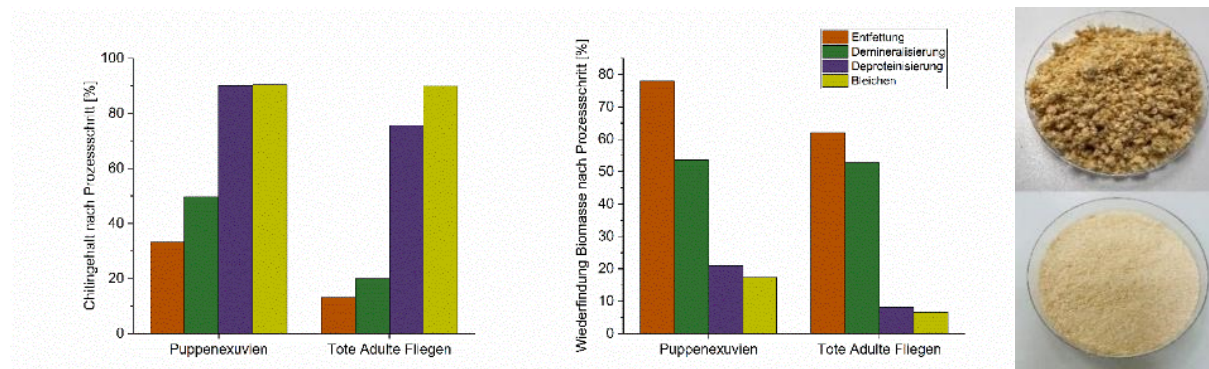


Abbildung 20: Der Chitingehalt nach den jeweiligen Schritten der Aufreinigung (links) für Puppenexuvien und toten adulten Fliegen; Wiederfindung nach jedem Prozessschritt bezogen auf die zu Anfang eingesetzte

Biomasse (Mitte); visuelle Darstellung der Chitine aus Puppenexuvien (rechts oben) und Larvenexuvien (rechts unten).

Für beide Seitenströme entwickelten Prozesse resultierten in Chitinaufreinigungsgraden > 90 % was eine Steigerung gegenüber den wenigen in der Literatur bekannten Prozessen darstellt. Die Biomassewiederfindung nach dem Gesamtprozess von 7 % für Adulte Fliegen und 16 % für Puppenexuvien korreliert mit den Chitingehalten in der Ausgangsbiomasse. Es sind somit moderate Chitinverluste während des Prozesses zu verzeichnen gewesen und die Chitinaufreinigung im Labormaßstab konnte somit erfolgreich abgeschlossen werden.

Für das Chitin aus Adulten Fliegen wurde nachfolgend eine Konversion zu Chitosan vorgenommen, welches aufgrund seiner Säurelöslichkeit ein ungleich größeres Anwendungsportfolio als das Chitin selbst hat. Die sogenannte heterogene Deacetylierung findet dabei unter drastischen Bedingungen (120 °C; 12 M NaOH) statt. Nachfolgend findet eine Aufreinigung mittels Lösung-Fällung statt um das Chitosan aufzureinigen. Die Konversion resultierte in einer 49%igen Ausbeute an Chitosan bezogen auf das eingesetzte Chitin. Der Deacetylierungsgrad wurde auf 78 % bestimmt, was gegenüber Literaturangaben etwas niedriger erscheint. Der Aufreinigungsgrad von 95 % ist jedoch gegenüber den Daten anderer Studien als sehr hoch anzusehen. Somit konnte die Chitosanaufreinigung im Labormaßstab finalisiert und **Meilenstein M7** erfolgreich abgeschlossen werden.

4.7.3 Ergebnisse Pilotmaßstab (TP6.2)

Die Chitinerstellung wurde nachfolgend in den Technikums- und dann Pilotmaßstab transferiert. Dadurch sollte 1. nachgewiesen werden, dass der entwickelte Prozess allgemein skalierfähig ist und 2. die Bottlenecks im nächstgrößeren Maßstab detektiert werden. Auch in diesem Fall wurden Puppenexuvien und Adulte Fliegen als Rohstoff eingesetzt. Eine für das Scale-up ausreichende Menge beider Rohstoffe wurde von *Hermetia* zur Verfügung gestellt. Die Vorbehandlung (Sieben, Zerkleinern) wurde mit etwa 10 kg durchgeführt, die eigentliche chemische Aufreinigung mit 5 kg Biomasse. Aufgrund der Kontamination mit Restsubstrat wurden die Adulten Fliegen zunächst mit dem für die Larvensparation verwendeten Rüttelsieb gesiebt und so von Frasspartikeln (> 1 cm) und weiteren kleineren Partikeln ≤ 4 mm separiert. Die Entfettung wurde mit drei verschiedenen Methoden evaluiert: Großsoxhlet, 25 L-Reaktor und einem Filtergehäuse. Der Restfettgehalt war mit Großsoxhlet am geringsten wobei jedoch auch die Anwendung immer nur batchweise ~ 1 kg möglich ist. Zur Deproteinisierung im 50 L-Reaktor mit Natronlauge wurden die unterschiedlich entfetteten Proben miteinander kombiniert. Die Demineralisierung erfolgte mit Ameisensäure im 50 L- oder 25 L-Reaktor. Der Bleichschritt wurde im Folgenden aus Sicherheitsgründen nicht im Pilotmaßstab durchgeführt. Die Reihenfolge und Bewertung der einzelnen Prozessschritte können Tabelle 7 entnommen werden.

Tabelle 7: Übersicht über den Chitinaufreinigungsprozess im Pilotmaßstab mit Chitingehalt nach jedem Schritt und Biomassewiederfindung bezogen auf die bereits entfettete Biomasse.

Reinigungsschritt	Puppenexuvien Wiederfindung [%]	Puppenexuvien Chitingehalt [%]	Adulte Fliegen Wiederfindung [%]	Adulte Fliegen Chitingehalt [%]
Deproteinisierung	18	80	13	64
Demineralisierung	15	93	11	72

Die Reinheit des Chitins aus Puppenexuvien beträgt final 93 %, was die Daten aus dem Labormaßstab bestätigt. Die Werte für das Adulte Fliegen-Chitin (72 %) erscheinen niedrig, sind aber vergleichbar mit den Werten aus dem Labormaßstab (76 %), wenn kein nachfolgendes Bleichen erfolgt. Die Werte für die Biomassewiederfindung sind für die Puppenexuvien im Allgemeinen höher (15-18 %) als die der Toten Adulten Fliegen (11-13 %), spiegeln jedoch auch den höheren Chitingehalt der Puppenexuvien wider. Die Skalierfähigkeit des Prozesses ist damit nachgewiesen, die **Meilensteine M7** und **M11** wurden erzielt.

Gegenüber dem Labormaßstab wurde hier auf eine Chitinkonversion verzichtet, da 1. die Chitosanherstellung apparativ deutlich höhere Anforderungen an ein Scale-up stellt, 2. das Chitosan bereits hinsichtlich Reinheit und Deacetylierungsgrad analysiert wurde und 3. die Weiterleitung des Chitosans an Partner zu anwendungstechnischen Untersuchungen aufgrund der Einteilung als K3-basiertes Material behördlich untersagt ist.

4.8 Evaluierung weiterer Verwertungswege des Restsubstrats (Frass) (TP6.3)

Die von den Larven während der Mast nicht verwertete Biomasse ist das sogenannte Restsubstrat, auch Frass genannt. Ein Ziel von InBiRa war es, das Restsubstrat möglichst gut zu valorisieren. Daher wurden der Biogasertrag und der Heizwert des Restsubstrats – ausgehend von der Larvenmast im Pilotmaßstab – bestimmt, um dies als möglichen Verwertungsweg beurteilen zu können.

Zur Bewertung wurde neben dem spezifischen Biogasertrag auch Methananteil und -ausbeute sowie Kohlendioxidanteil bewertet. Relevant ist in dieser Hinsicht, wie sich die Daten vor und nach Larvenmast ändern. Dazu wurden zunächst die Futtermischung selbst und das entsprechende Restsubstrat nach der Larvenmast aus den sechs Pilotierungen gemäß den Vorgaben der DIN 38414, Teil 8 mit Faulschlamm angeimpft und bei 36°C inkubiert. Als Referenz diente Cellulose. Die Biogaserträge der untersuchten Proben wurden im Anschluss rechnerisch auf Normvolumen umgerechnet. Mittels eines Gaschromatographen mit Wärmeleitfähigkeitsdetektor (GC-WLD) wurde über den gesamten Versuchszeitraum hinweg die Zusammensetzung des erzeugten Biogases analysiert. Die Ergebnisse zur Vergärung der Futtermischungen und Restsubstrate aus den sechs Pilotierungsläufen können Tabelle 8 entnommen werden.

Tabelle 8: Spezifischer Biogasertrag, Methananteil und -ausbeute sowie Kohlendioxidanteil nach Vergärung der Futtermischungen (FM) und Restsubstrate (RS) aus den Pilotierungsläufen (P#1-P#6); oTS: organische Trockensubstanz.

Substrat	Biogas-Ertrag (mL _{GN} / g _{oTS})	Methan-ausbeute (mL _{GN} / g _{oTS})	Methan-anteil (Vol.%)	Kohlendioxid-anteil (Vol.%)
FM-P#1	662	381	57,5	34,5
RS-P#1	581	318	54,7	33,2
FM-P#2	705	401	56,9	33,0
RS-P#2	599	331	55,3	28,0
FM-P#3	769	448	58,2	32,4
RS-P#3	642	361	56,2	32,4
FM-P#4	552	312	56,5	31,8
RS-P#4	140	74	53,2	26,7
FM-P#5	639	339	53,1	29,2
RS-P#5	729	402	55,1	31,5
FM-P#6	632	385	60,9	32,0
RS-P#6	561	310	55,3	30,7

Ein Vergleich der spezifischen Biogasausbeuten zeigte, dass bei den Pilotierungen 1, 2, 3 und 6 die Futtermischungen erwartungsgemäß höhere spezifische Gasausbeuten aufwiesen als die jeweils zugehörigen Restsubstrate (Frass). Besonders deutlich wurde dies bei der Pilotierung 3, in der eine Mischung auf Basis von Lebensmittlrückläufern (LMR) eingesetzt wurde: Mit 770 mL_{GN}/ g_{oTS} erzielte diese Futtermischung die höchste Biogasausbeute aller Pilotversuche. Das zugehörige Restsubstrat lag mit 642 mL_{GN}/ g_{oTS} zwar leicht darunter, zeigte jedoch ebenfalls noch ein hohes Vergärungspotenzial.

Ein abweichendes Bild zeigte sich hingegen bei der Pilotierung 5, bei der eine 80:20-Mischung aus Kantinenabfällen (KA) und Bioabfällen (BA) eingesetzt wurde. Hier wurde im Restsubstrat mit 730 mL_{GN}/g_{oTS} die höchste Biogasausbeute aller RS-Proben erreicht – deutlich über dem Wert der zugehörigen Futtermischung. Dies ließ darauf schließen, dass durch die Larvenverwertung bevorzugt leicht umsetzbare Bestandteile entfernt wurden, während Anteile, die unter anaeroben Bedingungen besonders gut abbaubar sind, im Restsubstrat angereichert wurden.

Auffällig sind die Ergebnisse der Pilotierung 4. Während die Futtermischung hier mit 552 mL_{GN}/g_{oTS} im mittleren Bereich lag, zeigte das resultierende Restsubstrat eine deutlich reduzierte Biogasausbeute von nur 140 mL_{GN}/g_{oTS}. Diese starke Diskrepanz könnte auf eine mikrobielle Hemmung bei der Vergärung des Frass hinweisen. Mögliche Ursachen sind hohe Salz-, Fett- oder Ammoniumkonzentrationen im Restsubstrat oder die Bildung inhibierender Substanzen während der Mast. Eine weiterführende inhibitionsanalytische Untersuchung wäre hier zur Absicherung dieser Hypothese sinnvoll.

Die Ergebnisse zeigten, dass das Verhältnis zwischen Futtermittelzusammensetzung, Larvenumsetzung und mikrobieller Verwertbarkeit des Frass differenziert betrachtet werden muss. Während in den meisten Fällen der Energiegehalt durch die Larven reduziert wird, kann in Einzelfällen – wie bei Pilotierung 5 – das Restsubstrat sogar ein höheres Vergärungspotenzial als das Ausgangsfuttermittel aufwiesen.

Neben der Analyse des Biogaspotenzials wurde im Rahmen des Projekts auch der obere Heizwert (auch Bruttoheizwert) der eingesetzten Futtermischungen sowie des jeweils resultierenden Restsubstrats (Frass) bestimmt, um deren thermisches Verwertungspotenzial zu bewerten. Die Bestimmung erfolgte gemäß der DIN 51900, die die kalorimetrische Analyse von festen Brennstoffen unter definierten Bedingungen regelt. Durch den Vergleich der Heizwerte von Ausgangssubstrat (Futtermischung) und verbleibendem Restsubstrat ließ sich quantifizieren, welcher Anteil der ursprünglich im Substrat enthaltenen chemischen Energie während der Larvenmast durch die Organismen umgesetzt wurde – insbesondere zur Biomassebildung, Wärmeentwicklung oder Stoffwechselaktivität. Gleichzeitig ermöglicht der Vergleich eine Abschätzung der im Restsubstrat verbleibenden Restenergie, die potenziell über eine thermische Verwertung (z. B. Mitverbrennung, Pyrolyse) erschlossen werden kann. Tabelle 9 stellt die oberen Heizwerte der Futtermischungen und Restsubstratproben aus den Pilotierungen bezogen auf die Trockenmasse dar.

Tabelle 9: Heizwertanalyse mit Futtermischungen und den entsprechenden Restsubstraten. Nomenklatur Pilotierung: 1. Schweinefutter, 2. Kantinenabfälle, 3. Lebensmittelrückläufer, 4. Kantinenabfälle (Wdh.), 5. 80 % Kantinenabfälle / 20 % Bioabfälle, 6. 90 % Kantinenabfälle / 10 % Bioabfälle.

Heizwert	Pilot 1	Pilot 2	Pilot 3	Pilot 4	Pilot 5	Pilot 6
Futtermischung (MJ/kg_{TS})	18,8	23,1	20,5	22,4	22,4	22,5
Restsubstrat (MJ/kg_{TS})	17,7	22,5	19,2	22,4	21,8	21,7

Die Werte liegen zwischen 17,6–23,1 MJ/kg_{TS}. Den höchsten Heizwert (23,1 MJ/kg_{TS}) hat die Futtermischung aus der Pilotierung 2, die aus Kantinenabfällen besteht. Den niedrigsten Heizwert weist das Futtermittel aus der Pilotierung 1 mit 17,7 MJ/kg_{TS} auf, welche aus Schweinefutter besteht. Die Werte verdeutlichen, dass die Verwertung durch die Larven der Schwarzen Soldatenfliege zu keiner nennenswerten Steigerung des Heizwerts im verbleibenden Restsubstrat führte. In sämtlichen Fällen ist der Heizwert des Frass niedriger oder nahezu identisch mit dem der eingesetzten Futtermischung.

Die größte Differenz zwischen Futtermischung und Frass wurde in Pilotierung 3 festgestellt und betrug 1,34 MJ/kg_{TS}. Diese vergleichsweise geringe energetische Differenz deutete darauf hin, dass nur ein begrenzter Anteil der chemisch gebundenen Energie im Substrat tatsächlich durch die Larven umgesetzt wurde. Damit wies der Prozess aus energetischer Sicht eine begrenzte Effizienz auf, wenn man die Umsetzung auf Heizwertebene betrachtete.

Zur besseren Bewertung der im Projekt ermittelten Heizwerte von Futtermischungen und Restsubstraten

wurden nachfolgend drei ausgewählte Literaturwerte aufgeführt, die als Vergleichsgrößen für organische Reststoffe herangezogen werden können:

Küchenabfälle weisen laut Literaturangaben [15] einen oberen Heizwert von etwa 19,0–21,0 MJ/kg_{TS} auf. Dieser Bereich entspricht in etwa den Werten der in Pilotierung 2 und 4 verwendeten Futtermischungen auf Basis von Kantinenabfällen und zeigt, dass diese Substrate energetisch mit klassischem Bioresten vergleichbar sind.

Grünschnitt bzw. kompostierbares Pflanzenmaterial liegt gemäß Literaturdaten bei etwa 16,0–18,0 MJ/kg_{TS} [16]. Damit liegt der Heizwert des Referenzsubstrats aus Pilotierung 1 (Schweinefutter, 17,7 MJ/kg_{TS}) innerhalb dieses Bereichs und zeigt ein vergleichbares energetisches Profil zu ligninreichem Biogut.

Presskuchen aus Insektenverarbeitung – Nichtentfettete Larven der Schwarzen Soldatenfliege besitzen laut Literaturdaten [17] Heizwerte von bis zu 25,8 MJ/kg_{TS}. Damit liegen sie geringfügig über den im Projekt gemessenen Werten der Frassproben, was die potenzielle Eignung solcher Insektenreststoffe für die thermische Nutzung unterstreicht.

Die im Projekt ermittelten Heizwerte von 17,6 bis 23,1 MJ/kg_{TS} ordnen sich damit plausibel in das bekannte Spektrum organischer Reststoffe ein. Sie bestätigen zugleich, dass sowohl Futtermittel als auch Frass ein relevantes energetisches Potenzial aufweisen – wobei die begrenzte Differenz zwischen Ausgangs- und Endsubstrat auf eine nur moderate energetische Umwandlung durch die Larven hinweist. Dies unterstreicht die Bedeutung einer nachgelagerten energetischen Nutzung des Restsubstrats – etwa durch thermische Verfahren – zur Rückgewinnung verbleibender Energiepotenziale.

4.9 Ökobilanzierung (AP7)

In dieser Ökobilanz wurden die ökologischen Vor- und Nachteile der Insektenbioraffinerie im Vergleich zur konventionellen Verwertung der biogenen Reststoffströme in Biogas- und Kompostierungsanlagen untersucht (TP7.1, TP7.2, TP7.4). Weiterhin wurde analysiert, welche Hotspots und relevanten Stellschrauben zur Verbesserung des Systems vorliegen. Somit konnte diese Studie zur Entscheidungsunterstützung für die Entwicklung der Insektenbioraffinerie durch die Projektpartner bzw. Projektentwickler, für die Vermarktung des Verfahrens aber auch für Entscheidungsträger in der Politik bspw. zu gesetzgebenden Verfahren dienen.

Der Vergleich verschiedener Systeme geschieht in Ökobilanzen auf Basis einer sogenannten funktionellen Einheit. Dies bedeutet, dass sich alle Ergebnisse auf eine bestimmte Menge einer gemeinsamen Funktion beziehen. In der vorliegenden Studie werden die Insektenbioraffinerie und die Referenzsysteme anhand ihrer Funktion, biogene Reststoffströme zu verwerten miteinander verglichen. Alle Ergebnisse werden auf diese Funktion bezogen. Die funktionelle Einheit ist daher in dieser Studie die „Verwertung von 1 t biogener Reststoffe“. Für den biogenen Reststoffstrom wurde eine beispielhafte Mischung angenommen. Diese besteht pro Tonne aus 450 kg Lebensmittelrückläufern (310,5 kg Backwaren, 49,5 kg Gemüse und Obst, 45 kg Molkereiprodukte, 45 kg Fisch und Fleisch), 450 kg Kantinenabfällen und 100 kg Bioabfall aus der Biotonne. Betrachtet wird die Insektenbioraffinerie in den Prozessstufen Futterherstellung, Larvenzucht (bzw. Reproduktion), Larvenmast, Primärraffination, Fett/Protein Trennung, Fettverarbeitung, Proteinverarbeitung und Chitinherstellung. In die Betrachtung fließen alle benötigten Energieströme, Verbrauchs- und Hilfsstoffe sowie Abfallströme ein. Die Systemgrenzen dieser Ökobilanz sind in Abbildung 21 dargestellt. Die vollständige Sachbilanz befindet sich im Anhang in Tabelle 12). Da sich die aus den biogenen Reststoffströmen hergestellten Produkte je nach Verwertungsweg unterscheiden, wird die vermiedene Herstellung der konventionellen tropischen, exportierten Produkte (z. B. Kokosöl oder Palmkernöl), die potenziell durch die jeweils produzierten Produkte (z.B. Fettsäuremethylester bzw. FAME) substituiert werden können (TP7.3), in Form von Gutschriften berücksichtigt. Diese Gutschriften werden ebenfalls auf die oben genannte funktionelle Einheit bezogen und gehen als negative Werte in die Bilanz

ein. Durch diesen Substitutionsansatz kann die Funktionsgleichheit der Systeme bilanziell hergestellt werden. Da es sich um eine Abfallökobilanz handelt, wird lediglich die Verwertung, also das End-of-Life der biogenen Reststoffströme betrachtet. Die vorgelagerten Lebensphasen der biogenen Reststoffströme bzw. die Produktsysteme, in denen die biogenen Reststoffströme anfallen, werden nicht betrachtet, da davon auszugehen ist, dass diese nicht von der Art der Verwertung der biogenen Reststoffströme beeinflusst werden. Die Nutzenphase und das End-of-Life der in den Systemen hergestellten Produkte sowie der potenziell substituierbaren Produkte werden nicht mit in die Betrachtung einbezogen, da vereinfachend davon ausgegangen wurde, dass sich diese zwischen Substitut und substituiertem Produkt nicht unterscheiden. Die technische Infrastruktur und die Transportwege innerhalb Deutschlands werden nicht mitberücksichtigt, da erfahrungsgemäß davon auszugehen ist, dass deren Einfluss auf die Umweltwirkungen der jeweiligen Systeme gering ist. Um einen realistischen Vergleich mit den Referenzsystemen im Industriemaßstab ziehen zu können, musste ein theoretisches Scale-up des sich noch in der Entwicklung befindenden InBiRa-Verfahrens auf den Industriemaßstab durchgeführt werden. Hierfür wurden je nach Datenverfügbarkeit folgende Ansätze angewendet: Abschätzung einer möglichen Effizienzsteigerung ausgehend von den Daten, die durch die Projektpartner im Pilotmaßstab erhoben wurden; Nutzung von Literaturdaten zu vergleichbaren Prozessen, z. B. aus Studien oder Datenbanken und ggf. Übertragung auf den deutschen Kontext; Identifizierung großtechnischer Anlagen und Prozesse und Abschätzung der Input- und Outputflüsse z. B. über Datenblätter; Schätzungen durch die Projektpartner. Die Verwertungswege Vergärung und Kompostierung werden als Referenzsysteme beschrieben. Da die Futtermittelmischung aus den biogenen Reststoffen Bioabfall, Kantinenabfälle und Lebensmittelrückläufer besteht, wurden für diese drei Stoffströme die Umweltwirkungen getrennt berechnet und anschließend entsprechen der Futtermittelzusammensetzung summiert. Da Kantinenabfälle und Lebensmittelrückläufer jedoch nicht kompostiert, sondern immer einer Vergärung zugeführt werden, setzt sich das Referenzsystem Kompostierung aus dem kompostierten Bioabfall und den Kantinenabfällen und Lebensmittelrückläufern mit dem Verwertungsweg der Vergärung zusammen. Die Ergebnisse für die Referenzsysteme gelten nur für die in dieser Ökobilanz verwendeten Modellierungsansätze und Annahmen bezüglich Zusammensetzung des biogenen Reststoffstroms, Strom- und Wärmemix sowie Art und Zusammensetzung der substituierten Produkte. Die Modellierung des Systems erfolgte über die Software Umberto 11. Als Hintergrunddatenbank diente ecoinvent 3.9.1 mit dem Systemmodell „cut-off“. Somit wurden die **Meilensteine M2** und **M12** erfolgreich abgeschlossen.

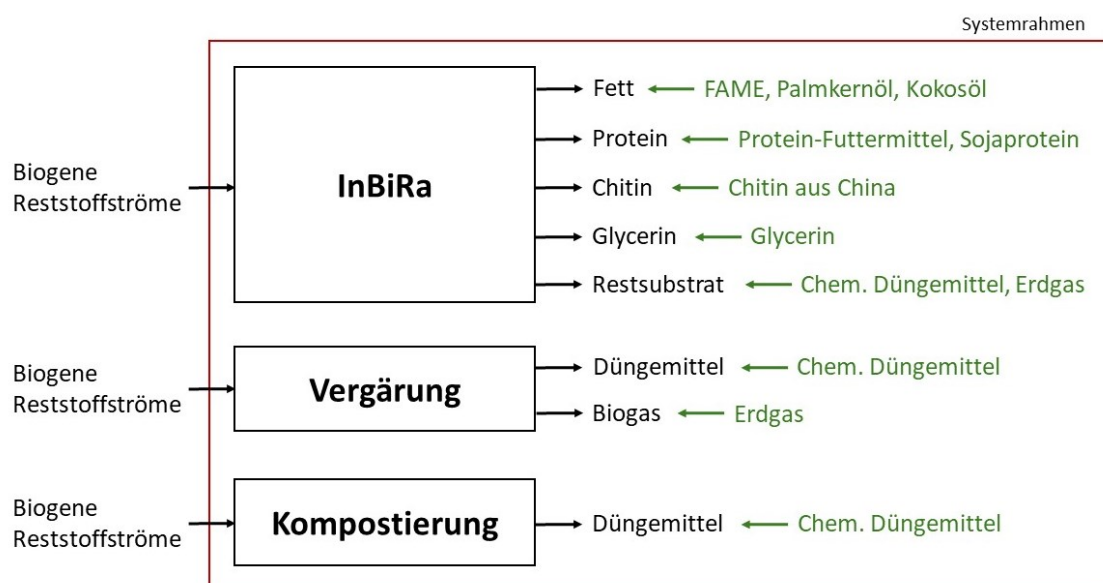


Abbildung 21: Systemrahmen Vergleichssysteme. Die potenziell durch die gezeigten Produkte substituierbaren konventionellen Produkte (grün) gehen mit negativem Vorzeichen in die Bilanz ein.

Die Wirkungsabschätzung wurde für die Wirkungskategorien Klimawandel, Landnutzung, kumulierter Energieaufwand, stratosphärischer Ozonabbau, Eutrophierung, Versauerung und Feinstaubentstehung durchgeführt. Dabei wird das Gesamtergebnis des InBiRa-Verfahrens (Emissionen aus InBiRa minus vermiedene Emissionen durch Substitution konventioneller Produkte) betrachtet und dieses mit den Umweltwirkungen der beiden Referenzverfahren Kompostierung und Vergärung verglichen. Das InBiRa-Verfahren wird dabei jeweils als „best case“ und „worst case“ dargestellt. Diese unterscheiden sich insofern, als dass jeweils die besten bzw. schlechtesten Kombinationen an durch die entstehenden Produkte Fett und Protein zu substituierenden Produkten angenommen wurden. Chitin und Frass werden in allen Kombinationen gleich eingesetzt. Dabei ist die für die Kategorie Klimawandel beste Kombination nicht notwendigerweise auch in der Kategorie Landnutzung am vorteilhaftesten. Im „best case“ wurde außerdem davon ausgegangen, dass die Larvenzucht (bzw. Reproduktion) sowie die Larvenmast ihre Wärmeenergie als Abwärme beziehen können, welche Lastenfrei in das System eintritt. Die beiden Szenarien dienen als Sensitivitätsanalyse und sind daher als Spektrum der InBiRa-Ergebnisse zu verstehen.

Abbildung 22 zeigt das Gesamtergebnis der verschiedenen InBiRa-Szenarien im Vergleich zu den Referenzsystemen für die Wirkungskategorie Klimawandel. Die Referenzsysteme „Vergärung“ und „Kompostierung und Vergärung“ sind mit höheren THG-Einsparungen verbunden als die verschiedenen Szenarien des InBiRa-Verfahrens und sind daher auf Basis des aktuellen Stands der Datenlage positiver zu bewerten. Es zeigt sich, dass InBiRa auch im „best case“ schlechter abschneidet als die Referenzsysteme. Dies ist v.a. auf die hohen direkten und indirekten Emissionen des InBiRa-Verfahrens zurückzuführen. Im InBiRa-Verfahren werden immer mehrstufige Prozesse (Futtermittelaufbereitung--> Mast --> Fraktionierung --> Trocknung --> Raffination --> chemische oder biotechnische Konversion und deren Aufreinigung) bis zu einem großen Portfolio an Endprodukten für die zahlreichen Branchen betrachtet. Hingegen sind die Kompostierung und Vergärung je nur als einstufiges Verfahren ohne Raffination und chemische oder biotechnische Konversion betrachtet. Diese liegen im „best case“ bei fast 130 kg CO₂e (bei Gutschriften von etwas über 160 kg CO₂e) und im „worst case“ bei fast 170 kg CO₂e (bei Gutschriften von ca. 110 kg CO₂e). Im „worst case“ sind sogar signifikante Netto-Emissionen zu erwarten. Die identifizierten Hot-Spots sind Energiebedarfe in fast allen Prozessschritten des InBiRa-Prozesses sowie die substituierten Produkte. Die Szenarien, in denen das in InBiRa hergestellte Protein Sojamehl ersetzt, haben die größten positiven Auswirkungen. Die Substitution von Palmkernöl durch das in InBiRa hergestellte Fett ist bez. Klimawandel etwas vorteilhafter als die Substitution von Kokosöl, Diesel oder FAME. Das vorteilhafteste Szenario ist die Kombination aus dem potenziellen Ersatz von Palmkernöl und Sojamehl. Das am wenigsten vorteilhafte Szenario ist die Kombination aus dem potenziellen Ersatz von FAME und Proteinfuttermittel. Die Ergebnisse bezüglich der weiteren Wirkungskategorien werden im Folgenden kurz umrissen. Somit wurde **Meilenstein M18** erfolgreich abgeschlossen.

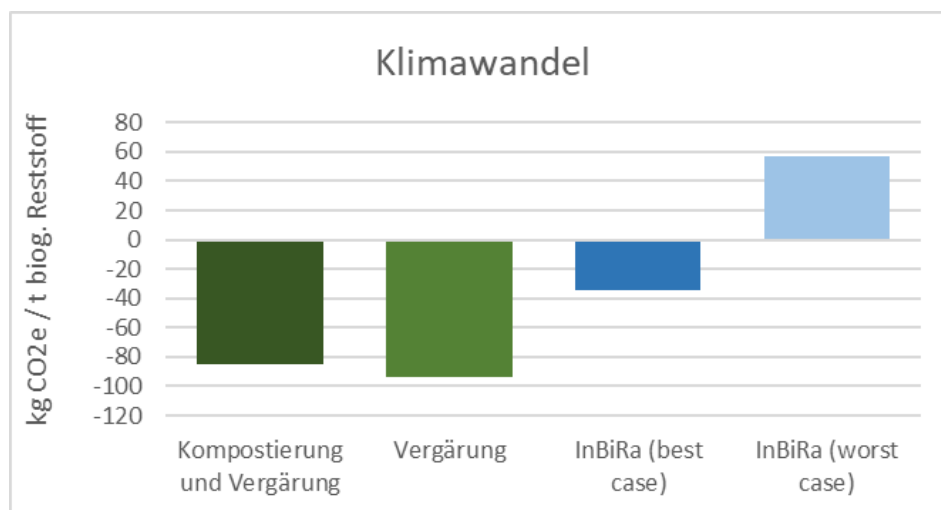


Abbildung 22: Wirkungsabschätzungsergebnis für die Wirkungskategorie Klimawandel.

In den Wirkungskategorien kumulierter Energieaufwand, stratosphärischer Ozonabbau und Eutrophierung schneidet InBiRa auch im „best case“ schlechter ab als die Referenzsysteme. In den Wirkungskategorien Feinstaub, Versauerung und Landnutzung sind die Ergebnisse gemischt, wobei InBiRa im Vergleich zu den Referenzsystemen jeweils im „best case“ besser und im „worst case“ schlechter zu bewerten ist. Auch hier hat die große Anzahl der Prozesse bei InBiRa im Vergleich zu Kompostierung und Vergärung einen Einfluss auf die Bewertung.

Bei der Reproduktion der Soldatenfliege wird aktuell noch Schweinefutter als Futtermittel eingesetzt. Im Rahmen dieser Ökobilanz wurde davon ausgegangen, dass auch im „worst case“ der Einsatz der betrachteten biogenen Reststoffe nicht nur in der Larvenmast, sondern im gesamten Lebensweg der Larven, angefangen bei der Reproduktion, möglich ist. Es wurde daher eine Sensitivitätsanalyse für die Nutzung von Schweinefutter für die Larvenreproduktion und Aufzucht bis zur Junglarve durchgeführt. Hierfür wurde in Absprache mit dem Projektpartner Hermetia 162,9 kg Schweinefutter (vereinfacht als Weizen modelliert) pro t biogener Reststoff angesetzt. Hierdurch ist mit einer deutlichen Verschlechterung der Ergebnisse zu rechnen. InBiRa wäre hier auch im „best case“ mit einer zusätzlichen Klimalast im Vergleich mit den potenziell zu substituierenden Produkten verbunden.

Das Ergebnis der Ökobilanz des InBiRa-Verfahrens ist stark abhängig von den potenziell substituierbaren Produkten. Hierbei wäre die „Wahl“ der zu substituierenden Produkte nicht eindeutig: in den verschiedenen Umweltwirkungskategorien wären verschiedene zu substituierende Produkte optimal. So sind zum Beispiel für den Klimawandel die Szenarien am vorteilhaftesten, in denen das Protein Sojamehl ersetzt. Die optimale Kombination wäre dabei, dass das in InBiRa gewonnene Fett potenziell Palmkernöl ersetzt. Für die Wirkungskategorien Landnutzung, kumulierter Energiebedarf und Eutrophierung sind hingegen die Szenarien am vorteilhaftesten in denen das Fett potenziell Kokosöl ersetzt.

Da sich das InBiRa-Verfahren noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befindet, sind die Datenunsicherheiten bezüglich der Vordergrunddaten noch sehr hoch. Dies ist bei Ökobilanzen für neuartige Verfahren üblich, sollte aber bei der Verwendung der vorliegenden Ergebnisse berücksichtigt werden. Alle Ergebnisse gelten daher nur für den Stand der Daten im Herbst 2024 und können sich im Laufe der weiteren Entwicklung noch signifikant verändern.

4.10 Rechtliches (AP8)

Aktuelle rechtliche Rahmenbedingungen zur Insektenfütterung

Die EU-Gesetzgebung, insbesondere die Verordnung (EG) Nr. 1069/2009, legt strenge Regeln für die Zucht und Mast von Insekten innerhalb der Europäischen Union fest. Insekten sind entsprechend dieser Verordnung Nutztiere. Sie dürfen nur mit zugelassenen Futtermitteln gefüttert werden. Das sind hauptsächlich Substrate pflanzlichen Ursprungs sowie Milch- und Eiprodukte. Die Definition der Insekten als Nutztiere in dieser Verordnung bedeutet, dass die Vorschriften zur Fütterung für alle Insektenprodukte gelten, unabhängig davon, ob sie für den menschlichen Verzehr oder für technische Anwendungen bestimmt sind. Insekten, die für die Herstellung von nicht für die Futter- und Lebensmittelkette bestimmten Produkten, wie z. B. Biokraftstoffen oder Kosmetik, gezüchtet bzw. gemästet werden, dürfen daher nicht mit Abfällen gefüttert werden.

Rechtliche Rahmenbedingungen am Fraunhofer IGB vor Projektbeginn

Das Fraunhofer IGB, Nobelstr. 12 in 70569 Stuttgart, ist seit 18. August 2016 nach Artikel 23 der "Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 (Verordnung über tierische Nebenprodukte)" unter der Registriernummer DE 08 111 1006 21 registriert. Eine Genehmigung nach Artikel 17 zur Verwendung von Material, das als tierisches Nebenprodukt gilt, wurde für Forschungszwecke generell und ohne Beschränkung auf einzelne Vorhaben erteilt.

Neue Genehmigung für das Fraunhofer IGB

Im Rahmen des InBiRa-Projekts wurden, auf der Grundlage der dem Fraunhofer IGB am 28.9.2022 erteilten Genehmigung für Tierische Nebenprodukte, „nicht-zugelassene-Futtersubstrate“ an Insekten verfüttert. Dies war nur im Rahmen der TNP-VO (EU) 1069/2009 unter Artikel 11 für Sondervorschriften für Proben zu Forschungszwecken möglich. Diese Sondervorschriften geben die Vorgehensweise bei solchen Arbeiten vor. Dies ermöglichte die Verwendung von nicht verkauften Lebensmitteln mit Fisch- und Fleischbestandteilen aus Supermärkten für die Larvenmast als Futtersubstrat. Darüber hinaus konnten außerdem Kantinenabfälle, die gemäß der Verordnung (EU) Nr. 142/2011 als Futterquelle für Insekten nicht erlaubt waren, eingesetzt werden. Als weitere ohne Genehmigung nicht zugelassene Substratquelle wurden Bioabfälle aus Haushalten anteilmäßig den Substraten beigemischt.

Alle eingesetzten Futtermittel sollten und wurden darüber hinaus so aufgearbeitet, dass diese frei von Verpackungsrückständen und Fremdstoffen waren. Diese Regelung sollte Risiken für die öffentliche Gesundheit und für die Umwelt minimieren und gleichzeitig die nachhaltige Nutzung von Insekten als Ressource möglich machen.

Die Genehmigung erforderte jedoch eine ausführliche Dokumentation (inkl. Handelspapieren). Dies beinhaltet Mengenangaben sowie Daten zur Lagerung und Entsorgung aller Futtermittel, Larven und alle aus den Larven hergestellten Zwischen- und Endprodukte, inklusive des nichtverwerteten Restsubsubstrats.

Innovationsraum InBiRa

Die Verwertung biogener Reststoffe aus Haushalten stellt eine wichtige Komponente im Abfallmanagement dar. Die Bioabfallverordnung (BioAbfV) regelt die Verwertung dieser Abfälle und setzt strenge Rahmenbedingungen für deren Behandlung und Entsorgung. Eine direkte stoffliche Verwertung dieser Reststoffe wie durch InBiRa ist nach der aktuellen Gesetzgebung nicht gestattet, da sie als Abfälle klassifiziert werden.

In der Natur ist es die eigentliche Funktion von Insekten, Abfälle im Rahmen der natürlichen Kreislaufwirtschaft in hochwertige Produkte umzuwandeln. Die in InBiRa eingesetzten Reststoffe, einschließlich überlagerter Lebensmittel und Speisereste, bieten ein ausgeglichenes Nährstoffprofil, welches für die Larvenkultivierung ideal ist. So können die Insekten, wie in der Natur auch, die Abfälle zu hochwertigen Produkten up-cyclen, ohne zusätzliche Abfallströme zu generieren.

Zusätzlich zu den Vorschriften der Bioabfallverordnung wurden im Rahmen des Projekts auch die allgemeinen Anforderungen an das Tierwohl beachtet, die gemäß Tierschutzgesetz auch für Insekten gelten. Dies schließt die Überwachung der Tiergesundheit und die Einhaltung von Sicherheitsmaßnahmen bei übertragbaren Tierseuchen gemäß der Verordnung (EU) 2016/429 ein. Diese Praktiken gewährleisten nicht nur die Einhaltung gesetzlicher Vorgaben, sondern tragen auch zur nachhaltigen und ethisch verantwortungsvollen Nutzung von Ressourcen bei.

4.11 Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation (AP9)

Ein wesentlicher Faktor für die erfolgreiche Umsetzung neuer vielversprechender Technologien in die Praxis ist ihre Akzeptanz – nicht nur durch potenzielle Anwender, sondern auch durch Endverbraucher. Information und Kommunikation stellen wichtige Pfade dar, um neuartige Verfahren und sich daraus neu eröffnende Wertschöpfungsketten vorzustellen und zu erklären. Ziel des Arbeitspakets 9 Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation war die frühzeitige Ansprache einer interessierten Fachöffentlichkeit als potenzielle Anwender und Multiplikatoren sowie Einbindung bzw. Information der breiten Öffentlichkeit als Gradmesser gesamtgesellschaftlicher Akzeptanz.

Das Projekt wurde daher von Beginn an mit verschiedenen kommunikativen Maßnahmen begleitet, um das Vorhaben grundsätzlich bekannt und sichtbar zu machen, die verschiedenen Stakeholder spezifisch über Vorgehen, Ergebnisse und Vorteile zu informieren und damit die Grundlage für einen weiteren persönlichen Austausch und den Transfer der Ergebnisse zu legen.

Das Vorhaben des Projekts sowie die im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse und Forschungsergebnisse wurden der Öffentlichkeit sukzessive zur Verfügung gestellt. Basis für das Teilprojekt Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation war die Einrichtung von **Webseiten und einer zentralen Website** zum Projekt InBiRa, auf denen fortlaufend alle zentralen Informationen zur Verfügung gestellt, Möglichkeiten zur Kontaktaufnahme angeboten wurde und die somit im Projektverlauf als Dreh- und Angelpunkt fungierten.

- [InBiRa-Projektseite auf der IGB-Website](#)
- [InBiRa-Website](#)
- Ergänzt wurden die Webpräsenzen durch Projektseiten bei BioPro und beim Umweltministerium.
- Ein [Blog-Beitrag zu InBiRa auf dem Fraunhofer Biointelligenz-Blog](#) machte das Projekt einem erweiterten Interessentenkreis zugänglich

Die Pressearbeit war ein zentraler Bestandteil der Kommunikationsstrategie und umfasste die Herausgabe von Presseinformationen und Fachartikeln zu verschiedenen Projektphasen. Der **Meilenstein M3** wurde teils durch die [Presseinformation »Mit Insekten zur Kreislaufwirtschaft«](#) und teils durch einen Fachbeitrag auf dem [Webportal Bioökonomie Baden-Württemberg](#) erreicht. Der Besuch von Dr. Andre Baumann und Miguel Avila führte zu einer weiteren Presseinfo. Der **Meilenstein M20** wurde durch die [Presseinfo »Insektenbioraffinerie erfolgreich aufgebaut: So werden Bioabfälle zu neuen Wertstoffen«](#) und den LinkedIn-Newsletter erreicht. Die Pressearbeit führte zu 44 Abdrucken und einem SWR-Filmbeitrag. Um das Verständnis für die Insektenbioraffinerie zu fördern, wurden zielgruppenspezifische Veranstaltungen organisiert, die den **Meilenstein M16** erreichten. Zielgruppen waren die breite Öffentlichkeit, Abfallwirtschaft, Chemieindustrie sowie Politik und Behörden. Veranstaltungen umfassten Tage der offenen Tür, Ausstellungen und Fachvorträge. Zudem wurden strategische Besuche und Messen genutzt, um potenzielle Anwender anzusprechen und die Technologie zu präsentieren. Mit 88 Posts auf Plattformen wie LinkedIn, Instagram und anderen sozialen Medien wurde die Sichtbarkeit des Projekts gesteigert. LinkedIn war der erfolgreichste Kanal, mit durchschnittlich 1020 Impressionen pro Beitrag und einem eigenen Newsletter »Unboxing InBiRa«, der 3112 Abonnenten gewann. Instagram erzielte durchschnittlich 145 Impressionen pro Beitrag. Deaktivierte Plattformen konnten nicht ausgewertet werden.

Eine detailliertere Aufstellung aller Beiträge im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit ist im Anhang Kapitel 7.2 zu finden.

Mit den verschiedenen Kommunikationsmaßnahmen im Projekt ist es gelungen, die Möglichkeiten der wertschöpfenden Nutzung von Bioabfällen mithilfe der Umwandlung durch die Larven der Schwarzen Soldatenfliege den anvisierten Zielgruppen näher zu bringen und auch die Bioökonomie im Allgemeinen bekannter zu machen. Insbesondere konnten Hemmnisse, die durch mangelndes Wissen oder Unverständnis entstehen, vermieden oder frühzeitig entgegengewirkt werden.

4.12 Massenbilanzierung für Industrieanlage (AP1-6)

Bei der Erstellung des Konzepts für die Industrieanlage handelt es sich jeweils um die letzten Teilarbeitspakete (TP1.8, 2.6, 3.5, 4.6, 5.6) der thematischen Arbeitspakete AP1-5. Außerdem wurde die Herstellung von Chitin und Chitosan aus den Reststoffströmen (TP6.2) ebenfalls in das Konzept der Industrieanlage übernommen. Die Auslegungsgrundlage war die Herstellung von 1500 t Larven (Trockenmasse) pro Jahr.

Das Konzept für die Industrieanlage mit den Prozesseinheiten und den zu erwartenden Massenströmen und möglichen Zwischen- und Endprodukten ist in Abbildung 27 (Anhang) dargestellt. Dieses basiert auf den Prozesseinheiten, welche bereits in der Pilotanlage erfolgreich umgesetzt wurden. Basierend auf den Massenbilanzen der Pilotierungsläufe wurden alle Massenströme entsprechend skaliert, um auf eine Jahresmenge von 1.500 t getrockneten Larven zu kommen. Dies gibt eine Potenzialabschätzung für eine spätere industrielle Umsetzung der InBiRa. Damit wurde der Meilenstein M19 erfolgreich abgeschlossen.

5 Praktische Anwendbarkeit und Roll-out

5.1 Voraussichtlicher Nutzen, Übertragbarkeit und Verwertung

5.1.1 Leistungsfähigkeit - Kapazität der Pilotanlage und deren Stoffströme

Unser Pilotanlagenkomplex wurde für die Verarbeitung von 1 Tonne Futtermittel ausgelegt, was eine Herstellung von ca. 120-180 kg Larven bzw. 50-60 kg getrocknete Larven ermöglicht (siehe hierzu nachfolgende vereinfachte Abbildung sowie detaillierte Massenbilanz in Kapitel 4.1). Mit dieser Menge war es möglich technische (Miniplant)-Anlagen zu betreiben, die der Fraktionierung dienen, um Fett und Protein, Chitin unterschiedlicher Qualität und deren Konversionsprodukte herzustellen. Diese Anlagen haben es uns ermöglicht, Daten für einen Industrieanlagenkomplex zu erheben.

Zusätzlich kann die Pilotanlage nun die Möglichkeit bieten, dass interessierte Wissenschaftler einzelne Prozesseinheiten sowie den Gesamtanlagenkomplex nutzen, um zahlreiche Fragestellungen im Bereich der Insektenbioraffinerie im Detail zu untersuchen und zu beantworten.

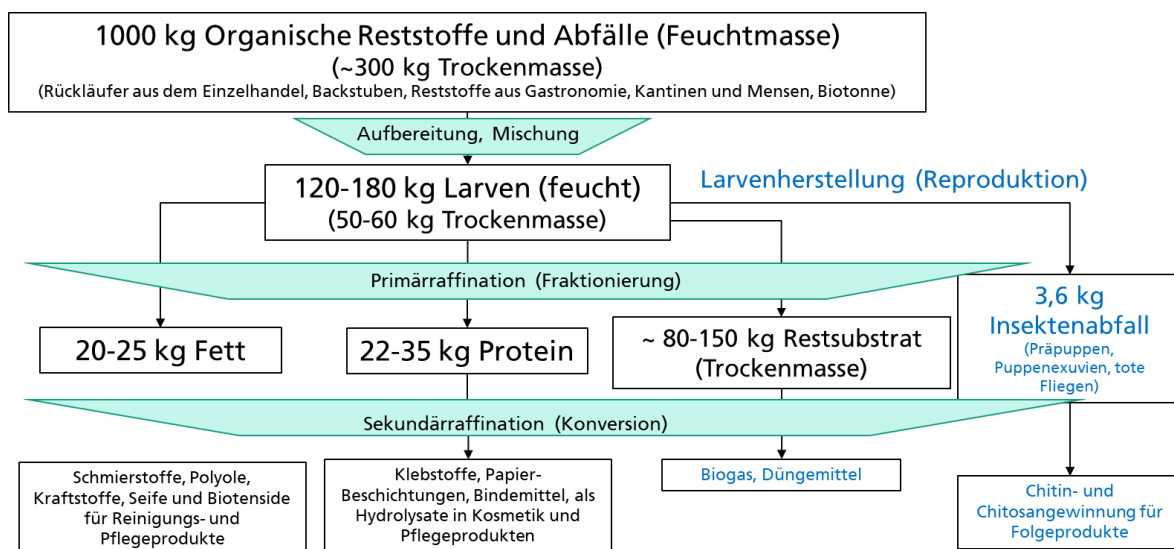


Abbildung 23: Strukturelle Übersicht der Insektenbioraffinerie und deren Stoffströme

5.1.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten und Nutzungsmöglichkeiten

Die wirtschaftliche Ergebnisverwertung liegt hauptsächlich bei den Industriepartnern des Projekts (PreZero, Hermetia) oder zukünftig weiteren interessierten Wissenschafts- und Industriepartnern. Die Nachhaltigkeitsziele, der Konsumentenbedarf, die Herstellung neuer Produkte/Wertschöpfungsketten und auch die Erweiterung des Wissens, neue Produkte durch den Einsatz von organischen Restströmen und Abfällen im Sinne einer Bioökonomie generieren zu können, sind hier Motivation. Dies wird zur Schaffung neuer Arbeitsplätze für die neuen Produktionsverfahren führen und zusätzliche Mittel generieren, die auch für weitere F&E Anstrengungen genutzt werden können. Die Verwertung der Ergebnisse trägt zudem direkt zur Schaffung von neuem Innovationspotenzial und der Vernetzung der beteiligten Firmen bei. Dies wird zur schnelleren Umsetzung der Insektenlarvenzucht und -verwertung in einen industriellen Produktionsprozess führen.

Eine Verwertungsabsicht ist ebenfalls, Pilotanwender für die Fette, Proteine und Restsubstrate zu identifizieren und auch eine Kooperation für weitere Projekte als Leuchtturmprojekt anzustreben. Hierbei steht die Nutzung lokaler organischer Reststoffe und Abfälle sowie die Stärkung der regionalen Kreisläufe im Vordergrund. Als mögliche Anwender der Sekundärrohstoffe kommen zahlreiche Firmen in Deutschland

in Frage, die aus den Branchen Chemie, Schmierstoffe, Kosmetik etc. stammen. Die Erstellung von Patentschriften und der Schutz von IP liegen im Interesse aller Partner. Das erstmalige Aufzeigen der Machbarkeit einer Insektenbioraffinerie im Pilotmaßstab und Entwicklung von Nutzungspfaden für die Nutzung von Fetten, Proteinen und Restsubstraten in verschiedenen Branchen eröffnet neue Möglichkeiten für zahlreiche Unternehmen und damit eine bedeutende wirtschaftliche Verwertung. Deshalb sehen wir hier mit hoher Wahrscheinlichkeit einen positiven volkswirtschaftlichen Effekt, der zur Stärkung des Wirtschafts- und Wissenschaftsstandortes in Baden-Württemberg beiträgt.

Ergänzend zu der Schaffung neuer Arbeitsplätze führt das Vorhaben zu einer Biologisierung der Industrie, einer stärkeren Unabhängigkeit von Importen sowie zu einer allgemeinen Umstellung auf nachhaltige Prozesse. Die Verwertung und Aufarbeitung von Reststoffen zur Bereitstellung der Ausgangsstoffe (Fett, Protein, Restsubstrat) für die Sekundärprodukte wird auch in ländlichen Regionen neue Arbeitsplätze schaffen. Die Reststoff- und Seitenstromnutzung besitzt den Vorteil, die deutsche Ökonomie unabhängiger von Rohstoff- und Ölimporten zu machen. Der Aufbau neuer Wertschöpfungsketten geht folglich einher mit der Umstellung auf nachhaltige Produkte und der Orientierung hin zu biobasierten und biokompatiblen drop-in Substanzen. Das Konzept der hier vorgestellten Arbeiten entspricht gänzlich der Strategie der Landesregierung Baden-Württemberg Nachhaltige Bioökonomie und auch der Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 der Bundesregierung [18], bei der eine nachhaltige Nutzung biologischer Ressourcen propagiert wird. Durch die Öffentlichkeitsarbeit, die die Verbreitung des Konzepts der Verwertung von Bioabfällen, auch des Inhalts der Biotonne, zu hochwertigen Stoffen, wie Fetten und Proteine in die breite Öffentlichkeit und gegenüber der interessierten Fachöffentlichkeit vorantreibt, wird die Bioökonomie in der Bevölkerung und bei Anwendern bekannt. Durch das Verständnis, dass Bioabfälle im Sinne einer kreislauforientierten Wirtschaftsweise Ausgangsstoffe für weitere Produkte werden, erfahren die Bioabfälle eine höhere Wertschätzung. Eine mögliche Auswirkung besteht infolgedessen auch darin, dass zukünftig sowohl die Menge als auch die Qualität des gesammelten Bioabfalls ansteigen.

5.1.3 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten und Anschlussfähigkeit

Es sollen neue regionale Wertschöpfungsketten entstehen und gemeinsam mit den Praxispartnern werden marktfähige Dienstleistungs- und Beratungsangebote entwickelt. Das Projekt wurde an der Universität Stuttgart in die Stuttgart Research Initiative (SRI) „Valorisation of Bioresources“ eingebunden. In dieser SRI kooperieren mehr als acht Institute aus vier Fakultäten disziplinenübergreifend auf dem Themengebiet der Bioökonomie in Forschung und Lehre auf dem Schwerpunkt der Inwertsetzung biogener Ressourcen unter dem Aspekt einer Nachhaltigen Entwicklung. Die an dem Projekt beteiligten Forschenden haben damit die Möglichkeit, sich umfassend mit den in der SRI-Forschenden der Universität Stuttgart auf diesen Themen zu vernetzen, an den dort angebotenen Workshops und dem fachlichen Diskurs teilzunehmen, Inhalte und Methoden, die auch über das eigene Thema hinausgehen, kennen zu lernen und zu vertiefen und bei Interesse Lehrangebote wahrzunehmen. Durch das aus verschiedenen Fachdisziplinen zusammengesetzte Konsortium können neue interdisziplinäre Kooperationen zwischen den Institutionen gefördert und Netzwerke geknüpft werden. Dies kann eine Basis für neue Projektideen und Forschungscluster darstellen.

Wissenschaftlich können die Ergebnisse für weitere Projekte und die Verbesserung bestehender Technologien zum Einsatz kommen. Des Weiteren können die Anwendungsmöglichkeiten der Technologien auf andere Sektoren/Prozesse ausgeweitet werden. Darüber hinaus können weitere studentische Arbeiten (Doktorarbeiten, zahlreiche Master- und Bachelorarbeiten) im Rahmen dieser Untersuchungen entstehen. Die zusätzlichen Produkte generieren zusätzlich F&E-Mittel in den Firmen und ermöglichen so die Weiterentwicklung der Insekten-basierten Produkte. Die Expertise, die im Laufe des InBiRa-Projekts erworben wurde, wird sich bei den Forschungseinrichtungen nach Sicherung des IP insbesondere in 4-5 wissenschaftlichen Publikationen (*peer reviewed*) äußern. Diese Expertise wird auch in Lehrveranstaltungen für die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses einfließen. Damit geht eine Stärkung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit gegenüber dem Ausland auf diesem Gebiet einher.

Um dieses Wissen auch ökonomisch nutzen zu können, ist ein Verfassen neuer rechtlicher Normen und Richtlinien zur Insektenfütterung mit Abfällen oder auch zum Einsatz der Insektenrohstoffe als drop-in Produkte unabdingbar.

5.1.4 Übertragbarkeit des Vorhabens

Mit unserer Pilotierung konnten wir wichtige Daten generieren, um eine Industrieanlage mit einem kleineren technischen Risiko auszulegen. So wurden wertvolle Daten zu neuen Futtermischungen aus Rückläufern und organischen Abfällen hinsichtlich der Insektenlarvenmast und der verfahrenstechnischen Auslegung der Separation und auch Konversion der Fette, Proteine und Restsubstrate zu neuen wertschöpfenden Produkten gewonnen. Zusätzlich wurden in allen Prozessschritten Massen- und Energiebilanzen erhoben, die eine industrielle Anbindung der Energie- und Wärmeströme ermöglichen.

5.2 Was wird benötigt, um Verfahren und Technologie in die Anwendung zu bringen?

Für die Industrielle Umsetzung ist für die Auslegung eine Darstellung der Abfallstoffströme und Logistik für die Insektenmast notwendig. Zusätzlich sind Entpackungsanlagen und Schadstoffkontrollen notwendig. Für die Insektenmast ist eine Genehmigung notwendig, falls nicht zugelassene Futtermittel zum Einsatz kommen. Im Rahmen eines Businessplans sollte durch einen möglichen Kundenkreis erschlossen werden, welche Stoffströme oder Zwischenprodukte hergestellt werden sollen. Es gibt die Möglichkeit die Prozesskette bis zur getrockneten Larve, zu den Stoffströmen Rohfett und –protein darzustellen oder die chemischen Prozesse zur Aufreinigung und Umwandlung der Stoffe zu integrieren. Dazu sind neben den Anlagenplanern auch Kompetenzträger im Bereich der Futtermittelherstellung, Tiermast und Chemiker sowie Chemieingenieure erforderlich.

6 Ausblick und Entwicklungsperspektive

Das InBiRa-Projekt zeigt auf, dass Insekten wie die Larven der Schwarzen Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) effizient auf verschiedenen organischen Abfallsubstraten wachsen können und dabei hochwertige Proteine und Fette produzieren. Um sicherzustellen, dass keine schädlichen Substanzen in die Nahrungskette gelangen, sind diese nicht für den menschlichen Verzehr bestimmt, sondern können in technischen Produkten Anwendung finden. Die aktuellen Forschungen und Entwicklungen in diesem Bereich könnten die Tür für neue Futtersubstrate öffnen und die Insektenkultivierung als eine sichere und umweltfreundliche Option für eine wertschöpfende Nutzung der im Projekt eingesetzten Reststoff- und Abfallströme etablieren. Die Ergebnisse des Projekts können als wissenschaftlicher Beleg für die Zulassung neuer Futtersubstrate in der Insektenkultivierung in Betracht gezogen werden.

7 Anhang

7.1 Ausführlicher Stand der Technik zu Projektbeginn

7.1.1 Organische Reststoffe und Bioabfälle

In Deutschland wird aktuell ein Großteil der zu entsorgende Menge an Lebensmittelresten über Biogasanlagen oder und auch in Kompostierungsanlagen verwertet. Das erzeugte Biogas wird für die Erzeugung von Strom und Wärme bzw. Biomethan genutzt. Gärrest und Kompost werden als sekundäre Nährstoff- und Humusquelle für Böden verwertet. Hierdurch werden Bioabfälle zwar einem Recycling zugeführt; jedoch erfüllen diese Verwertungspfade nicht die Kriterien und Ziele der Landestrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg und deren bioökonomischem Ansatz. Unsere innovative „Insektenbioraffinerie“ bietet die Chance, zusätzliche, bioökonomisch geprägte Verwertungskapazitäten auszubauen und effiziente stoffliche Verwertungsmöglichkeiten zu erschließen.

7.1.2 Insektenmast

In Europa waren zu Beginn des Projektes nur wenige Firmen in der Konzeptionsphase oder am Bau bzw. der Inbetriebnahme industrieller Produktionsanlagen für *Hermetia illucens* Larven beschäftigt. Am weitesten in der Entwicklung fortgeschritten sind in Europa die Firmen Hermetia (D), Protix (NL), Bestico (NL), Innovafeed (FR), Nextalim (FR), Agronutris (FR), sowie außerhalb Europas die Firmen Enterra (Kanada), Agriprotein (Südafrika) und Enviroflight (USA). Als Rohstoffe werden aktuell noch meist organische Reststoffe aus der Landwirtschaft eingesetzt, was in direkter Konkurrenz zum bestehenden Tierfuttermittelmarkt steht. Neben der Hermetia Baruth GmbH gibt es in Deutschland keinen industriellen Insektenproduzenten, sondern lediglich kleinere Versuchsanlagen (z. B. MadebyMade). Die Insektenprodukte werden als getrocknete Insektenlarven und trockenes Insektenmehl als Alternative zu Fischmehl und Sojaschrot vermarktet. Das Insektenfett wird zum Teil als Tierfutter für Aquakultur, Geflügel und Haustiere gehandelt. Rückstände aus dem Produktionsprozess werden als natürlicher Dünger im Bereich der ökologischen Pflanzenproduktion vertrieben. Hermetia produziert am Standort Baruth bereits Insektenlarven, jedoch mit gängigem Schweinefutter. Das proteinreiche Insektenmehl gelangt gemäß aktueller Gesetzeslage zur Verwertung vorwiegend nur in den Haustierfutterbereich (Hunde- und Katzenfutter).

Die Insektenlarvenherstellung von Hermetia erfolgt so, dass zunächst in Flugkäfigen eine Paarung der adulten Fliegen stattfindet. Das Weibchen legt dann ca. 500 Eier in einer Ablagevorrichtung aus Pappe ab. Diese Pappen werden dann manuell eingesammelt und in eine Abschlupfeinrichtung verbracht. Nach 2-4 Tagen schlüpfen Neonates (Frisch geschlüpfte Larven) aus den Eiern. Die Neonates werden auf Kraftfutter bei optimalen Parametern gezüchtet. Nach 5-7 Tagen werden die so gewonnenen Junglarven auf das zu verarbeitende Substrat umgesetzt. Die Substrathöhe und damit das Volumen sowie die Anzahl der Larven pro Flächeneinheit sind im Projekt für jedes Substrat zu ermitteln. Nach spätestens 12 Tagen sollte das Substrat weitgehend umgesetzt sein. Die Mast ist damit beendet.

Hermetia hat bereits Substrate wie Roggenschrot, Schweinefutter, Bioethanolschlempe, Stärkepülpe und Biertreber getestet, die jedoch klassisch zur direkten Fütterung an Nutztiere verwendet werden. Substrate wie überlagerte Lebensmittel, Rückläufer aus dem Einzelhandel oder komplexe Mischungen daraus sowie Mischungen mit Fisch- und Fleischbestandteilen und Speiseresten wurden erstmalig mit unserer „Insektenbioraffinerie“ betrachtet.

7.1.3 Aufarbeitung von Insekten (Primärraffination)

Nach der Mast erfolgt im ersten Schritt der Primärraffination eine mehrstufige mechanische Trennung der Larven vom Restsubstrat (nichtverwertete Bestandteile, Exuvien, Exkrememente) mit mehreren Rüttelsieben. Die Herausforderung hierbei ist es, dies möglichst noch im feuchten Zustand des Restsubstrats

durchzuführen. Die Larven haben ihr Endgewicht erreicht, bevor das Futtersubstrat völlig abgetrocknet ist. Der nächste Schritt der Primärraffination ist die sog. Devitalisierung, wobei die Larven in einem Trockner getrocknet werden. Anschließend werden die getrockneten Larven in einer Schneckenpresse bei 60 °C gepresst und so das Rohfett mechanisch vom Presskuchen getrennt. Dieses wird dann noch filtriert, um eventuelle partikuläre Bestandteile aus der Pressung zu entfernen. Weitere Reinigungsschritte wie Extraktion, Entschleimung, Bleichen oder Desodorierung analog zur Raffination von Pflanzenölen sollen in unserem Projekt untersucht werden. Bislang existiert hier noch kein final entwickeltes und skalierbares Verfahren, welches das Rohfett aufreinigt. Zudem wurden noch keine weiteren Schritte untersucht, um den proteinhaltigen Presskuchen vom Restfett zu befreien und somit eine höherwertige Proteinfraction zu erhalten. Hierfür wollen wir eine Fest-Flüssig-Extraktionseinheit vorsehen, durch welche das Restfett aus dem Presskuchen entfernt werden kann.

7.1.4 Technische Nutzung von Insektenfett (Sekundärraffination)

Öle und Fette können energetisch in Form von Biodiesel als Treibstoff oder stofflich in der chemischen Industrie, der sog. Oleochemie, als Farben, Lacke, Schmierstoffe, Kunststoffe oder Tenside genutzt werden [19]. Hierfür werden die Fettsäureester verseift oder die Fettsäuren substituiert (Umesterung). Zudem kann eine Hydrierung oder Epoxidierung an den Doppelbindungen oder eine Fettsäurespaltung durch Metathese durchgeführt werden [19, 20].

Problematisch ist, dass bislang sowohl für die energetische als auch die stoffliche Nutzung zumeist Pflanzenöle eingesetzt werden, welche auch als Lebensmittel Verwendung finden. Für Deutschland und die EU sind dies vorwiegend Raps- und Soja-, aber auch Sonnenblumenöl. Weltweit dominieren hier v. a. die tropischen Ölpflanzen wie Kokosnuss und die Ölpalme [21]. Für einen Einsatz in der chemischen Industrie ist die genaue Fettsäurezusammensetzung der Öle bzw. Fette entscheidend, da diese die Eigenschaften des Endprodukts bestimmen. Das aus Insektenlarven gewonnene Fett mit seinem hohen Anteil an Laurinsäure besitzt eine ähnliche Fettsäurezusammensetzung wie Kokos- oder Palmkernöl, welche z. B. vornehmlich für die Herstellung von biobasierten Tensiden zum Einsatz kommen.

Ein Einsatz von Fetten aus der Insektenzucht hätte somit zwei Vorteile. Zum einen stellen diese keine Konkurrenz zur Nutzung als Lebensmittel dar, zum anderen sind sie eine lokale Alternative zu tropischen Ölen, bei ähnlichen chemischen Eigenschaften. In diesem Projekt soll daher die technische Nutzung von unterschiedlich aufgereinigtem Insektenfett (siehe Primärraffination) für verschiedene Konversionspfade im Labor- bzw. Pilotmaßstab untersucht werden:

Biodiesel und Schmierstoffe: Durch eine Umesterung zu Fettsäuremethylestern kann aus Fetten Biodiesel hergestellt werden. Es sind bereits verschiedene Publikationen zur Herstellung von Biodiesel aus Insektenfett mittels chemischer und auch enzymatischer Verfahren vorhanden [22, 23]. Laut diesen Quellen besitzt Insekten-Biodiesel vergleichbare Eigenschaften zu Biodiesel aus Pflanzenölen. Die bei diesem Prozess eingesetzten Katalysatoren sind jedoch empfindlich gegenüber Schwebstoffen.

Seifen: Seifen werden zumeist aus Ölen bzw. Fetten hergestellt, welche aufgrund von niedriger Qualität für andere Anwendungen nicht in Frage kommen. Um reine Seife zu erhalten, werden die Fette mit Lauge gekocht und über Aussalzen von unverbrauchten Reaktanden separiert. Die Eigenschaften der Seife werden dabei sowohl von der Fettsäurezusammensetzung des Fettes als auch von der eingesetzten Lauge bestimmt und können deshalb durch Wahl der Substrate beeinflusst werden.

Mikrobielle Biotenside: Biotenside sind Tenside, welche mikrobiell, d. h. mittels fermentativer Verfahren aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Für die meisten Biotenside wird zur Herstellung ein Pflanzenöl verwendet, die Verwendung von Insektenfett wurde noch nicht untersucht. Während erste mikrobielle Biotenside wie die Sophorolipide bereits kommerzialisiert wurden [24], ist für die in diesem Projekt untersuchten Mannosylerythritolipide (MEL) noch kein skalierbarer Herstellungsprozess etabliert. In diesem Projekt soll daher die Herstellung von mikrobiellen Biotensiden aus Insektenfett verschiedener Reinheit untersucht werden, um eine neue und alternative Rohstoffquelle für diesen Prozess zu erschließen

und eine fermentative Umsetzung des Insektenfetts zu einem hochwertigen Produkt zu demonstrieren.

7.1.5 Technische Nutzung von Insektenprotein (Sekundärrefinement)

Proteine sind Biopolymere, die aus pflanzlichen oder aus tierischen Ressourcen extrahiert werden können. Das Gros der Proteine wird in der Ernährung eingesetzt. Die Verwendung von Proteinen aus nicht-essbaren Quellen ist demgegenüber vorwiegend technischer Natur, wobei dementsprechend die Funktionalität im Vordergrund steht. Die Filmbildung ist dabei für die meisten Anwendungen essentiell. Beim Gießen der Filme wird das Protein gelöst und dann das Lösungsmittel entfernt [25].

Im Sinne einer technischen Anwendung sollen die Larvenproteine in den jeweiligen Gebieten auf ihr Potenzial hin getestet werden. Auch nach intensiver Recherche finden sich keine Daten zur technischen Verwendung von Proteinen der Schwarzen Soldatenfliege. Unsere Evaluierung der Proteine aus der Primärrefinement konzentriert sich auf die nachfolgend dargestellten Anwendungsgebiete:

Proteine wie Kollagen und Casein sind als biobasierte Klebstoffe in der Papier- und Holzverarbeitung etabliert, beispielsweise bei der Etikettenherstellung oder der Verklebung von Holzfaserplatten [26]. Darüber hinaus dienen **Proteinhydrolysate als natürliche Bindemittel in Farben**, wo sie durch ihre filmbildenden Eigenschaften die mechanische Integrität sowie optische Effekte wie Glanz, unterstützen. Insbesondere Lederwaren verleihen sie einen natürlichen Glanz.

In **kosmetischen Formulierungen** werden Proteine seit den 1950er Jahren eingesetzt [27]. Aufgrund ihrer hohen Ausgangsviskosität ist hier eine vorherige Hydrolyse zwingend erforderlich. Die daraus resultierenden Hydrolysate wirken filmbildend, feuchtigkeitsbindend und tragen zur Oberflächenveredelung bei [28].

Proteinbasierte Folien, insbesondere aus Insektenproteinen wie denen der schwarzen Soldatenfliege, bieten eine vielversprechende biobasierte und biologisch abbaubare Alternative zu konventionellen **Mulchmaterialien**. Ihre Verwendung als Mulch soll nicht nur Unkrautwachstum unterdrücken und Verdunstung reduzieren, sondern auch ökologisch vorteilhaft sein [29].

7.1.6 Nutzung von nichtverwertetem Restsubstrat – Biogasproduktion

Das von den Larven nichtverwertete Restsubstrat kann in der Biogasproduktion allein oder als Cosubstrat eingesetzt, alternativ einer Kompostierung zugeführt werden. Weiter kann man das Substrat als Düngemittel und Bodenverbesserer einsetzen [30, 31]. Das Potential des Restsubstrats zur Biogasproduktion kann in erster Näherung mit Gülle verglichen werden [32], jedoch ist die Zusammensetzung und die darin enthaltene Mikrobiologie von der Fütterung der Larven abhängig. In gleicher Weise hängt die Biogas- (44-668 m³/t bezogen auf volatile Feststoffe) und Methanausbeute (26-502 m³/t) von dem spezifischen Prozess, aber eben auch von der Zusammensetzung des Restsubstrats ab [32]. Im Rahmen von InBiRa wurde die Biogasproduktion mit dem nichtverwerteten Restsubstrat erfolgreich durchgeführt (s. Kapitel 4.8).

7.1.7 Chitosanherstellung

Eine weitere Wertschöpfung wäre in der Extraktion des Chitins aus den Exuvien der Insekten im Restsubstrat zu sehen [33, 34]. Das Fraunhofer IGB ist Pionier der Chitinaufreinigung aus Reststoffströmen der *H. illucens*-Kultivierung. Zunächst wurde mit der Entwicklung einer Chitingehaltsbestimmung der Grundstein für weitere Arbeiten gelegt [35]. Ebenfalls veröffentlicht wurden Arbeiten zur Aufreinigung und die nachfolgende Umsetzung von Chitin aus Larvenexuvien zu Chitosan, dem säurelöslichen Derivat [36]. Das resultierende Chitosan wurde erfolgreich in Textilprozessen eingesetzt, speziell als Schlichtemittel oder zur Hydrophobierung von Textilien (Hydrofichi, FKZ: 031B0341A, BMBF) angesiedelt. Mittlerweile wurde *H. illucens*-basiertes Chitosan erfolgreich in weiteren Anwendungen getestet, wie z. B. Pflanzenschutz [37] und Lebensmittelkonservierung [38].

In InBiRa wurde zunächst der Chitingehalt im nicht-verwerteten Restsubstrat der Larvenmast bestimmt und für nicht ökonomisch verwertbar befunden (s. Abschnitt 4.7). Demgegenüber konnte jedoch die Chitin- und Chitosangewinnung aus Seitenströmen der Larvenzucht (Puppenexuvien und adulte Fliegen) erfolgreich

durchgeführt werden.

7.1.8 Nachhaltigkeitsbewertung

Die ökologische Bewertung erfolgt über die Energie- und Stoffstrombilanzen der betrachteten Prozesse und Aufbereitungsschritte mit der Methode der Ökobilanzierung. Diese werden zu Umweltwirkungskategorien aggregiert. Gleichzeitig werden mit der Abfallaufbereitung Produkte generiert, die konventionell produzierte Produkte ersetzen können. Die mit der konventionellen Produktion verbundenen Energie- und Stoffeinsparungen, werden erfasst und gehen in die Ökobilanzierung ein. Zudem wurden die mit InBiRa verbundenen ökonomischen und sozialen Auswirkungen benannt und argumentativ einbezogen.

Aufwand und Nutzen stehen dann in einem guten Verhältnis, wenn die aus der Bioabfallverwertung resultierende Umweltlast niedriger ist als der Nutzen und die mit der konventionellen Produktion verbundenen Umweltlast. Das System InBiRa wurde gegenüber alternativen Verwertungsansätzen für Biorestmassen sowie auch alternativen Ausrichtungen von Bioraffinerien verglichen.

Aus dem System InBiRa heraus entstehen über die Produktionslinien „Fett“, „Protein“ und „Restsubstrat“ Produkte und Massen, die einen Nutzen aufweisen und aufgrund dieser Eigenschaften vermarktet werden. Dies ist eine zentrale Grundlage für die Bilanzierung der erzielbaren Substitutionserfolge. Diese Produkte und Massen aus dem System InBiRa treten in Konkurrenz zu nutzengleichen, konventionell erzeugten Produkten und Massen. Ein Vergleich war daher für eine Vielzahl und Vielfalt an Produkten, die aus InBiRa resultieren, notwendig.

7.2 Detaillierte Auflistung der Öffentlichkeitsarbeit im Projekt

7.2.1 Pressearbeit in Abhängigkeit vom Projektfortschritt

Ein zentraler Baustein der Kommunikationsaktivitäten war die Erstellung von **Presseinformationen** zu verschiedenen Zeitpunkten im Projektverlauf sowie der Veröffentlichung von allgemeinverständlichen **Fachartikeln**.

- Mit Herausgabe einer ersten [Presseinformation »Mit Insekten zur Kreislaufwirtschaft«](#) zum Start des Projekts wurde ein Teil des **Meilensteins M3** erreicht.
- Die andere Hälfte von **M3** bestand in der Veröffentlichung eines Fachbeitrags (InBiRa: Insektenbioraffinerie verwandelt Lebensmittelreste in neue Produkte) auf dem [Webportal Bioökonomie Baden-Württemberg](#)
- Im Projektverlauf diente der [Besuch von UM-Staatssekretär Dr. Andre Baumann und EU-Kommissionsvertreter Miguel Avila als Anlass für eine weitere Presseinformation](#)
- Eine dritte [Presseinfo »Insektenbioraffinerie erfolgreich aufgebaut: So werden Bioabfälle zu neuen Wertstoffen«](#) zum Abschluss des Projekts im Oktober 2024 bildete zusammen mit dem LinkedIn-Newsletter (siehe unter 0) den Meilenstein **M20**.

Mit den Presseinformationen konnten insgesamt **44 Abdrucke** in auch branchenrelevanten Zeitschriften (euwid, Recycling-Portal), regionalen und überregionalen Tageszeitungen (StZ, StN u.a.) und Online-Portalen (bioökonomie.de) erreicht werden. Zudem führte die Pressearbeit zu einer Anfrage des SWR, die in einem **Filmbeitrag** zu InBiRa resultierte, der über 3SatNano ausgestrahlt wurde und über verschiedene ARD-Online-Präsenzen (z. B. tagesschau.de) abgerufen werden konnte.

7.2.2 Stakeholder-Analyse und zielgruppenspezifische Veranstaltungen

Ein weiterer elementarer Baustein war die **Organisation und Durchführung von Veranstaltungen**, um die Grundlage für das Verständnis der Öffentlichkeit und insbesondere des Fachpublikums für den neuartigen Lösungsansatz der Insektenbioraffinerie zu schaffen – Voraussetzung für einen erfolgreichen Transfer der Technologie in die Umsetzung und damit zur Verwertung der Projektergebnisse bzw. zur Vermarktung der mit InBiRa gewonnenen Produkte. Zu diesem Zweck wurden verschiedene, teils

partizipative Veranstaltungen für im Vorfeld ausgewählte Stakeholder durchgeführt. Durch die unten genannten Aktivitäten wurde **M16** erreicht.

Mittels Stakeholder-Analyse wurden folgende Zielgruppen identifiziert:

- Breite Öffentlichkeit
- Abfallwirtschaft
- Chemieindustrie
- Politik und Behörden

Veranstaltungen für die breite Öffentlichkeit waren:

- [Tag der offenen Tür am Fraunhofer Institutszentrum Stuttgart](#) mit Vortrag von Dr.-Ing. Susanne Zibek zu InBiRa, 25. Juni 2022
- [Ausstellung von InBiRa im Erlebnisraum Bioökonomie auf der Bundesgartenschau](#) 2023 in Mannheim, 14. April 2023 - 08. Oktober 2023
- [Aktionstag Insektenbioraffinerie im Erlebnisraum Bioökonomie](#), Spinelli-Park auf der Bundesgartenschau Mannheim, 25. Juni 2023
- Ausstellung von Rohstoffen, Fraktionen, Zwischenprodukten und Produkten der Insektenbioraffinerie InBiRa am Stand des IGVP der Uni Stuttgart; Tag der Wissenschaft der Universität Stuttgart, 8. Juni 2024
- [Tag der offenen Tür im Rahmen des Stuttgarter Wissenschaftsfestivals](#) am Fraunhofer-Institutszentrum Stuttgart mit Führung und Ausstellung »InBiRa – die Insektenbioraffinerie: Wie Fliegen Erdöl ersetzen«, 19. Oktober 2024

Beiträge zu fachlichem Austausch und Vernetzung von potenziellen Anwendern (Abfallwirtschaft, Chemie) sowie Stakeholdern aus der Politik wurden durch Vorstellung des Projekts bzw. der Projektergebnisse bei relevanten Veranstaltungen, Kongressen und Tagungen oder bei Besuchen geleistet:

- 13. Sitzung Bioabfall; Vorstellung von InBiRa durch Dr.-Ing. Susanne Zibek, 17.12.2021
- Sitzung Fachinitiative Bioraffinerien „Bio-Ab-Cycling“, 01.02.2022
- Sitzung des EFRE-Begleitausschusses BW, 19.05.2022
- [Bioabfallforum 2022](#), 27. Juni 2022, mit Vortrag von Dr.-Ing. Susanne Zibek: InBiRa – die Insektenbioraffinerie: Von der Verwertung organischer Reststoffe und Abfälle bis hin zur Herstellung von Produkten für Bereiche Kraftstoff, Kosmetik, Reinigungsmittel, Kunststoff und Pflanzendünger
- [Satellitenveranstaltung zum Bioökonomie-Kongress Baden-Württemberg](#) mit Vortrag von Dr.-Ing. Susanne Zibek zu InBiRa, 27. September 2022
- [Führung zu InBiRa anlässlich des Jubiläumssymposiums »70 Jahre Fraunhofer IGB«](#), Fraunhofer IGB, 10. Juli 2023
- [Besuch des Staatssekretärs Dr. Andre Baumann und des EU-Kommissionsvertreters Miguel Avila inkl. Delegation UM und MLR bei InBiRa](#), Fraunhofer IGB, 12. Juli 2023
- Informationsbesuch zu InBiRa am Fraunhofer IGB durch Vertreter des Umweltministeriums und der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, 08.02.2024
- [UTBW After Work Event „InBiRa – Fette und Proteine aus Bioabfall“](#), 27. Juni 2024, Informationsveranstaltung mit Vortrag zum Projekt und zu den Anwendungen der Produkte sowie Führung durch die Insektenbioraffinerie am IGB
- Informationsbesuch von Hans-Peter Behrens, MdL, sowie weiteren Personen der Fraktion Grüne im Landtag am Fraunhofer IGB zu InBiRa (Vortrag, Besichtigung der Insektenbioraffinerie am IGB) im Rahmen der Sommertour von MdL Behrens, 23. Juli 2024
- Ausstellung von Rohstoffen, Fraktionen, Zwischenprodukten und Produkten der Insektenbioraffinerie InBiRa am Stand des Fraunhofer IGB beim [Bioökonomie-Kongress Baden-Württemberg](#), 18. - 19. September 2024

Gezielte Ansprache potenzieller Anwender aus Abfallwirtschaft und Chemie auf Messen:

- 16. - 17. April 2024, Ausstellung von Rohstoffen, Fraktionen, Zwischenprodukten und Produkten der Insektenbioraffinerie InBiRa bei den [Deutschen Biotechnologietagen](#), bcc Berlin Congress Center
- 13. - 17. Mai 2024, Vorstellung der Insektenbioraffinerie (von den Rest- und Abfallstoffen, über die Insektenmast bis zu Fraktionen, Zwischenprodukten und Produkten) am Fraunhofer-Gemeinschaftsstand (Halle B2, Stand 338) auf der Messe [IFAT](#), München
- 10. - 14. Juni 2024: Vorstellung der Insektenbioraffinerie (von den Rest- und Abfallstoffen, über die Insektenmast bis zu Fraktionen, Zwischenprodukten und Produkten) am Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Allianz Chemie (Halle 6.0, Stand D49), Bereich „Accelerating Green Chemistry: Biobasierte Produkte aus Rest- und Abfallstoffen“ auf der Messe [ACHEMA](#), Frankfurt am Main

Entsprechend der Ausweisung des Projekts als „Vorhaben von strategischer Bedeutung“ wurde zudem unter Einbeziehung der Europäischen Kommission und der EFRE-Verwaltungsbehörde im Ministerium Ländlicher Raum eine **Abschlussveranstaltung als zentrale Kommunikationsveranstaltung** organisiert:

- [InBiRa-Abschlusskonferenz](#), 21. Oktober 2024, 10:30 – 16:00 Uhr, Fraunhofer IGB, Stuttgart
Hier wurden Stakeholdern die Ergebnisse des Projekts vorgestellt und die Potenziale der neuen Technologie aufgezeigt. Dabei erhielten die Teilnehmer Gelegenheit, die einzelnen Module der Insektenbioraffinerie bei einem Rundgang zu besichtigen.

Für die Veranstaltungen wurden zudem Postkarten und eine Abschlussbroschüre produziert:

- Konzeption, Entwurf, Layout und Druck einer Postkarte zu InBiRa als Mitnahmeartikel auf Messen und Veranstaltungen (Erstauflage Juni/2024 100, Zweite Auflage September/2024: 100 Stück)
- Konzeption, Entwurf, Layout und Druck der InBiRa-Abschlussbroschüre zur Information der Teilnehmer auf der Abschlusskonferenz sowie bei weiteren Veranstaltungen und Besuchen

7.2.3 Soziale Medien zur Sichtbarmachung und Verbreitung

Einen starken Akzent konnten wir mit vielfältigen Aktionen in den **sozialen Medien** des Fraunhofer IGB setzen, indem hier Beiträge zu den Aufgaben und Ergebnissen des Projekts, aber auch zu den im Projektverlauf erfolgten Presseinformationen, Infoveranstaltungen und Besuchen seitens der Politik u.v.m. gepostet wurden.

Insgesamt **88 Posts** auf den folgenden Kanälen wurden im Projektverlauf ausgespielt:

- [Instagram-Account des Fraunhofer IGB](#)
- [Twitter-Account des Fraunhofer IGB](#) (Deaktivierung Januar 2024)
- [Facebook-Account des Fraunhofer IGB](#) (Deaktivierung Januar 2024)
- [LinkedIn-Account des Fraunhofer IGB](#)
- [Newsletter Unboxing InBiRa auf LinkedIn](#)
- [Mastodon-Account des Fraunhofer IGB](#)

Auf **LinkedIn**, dem reichweitestärksten Kanal des Fraunhofer IGB (8.803 Follower Stand 25. März 2025), erzielten Beiträge im Zeitraum vom 1.6.2022 bis zum 25.03.2025 im Schnitt 1020 Impressionen (bezieht, wie oft Beiträge auf dem Bildschirm einer Person angezeigt wurden), 16 Reaktionen und eine Teilung. Ähnliche durchschnittliche Impressionen, Reaktionen und Teilungen können auch für die InBiRa-Beiträge angenommen werden. Der erfolgreichste Beitrag zur Insektenbioraffinerie erzielte auf LinkedIn 56 Reaktionen (Likes), 4 Kommentare, 5 Teilungen und 2821 Aufrufe.

Auf **Instagram** (997 Follower Stand 25. März 2025), erzielten Beiträge im Zeitraum vom 1.6.2022 bis zum 25.03.2025 im Schnitt 145 Impressionen und 8,5 Reaktionen. Ähnliche durchschnittliche Impressionen, Reaktionen und Teilungen können auch für die InBiRa-Beiträge angenommen werden. Der erfolgreichste

Beitrag zur Insektenbioraffinerie erzielte auf Instagram 50 Reaktionen (Likes) und 945 Aufrufe.

Die Metriken der deaktivierten Social-Media-Plattformen sowie von Mastodon können aufgrund Deaktivierung bzw. mangelnder Infrastruktur der Plattformen nicht ausgewertet werden.

Ein Highlight stellte die Etablierung eines **eigenen InBiRa-Newsletters auf LinkedIn** dar. Dort wurden, in Anlehnung an das auf Social Media bekannte »Unboxing«-Prinzip, Fortschritte und Meilensteine im Projekt Stück für Stück vorgestellt. So konnten neben der Forschungs-Community (ca. 1/3 der Follower des Newsletters) Brancheninteressierte aus der **Industrie** (ebenfalls ca. 1/3) und Studierende (1/4) angesprochen werden. Es konnten insgesamt bis heute **3.112 Abonnent:innen** für den Newsletter gewonnen werden. Die insgesamt **8 Ausgaben** erreichten im Schnitt **jeweils eine Reichweite von 1312 Artikelaufrufen** (Daten für 26.3.2024 bis 25.3.2025).

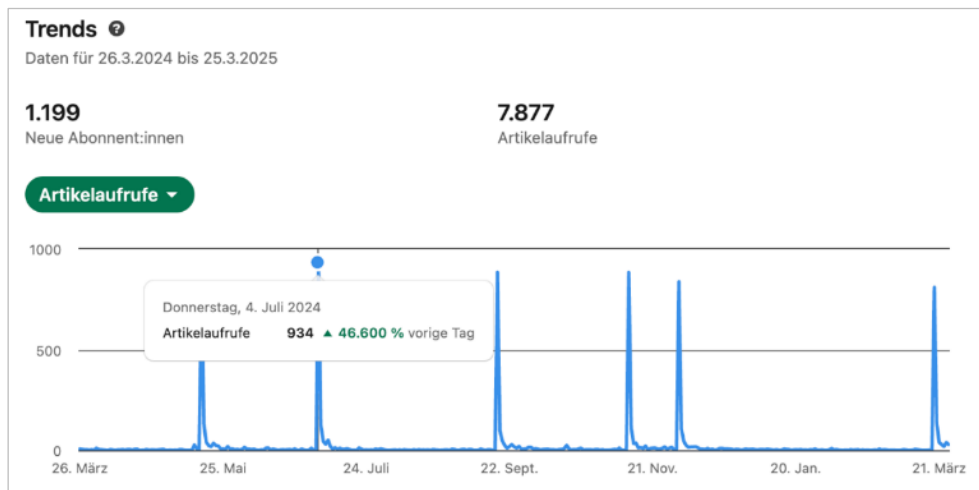


Abbildung 24: Newsletter-Aufrufe, LinkedIn-Newsletter »Unboxing InBiRa«

7.3 Ergänzende Tabellen und Abbildungen

Nachfolgend sind noch einige Diagramme und Tabellen dargestellt, die die in den einzelnen Kapiteln gezeigten Ergebnisse ergänzen.

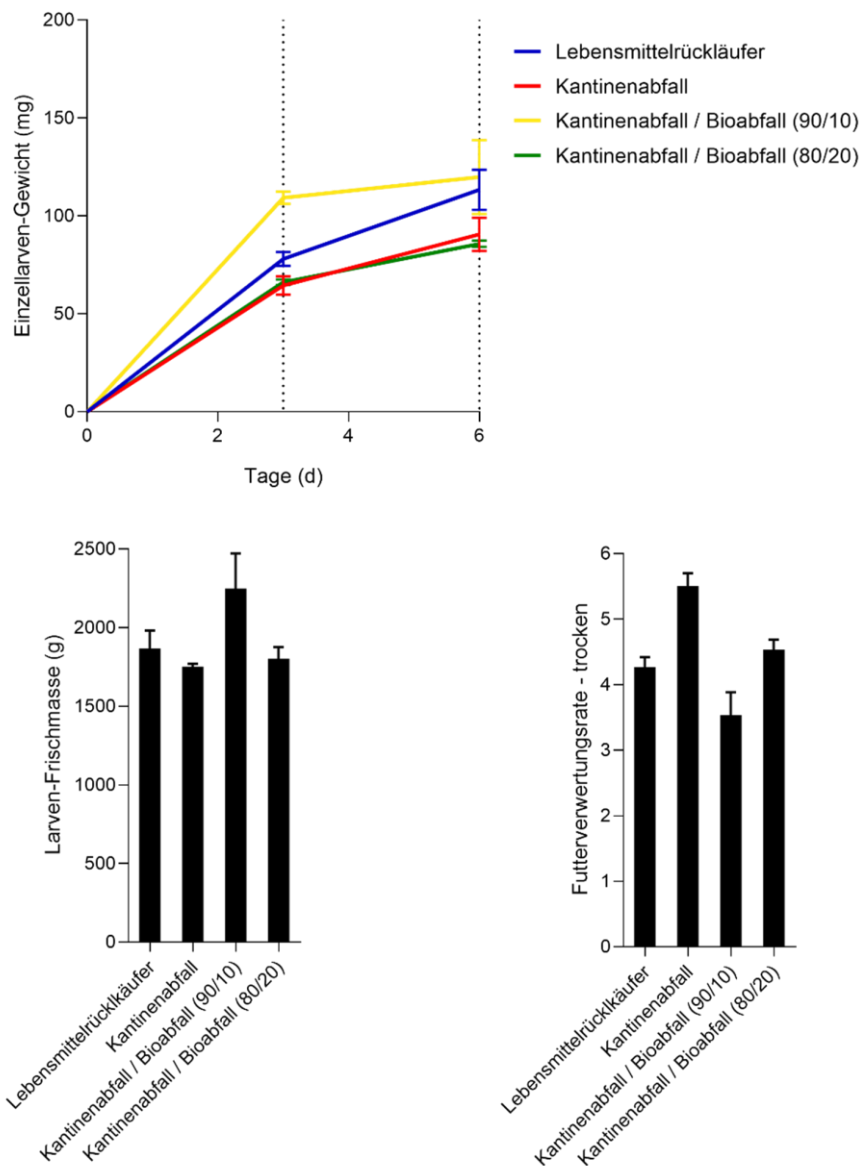


Abbildung 25: Auswertung der Pilotierungs-Futtermischungen im 10 kg Labormaßstab. Dargestellt ist das Larvenwachstum (Oben), die geernteten getrocknete Larven-Biomasse (Unten, links) sowie die Futterverwertungsrate (Unten, rechts). Die Fehlerbalken stellen den Mittelwert $\pm$ SD dar.

Tabelle 10: Fettkennzahlen der Roh- und Raffinierten Fette der sechs Pilotierungsexperimente (PEx).

Pilotierungsexperiment	Iodzahl [g I ₂ /100 g _{Fett}]	Verseifungszahl [mg KOH/ g _{Fett}]	Freie Fettsäuregehalt [mg KOH/ g _{Fett}]	Peroxidzahl [mmol O ₂ / kg _{Fett}]	Schmelzpunkt Mittelwert [°C]	Schmelz- bereich Start [°C]	Schmelz- bereich Ende [°C]	Viskosität [mPa s]
PEx 1	21,1 ± 0,98	242 ± 17	21,1 ± 0,51	0,35 ± 0,07				
PEx 1 Raff.	19,6 ± 2,6	229 ± 2,5	1,30 ± 0,40	0,08 ± 0,01	32,2 ± 0,21	31,5 ± 0,3	32,9 ± 0,3	30,6 ± 0,05
PEx 2	63,4 ± 0,59	201 ± 13	13,6 ± 0,40	0,32 ± 0,01				
PEx 2 Raff.	55,2 ± 0,55	194 ± 4,0	11,3 ± 0,60	0,08 ± 0,01	20,6 ± 0,22	19,0 ± 0,4	22,2 ± 0,2	
PEx 3	44,0 ± 0,68	237 ± 6,5	1,20 ± 0,15	0,39 ± 0,01				
PEx 3 Raff.	34,2 ± 0,96	234 ± 2,3	1,00 ± 0,14	0,09 ± 0,01	24,6 ± 0,18	22,8 ± 0,2	26,4 ± 0,3	
PEx 4	66,2 ± 0,24	220 ± 5,7	11,7 ± 0,23	0,26 ± 0,09				
PEx 4 Raff.	63,6 ± 0,45	215 ± 4,2	4,00 ± 0,60	0,05 ± 0,01	18,4 ± 0,29	17,2 ± 0,5	19,6 ± 0,3	36,4 ± 0,19
PEx 5	69,2 ± 0,10	215 ± 5,1	25,7 ± 2,8	1,31 ± 0,06				
PEx 5 Raff.	68,7 ± 0,96	214 ± 3,5	11,9 ± 0,62	0,14 ± 0,01	18,8 ± 0,22	17,1 ± 0,4	20,5 ± 0,2	35,6 ± 0,07
PEx 6	58,0 ± 0,42	229 ± 6,9	3,20 ± 0,20	1,28 ± 0,05				
PEx 6 Raff.	50,1 ± 0,84	223 ± 1,8	2,80 ± 0,10	0,99 ± 0,01	22,0 ± 0,25	20,8 ± 0,3	23,2 ± 0,4	

Tabelle 11: FAME-Analytik der Fette aus Pilotierungsexperimente (PEx) 1, 4 und 5 im Vergleich zur Regulation EN 14214.

PEx	Ausbeute [%]	FFA [mg KOH/ g _{Fett}]	VZ [mg KOH/ g _{Fett}]	IZ [g I ₂ /100 g _{Fett}]	POZ [mmol O ₂ / kg _{Fett}]	Viskosität 40°C [mPa s]	KF [ppm]	Dichte bei 15°C [kg/m ³]	Estergehalt via GC [%]
PEx 1	92	0,06 ± 0,02	238 ± 3,0	25,8 ± 0,03	0,10 ± 0,01	2,70 ± 0,05	290 ± 3	872 ± 3	97,2 ± 0,4
PEx 4	84	0,13 ± 0,04	210 ± 2,8	55,2 ± 0,46	0,05 ± 0,01	3,43 ± 0,05	159 ± 7	876 ± 2	97,4 ± 0,4
PEx 5	77	0,21 ± 0,06	215 ± 2,9	57,6 ± 1,43	0,05 ± 0,01	3,45 ± 0,02	258 ± 7	875 ± 3	97,4 ± 0,3
PEx EN 14214	n/a	0 - 0,5	n/a	0 - 120	n/a	3,5 - 5,0	0 - 500	860 - 900	96,5 - 100

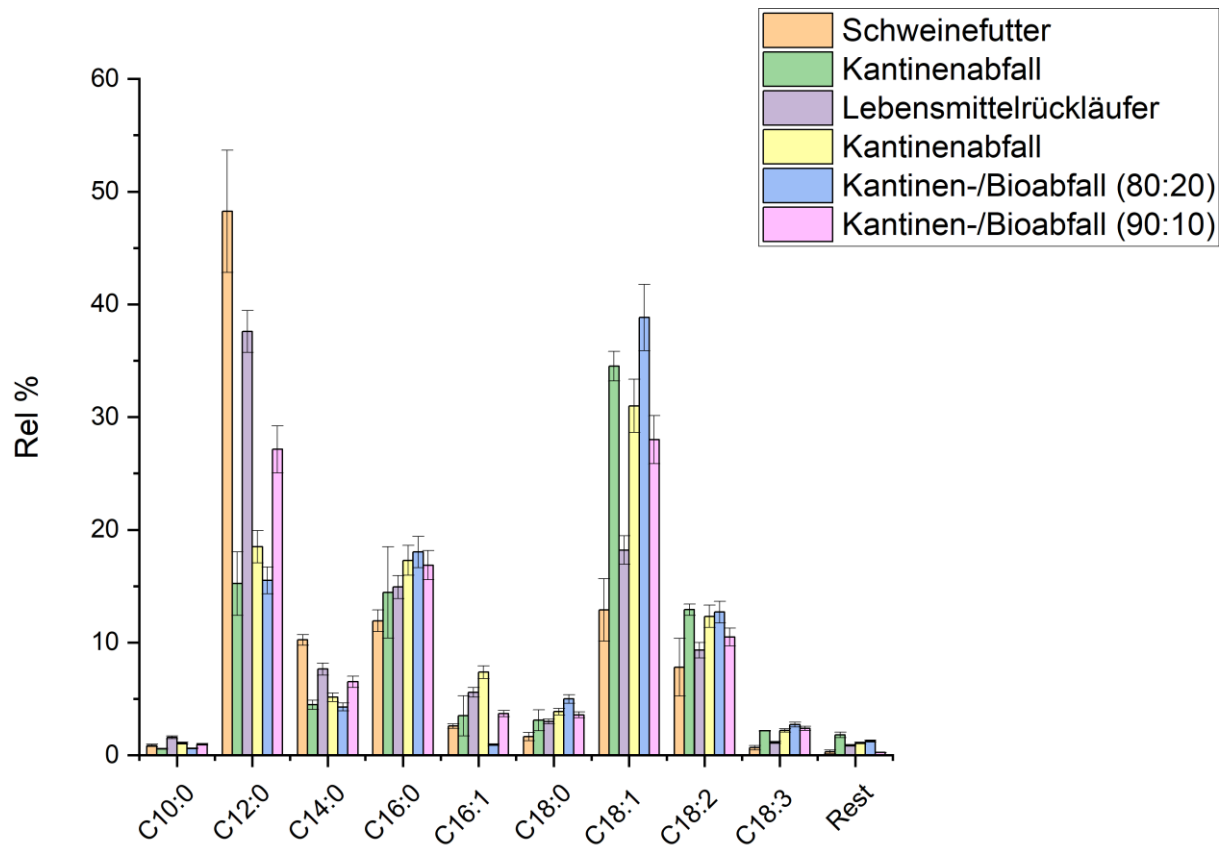
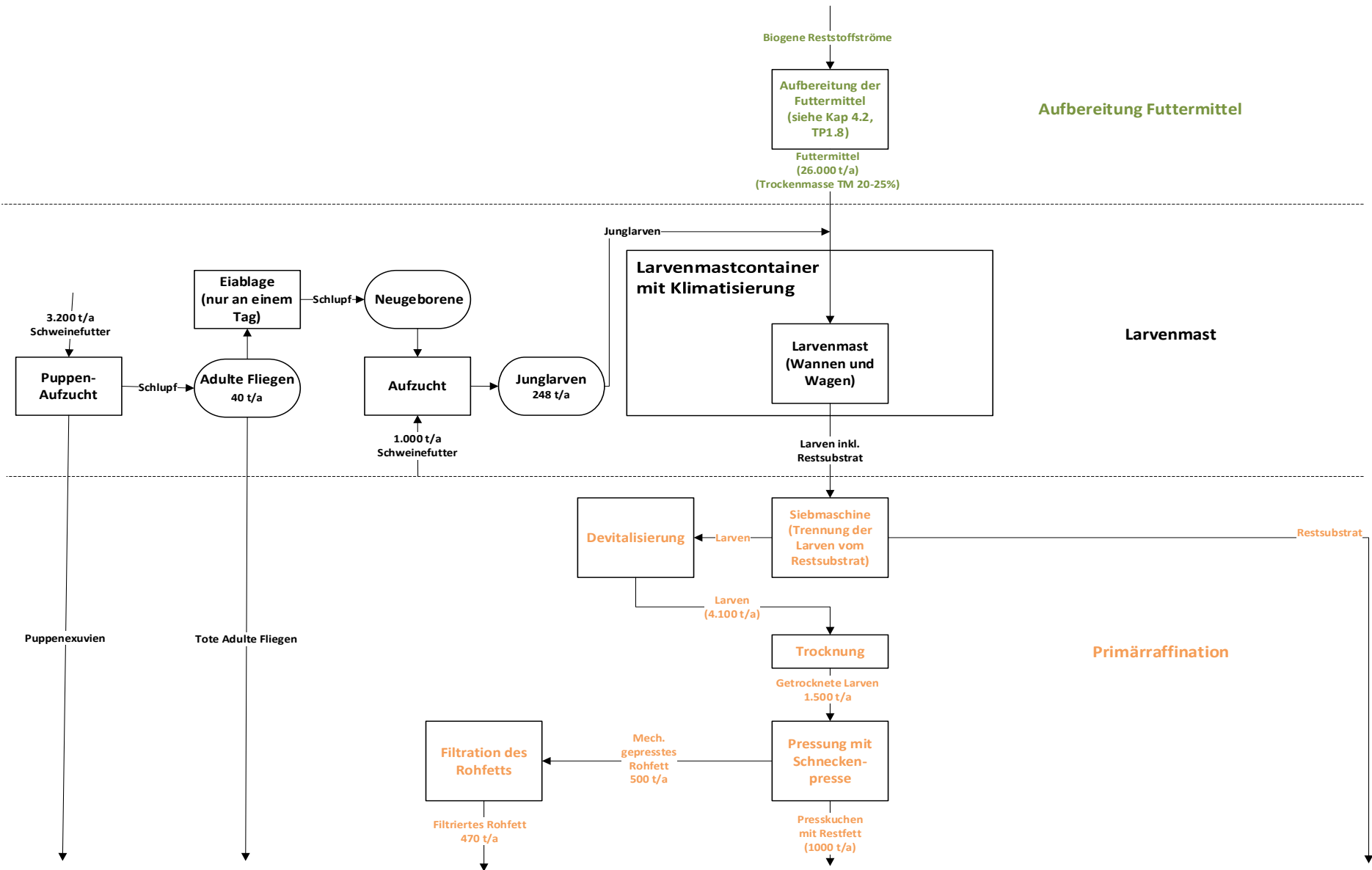


Abbildung 26: GC-FID Spektrum der unterschiedlichen Fette der sechs Pilotierungsexperimenten.

Tabelle 12: Stoffströme zur Sachbilanz des InBiRa-Verfahrens für die Ökobilanzierung, ohne Abwärmenutzung und mit Schweinefutter als Futtermittel in der Reproduktion.

Bioraffineriestritt	Prozess	Input/Output
Futtermittelherstellung	Zerkleinerung	Lebensmittelrückläufer Backwaren
		Lebensmittelrückläufer Gemüse/Obst
		Lebensmittelrückläufer Molkereiprodukte
		Lebensmittelrückläufer Fisch/Fleisch
		Kantinenabfälle
		Bioabfall
		Strom Zerkleinerer
		Strom Sieb
		Strom Nachzerkleinerung
		Strom gesamt
		biogene Reststoffe, zerkleinert
	Mischen und Vorheizen	biogene Reststoffe, zerkleinert
		Strom Rührer
		Strom Wasser erhitzen
		Strom gesamt
		Wasser
	Dosierung	Lebensmittelrückläufer, gemischt
		Strom
		Futtermittelmischung
Larvenproduktion	Produktion Eier	Strom
		Wärme
		Schweinefutter
		Exuvien Puppen
		Tote Fliegen
		Eier
	Aufzucht und Mast	Futtermittelmischung
		Eier
		Strom
		Wärme
		Schweinefutter
		Präpupale Exuvien
Primärraffination	Sieben	Insektenlarven und Frass
		Strom
		Frass
		Larven
	Devitalisierung, Trocknung und Vorheizen	Larven
		Strom
		Wärme
		Wasser
		Abwasser
		Wärme
	Schneckenpresse	Larven, getrocknet
		Strom
		Fett, roh
	Mahlen Filterkuchen	Presskuchen
		Filterkuchen
		Strom
Trennung von Fett und Protein	Filtration Fett	Presskuchen, gemahlen
		Fett, roh
		Strom
		Filterkuchen
	Fest/Flüssig Extraktion	Fett, gefiltert
		Presskuchen, gemahlen
		Filterkuchen
		Strom
		Wärme
		Essigsäureethylester, gesamt
		Essigsäureethylester, frisch
		Presskuchen, gelöst
	Lösemittel-verdampfung	Presskuchen, gelöst

Bioraffineriestritt	Prozess	Input/Output
		Strom
		Essigsäureethylester, recycelt
		Essigsäureethylester, Emissionen in die Luft
		Fett, ex.
Fettverarbeitung	Herstellung von FAME	Fester Rückstand, Protein
		Fett, ex.
		Fett, gefiltert
		Strom
		Wärme
		Methanol
		Phosphorsäure
		potassium hydroxide
		Natriumhydroxid
		Natriummethoxid
		Schwefelsäure
		Wasser
		Wasser, deionisiert
		Kohlenstoffdioxid, Luft
		Kühlwasser
		Kohlenstoffdioxid, nicht fossil
		Restmüll
		Abwasser
		Wasser
		Glycerin
		FAME
Proteinverarbeitung	Auslaugung	Fester Rückstand, Protein
		Strom
		Natriumhydroxid
		Wasser
	Filtration	Proteinlösung
		Proteinlösung
		Strom
		Fester Rückstand
	Ausfällen	Proteinlösung, gefiltert
		Proteinlösung, gefiltert
		Strom
		Salzsäure 30%
	Filtration	Protein, ausgefällt
		Protein, ausgefällt
		Strom
		Natriumchlorid
	Lösemittelverdampfung	Abwasser
		Protein, ausgefällt, nass
		Protein, ausgefällt, nass
		Strom
		Wärme
Chitinherstellung		Eisen
		Wasser
		Protein
		Exuvien Puppen
		Tote Fliegen
		Präpupale Exuvien
		Strom
		Wasser
		Wärme
		Ethanol
		Ameisensäure
		Wasserstoffperoxid
		Natriumhydroxid
		Chitin
		Fett
		Protein
		Abwasser
		Kohlenstoffdioxid, Emissionen in die Luft
		Proteinschlamm



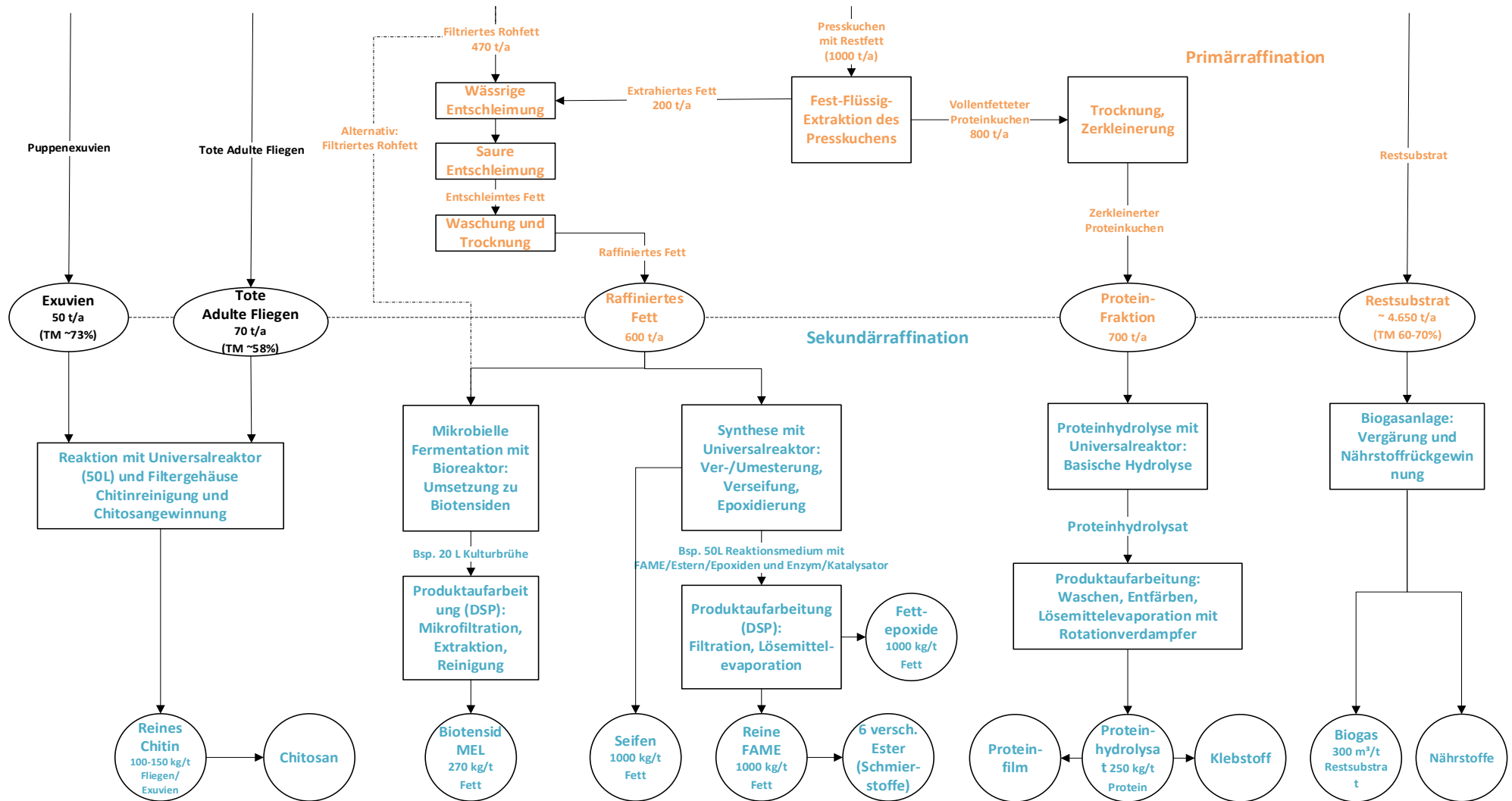


Abbildung 27: Konzept für Industrieanlage mit Prozesseinheiten und Massenströmen.

8 Literatur

1. van Huis, A. and J.K. Tomberlin, *Insects as Food and Feed: From Production to Consumption*. 2017: Wageningen Academic Publishers.
2. Surendra, K.C., et al., *Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming*. Renewable Energy, 2016. **98**: p. 197-202.
3. Lalander, C.H., A.J. Komakech, and B. Vinnerås, *Vermicomposting as manure management strategy for urban small-holder animal farms – Kampala case study*. Waste Management, 2015. **39**: p. 96-103.
4. Lardé, G., *Recycling of coffee pulp by Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae) larvae*. Biological Wastes, 1990. **33**(4): p. 307-310.
5. Rehman, K.U., et al., *Conversion of mixtures of dairy manure and soybean curd residue by black soldier fly larvae (Hermetia illucens L.)*. Journal of Cleaner Production, 2017. **154**: p. 366-373.
6. Spranghers, T., et al., *Nutritional composition of black soldier fly (Hermetia illucens) prepupae reared on different organic waste substrates*. J Sci Food Agric, 2017. **97**(8): p. 2594-2600.
7. Sarpong, D., et al., *Biodegradation by composting of municipal organic solid waste into organic fertilizer using the black soldier fly (Hermetia illucens) (Diptera: Stratiomyidae) larvae*. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 2019. **8**(1): p. 45-54.
8. Manurung, R., et al., *Bioconversion of Rice straw waste by black soldier fly larvae (Hermetia illucens L.) : Optimal feed rate for biomass production*. Journal of entomology and zoology studies, 2016. **4**: p. 1036-1041.
9. Tinder, A.C., et al., *Bioconversion of sorghum and cowpea by black soldier fly (Hermetia illucens (L.)) larvae for alternative protein production*. Journal of Insects as Food and Feed, 2017. **3**(2): p. 121-130.
10. Dijkstra, A.J. and M. Van Opstal, *The total degumming process*. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1989. **66**(7): p. 1002-1009.
11. Gerpen, J.V., *Biodiesel processing and production*. Fuel Processing Technology, 2005. **86**(10): p. 1097-1107.
12. Batish, I., et al., *Effects of Enzymatic Hydrolysis on the Functional Properties, Antioxidant Activity and Protein Structure of Black Soldier Fly (Hermetia illucens) Protein*. Insects, 2020. **11**(12).
13. Burgess, R.R., *Protein Precipitation Techniques*, in *Guide to Protein Purification, Second Edition*, R.R. Burgess and M.P. Deutscher, Editors. 2009. p. 331-342.
14. Belitz, H.-D., W. Grosch, and P. Schieberle, *Amino Acids, Peptides, Proteins*, in *Food Chemistry*, H.-D. Belitz, W. Grosch, and P. Schieberle, Editors. 2009, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 8-92.
15. Giegrich, J. and R. Vogt, *Beitrag der Abfallwirtschaft zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland*. 2005, Umweltbundesamt: Berlin.
16. Kaltschmitt, M., H. Hartmann, and H. Hofbauer, *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Vol. 2. 2009, Heidelberg: Springer Berlin. 1030.
17. *Black soldier fly larvae, fat > 20%, dried*. Feed tables [cited 2025 29.04.2025]; Available from: <https://www.feedtables.com/content/black-soldier-fly-larvae-fat-20-dried-0>.
18. *Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft*. Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 2021 [cited 2021 27.2.21]; Available from: <https://www.bmbf.de/de/biooekonomie-neue-konzepte-zur-nutzung-natuerlicher-ressourcen-726.html>.
19. Salimon, J., N. Salih, and E. Yousif, *Industrial development and applications of plant oils and their biobased oleochemicals*. Arabian Journal of Chemistry, 2012. **5**(2): p. 135-145.
20. Metzger, J.O., *Fats and oils as renewable feedstock for chemistry*. European Journal of Lipid Science and Technology, 2009. **111**(9): p. 865-876.
21. Raschka, A. and M. Carus, *Stoffliche Nutzung von Biomasse - Basisdaten für Deutschland, Europa und die Welt*, in *Ökologische Innovationspolitik – mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzung von Biomasse*. 2012, nova-Institut GmbH: Hürth.
22. Nguyen, H.C., et al., *Lipase-catalyzed synthesis of biodiesel from black soldier fly (Hermetia illucens): Optimization by using response surface methodology*. Energy Conversion and Management, 2017. **145**: p. 335-342.
23. Li, Q., et al., *From organic waste to biodiesel: Black soldier fly, Hermetia illucens, makes it feasible*. Fuel, 2011. **90**(4): p. 1545-1548.
24. Kim, J.-H., et al., *Value-added conversion of biodiesel into the versatile biosurfactant sophorolipid using Starmerella bombicola*. Cleaner Engineering and Technology, 2020. **1**: p. 100027.

25. Verbeek, C.J.R. and L.E. van den Berg, *Extrusion Processing and Properties of Protein-Based Thermoplastics*. Macromolecular Materials and Engineering, 2010. **295**(1): p. 10-21.
26. Heinrich, L.A., *Future opportunities for bio-based adhesives – advantages beyond renewability*. Green Chemistry, 2019. **21**(8): p. 1866-1888.
27. Secchi, G., *Role of protein in cosmetics*. Clinics in dermatology, 2008. **26**: p. 321-5.
28. Simionato, A.V., E. Carrilho, and M.F. Tavares, *Characterization of protein hydrolysates of cosmetic use by CE-MS*. J Sep Sci, 2011. **34**(8): p. 947-56.
29. Setti, L., et al., *Bioplastic Film from Black Soldier Fly Prepupae Proteins Used as Mulch: Preliminary Results*. Agronomy, 2020. **10**(7): p. 933.
30. Lomonaco, G., et al., *Larval Frass of Hermetia illucens as Organic Fertilizer: Composition and Beneficial Effects on Different Crops*. Insects, 2024. **15**(4): p. 293.
31. Schmitt, E. and W. de Vries, *Potential benefits of using Hermetia illucens frass as a soil amendment on food production and for environmental impact reduction*. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2020. **25**: p. 100335.
32. Magro, A.D., et al., *The potential of insect frass for sustainable biogas and biomethane production: A review*. Bioresource Technology, 2024. **412**: p. 131384.
33. Jasso, B., et al., *Black soldier fly larvae (Hermetia illucens) frass and sheddings as a compost ingredient*. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2024. **Volume 7 - 2023**.
34. Yildirim-Aksoy, M., et al., *Use of dietary frass from black soldier fly larvae, Hermetia illucens, in hybrid tilapia (Nile x Mozambique, Oreochromis niloticus x O. mozambique) diets improves growth and resistance to bacterial diseases*. Aquaculture Reports, 2020. **17**: p. 100373.
35. Hahn, T., et al., *New methods for high-accuracy insect chitin measurement*, in *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018. p. 5069-5073.
36. Hahn, T., et al., *Chitosan production with larval exoskeletons derived from the insect protein production*, in *Journal of Biotechnology*. 2020. p. 62-67.
37. Escobar Rodríguez, C., et al., *Chitosan obtained from black soldier fly larval cuticles expands the value chain and is effective as a biocontrol agent to combat plant pathogens*. Carbohydrate Polymers, 2025. **349**: p. 123023.
38. Triunfo, M., et al., *Hermetia illucens, an innovative and sustainable source of chitosan-based coating for postharvest preservation of strawberries*. iScience, 2023. **26**(12): p. 108576.

9 Autorenliste

Tabelle 13: Alle Autoren, die bei der Erstellung des Berichts mitgewirkt haben.

Partner	Autoren
Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB	Susanne Zibek, Alexander Beck, Claudia Vorbeck, Pravesh Tamang, Fabiola Maria Salguero del Valle, Lisa Kern, Thomas Hahn
Hermetia Baruth	Franziska Schindler, Kirsten Katz
Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie (IGVP) - Universität Stuttgart	Christian Schmidle, Günter Tovar
Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft (ISWA) - Universität Stuttgart	Daniel Raja-Nigl, Sandra Grob, Bettina Krucker
ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH	Christian Dierks, Joachim Reinhardt, Corvin Veith, Bianca Siedlecki