

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 18235 N

## Thema

Funktionsmuster einer industriellen Produktions- und Fraktionierungsanlage (Fett + Protein) von Insekten

## Berichtszeitraum

01.10.2015 - 30.09.2018]

## Forschungsvereinigung

Internationale Forschungsgemeinschaft Futtermitteltechnik e. V.

## Forschungseinrichtung(en)

Forschungsinstitut Futtermitteltechnik der IFF, Frickenmühle 1A, 38110 Braunschweig

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Cauerstraße 4, 91058 Erlangen

Hochschule Bremerhaven, Labor für Lebensmittelchemie, An der Karlstadt 8, 27568 Bremerhaven

Bremerhaven,

17.01.2019

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Erlangen,

25.1.2019

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Braunschweig,

03.04.2019

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie



Forschungsnetzwerk  
Mittelstand

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	4
1 Einleitung .....	6
2 Stand von Wissenschaft und Technik.....	7
2.1 Entwicklung von Funktionsmustern und Automatisierung .....	7
3 Forschungsziel .....	14
3.1 Angestrebte Ergebnisse .....	14
3.2 Innovativer Beitrag .....	14
4 Material und Methoden.....	15
4.1 Bestimmung der Produkteigenschaften von Mischfutter .....	15
4.1.1 Partikelgrößenverteilung .....	15
4.1.2 Feuchtigkeit.....	15
4.1.3 Mikrobiologischer Zustand.....	15
4.1.4 Pelletfestigkeit.....	16
4.1.5 Chemische Stoffeigenschaften.....	16
4.1.6 Lösliches Protein.....	16
4.1.7 Wasseraktivität.....	16
4.1.8 4-HNE Bestimmung.....	16
4.2 Aufbau des Funktionsmusters .....	17
4.2.1 Auslegung und Konstruktion des Zick-Zack-Sichters.....	17
4.2.2 Berechnung der Sinkgeschwindigkeit.....	17
4.2.3 Künstlich neuronale Netze.....	19
4.3 Trocknung .....	20
4.3.1 Wirbelschichttrockner .....	20
4.3.2 Stikkenofen .....	20
4.3.3 Vakuumofen.....	20
4.3.4 Mikrowelle .....	20
4.3.5 Gefriertrockner .....	20
4.3.6 Bandtrockner.....	21
4.4 Datenerhebung zur Bestimmung der Energieeffizienz.....	21
4.4.1 Strom, Spannung, Leistungsmessung, Energiemessung nach Trendows .....	21
5 Ergebnisse und Diskussion .....	21
5.1 AS 1: Aufbau des automatisierten Funktionsmusters zur Insektenzucht (LSTM, HSB) .....	21
5.2 AS 2: Vorverarbeitung der gewonnenen Insekten durch Fraktionierung und Trocknung (HSB, IFF).....	39
5.2.1 Trockenaufbereitung der Insekten .....	46

5.2.2 Nassaufbereitung der Insekten .....	49
5.2.3 Fettsäurezusammensetzung .....	54
5.3 AS 3: Herstellung von Mischfutter mit insektenbasierten Rohstoffen und Bewertung (IFF) 57	
5.3.1 Rohwarenerkleinerung .....	57
5.3.2 Pelletieren von Mischfutter .....	62
6 Zusammenfassung und Ausblick .....	68
7 Nachweis der Verwendung der Zuwendung .....	73
7.1 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten .....	73
7.2 Verwendung der zugewendeten Mittel.....	74
7.3 Plan zum Ergebnistransfer .....	75
<u>7.4</u> Einschätzung der Realisierbarkeit des Transferkonzeptes.....	79
Literaturverzeichnis .....	82

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der im industriellen Maßstab Insekten produzierenden und verarbeitenden Unternehmen [IPIFF 2017].....	9
Tabelle 2: Daten zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit für Mehlkäferlarven, Exuvien, Faeces und Substrat .....	26
Tabelle 3: Technische Daten des Förderbands .....	30
Tabelle 4: Technische Daten des Dosierers .....	31
Tabelle 5: Daten zum optischen Messsystem mit intelligenter Industriekamera.....	31
Tabelle 6: Daten bezüglich der verwendeten Software .....	32
Tabelle 7: Zusammengefasste Ergebnisse der unterschiedlichen Trocknungsmethoden für <i>T. molitor</i> Larven. Werte mit einem gleichen hochgesetzten Buchstaben sind nicht signifikant unterschiedlich ( $p < 0,05$ ; ANOVA/ Bonferroni post hoc Test) .....	41
Tabelle 8: Einfluss der Trocknungstemperatur auf die Qualität des Proteinträgers <i>Tenebrio molitor</i> . Trocknungsfläche 2500 cm <sup>2</sup> (50 cm x 50 cm), Schichthöhe 4,5 cm, Luftgeschwindigkeit 0,52 m/s, Ausgangs-Gesamtkeimzahl $8,2 \times 10^6$ cfu/g (Durchschnittswerte dreier Replikate $\pm$ Standardabweichung) .....	43
Tabelle 9: Wender-Analysedaten der getrockneten Larve des <i>Tenebrio molitor</i> sowie des Presskuchens nach der Aufbereitung mittels Seiherschneckenpresse verglichen mit handelsüblichem Fischmehl (Durchschnittswerte dreier Replikate $\pm$ Standardabweichung). ..	48
Tabelle 10: Ergebnisse der Zentrifugationsversuche zur Nassaufbereitung.....	50
Tabelle 11: Fettsäurezusammensetzung von <i>Tenebrio molitor</i> in Abhängigkeit von der Trocknungsvariante. Werte mit einem gleichen hochgesetzten Buchstaben sind nicht signifikant unterschiedlich ( $p < 0,05$ ; ANOVA/ Bonferroni post hoc Test).....	54
Tabelle 12: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach Austritt aus der Seiherschneckenpresse .....	58
Tabelle 13: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach der Zerkleinerung mittels Walzenstuhl Walzenspalt 0,0 mm.....	60
Tabelle 14: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach der Zerkleinerung mittels Walzenstuhl Walzenspalt 0,25 mm.....	60
Tabelle 15: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach der Zerkleinerung mittels Walzenstuhl Walzenspalt 0,5 mm.....	61
Tabelle 16: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach der Zerkleinerung mittels Walzenstuhl Walzenspalt 0,75 mm.....	61
Tabelle 17: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfeeders (konventionell).....	64
Tabelle 18: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfeeders mit 25% Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot) .....	64
Tabelle 19: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfeeders mit 50 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot .....	65
Tabelle 20: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfeeders mit 75 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot .....	65

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fließdiagramm einer möglichen Produktionslinie von der Insektenlarve bis zum Produkt.....	8
Abbildung 2: Aufarbeitungsschema von Insekten zur Herstellung von Proteinmehl, Chitosan und Lipid (US20180002452A1) .....	10
Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Ringmatrizenpresse mit Detailausschnitt des Materialeinzugs (frei nach <a href="http://www.gemco-machine.com">http://www.gemco-machine.com</a> ) .....	13
Abbildung 4: Kräftebilanzierung für die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit .....	17
Abbildung 5: Darstellung eines zweischichtigen feed-forward Netzes mit sigmoidalen und softmax Aktivierungsfunktionen. Die Eingangswerte gelangen über die Inputschicht in die sog. „Hidden-Layer“. Entsprechend der Aktivierungsfunktionen muss die Summe über einem Grenzwert liegen, damit das Neuron ein Ausgangssignal an die nächste Schicht weitergibt ( <a href="https://de.mathworks.com/help/deeplearning/ref/patternnet.html">https://de.mathworks.com/help/deeplearning/ref/patternnet.html</a> ; Stand 17.01.2019) .....	19
Abbildung 6: Darstellung eines Neurons. Die Eingangssignale werden zuerst zu einem Wert $net_j$ aufsummiert und anschließend mit der Aktivierungsfunktion weiterverarbeitet. Sollte die Aktivierung positiv sein, wird der Ausgabewert an darauffolgende Neuronen weitergegeben. ....	20
Abbildung 7: Konzeptionelles Fließbild für eine <i>Tenebrio molitor</i> Zucht im industriellen Maßstab. Erstellung des Fließbilds mit Microsoft Visio Professional.....	22
Abbildung 8: Reduzierte, optimierte Darstellung des Zuchtprozesses von Abbildung 7 .....	23
Abbildung 9: Fertiger Zick-Zack-Sichter mit 17 Trennstufen .....	25
Abbildung 10: Strömungssimulation im Zick-Zack-Sichter .....	27
Abbildung 11: Zick-Zack-Sichter im Betrieb. Hervorzuheben ist hierbei die Abnahme des Feingutanteils im Grobgut mit steigender Stufenzahl.....	28
Abbildung 12: Kombination aus Zick-Zack-Sichter und Fließband aus Aluminium-Item Profilen .....	29
Abbildung 13: Automatischer Futterautomat von Brabender zur Befüllung der Aufzuchtbehälter der Larven mit Weizenkleie .....	30
Abbildung 14: Integriertes Kamerasystem mit Auswertemodul zur Detektion des Entwicklungsstandes der Insekten.....	31
Abbildung 15: Gesamtübersicht des Funktionsmusters (Automatisierung) für die Insekten ..	32
Abbildung 16: Schaltschrank/Automatisierungsbox für die Regelungstechnik des Funktionsmusters .....	33
Abbildung 17: Bildverarbeitung.....	33
Abbildung 18: Normierte Gegenüberstellung der Mittelwerte der einzelnen „Features“ inkl. Standardabweichung. Das Zusammenspiel der Features führt zu einer eindeutigeren Klassifikation, indem die Einflüsse der Überlappungen der einzelnen Features durch den Zusammenschluss verringert wurden .....	35
Abbildung 19: Confusion Matrix .....	35
Abbildung 20: Confusion Matrix mit Minimum der Cross-Entropy von 0,0471 .....	36

Abbildung 21: Klimaraum für die Unterbringung der Larvenaufzucht (links) und des Funktionsmusters (Automatisierung, rechts).....	38
Abbildung 22: Darstellung des Trocknungsprozesses mit den verschiedenen Trocknungsverfahren.....	40
Abbildung 23: Farbunterschiede der Mehlkäferlarven vor und nach der Trocknung. 1) Mikrowellen; 2) Gefriertrocknung; 3) Ungetrocknete Larven; 4) Stikkenofen; 5) Vakuumofen; 6) Wirbelschicht.....	42
Abbildung 24: Schematische Darstellung der Verarbeitung und Fraktionierung von Larven von <i>T. molitor</i> und <i>H. illucens</i> [Bußler et al. 2013].....	46
Abbildung 25: Schematische Darstellung des Seiherschneckenprozesses zur Proteinextraktion von Mehlkäferlarven in Presskuchen und Lipid ( <i>Tenebrio molitor</i> ) .....	47
Abbildung 26: Zusammensetzung von <i>Tenebrio molitor</i> a) nach dem Trocknen und nach dem Abpressen des Fettes mittels Schneckenpresse durch zwei unterschiedliche Presskopfkfigurationen b) mittels Konunsscheibe c) mittels Pelletscheibe.....	48
Abbildung 27: Schema einer Trockenaufbereitung für Insekten.....	49
Abbildung 28: Schematische Darstellung der Nassaufbereitung von Insekten.....	49
Abbildung 29: Überblick über die Versuchseinstellungen zur Nassaufbereitung der Insekten .....	51
Abbildung 30: Darstellung der Restfettgehalte im Proteinfeststoff der Zentrifugationsversuche zur Nassaufbereitung von Insekten über die Zeit.....	52
Abbildung 31: Darstellung der Phasenzusammensetzung der zerkleinerten Mehlkäferlarven mittels Thermomix und der daraus resultierenden Zentrifugationsversuche .....	53
Abbildung 32: Gesamt-Zinkgehalte und dessen enzymatische Freisetzbarkeit aus <i>Tenebrio molitor</i> Larven. Werte mit einem gleichen hochgesetzten Buchstaben sind nicht signifikant unterschiedlich ( $p < 0,05$ ; ANOVA/ Bonferroni post hoc Test) .....	55
Abbildung 33: Headspace-GC-MS-Analysen von unterschiedlich getrockneten <i>Tenebrio molitor</i> Larven .....	56
Abbildung 34: Presskuchen nach dem Austritt aus der Seiherschneckenpresse .....	58
Abbildung 35: Darstellung der Partikelgrößenverteilung nach der Zerkleinerung des Presskuchens mittels Walzenstuhl bei unterschiedlichen Spaltweiten (0 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 0,75 mm) .....	59
Abbildung 36: Schematische Darstellung des konventionellen Pelletierens mit Kurzzeitkonditionierung einschließlich relevanter Mess- und Probenahmestellen der Versuchsanlage im Technikum des IFF-Forschungsinstituts Futtermitteltechnik .....	63
Abbildung 37: Prozentuale Anteile von Sojaöl und Insektenpresskuchen an der Gesamtmischung des Ferkelfutters .....	66
Abbildung 38: Darstellung der Pelletqualität in Form der Abriebkennzahl nach Pfast mit unterschiedlichen Gehalten an Insektenmehl .....	67
Abbildung 39: Darstellung der Pelletqualität in Form der Pellethärte mit unterschiedlichen Gehalten an Insektenmehl und variierenden Dampfzusätzen (1 %, 2 %, 3 %) .....	67

## 1 Einleitung

Trotz gesetzlicher Vorgaben hat sich (z. B. (EG) Nr. 999/2001, (EG) Nr. 258/97) in den letzten Jahren z. B. in den Niederlanden, Frankreich und auch Deutschland eine Industrie zur Verarbeitung bzw. Aufbereitung von Insekten entwickelt.

Gegenwärtig wird von einem weltweiten Pro-Kopf-Bedarf an Protein von 80 g pro Tag ausgegangen, wovon rund 40 % aus tierischen Quellen (ohne Insekten) stammen [UN 2017; FAO 2009]. Für das Jahr 2050 wird ein Anstieg der Weltbevölkerung von gegenwärtig 7 auf ca. 9,5 Milliarden Menschen prognostiziert [FAO 2013]. Gleichzeitig wird die landwirtschaftliche Nutzfläche, die sowohl für die Lebensmittelproduktion als auch für die Bedarfsdeckung an nachwachsenden Rohstoffen pro Kopf zur Verfügung steht, signifikant schrumpfen. Die global überproportional steigende Nachfrage nach Veredelungsprodukten aus der tierischen Erzeugung erschwert die Situation, da im Gegensatz zum Direktverzehr pflanzlicher Produkte ein Konvertierungsverlust von bis zu 70 % erwartet werden muss. Vor diesem Hintergrund wird die Bedeutung ersichtlich, die der Verfügbarmachung und Bereitstellung von Protein aus alternativen Quellen in der Zukunft zukommt. Für die Nutztierernährung stehen insbesondere solche Quellen im Vordergrund, bei denen keine Konkurrenz zur menschlichen Ernährung besteht.

Aktuell sind mit der Zulassung für Insekten im Aquafeed [EU-Verordnung 2017/893] seit dem 01.07.2017 sieben Insektenspezies zugelassen. Diese Zulassung betrifft die Änderung der Verordnung (EG) Nr. 999/2001 im Hinblick auf die Zulassung von verarbeitetem tierischem Protein zur Verfütterung an Nutztiere.

Des Weiteren ist seit dem 01.01.2018 die EU-Verordnung 2015/2283 in Kraft getreten. Die Novel Food-Verordnung besagt: Ganze Insekten und Insektenteile sowie aus Insekten gewonnene Inhaltsstoffe gelten als neuartige Lebensmittel („Novel Food“) und müssen vor dem Inverkehrbringen gesundheitlich bewertet und zugelassen werden.

Das vorliegende Projekt hatte die Verwendung von Insekten als alternative Proteinquelle für Futtermittel zum Gegenstand. Als Folge der BSE-Krise wurde 2001 die Verwendung von Protein tierischen Ursprungs in Form von Tiermehl verboten, dieses Verbot wurde jedoch inzwischen teilweise gelockert. Seit dem 01.06.2013 ist die Verwendung von verarbeiteten tierischen Proteinen aus Nichtwiederkäuern für die Fütterung von Fischen und anderen Aquakulturen wieder zulässig [FAO 2013].

Neben den geschilderten gesetzlichen Rahmenbedingungen, die lediglich die Verwendung von Insektenprotein in Aquakulturen erlauben, steht vor allem die mangelnde Verfügbarkeit großer Mengen von Insektenmehl einem kommerziellen Einsatz als Einzelfuttermittel im

Wege. Erst wenn eine ausreichend hohe Verfügbarkeit gewährleistet wird, kann ein solches Produkt für die breite Anwendung in der Futtermittelindustrie interessant werden.

In der Literatur wird hinreichend beschrieben, dass sich Mehle aus einer Vielzahl verschiedenster Insekten hervorragend eignen, um diese als Protein- und Fettlieferant in Futtermitteln einzusetzen und somit Sojaschrot bzw. Fischmehl zu ersetzen [Dankwa 2000; Awoniyi 2003; Kroeckel 2012; Veldkamp 2012], allerdings befinden sich die derzeit bekannten Projekte weltweit in einem als vorindustriell zu bezeichnenden Stadium. Die Zuchtstätten sind in der Lage, einige hundert Kilogramm pro Monat zu liefern. Dies qualifiziert Insektenmehl bestenfalls als Nischenprodukt für beschränkte Anwendungen.

Das vorliegende Projekt hatte zum Ziel, Insektenmehl oder -protein durch die Reduktion von hohem Personaleinsatz bei der Insektenhaltung aus einem „Nischendasein“ in ein für die Futtermittelindustrie preislich und mengenmäßig interessantes Produkt zu überführen.

**Dementsprechend stand die Entwicklung eines Verfahrens zur Gewinnung von Insektenprotein im Produktionsmaßstab im Mittelpunkt dieses Forschungsvorhabens.**

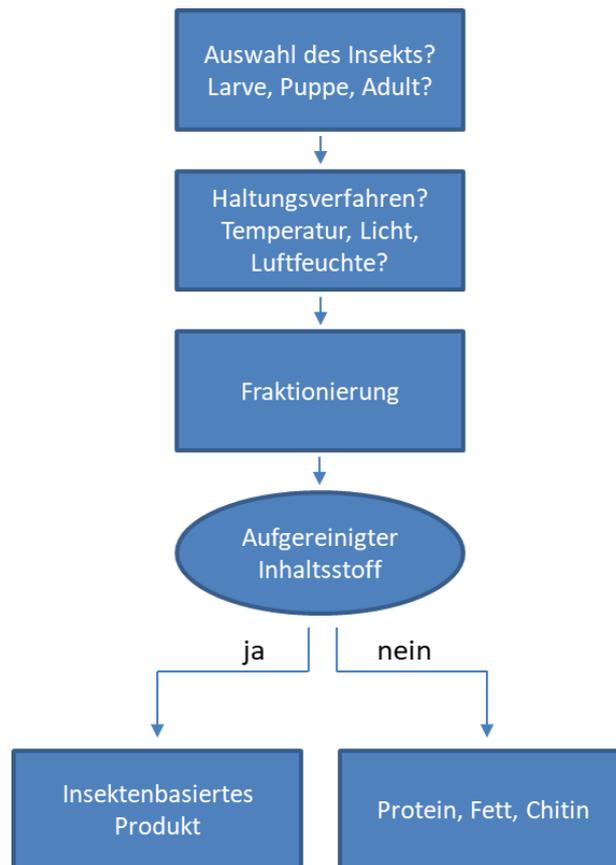
## **2 Stand von Wissenschaft und Technik**

### **2.1 Entwicklung von Funktionsmustern und Automatisierung**

Insgesamt zeigt sich die Zucht von Insekten im bisher umgesetzten Rahmen als vergleichsweise wenig aufwendig. In Laos werden Grillen beispielsweise in Tanks (Höhe = 0,5 m, Durchmesser = 0,8 m) gezüchtet [Rumpold und Schlüter 2013; Laos 2010]. Darüber hinaus zeichnen sich Insekten durch effiziente Futterumsatzraten aus [Veldkamp et al. 2012]. Beide eben genannten Aspekte sind Ansatzpunkte eines potenziellen Automatisierungsansatzes, um Insekten auch in größeren Maßstäben und Chargen aufziehen zu können.

Bisher erfolgt die kommerzielle bzw. industrielle Zucht von Insekten über den privaten Bedarf hinaus in Boxen verschiedenster Größe. Dabei werden Insekten zum direkten Verzehr durch Menschen und vor allem Haustiere wie Reptilien produziert (z. B. Mehlwürmer, Heuschrecken und Grillen, Fa. van de Ven insecten Kwekerij, Deurne, Niederlande, Handelskammer K. v. K. 17174159, Fa. Kreca, Ermelo, Niederlande), als Futtermittel vertrieben (Stubenfliegenlarven, Fa. Jagran B. V., Hillegom, Niederlande) oder auch bereits verarbeitet als Protein- oder Fettquelle verkauft (schwarze Soldatenfliege, Fa. Protix Biosystems BV, Dongen bzw. Amsterdam, Niederlande).

Insgesamt besteht das Bestreben, die Produktion von Insekten unabhängiger von Umgebungsbedingungen und abgeschlossen zu betreiben, um beispielsweise auch potenziellen Infektionen vorzubeugen. Außerdem sollen verfahrenstechnische Gesamtlösungen entwickelt und umgesetzt werden, so dass eine Produktionslinie entsteht, die die Insektenzucht von der Larve bis zum verkaufsfertigen Produkt in einer Gesamtanlage umfasst (**Abbildung 1**).



**Abbildung 1: Fließdiagramm einer möglichen Produktionslinie von der Insektenlarve bis zum Produkt**

Die Prozessautomatisierung ermöglicht in diesem Zusammenhang als Querschnittstechnologie in allen verfahrenstechnischen Industrien die Gestaltung einer wirtschaftlichen, aber auch umweltgerechten und sicheren Produktion. So wird durch eine Automatisierung eine ganzheitliche Gesamtlösung zugänglich, die die Insektenzucht innerhalb einer Produktionslinie möglich macht.

Erst das Zusammenspiel der involvierten Prozessierungseinheiten ermöglicht den Zugang zu Lösungen eines Scale-Ups durch z. B. parallele Zucht- bzw. Transportbänder, so dass eine definierte Durchsatzrate erzielt werden kann und damit die Wirtschaftlichkeit der Prozessierung gegeben ist.

Darüber hinaus spielt die Prozesssicherheit eine entscheidende Rolle. Sie kann durch die Kombination aus automatisierbaren Strukturen und hygienegerechter Anlagengestaltung gewährleistet werden. Essentiell ist dabei auch die Konzeption, Entwicklung und Umsetzung von Reinigungsstrategien für Anlagenkomponenten und Gesamtanlage sowie die Adaption und Umsetzung von HACCP-Konzepten und -Strategien.

## Aufbereitung von Insekten

Ein wesentlicher Schritt innerhalb der Prozessierung, die die Insektenzucht von der Larve bis zum verkaufsfertigen Produkt in einer Gesamtanlage umfasst, ist die Aufbereitung der Insekten in ihre wertbestimmenden Komponenten (z. B. Protein, Fett, Chitin).

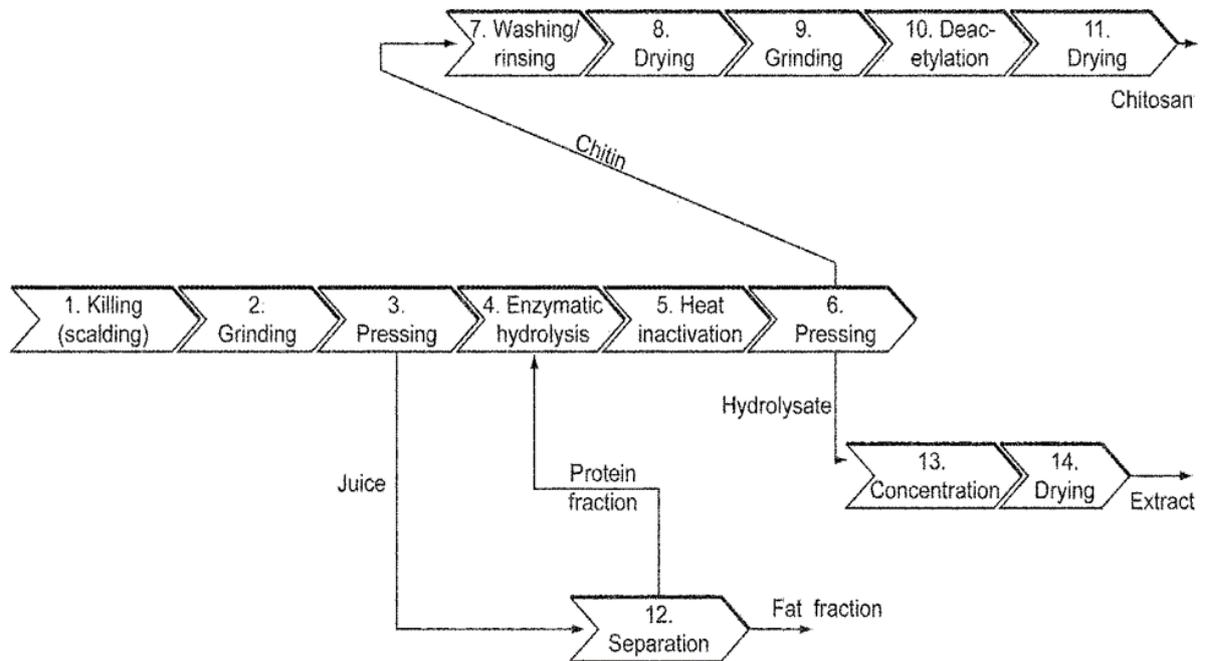
Die in der **Tabelle 1** aufgeführten Unternehmen arbeiten mit unterschiedlichen Verfahren zur Aufbereitung der Insekten.

**Tabelle 1: Übersicht der im industriellen Maßstab Insekten produzierenden und verarbeitenden Unternehmen [IPIFF 2017]**

Gründungs-jahr	Produktion [t/a]	Unternehmen	Land	Insekt
1978	5000	Proti-Farm Holding NV	Niederlande	Verschiedene
1978	500	Kreca	Niederlande	Verschiedene
1985		Fair Insects	Niederlande	<i>Tenebrio molitor</i> , <i>Locusta migratoria</i>
2006	350	Hermetia	Deutschland	<i>Hermetia illucens</i>
2007		Entra Feed Corporation	Canada	<i>Hermetia illucens</i>
2008	> 2000	Agriprotein	Südafrika	<i>Hermetia illucens</i>
2009		Enviroflight	USA	<i>Hermetia illucens</i>
2009		Protix	Niederlande	<i>Hermetia illucens</i>
2009		River Road Research	USA	<i>Hermetia illucens</i>
2011	20000	Ynsects	Frankreich	<i>Tenebrio molitor</i>
2012	20	Entofood	Malaysia	<i>Hermetia illucens</i>
2012		Bioflytch	Spanien	<i>Hermetia illucens</i> , <i>Musca domestica</i>
2013	24	Entobel	Vietnam	<i>Hermetia illucens</i>
2013		Nextalim	Frankreich	<i>Hermetia illucens</i>
2014	2500	Entomo Farm	Frankreich	<i>Tenebrio molitor</i>
2014	> 100	F4F	Chile	<i>Hermetia illucens</i>
2014	800	Nutrition Technologies	Vietnam/Singapur	<i>Hermetia illucens</i>
2015		Innovafees	Frankreich	<i>Hermetia illucens</i>
2015	> 350	Nextprotein	Frankreich/ Tunesien	<i>Hermetia illucens</i>
2016	1500	Insecturm	Litauen	<i>Hermetia illucens</i>
2016		Multibox	Vereinigtes Königreich	<i>Hermetia illucens</i>

Zum Beispiel wird bei der Proti-Farm Holding NV die ganze Larve (Mehlkäferlarve, Buffalo-Wurm) für den menschlichen Verzehr getrocknet. Bei dem Unternehmen Protix werden im Gegensatz dazu die ungetrockneten Insekten nach der Zerkleinerung mittels Separator (Protix, 2014 WO2014/123420) in Protein und Fett überführt [Protix 2015].

Ein ähnlicher Prozess von der Firma Ynsects wird zur zusätzlichen Abtrennung von Chitin verwendet [Ynsects 2018]. Dabei wird das Insektenprotein gelöst (**Abbildung 2**) und Chitin über mechanisches Abpressen entfernt.



**Abbildung 2: Aufarbeitungsschema von Insekten zur Herstellung von Proteinmehl, Chitosan und Lipid (US20180002452A1)**

Alle genannten Verfahren beinhalten mehrere verfahrensspezifische Prozessschritte, von der Inaktivierung der Larve bis zu den jeweiligen Endprodukten.

Wissenschaftliche Literatur zur systematischen Aufarbeitung von Insekten hinsichtlich der dabei gewonnenen Produkte ist nur unzureichend zu finden [Purschke 2018].

Das gilt auch für etablierte Prozesse wie z. B. der Gewinnung von Öl und proteinreichem Mehl mittels Seiherschneckenpressen aus ganzen, getrockneten Insekten [Hermetia 2015].

Grundsätzlich kann zwischen Trocken- und Nassaufbereitungsverfahren unterschieden werden. Bei der Trockenaufbereitung wird das Insektenmaterial erst getrocknet und dann in die wertbestimmenden Stoffe überführt. Etabliert hat sich in diesem Fall für den Trocknungsprozess die Gefriertrocknung.

Bei der Nassaufbereitung wird nach der Zerkleinerung und Homogenisierung des Insektenmaterials ein Drei-Phasen-Gemisch über Separationstechnik in die wertbestimmenden Stoffe überführt. Nach der Trennung wird der Proteinträger getrocknet.

In beiden Aufbereitungswegen spielt die Trocknung eine essentielle Rolle.

## Trocknung

Die Trocknung ist ein wichtiger Schritt der Haltbarmachung biotechnologischer Matrices, für die unterschiedliche Methoden existieren [Wankhade et al. 2013; Haque und Somerville 2013; Lababidi und Baker 2003]. Im vorliegenden Fall muss das entfeuchtete und fraktionierte Material entsprechend den Anforderungen der Futtermittelkennzeichnung (EG) Nr. 767/2009 auf einen Feuchtegehalt von unter 14 % getrocknet werden.

Die anzuwendende Art der Trocknung hängt neben der Eignung für das untersuchte Trocknungsgut auch vom vorliegenden Zerkleinerungsgrad des Trocknungsgutes ab. Ziel der Trocknung ist ein lagerstabiles Produkt, ohne den Wert des Rohstoffes durch eine übermäßige Wärmebelastung signifikant zu mindern, z. B. durch Fettoxidation oder Proteinzersetzung.

Prinzipiell lassen sich zum Trocknen mechanische (Schleudern, Pressen) oder thermische Verfahren (z. B. Flüssigkeitsentzug durch Konvektion) anwenden.

Hinsichtlich der Bindung des Wassers, welches dem Trocknungsgut entzogen wird, unterscheidet man folgende Bindungsarten:

- physikalisch-mechanische Bindungen (Kapillarfeuchtigkeit, Oberflächenfeuchtigkeit),
- physikalisch-chemische Bindungen (Quellfeuchte) [Tvardovskiy 2007] und
- chemische Bindungen (Kristallwasser).

Bei der physikalisch-mechanischen Bindung spricht man einerseits von den Flüssigkeiten, die als zusammenhängender Film auf der Oberfläche bis in große Poren hinein vorhanden sind, und andererseits von der durch Absorption in kleinen Poren gebundenen Kapillarflüssigkeit [Kutz 2013].

Das in dem vorliegenden Fall nach der Fraktionierung zu erwartende proteinreiche Trocknungsgut betreffend, sind voraussichtlich sowohl physikalisch-mechanische als auch physikalisch-chemische Bindungsmechanismen zu erwarten. Chemisch gebundenes Wasser wird in der Regel bei technischen Prozessen nicht entfernt und spielt in dem vorliegenden Vorhaben keine Rolle.

Auf dem Markt ist eine große Anzahl unterschiedlicher Trockner erhältlich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für eine bestimmte Trocknungsaufgabe in der Regel mehrere Verfahren anwendbar sind. Die Auswahl des Trockners wird oft nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten vorgenommen, denn der Trocknungsprozess weist einen sehr hohen Energiebedarf auf.

Die Grundlage für die Funktion der wichtigsten Art von Trocknern, den Konvektionstrocknern, ist die Ausnutzung des Dampfdruckes der Flüssigkeit bei einer definierten Temperatur und einem definierten Druck. Der Wirkungsgrad ist dementsprechend abhängig vom treibenden Konzentrationsgefälle des Dampfdruckes und von der Geschwindigkeit des Gasaustausches.

Durch den ständigen Gasaustausch (Trocknungsmittel: z. B. Luft) wird ein hoher Wärme- und Stofftransport realisiert. Konvektionstrockner sind in verschiedensten Industriezweigen weit verbreitet. Vertreter sind beispielsweise Kammertrockner, Bandtrockner, Etagentrockner, Trommeltrockner und Wirbelbettrockner.

## **Mischfutter**

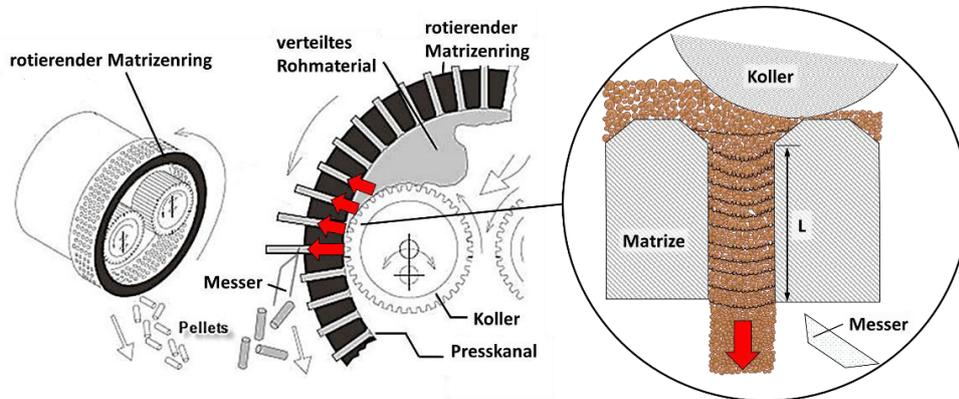
Nach der Trocknung steht der Proteinträger für die weitere Verwendung in Mischfuttermitteln zur Verfügung. Diese bestehen durchschnittlich aus etwa zwanzig Einzelkomponenten organischer und anorganischer Herkunft [Feil et al. 2006]. Für die Tierernährung spielen neben den Getreidefuttermitteln – insbesondere nach den Beschränkungen für den Einsatz von Tiermehlen – eiweißhaltige pflanzliche Erzeugnisse wie Sojabohnen, Soja- und Rapsextraktionsschrot sowie alternative Eiweißträger wie Insektenmehle eine herausragende Rolle. Die Verarbeitung der unterschiedlichen Rohstoffe zu Mischfuttermitteln konstanter Qualität stellt dabei eine verfahrenstechnische Herausforderung dar.

Der erste Schritt, die **Rohwarenerkleinerung**, ist ein zentraler Prozess der Herstellung und übt einen maßgeblichen Einfluss auf wichtige Qualitätseigenschaften des Mischfutters aus. Erwünschten Effekten wie Steigerung der Verdaulichkeit [Fastinger et al. 2003] oder Steigerung des Aufnahmevermögens von Flüssigkeiten stehen auch unerwünschte Wirkungen wie die Verminderung der Fließfähigkeit gegenüber.

Die Aufgabe des nachfolgenden **Mischprozesses** besteht darin, die Einzelkomponenten, die sich mischtechnisch in wesentlichen Eigenschaften unterscheiden, homogen zu mischen. Zum Mischen der Einzelkomponenten kann eine Vielzahl konstruktiv unterschiedlicher Feststoffmischer eingesetzt werden [Strauch 2003]. Maschinentechnisch kommen in der Mischfutterindustrie fast ausschließlich Chargenmischer zur Anwendung.

Um die erzeugte Mischung zu stabilisieren, wird Mischfutter häufig in gepresster Form, d. h. in Form von Pellets, nachgefragt. Das **Pelletieren** umfasst die drei Verfahrensstufen Konditionieren (hier: Kurzzeitkonditionierung), Verdichten und Kühlen. Die Pellets werden in Mischfutterwerken durch Pressagglomeration mit Pelletpressen erzeugt (siehe **Abbildung 3**). Beim Pressvorgang wird das konditionierte Mischgut auf eine mit Lochbohrungen versehene Matrize dosiert und von Kollern überrollt. Dabei wird es verdichtet und in die runden Presskanäle der Matrize gedrückt. Der Druck, mit dem der Futterpfropfen in die Bohrung gepresst wird, muss die Reibungskraft im Presskanal übersteigen, um das bereits im Kanal befindliche Pressgut um die jeweilige Schichtdicke voran zu bewegen. Zurück bleibt eine dünne vorverdichtete Futterschicht, die mit weiter hinzudosiertem Material beim nächsten Kollerkontakt überrollt und in die Bohrungen gepresst wird. So wachsen die Materialpfropfen schichtweise und werden

als Endlosstränge durch die Presskanäle geschoben, bis sie die Matrize verlassen und mit Abstreifmessern zu zylinderförmigen Pellets definierter Länge abgetrennt werden [Friedrich und Robohm 1979; Jansen und Friedrich 1985].



**Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Ringmatrizenpresse mit Detailausschnitt des Materialeinzugs (frei nach <http://www.gemco-machine.com>)**

Grundsätzlich ermöglichen feinstrukturierte Futtermischungen bessere Pelletqualitäten als grob vermahlene, da wegen der vergrößerten spezifischen Partikeloberflächen mehr Feuchtigkeit aus dem Dampf der Konditionierung aufgenommen wird und sich u. a. eine größere Anzahl von Feuchtigkeitsbrücken bildet. Bereits einzelne gröbere Partikel können in feineren Futterstrukturen zu höheren Energieeinträgen und verschlechterten Abriebeigenschaften führen [Löwe et al. 2011].

Auf weitere optionale Verfahrensschritte wie Expandieren oder Extrudieren soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

### **3 Forschungsziel**

Ziel der Untersuchungen ist der Aufbau eines innovativen Funktionsmusters zur automatischen Insektenaufzucht. Dies wird mit geeigneten Anlagen zur Vorverarbeitung der Insekten zu Einzelfuttermitteln verknüpft. Die anschließende Herstellung eines exemplarischen Mischfutters durch Zerkleinern, Mischen, Kurzzeitkonditionierung und Pelletierung (inkl. Kühlung) validiert die verfahrenstechnische Eignung der erzeugten Einzelfuttermittel. Die Einsatzigenschaften werden durch physikalische und chemische Analysen nachgewiesen. Die angestrebten Erkenntnisse sichern nicht nur die Einsatzmöglichkeiten von Insekten als Proteinträger in der Ernährung von Nutztieren ab, sie weisen auch erstmals die Möglichkeit nach, durch die Automatisierung der Zucht diesen Rohstoff in ausreichend großen Mengen produzieren zu können. Für KMU sind solche Untersuchungen aus betrieblichen und kapazitiven Gründen nicht leistbar.

#### **3.1 Angestrebte Ergebnisse**

Das beantragte Forschungsvorhaben dient der Gewinnung von Erkenntnissen bezüglich der Automatisierung der Insektenzucht sowie ihrer Eignung zur Herstellung großer Mengen unter qualitativ und insbesondere hygienisch einwandfreien Bedingungen.

Im Mittelpunkt des Vorhabens stehen deshalb Untersuchungen zur automatisierten Zucht von Insekten, zur Sicherstellung der Hygiene und der automatisierten Reinigbarkeit der Anlagen. Das Hauptforschungsergebnis besteht damit in einem Funktionsmuster zur automatisierten Insektenzucht. In diesem Zusammenhang wird außerdem ein systemspezifisches Reinigungskonzept für die Gesamtanlage erarbeitet, das am Beispiel der Reinigung der Insektenboxen getestet und validiert als weiteres Ergebnis vorliegt. Des Weiteren wird die Eignung der in der automatisierten Insektenzucht gewonnenen Produkte im Projektsinne untersucht. Dies wird durch die Herstellung eines Mischfutters und dessen Analyse (physikalische, chemische Eigenschaften) überprüft und sichergestellt.

Aufgrund der hohen Bedeutung einer energieeffizienten Produktion steht auch dieser Punkt im Fokus. Hier bilden die Grundlagen einer energetisch optimierten und nachhaltigen Produktion ein weiteres Forschungsergebnis.

#### **3.2 Innovativer Beitrag**

Der innovative Beitrag des angestrebten Projektes besteht darin, dass es Unternehmen aus dem Bereich der Insektenzucht ermöglicht wird, auf Grundlage der erarbeiteten Erkenntnisse Insekten automatisiert zu züchten. Dies ist derzeit gar nicht oder noch nicht in dem angestrebten Umfang möglich.

Die Automatisierung der Insektenzucht verlangt Untersuchungen zur Gewährleistung von Hygienebedingungen im Herstellungsprozess, um die entsprechenden Anforderungen aus gesetzlicher und qualitativer Sicht umzusetzen.

Entsprechend besteht ein weiterer innovativer Beitrag in systematischen Untersuchungen zur Hygiene und Reinigbarkeit unter den erarbeiteten Bedingungen. Es erfolgt die Entwicklung eines systemspezifischen Reinigungskonzepts für die Gesamtanlage, das am Beispiel der Reinigung der Insektenboxen spezifiziert, untersucht und getestet wird.

Die Berücksichtigung des Energieeinsatzes soll insbesondere die kleinen und mittelständischen Insektenproduzenten in die Lage versetzen, wirtschaftlich zu produzieren. Dies würde sich auch in einem für die Mischfutterhersteller attraktiven Preis niederschlagen und auch in dieser Branche die Wirtschaftlichkeit der Herstellung verbessern.

## **4 Material und Methoden**

### **4.1 Bestimmung der Produkteigenschaften von Mischfutter**

#### **4.1.1 Partikelgrößenverteilung**

Die Ermittlung der Partikelgrößenverteilung wird mit einer Vibrationssiebmaschine durch Prüfsiebung nach DIN 66 165 unter Verwendung von Analysensieben gemäß DIN 3310 durchgeführt. Die Partikelgrößenbestimmung kleinerer Fraktionen ( $< 125 \mu\text{m}$ ) erfolgt mit einer Luftstrahlsiebmaschine.

#### **4.1.2 Feuchtigkeit**

Die Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts erfolgt durch die Bestimmung der Massendifferenz nach vierstündigem Trocknen bei  $103 \text{ }^\circ\text{C}$  gemäß der Trockenschrankmethode.

#### **4.1.3 Mikrobiologischer Zustand**

Der Methode liegt das Plattengussverfahren nach Koch zugrunde. Das Verfahren gehört zu den zuverlässigsten Keimzählmethoden. Seine untere Nachweisgrenze liegt bei weniger als 100 Keimen pro g Probensubstanz. Die zu untersuchende Probe wird in sterilem Wasser suspendiert und geschüttelt, um die mit Zusätzen gemischten oder an Trägerstoffen haftenden Keime in der Lösung zu verteilen. Von der Ausgangssuspension wird eine dezimale Verdünnungsreihe hergestellt. Von der jeweiligen Verdünnungsstufe wird in drei Petrischalen mit steriler Pipette jeweils 1 ml pipettiert. Die beimpften Platten werden nach Erstarren des Agars im Brutschrank kopfstehend bei  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  für drei Tage inkubiert. Die gewachsenen Kolonien werden unmittelbar nach dem Bebrüten gezählt. Auswertbar sind Kulturschalen mit 20 bis 200 Kolonien. Die Keimzahl pro g Einwaage wird durch Multiplikation des Mittelwertes aus der Koloniezählung mit dem dazugehörigen Verdünnungsfaktor berechnet. Die Angabe (Koloniebildende Einheiten oder KBE/g Frischmasse) erfolgt als Vielfaches der Zehnerpotenz.

#### **4.1.4 Pelletfestigkeit**

Der Pelletabrieb entspricht dem Massenanteil des unter definierten mechanischen Beanspruchungen von Futtermittelpellets gebildeten Feinguts. Die Ermittlung der Abriebkennzahl erfolgt mit einem Abriebtestgerät nach Pfof (ASABE Standards 269.4.) der Firma Bühler, mit dem die Beanspruchung von Pellets beim mechanischen Transport simuliert wird. Die vom bereits vorliegenden Feingut abgetrennten Pellets werden in einem mit 50 Umdrehungen pro Minute rotierenden Prüfkasten für 10 Minuten bewegt. Die Abriebkennzahl entspricht dem prozentual normierten Anteil des Abriebs an der Gesamtmasse der Probe. Um Einflüsse ungleichmäßig verteilter Feuchtigkeit auf das Untersuchungsergebnis zu minimieren, wird der Pelletabrieb nach eintägiger Abstehtzeit in luftdicht verschlossenen Beuteln ermittelt.

#### **4.1.5 Chemische Stoffeigenschaften**

Die stoffliche Zusammensetzung der Komponenten und Mischungen erfolgt durch die Analyse von Rohfaser, Rohprotein, Rohfett, Rohasche und Stärke nach den amtlichen Vorschriften zur Futtermitteluntersuchung [VDLUFA III 1976].

#### **4.1.6 Lösliches Protein**

Die Methode dient zur Bestimmung der Qualität von thermisch behandeltem Soja und ist somit ein Kriterium zur Prüfung des Hitzebehandlungsprozesses, welcher antinutritive Substanzen reduziert und zur besseren Verwertbarkeit der Leguminosenanteile im Tier, aber auch zu Proteinschädigung, führen kann. Die Probe wird in Wasser mit einem Hochleistungsdispersiergerät dispergiert. Die Suspension wird zentrifugiert und der in ihr enthaltene, organisch gebundene Stickstoff wird durch Aufschluss mit konzentrierter Schwefelsäure, Kaliumsulfat und einem Katalysator in Ammoniumsulfat überführt. Nach Zugabe von Natronlauge im Überschuss wird durch Wasserdampfdestillation der Ammoniak freigesetzt und in einer Borsäure-Vorlage aufgefangen. Anschließend wird mit einer schwachen Schwefelsäurelösung titriert.

#### **4.1.7 Wasseraktivität**

Der aw-Wert wurde mit einem Feuchte-Messgerät (Testo 650) gemessen.

#### **4.1.8 4-HNE Bestimmung**

Die Probenaufarbeitung für die Bestimmung von 4-HNE mittels Enzyme-linked Immunosorbent Assay (ELISA) erfolgte nach [Zanardi et al. 2002], jedoch mit abweichender Einwaage von 1 g. Die ELISA-Analytik wurde nach dem Standardprotokoll von Cell Biolabs (OxiSelect HNE Adduct Competitive ELISA Kit) durchgeführt.

## 4.2 Aufbau des Funktionsmusters

### 4.2.1 Auslegung und Konstruktion des Zick-Zack-Sichters

Die Auslegung und Konstruktion des Sichters wurde auf der Basis einer Gegenstromsichtung durchgeführt. Das Sichtgut fällt mit der Gravitationskraft nach unten, während es von unten durch einen Luftstrom angeströmt wird. Ist die Geschwindigkeit des fallenden Partikels langsamer als die Sichterluft, wird das Partikel oben ausgetragen. Ist das Gegenteil der Fall, wird das Partikel als Grobput unten ausgetragen. Zur Vergrößerung der Trennschärfe wird zusätzlich zur Gegenstromsichtung eine Querstromsichtung angewendet, welche durch mehrere hintereinandergeschaltete Umlenkungen realisiert wird. Dadurch wird die Trägheit der Partikel ausgenutzt, welches das Sichtgut zusätzlich dispergiert.

Diese kombinierte Windsichtung wird mit einem sogenannten „Zick-Zack-Sichter“ durchgeführt.

### 4.2.2 Berechnung der Sinkgeschwindigkeit

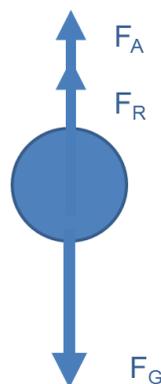
Der wichtigste Parameter bei der Auslegung des Zick-Zack-Sichters ist die nötige Sichterluftgeschwindigkeit, die auf Basis der Sinkgeschwindigkeiten der Partikel eingestellt wird.

Die Sink- bzw. Sedimentationsgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, bei der sich die Gravitationskraft, die Auftriebskraft und die mit der Geschwindigkeit zunehmenden Reibungskraft kompensieren [Frenzel und Gebhard 2009]:

$$F_G = F_R + F_A \quad (1)$$

wobei  $F_G$  = Gewichtskraft,  $F_R$  = Reibungskraft und  $F_A$  = Auftriebskraft.

Für dieses Kräftegleichgewicht, in **Abbildung 4** dargestellt, können folgende Formeln herangezogen werden [Stieß 2013]:



**Abbildung 4:** Kräftebilanzierung für die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit

$$F_G = m_p g = V_p \rho_s g = \frac{\pi d_p^3 \rho_s g}{6} \quad (2)$$

$$F_A = m_f g = V_p \rho_f g = \frac{\pi d_p^3 \rho_f g}{6} \quad (3)$$

$$F_R = \frac{\rho_f}{2} v_s^2 A_{proj} c_w = \frac{\rho_f}{8} v_s^2 \pi d_p^2 c_w \quad (4)$$

- $m_p$  = Partikelmasse
- $m_f$  = Fluidmasse
- $g$  = Erdbeschleunigung
- $\rho_s$  = Dichte eines sphärischen Partikels
- $\rho_f$  = Fluiddichte
- $V_s$  = Volumen eines sphärischen Partikels
- $A_{proj}$  = Projektionsfläche
- $c_w$  = Widerstandskoeffizient
- $d_p$  = Partikeldurchmesser
- $v_s$  = Sinkgeschwindigkeit

Da aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten hohe Reynoldzahlen vorherrschen, wird von einem Widerstandskoeffizientwert von  $c_w = 0,44$  ausgegangen.

Daraus lässt sich die Formel für die Sinkgeschwindigkeit eines Partikels herleiten:

$$v_s = \sqrt{\frac{3d_p g (\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (5)$$

Für die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit wird ein Äquivalenzdurchmesser benötigt, da die Formel nur für sphärische Objekte gültig ist. Für einen Mehlwurm wurde ein zylindrischer Körper angenommen. Mit der folgenden Formel kann der Äquivalenzdurchmesser berechnet werden, bei der ein sphärisches Objekt die gleichen Eigenschaften besitzt wie das zylindrische Objekt [Figura 2006]:

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \cdot V} \quad (6)$$

wobei  $V$  = Volumen des Zylinders.

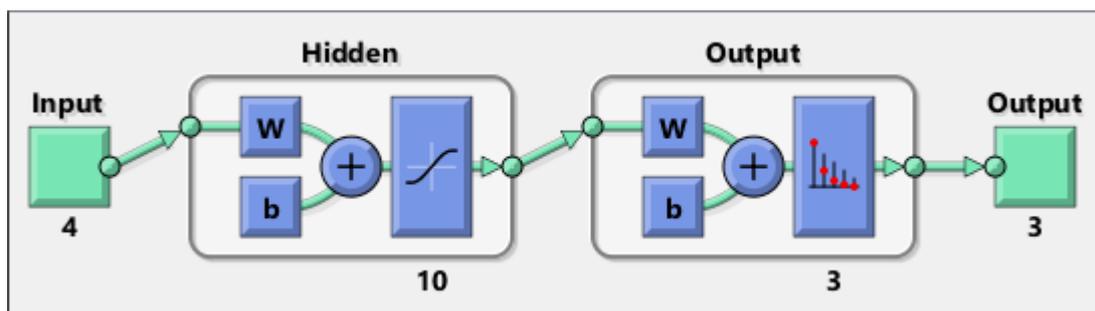
Die Variablen zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeiten von Mehlkäferlarven, Exuvien, Faeces und Mehl wurden experimentell über die Schüttgutdichte gravimetrisch bzw. die Maße durch Vermessen annähernd ermittelt.

Basierend auf den Ergebnissen wurde ein Zick-Zack-Sichter mit dem CAD Programm Creo Parametrics 3.0 konstruiert [Gillandt et al. 1996; Kaiser 1963]. Die Geometrie wurde anhand einer Ansys Simulation auf störende Turbulenzen getestet und verbessert.

### 4.2.3 Künstlich neuronale Netze

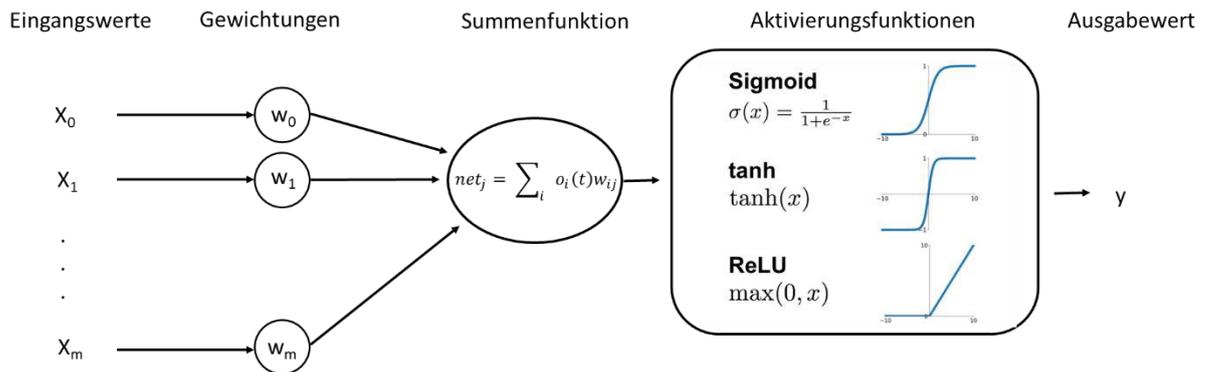
Neuronale Netze bestehen aus künstlichen Neuronen, die sich durch Verknüpfung untereinander zu einem informationsverarbeitenden Netz zusammenschließen. Die Anzahl unterschiedlicher Architekturen von neuronalen Netzen ist sehr groß. Grundsätzlich kann zwischen hierarchischen und nicht hierarchischen Systemen unterschieden werden. Bei nichthierarchischen Systemen gibt es keine klaren Schichten, durch die die Informationen in einer Richtung durch das Netz geschickt werden. Stattdessen können innerhalb des Netzes auch Schleifen vorhanden sein, bei der die Information an bereits angesprochene Neuronen geschickt wird. In diesem Projekt kommt ein hierarchisches System zum Einsatz, ein sogenanntes „feed forward“ Netz, bei dem die Information nur in eine Richtung fließt (**Abbildung 5**).

Die Informationsverarbeitung erfolgt in mehreren Schichten. Die erste Schicht, auch Eingangsschicht genannt, übergibt die Daten von der Umgebung an tiefere Schichten (auch „Hidden-Layer“ genannt) des neuronalen Netzes. Die Anzahl der Schichten kann je nach Architektur des Netzes variieren. In der sogenannten Ausgangsschicht werden die klassifizierten Eingangsdaten wieder aus dem Netz ausgegeben [Lenze 1997; Lippmann 1987].



**Abbildung 5:** Darstellung eines zweischichtigen feed-forward Netzes mit sigmoidalen und softmax Aktivierungsfunktionen. Die Eingangswerte gelangen über die Inputschicht in die sog. „Hidden-Layer“. Entsprechend der Aktivierungsfunktionen muss die Summe über einem Grenzwert liegen, damit das Neuron ein Ausgangssignal an die nächste Schicht weitergibt (<https://de.mathworks.com/help/deeplearning/ref/patternnet.html>; Stand 17.01.2019)

Der wichtigste Vorteil eines neuronalen Netzes ist die Lernfähigkeit bzw. seine Anpassung an ein gegebenes Datenset. Diese erfolgt während des Lernprozesses durch die Signalgewichtung zwischen den Neuronen sowie die Verwendung von unterschiedlichen Aktivierungsfunktionen, die die Weitergabe eines Signals steuern (**Abbildung 6**). Dadurch wird der Informationsfluss innerhalb des Netzes verändert. Die Parameter werden solange verändert, bis die Abweichung des Ergebniswertes von einem Zielwert minimal wird [Jain et al. 1996; Widrow et al. 1988].



**Abbildung 6: Darstellung eines Neurons. Die Eingangssignale werden zuerst zu einem Wert  $net_j$  aufsummiert und anschließend mit der Aktivierungsfunktion weiterverarbeitet. Sollte die Aktivierung positiv sein, wird der Ausgabewert an darauffolgende Neuronen weitergegeben.**

Die Veränderung der Parameter erfolgt mit der sogenannten *Backpropagation*-Technik. Der Algorithmus leitet den Fehler von der Ausgangsschicht zurück zur Inputschicht entgegen des Informationsflusses. Bei sämtlichen Neuronen, die angesprochen wurden, werden die Gewichte so verändert, dass der Fehler minimal wird.

Für das Projekt wurde die Neuronale Netze Toolbox von Matlab (R2016a) genutzt, die bereits vorgefertigte neuronale Netze enthält. Das Netz besteht aus zwei Schichten, die mit einer individuellen Anzahl an Neuronen eingesetzt werden können. Für dieses Projekt hat sich eine Neuronenzahl von 20 Neuronen pro Schicht als geeignet erwiesen.

### 4.3 Trocknung

#### 4.3.1 Wirbelschichttrockner

Die Versuche wurden mit einem Bühler Pulsbed bei 130 °C für 110 Minuten durchgeführt.

#### 4.3.2 Stikkenofen

Für die Versuche wurde das Gerät MIWE RI 1.6008-TL mit einer Trocknungstemperatur von 120 °C verwendet.

#### 4.3.3 Vakuumofen

Es wurde das Gerät Heraeus VT 5042 bei einer Temperatur von 60 °C genutzt.

#### 4.3.4 Mikrowelle

Für die Trocknungsversuche in der Mikrowelle wurde ein Gerät der Firma Miele H 6100 bei 850 Watt für 10 Minuten genutzt.

#### 4.3.5 Gefriertrockner

Für die Trocknungsversuche wurde das Gerät der Firma Christ Beta 1-8 genutzt.

#### **4.3.6 Bandrockner**

Für die Versuche zur Bandtrocknung wurde eine Eigenkonstruktion der Firma Amandus Kahl verwendet. Die durchströmte Trocknungsfläche betrug 50 x 50 cm.

#### **4.4 Datenerhebung zur Bestimmung der Energieeffizienz**

##### **4.4.1 Strom, Spannung, Leistungsmessung, Energiemessung nach Trendows**

Trendows-Xp ist ein leistungsstarkes Softwaresystem für das Aufzeichnen von physikalischen Messgrößen, welches im IFF-Technikum zum Einsatz kommt. Die Schwerpunkte liegen in der Langzeitaufzeichnung, dem Umgang mit großen Datenmengen, der Online-Verarbeitung der Messgrößen in fertige Ergebnisse und in der Datenkommunikation im Netzwerk.

Zusätzlich kam das Energiemessgerät PQA823 (Netzanalysegerät) zum Einsatz.

### **5 Ergebnisse und Diskussion**

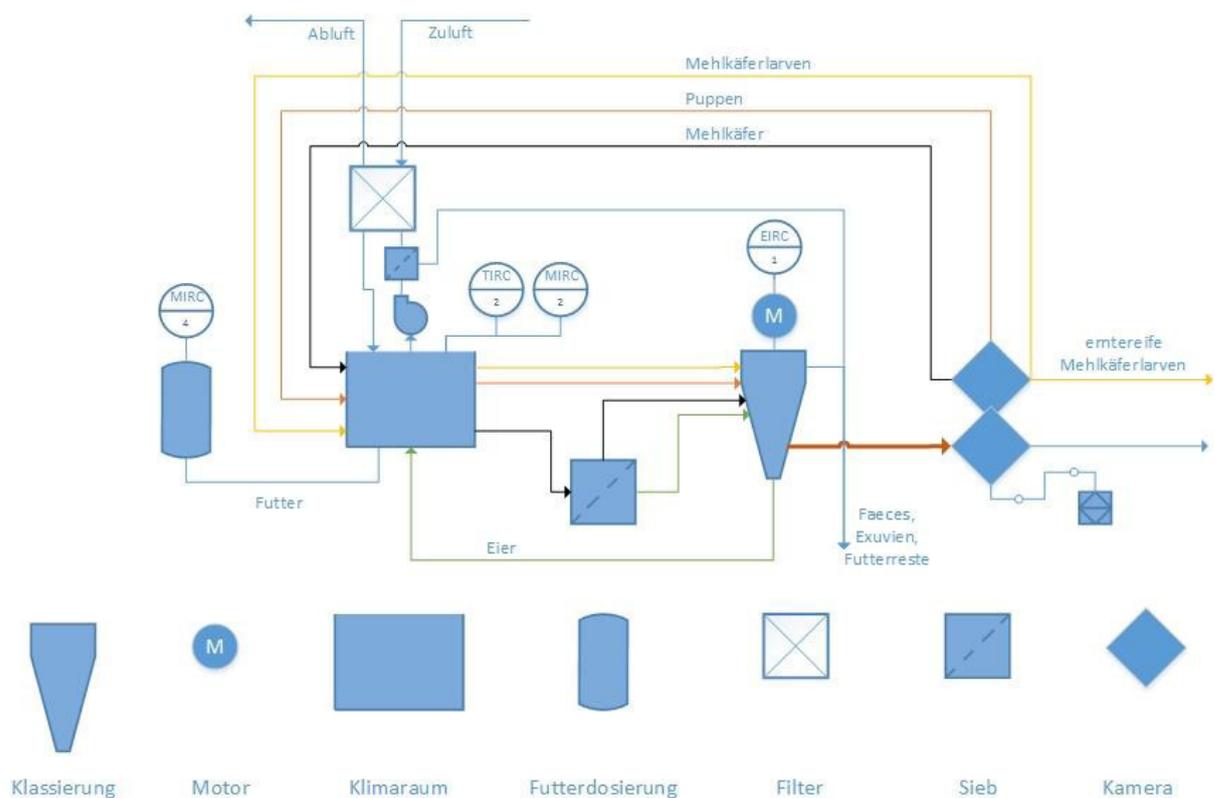
#### **5.1 AS 1: Aufbau des automatisierten Funktionsmusters zur Insektenzucht (LSTM, HSB)**

Für die Konzeption eines Funktionsmusters wurde zunächst ein Zuchtbehälter gebaut (400 x 300 mm), der eine automatisierte Regelung der zuchtrelevanten Parameter wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Labormaßstab ermöglicht. Auf Basis dieser Zuchtbox wurde eine kleine Zucht etabliert, die für die Entwicklung der Messanalytik und für die Konstruktion und Entwicklung der Separationseinheit genutzt wurde. Anhand der gesammelten Erfahrung bei der manuellen Zucht wurden die arbeitsintensivsten Prozessschritte ermittelt und ein konzeptionelles Prozessfließbild erstellt (siehe **Abbildung 7**).



Um den technischen Aufwand und die Investitionskosten gering zu halten, wurde das Funktionsmuster so konzipiert, dass die Aufzuchtbox selbst keine technisch aufwändigen Komponenten wie z. B. ein eigenes Sieb oder Klimatechnik enthält, da die Kosten bzw. der Aufwand linear mit der Anzahl der Boxen steigen würde.

Des Weiteren wird angenommen, dass das klimatische Optimum bei der Aufzucht sowohl für die Mehlkäferlarven, die Puppen und die adulten Mehlkäfer gleich ist. Für die Klassierung der verschiedenen Komponenten wird eine flexible Sichtungseinheit konstruiert, die sowohl Faeces von Mehlkäferlarven als auch Eier vom Legesubstrat und Käfer abtrennen kann. Somit reduziert sich die Anzahl der Sichtungseinheiten von drei auf eins. Weiterhin wird neben der Mast auch die Nachschaffungszucht zur Eierproduktion für die Erhaltung der Mast mitbetrachtet. Das Fließbild von Abbildung 7 lässt sich somit auf das Fließbild in **Abbildung 8** reduzieren.



**Abbildung 8: Reduzierte, optimierte Darstellung des Zuchtprozesses von Abbildung 7**

Ein wichtiger Verfahrensschritt bei der Insektenaufzucht ist die Separation der Faeces von Mehlkäferlarven während der Mast bzw. die Separation der Eier vom Legesubstrat. Für die Auswahl einer geeigneten Separation wurden hauptsächlich zwei verschiedene Trennverfahren verglichen. Zum einen erfolgte eine Trennung durch Größenausschluss mittels Sieben und zum anderen eine Trennung über den Dichteunterschied mittels Windsichtung [Bohnet 2012; Stieß 2008].

Im Rahmen einer Masterarbeit wurden Vorversuche durchgeführt, in der die Vor- und Nachteile dieser beiden Methoden bezüglich der Insektenaufzucht erarbeitet wurden. Dabei wurden verschiedene Lochbleche und Gitter verwendet, die bei verschiedenen Anstellwinkel mit Substrat und Mehlkäferlarven beschüttet wurde. Weiterhin wurde auch mit Wasser als Hilfsmedium gearbeitet, um eventuelle Beeinflussungen bezüglich der Fließfähigkeit zu betrachten und die Staubentwicklung zu minimieren. Des Weiteren wurde ein einstufiger Kanalsichter gebaut, mit der eine einfache Windsichtung bewerkstelligt wurde. Über eine Absaugung wurden leichte Partikel seitlich abgesaugt, während schwerere Partikel durch die Trägheit durchgefallen sind.

Da sich die Mehlkäferlarven auf den Lochblechen nicht wie Stückgüter verhalten, ist aufgrund dessen ein kontinuierlicher Trennprozess kaum möglich. Die Mehlkäferlarven verwinden sich in den Löchern und lassen sich dadurch nur sehr schlecht transportieren. Die Zugabe von Wasser führte zwar zu einer Verringerung der Staubbildung, förderte aber auch die Verklumpung des Faeces und der Mehlwürmer. Die Reinigbarkeit der Lochbleche wird aufgrund der oben genannten Effekte deutlich erschwert.

Die Klassierung mittels eines Luftstroms zeigte eine Abtrennung der Faeces und der Exuvien von den Mehlkäferlarven. Durch den Einsatz eines Staubsaugers als Absaugungseinheit wurde auch die Staubproblematik verringert. Da die Oberfläche des Kanalsichters glatt ist, erwies sich die Reinigung als einfach. Um die Trennschärfe beim Windsichten zu erhöhen, sind eine mehrstufige Sichtereinheit und die Berechnung der optimalen Luftgeschwindigkeit nötig.

Aufgrund der oben genannten Erkenntnisse wurde die Windsichtung als geeignetere Variante ausgewählt und darauf basierend der Zick-Zack-Sichter konstruiert.

Für die Auslegung des Windsichters ist u. a. die Sinkgeschwindigkeit ausschlaggebend, die im Vorfeld berechnet wurde.

Die Variablen zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeiten von Mehlkäferlarven, Exuvien, Faeces und Mehl wurden experimentell über die Schüttgutdichte gravimetrisch bzw. die Maße durch Vermessen annähernd ermittelt.

Basierend auf den Ergebnissen wurde ein Zick-Zack-Sichter mit der CAD Programm Creo Parametrics 3.0 konstruiert [Gillandt et al. 1996; Kaiser 1963]. Dieser ist in **Abbildung 9** dargestellt. Die Geometrie wurde anhand einer Ansys Simulation auf störende Turbulenzen getestet und ausgebessert.



**Abbildung 9: Fertiger Zick-Zack-Sichter mit 17 Trennstufen**

Die durchschnittliche Körperlänge einer erntereifen Larve beträgt ca. 15 mm und der Durchmesser 2,5 mm. Sie wiegt im Mittel 0,1 g. Die Mehlkäferlarven können näherungsweise als zylindrische Partikel betrachtet werden, wodurch das Volumen bestimmt werden kann. Aus dem Verhältnis der Masse und dem berechneten Volumen ergibt sich eine abgeschätzte Dichte von  $1358 \text{ kg/m}^3$ . Daraus lässt sich eine Sinkgeschwindigkeit von 13,22 m/s für die Mehlkäferlarve berechnen.

Bei Substrat, Faeces und Exuvien wurden Literaturwerte herangezogen, die für die Berechnung der Sinkgeschwindigkeiten genutzt wurden. Die Geschwindigkeiten sind in **Tabelle 2** aufgelistet.

**Tabelle 2: Daten zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit für Mehlkäferlarven, Exuvien, Faeces und Substrat**

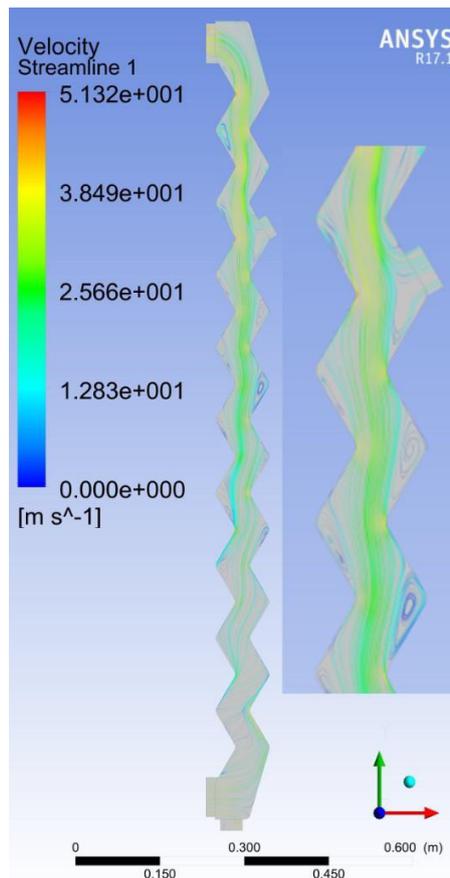
	Mehlkäferlarve	Exuvie	Faeces	Substrat (Weizenkleie)
<b>Länge [mm]</b>	15	13	0,35	3,5
<b>Breite [mm]</b>	2,5	7,5	0,35	3,5
<b>Masse [mg]</b>	100	2	0,01	0,236
<b>Schüttgutdichte [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1358	81	440	1050
<b>v<sub>s</sub> [m/s]</b>	13,22	2,25	0,74	1,39

Da es sich hierbei um Annäherungen handelt, muss von einer hohen Abweichung ausgegangen werden. Um dies auszugleichen, muss der Luftstrom im Zick-Zack-Sichter regelbar sein, um eine Feineinstellung zu ermöglichen.

Bei der Auslegung des Zick-Zack-Sichters wurden 17 hintereinander geschaltete Sichterstufen verbaut, die jeweils eine Höhe von 110 mm besitzen. Der Winkel, in dem die Sichterstufen zueinander stehen, wurde aus einer Veröffentlichung von [Gillandt et al. 1996] übernommen und beträgt 120°. Die Zugabe des Aufgabegutes wurde auf die fünfte Stufe gesetzt, wodurch eine höhere Trennschärfe beim Grobgut im Vergleich zum Feingut erreicht werden sollte, da die Trennstufenzahl mit 12 Stufen höher ist als die Trennstufenzahl von fünf im Feingutbereich.

Um einen kontinuierlichen Betrieb zu ermöglichen und eine möglichst geringe Veränderung des statischen Druckes zu erreichen, sind Zu- und Abluftstutzen eingebaut, die den Betrieb mit Sekundärluft ermöglichen sollen. Bei einem Batchbetrieb kann es zu einem Unterdruck im Vorratsbehälter kommen, der das Wohlbefinden der Mehlkäferlarven beeinträchtigen kann. Die Ecken und Kanten wurden weitestgehend abgerundet, um Verletzungen der Mehlkäferlarven zu vermeiden und um eine Reinigung zu vereinfachen.

Der erste Entwurf wurde einer Strömungssimulation unterzogen, um Problemstellen zu ermitteln und diese auszubessern (**Abbildung 10**). Dabei wurde der Radius der Zu- und Abluftflansche vergrößert und der Zick-Zack-Sichter von 20 auf 17 Trennstufen verkürzt.



**Abbildung 10: Strömungssimulation im Zick-Zack-Sichter**

Für die Anlage wurde ein Druckverlust von 3200 Pa berechnet. Die maximale Gesamtdruck-erhöhung des Ventilators liegt bei 5650 Pa und einem maximalen Volumenstrom von 14,3 m<sup>3</sup>/min. Mithilfe eines Frequenzumrichters wird im Verlauf durch die Leistungsregelung die optimale Luftgeschwindigkeit eingestellt. In Abbildung 9 ist der fertige Zick-Zack-Sichter zu sehen, der auf einem Alu-Profil-Gerüst montiert wurde. Für die bessere Darstellung der Funktionsweise wurde durchsichtiges Plexiglas als Abdeckplatte gewählt.

In **Abbildung 11** ist die stufenweise Trennung des Aufgabegutes in Grob- und Feingut sichtbar. Hierbei wurde eine Zuchtbox mit hauptsächlich Mehlkäferlarven, Faeces und Exuvien als Bestandteile aufgegeben. Mit steigender Stufenzahl nach unten wird der Anteil des Feinguts immer geringer. Die ersten Durchläufe wurden mit einem regelbaren Staubsauger durchgeführt, um die Staubbelastung so gering wie möglich zu halten. Der Staubsauger wurde im Laufe des Projektes durch einen Radialventilator ersetzt, um die industrielle Zweckmäßigkeit und die Automatisierung besser umsetzen zu können.



**Abbildung 11: Zick-Zack-Sichter im Betrieb. Hervorzuheben ist hierbei die Abnahme des Feingutanteils im Grobgut mit steigender Stufenzahl**

Um ein vollständiges Funktionsmuster zu bauen, wurden weitere Anlagenteile benötigt: Unter anderem ein Fließband, ein Futterdosierer, der oben bereits genannte Radialventilator für den Betrieb des Zick-Zack-Sichters, eine Industriekamera inklusive Beleuchtung, ein Schaltschrank und Rahmenkonstruktionen für diverse Anlagenkomponenten.

Das Fließband bildet die Grundlage für das Funktionsmuster und verbindet sämtliche Prozessschritte in der industriellen Insektenzucht. Um den Anforderungen gerecht zu werden, besteht das Fließband aus Aluminium-Item Profile, um flexibel weitere Anlagenteile anzubringen bzw. Umbauten schnell durchzuführen zu können (**Abbildung 12**).



**Abbildung 12: Kombination aus Zick-Zack-Sichter und Fließband aus Aluminium-Item Profilen**

Die technischen Daten bezüglich des Fließbandes sind in **Tabelle 3** aufgeführt. Des Weiteren besteht das Band aus einem lebensmittelechten Material und besitzt Seitenführungen, die das Entwischen von Mehlkäferlarven verhindern und die Reinigung der Anlage/des Fließbands erleichtern soll.

### Tabelle 3: Technische Daten des Förderbands

Firma	Dürschmidt GmbH Förderband FB –TM100
Fließbandlänge	4 m
Bandbreite	400 mm
Bandgeschwindigkeit (max.)	1 m/s
Bandmaterial	FDA Gurt nach ISO 284 (Lebensmittelecht) mit aufvulkanisierten Seitenrändern

Der Futterdosierer wurde aufgrund seiner Flexibilität bezüglich des zu dosierenden Mediums ausgewählt. Dadurch kann während der weiteren Nutzung auf unterschiedliche Futtermittel gewechselt werden (**Abbildung 13**). Die Dosierung erfolgt volumetrisch mit einer auswechselbaren Spiralschnecke. Der Dosierer ist trapezförmig konstruiert, damit bis zu sechs Dosierer um einen zentralen Aufgabepunkt platziert werden können. Die technischen Daten des Gerätes sind in der **Tabelle 4** enthalten.



**Abbildung 13: Automatischer Futterautomat von Brabender zur Befüllung der Aufzuchtbehälter der Larven mit Weizenkleie**

#### Tabelle 4: Technische Daten des Dosierers

Firma	Brabender Technologie FlexWall® plus-Dosierer FW 40/5
Förderung	Volumetrisch mit Spiralschnecke
Trogmaterial	Lebensmittelecht gemäß FDA (Polyurethan)
Aufsatzbehälter	20 Liter, trapezförmig

Für das optische Messsystem wurde eine intelligente Industriekamera angeschafft, die zur nichtinvasiven Überwachung der Insektenbox eingesetzt wurde. Zusätzlich zur Kamera wurde eine Dunkelkammer konstruiert, um gleichbleibende Lichtverhältnisse zu gewährleisten (**Abbildung 14**). Die technischen Daten sind in der folgenden **Tabelle 5** enthalten. Auf den Auswertelgorithmus wird in einem späteren Kapitel näher eingegangen.

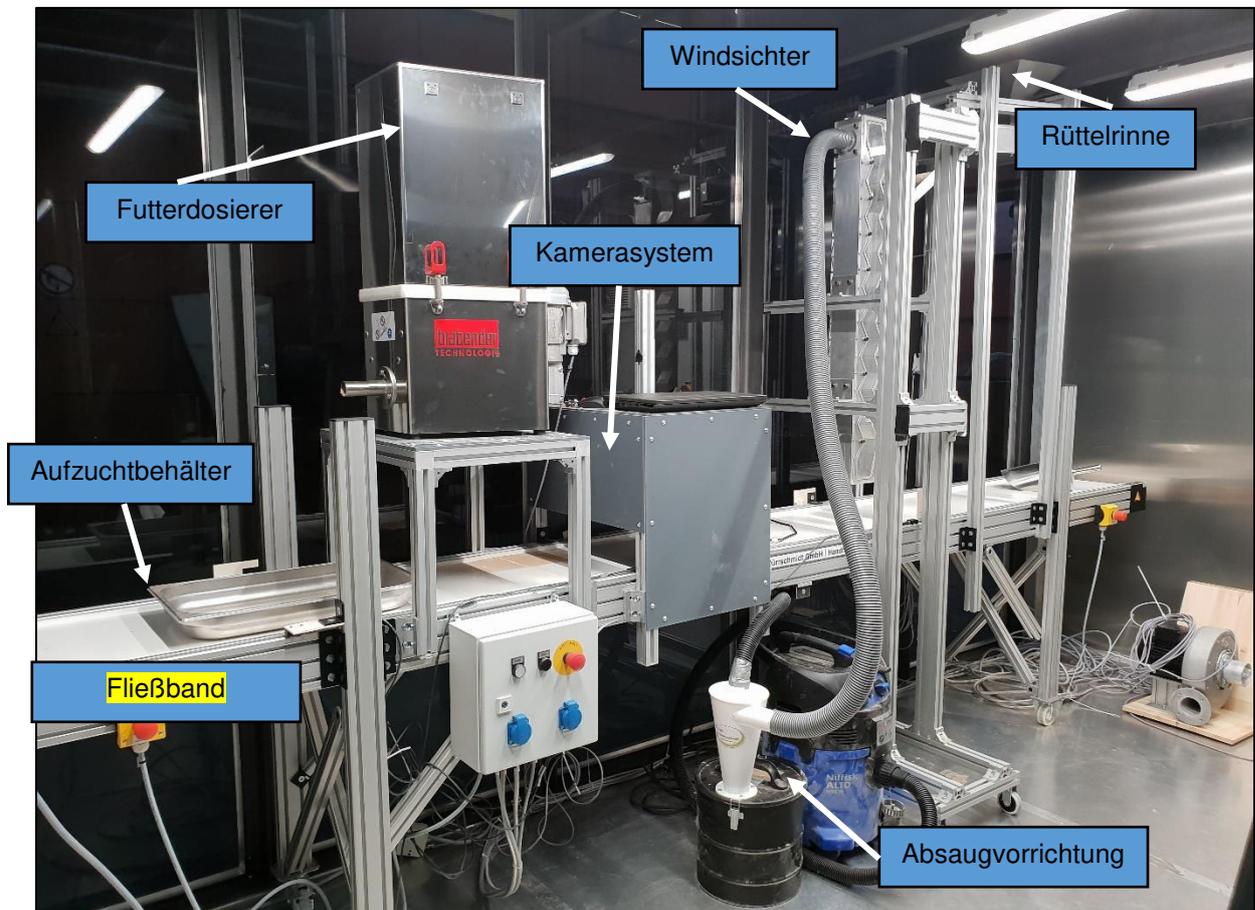
#### Tabelle 5: Daten zum optischen Messsystem mit intelligenter Industriekamera

Firma	Vision & Control / EIDECON vision solutions GmbH
Kamera	Pictor® T303M-ETH
Bediensoftware	vcwin® pro / Matlab / Python inkl. OpenCV
Sensor	CMOS Sensor, Monochrom
Schnittstelle	Ethernet, Digital I/O



**Abbildung 14: Integriertes Kamerasystem mit Auswertemodul zur Detektion des Entwicklungsstandes der Insekten**

Für das Zusammenspiel der Anlagenkomponenten sind eine Automatisierung mit den entsprechenden Bauteilen und Softwares sowie ein Schaltschrank notwendig (**Abbildung 15 und 16, Tabelle 6**).



**Abbildung 15: Gesamtübersicht des Funktionsmusters (Automatisierung) für die Insekten**

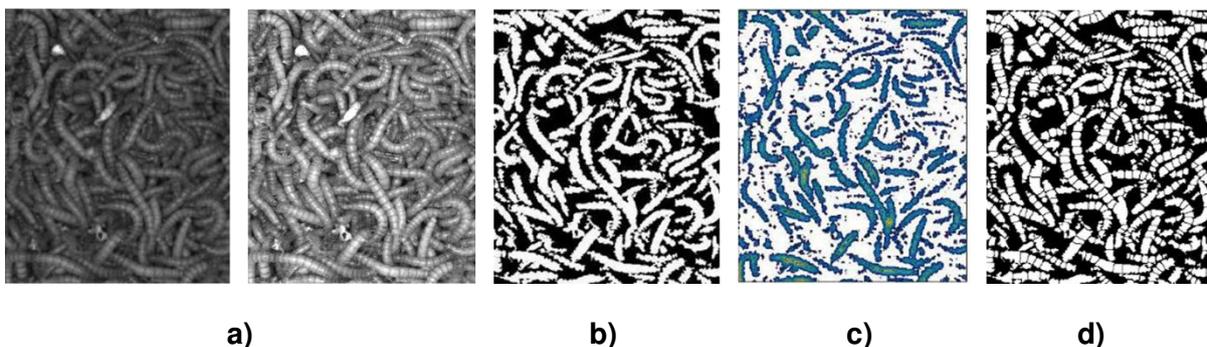
**Tabelle 6: Daten bezüglich der verwendeten Software**

Firma	Gesta mbH
SPS Programmierung	Siemens Simatic STEP 7 (TIA Portal) V15 Siemens Simatic WinCC
CPU	S7-1500 CPU 1512C-1 PN 16 D I/O
Frequenzumrichter	Danfoss Midi Drives
HMI Interface	Siemens Simatic HMI Touch Panel TB 700



**Abbildung 16: Schaltschrank/Automatisierungsbox für die Regelungstechnik des Funktionsmusters**

Für die Erkennung und Auswertung der Entwicklungszustände wurde ein Ansatz entwickelt, um die benötigten Informationen direkt aus der Box zu extrahieren ohne vorherige Aufreinigung und Vereinzelung der Mehlkäferlarven. Die Extraktion der benötigten Daten aus einem inhomogenen Bild ohne einen sich abhebenden Hintergrund erfordert andere neue Ansätze als in der klassischen Bildverarbeitung. Hierfür wurden alternative Algorithmen für die Segmentation recherchiert und erste Versuche ausgeführt [Husain et al. 2015; Ji et al. 2015; Sun and Luo 2009]. Dabei sollen für die Zucht relevante Größen wie der Umfang, Kreisähnlichkeit, Durchmesser, Länge und Breite extrahiert werden, die Rückschlüsse auf den Wachstumsfortschritt der Mehlkäferlarven zulassen. Dazu wurde die bereits implementierte Kamera (pictor T303M-ETH, Fa. Dr. Merbach, Optischer Gerätebau, Zella-Mehlis) genutzt und für diese Anwendung modifiziert.



**Abbildung 17: Bildverarbeitung**

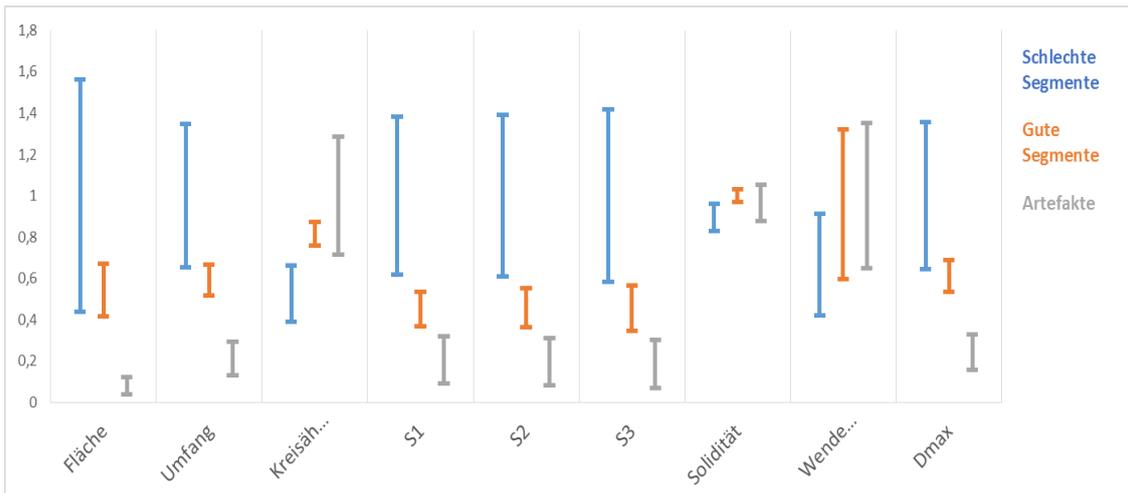
Die Auswertung erfolgte auf der Basis des *irregular watershed* Algorithmus und eines Künstlichen Neuronalen Netzes (KNN). Mit dem Watershed Algorithmus war es möglich, die einzelnen Segmente einer Mehlkäferlarve aus dem Bild zu extrahieren und einzeln auszuwerten. Dazu war eine Vorverarbeitung der Bilder durch Kontrasterhöhung (**Abbildung 17a**) und Thresholding (**b**) nötig. Nach der Berechnung der euclidischen Distanzen (**c**) kann letztendlich der *irregular watershed* Algorithmus angewendet werden (**d**), der die einzelnen Segmente der Mehlkäferlarven extrahieren kann.

Die Segmente wurden einzeln abgespeichert und nach folgenden Eigenschaften ausgewertet: Fläche, Umfang, Kreisähnlichkeit Fouriertransformatoren (S1, S2, S3), Solidität, Wendepunkte und maximaler Durchmesser (siehe **Abbildung 18**). Anhand dieser Eigenschaften wurden die Segmente klassifiziert.

Die Klassifizierung fand mit einem künstlichen neuronalen Netz statt. Für das Anlernen des Netzes wurden manuell klassifizierte Datensätze herangezogen mit insgesamt drei Klassen: „Gute Segmente, schlechte Segmente und Artefakte“. Als neuronales Netz wurde ein „*feed forward back propagation*“ Netz genutzt [Sun and Luo 2009].

Für die Erstellung des Datensatzes wurden 109 Bilder ausgewertet. Die Segmente wurden in 2938 schlechte Segmente, 4717 gute Segmente und in 2257 Artefakte eingeteilt.

In **Abbildung 18** sind die verschiedenen Eigenschaften und ihre Qualität bezüglich der Unterscheidbarkeit zwischen den drei Klassen dargestellt. Während die Fourierdiskreptoren die beste Unterscheidung zwischen den drei Klassen zeigten, ist z. B. die Betrachtung der Wendepunkte der Segmentumfänge oder die Betrachtung der Solidität ineffizient, da alle drei Klassen im selben Bereich lagen. Um die Effizienz zu erhöhen, wurden neben den Fourierdiskreptoren auch die Fläche, der Umfang und die Kreisähnlichkeit bei der Klassifizierung mit einbezogen.



**Abbildung 18: Normierte Gegenüberstellung der Mittelwerte der einzelnen „Features“ inkl. Standardabweichung. Das Zusammenspiel der Features führt zu einer eindeutigeren Klassifikation, indem die Einflüsse der Überlappungen der einzelnen Features durch den Zusammenschluss verringert wurden**

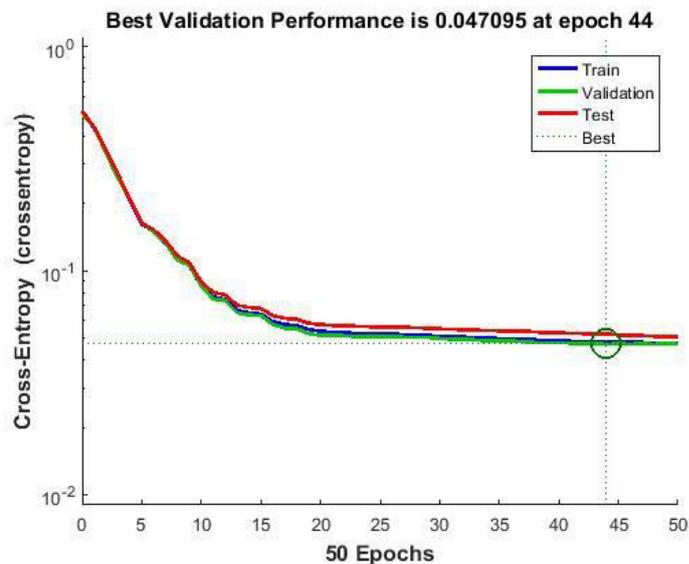
Der Datensatz des Anlernens teilt sich zu 50 % auf den Trainingsdatensatz auf und zu jeweils 25 % auf den Validierungs- und Testdatensatz. In einer Confusion Matrix (**Abbildung 19**) entsprechen die Zeilen den vorhergesagten und die Spalten den tatsächlichen Klassenzugehörigkeiten.



**Abbildung 19: Confusion Matrix**

Die Diagonale gibt die Anzahl der korrekt klassifizierten Objekte und deren prozentuale Anteile an der Gesamtzahl an. In der äußeren rechten Spalte steht die relative Genauigkeit bzw. die relative Fehlerrate der vorhergesagten Klassen. Diese Zahl gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Zuweisung in diese Klasse korrekt ist. In der untersten Spalte steht die relative Genauigkeit. Das blaue Feld gibt die Gesamtgenauigkeit an.

Das künstliche neuronale Netz wurde in einem iterativen Prozess angelernt. Die Genauigkeit des Netzes erhöhte sich zu Beginn bei jeder Wiederholung. Nach 44 Wiederholungen erreichte das Netz ein Minimum der Cross-Entropy von 0,0471 (siehe **Abbildung 20**).



**Abbildung 20: Confusion Matrix mit Minimum der Cross-Entropy von 0,0471**

Die Anwendung des Algorithmus inkl. neuronalem Netz zeigt, dass die Extraktion von Informationen aus einem stark inhomogenen Bild möglich ist. Die Informationen können aufgezeichnet und für die Erstellung einer Wachstumskurve herangezogen werden. Die nichtinvasive Auswertung der Aufzuchtboxen ist im halbertechnischen Maßstab möglich und erreichte eine Genauigkeit von 95,4 % bei der Klassifikation. Nichtsdestotrotz muss die Robustheit des Algorithmus erhöht werden, um Abweichungen und Fehlklassifikationen zu vermeiden. Einen großen Einfluss auf die Auswertung hat die Kamera selbst. Unterschiedliche Beleuchtungen, Abstände der Kamera zur Füllhöhe der Aufzuchtboxen und unterschiedliche Bildausschnitte können zu einer Fehlklassifikation führen. Um diese zu vermeiden, ist eine Online-Kalibrierung der Kamera u. a. durch den Abgleich mit einem Referenzmuster im Bild bzw. der Aufzuchtbox möglich. Des Weiteren kann das Vorhandensein von Substratresten auch zu einer Erhöhung der Fehlklassifikation führen. Um die Genauigkeit von 95,4 % zu erhöhen, müssen weitere Eigenschaften herangezogen werden, da der Fehler beim Anlernen des neuronalen Netzes nach 44 Iterationen keinen signifikanten Abfall der Cross-Entropy zeigt. Es können u. a. auch

die Segmente an sich als Bild in das neuronale Netz gegeben werden, um auch die Graustufen bzw. die Graustufenverteilung eines Segmentes oder Artefaktes mit in die Klassifizierung einzubeziehen. Eine weitere Möglichkeit wäre der Abgleich der Lage der Segmente untereinander: Die Mehlkäferlarven sind in 13 Segmente eingeteilt, deren Lage in einer gewissen Wahrscheinlichkeit zu den Nachbarsegmenten vorausgesagt werden kann. Anhand dessen können weitere Segmente identifiziert werden.

Der Aufbau des Funktionsmusters erfolgte nach Test der Einzelteile direkt in der Hochschule Bremerhaven. Die Anlage wurde in einem klimatisierten Raum aufgebaut, um auch während der Prozessierung die Klimatisierung der Mehlkäferlarven nicht zu unterbrechen (siehe Abbildung 16).

Dieser Klimaraum hat die Maße L 9 x B 3 x H 2,8 m und wurde aus einer Stahlrahmenkonstruktion gefertigt, an die Glassegmente als Außenwände angebracht wurden. Das verdunkelte Glas hat den Vorteil, Temperaturschwankungen durch von außen einfallendes Licht niedrig zu halten, bleibt jedoch transparent genug, um für Besucher einsehbar zu sein. An dem Standort des Klimaraumes in der Hochschule Bremerhaven wird somit ein Mehrwert erzielt, da Besucher, Studierende und Interessierte unkompliziert Einblick in das Projekt erhalten können. Die glatte Fassade ermöglicht darüber hinaus die Anbringung von Postern und Zwischenergebnissen, die über den aktuellen Stand der Forschung im Projekt informieren.

Der Klimaraum verfügt über eine eingebaute Zu- und Abluft, die nach Bedarf reguliert werden kann, sowie LED-Beleuchtung und eine Wärme- und Feuchteregulierung, so dass die optimalen Wachstumsparameter für die Larven eingestellt werden können (**Abbildung 21**).

Um etwaige Ausbrüche von Insekten der Massenaufzucht zu verhindern, wurde der Klimaraum mit einem leicht zu reinigenden Edelstahlboden versehen und sämtliche Verbindungen zwischen Glas und Metall hermetisch abgedichtet, so dass auch die Klimatisierung möglich ist. Neben der Massenaufzucht befindet sich das Technikum ebenfalls im Klimaraum, wird jedoch durch eine versiegelte Zwischenwand davon abgetrennt, zum einen um die Massenhaltung durch Arbeiten am technischen Ablauf nicht zu beeinträchtigen, zum anderen um unterschiedliche Klimaregimes zwischen Aufzucht und weiterer Verarbeitung realisieren zu können.



**Abbildung 21: Klimaraum für die Unterbringung der Larvenaufzucht (links) und des Funktionsmusters (Automatisierung, rechts)**

Abbildung 21 zeigt das Funktionsmuster, welches in Bremerhaven im Klimaraum untergebracht ist. Dies besteht aus einem 4,3 m langen Förderband, auf dem die Larven in den Aufzuchtbehältern (GN-Edelstahlbehälter) transportiert werden können. Auf der rechten Seite ist eine Rüttelrinne installiert (Detailaufnahme siehe Abbildung 16), welche für die Zudosierung des nachgeschalteten Zick-Zack-Sichters (Detailaufnahme siehe Abbildung 16) dient. In die Rüttelrinne kann der gesamte Inhalt des Aufzuchtbehälters (Larven, Futterreste, Kot) gegeben werden. Diese wurde zur vereinfachten Beladung des Zick-Zack-Sichters konstruiert. Sie wird durch einen Vibrationsmotor angetrieben und garantiert durch einen regelbaren Frequenzbereich einen konstanten Massenstrom. Hiermit lässt sich eine bessere Dosierung bzw. einfachere und konstante Zuführung der Menge an Larven, Futterresten und Kot in den Zick-Zack-Sichters erreichen. Zudem führt eine gleichmäßige Belastung des Zick-Zack-Sichters mit Material zu einer hohen Trennschärfe bei gleichbleibender, gewünschter Auslastung. Der Zick-Zack-Sichter trennt die Larven von den Rückständen. Hierbei fallen die Larven unten wieder in die Aufzuchtbox und können zur nächsten Station weiter transportiert werden. Die Futterreste und der Kot werden über einen Industriestaubsauger oben abgesaugt und separiert. Das folgende Kamerasystem mit Auswertemodul gibt Auskunft über den Erntezustand der Larven. Anschließend kann der automatisierte Futterspender von Brabender (Detailaufnahme siehe

Abbildung 16) das Substrat in den Aufzuchtbehälter der Larven geben. Die Larven im Aufzuchtbehälter können im Anschluss wieder in den Aufzuchttraum überführt werden. Im Zuge einer Automatisierung wäre dies durch Roboter realisierbar, indem nach der Zudosierung des Substrats der gefüllte Behälter direkt vom Förderband in ein Tragesystem gebracht und von dort in ein Regalsystem transportiert wird. Entsprechende Greif- und Transportroboter werden bereits flächendeckend und mit großem Erfolg in Lager- und Logistikzentren eingesetzt.

### **Prüfung und Reinigung von GN-Behältern**

Es wurde sich an der genannten DIN 10522 und dem Praxishandbuch orientiert. Für das Reinigen von Mehrwegbehältern gibt es keine direkt anwendbaren Gesetze. Als Orientierung können aber die DIN 10522 („Lebensmittelhygiene – gewerbliches maschinelles Spülen von Mehrwegkästen und Mehrwegbehältern für unverpackte Lebensmittel – Hygienische Anforderungen, Prüfungen“) sowie das „Praxishandbuch Gewerbliches Geschirrspülen“ herangezogen werden. Die DIN 10522 stellt den Stand der Technik dar und kann den Verantwortlichen der lebensmittelverarbeitenden Betriebe als Leitfaden dienen.

Die Aufzuchtbehälter der Larven (GN-Edelstahlbehälter) wurden zusammen mit der Firma Dr. Weigert einem Reinigungsverfahren unterzogen, damit anhaftende Futter- und Kotreste oder am Boden des Behälters haftende Eihüllen entfernt werden. Für das Reinigungsverfahren wurden dem Unternehmen benutzte GN-Behälter, die nach der Larvenhaltung nicht gereinigt wurden, zur Verfügung gestellt. Die Spülversuche wurden mit einer Miele Maschine G 8535 durchgeführt. Alle Spül- und Reinigungsschritte erfolgten mit enthärtetem Wasser. Es zeigte sich, dass eine Reinigung mit folgenden Parametern zu einer bestmöglichen Reinigung führte:

- Vorreinigung: Wasser, 1 min, kalt
- Reinigung: 2 % neodisher Alka 440 (alkalisch-aktivchlorhaltiger Reiniger), 2 min, 60 °C
- Nachspülung: 0,5 ml/l neodisher TS (Klarspüler), 1 min, 60 °C

Nach dem angegebenen Programmablauf waren die GN-Behälter visuell sauber.

## **5.2 AS 2: Vorverarbeitung der gewonnenen Insekten durch Fraktionierung und Trocknung (HSB, IFF)**

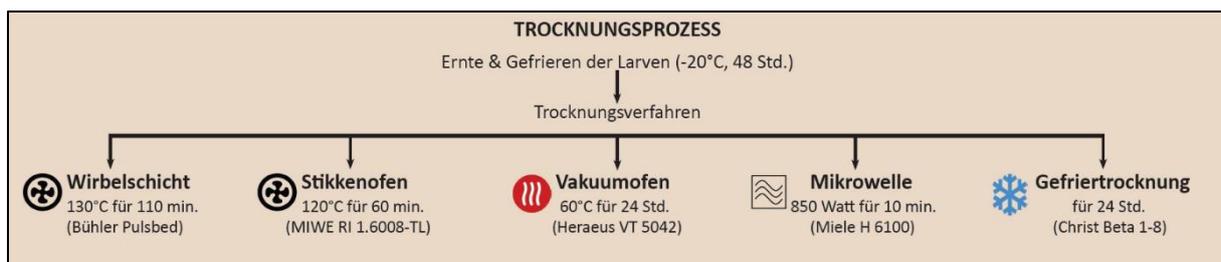
### **5.2.1 Vergleich geeigneter Verfahren zur Trocknung von Mehlkäferlarven**

Bei der industriellen Insektenproduktion bzw. -verarbeitung stellt die Trocknung einen bedeutenden Schritt in der Haltbarmachung dar. Gewünscht ist das Erreichen eines Feuchtegehaltes von unter 7 % und eines  $a_w$ -Wertes von unter 0,6, um ein lagerfähiges Produkt zu erhalten. Die Gefriertrocknung wird bisher kommerziell am häufigsten dafür verwendet [EFSA 2015]. Mehlkäferlarven (*Tenebrio molitor*) sind ungetrocknet, aufgrund des hohen Wassergehaltes

von 59-68 % und einer Wasseraktivität von bis zu 0,96 sehr anfällig für Abbauprozesse wie z. B. Lipidoxidation, Maillard-Reaktion oder dem mikrobiellen Verderb [Nowak et al. 2016]. Das mögliche Auftreten einer Lipidoxidation und die Veränderung des Nährwertes wie Protein-, Fett- und Fasergehalt wurden bezüglich verschiedener Trocknungsverfahren von Mehlkäferlarven mit unterschiedlichen Parametern für die Temperatur und die Trocknungsdauer untersucht. Ziel der untersuchten Verfahren ist, ein lagerstabiles Produkt zu erhalten, ohne den Wert des Rohstoffes durch eine übermäßige Belastung während der Trocknung signifikant zu mindern, und eine Alternative zur konventionellen Gefriertrocknung zu finden.

**Abbildung 22** zeigt eine Übersicht über die untersuchten Trocknungsprozesse mit den entsprechenden Einstellungen der Parameter für die fünf unterschiedlichen Trocknungsverfahren. Die Larven wurden nach der Ernte bei -20 °C für 48 Stunden gefroren. Anschließend erfolgte die Trocknung mittels Wirbelschichttrockner, Stikkenofen, Vakuumofen, Mikrowelle oder Gefriertrockner. Das Ziel dieses Versuches war es, die Larven so schonend wie möglich zu trocknen und ein lagerstabiles Produkt zu erhalten (Feuchte < 7 %, Wasseraktivität < 0,6).

Die Probenaufarbeitung für die Bestimmung von 4-HNE mittels Enzyme-linked Immunosorbent Assay (ELISA) erfolgte nach der Methode für die Festphasenextraktion. Nach den amtlichen Methoden wurde der Gehalt an Wasser (L 06.00-3), Rohprotein (L 06.00-7), Rohfett (L 06.00-6) und Rohfaser (L 06.00-4) analysiert. Der Gehalt an löslichen Proteinen wurde mit dem Kjeldahl-Verfahren auf wässriger Basis ermittelt. Die Wasseraktivität wurde mit einem Feuchte-Messgerät (Testo 650) gemessen. Für jede Analyse wurde eine Dreifachbestimmung durchgeführt.



**Abbildung 22: Darstellung des Trocknungsprozesses mit den verschiedenen Trocknungsverfahren.**

Die prozessierten Larven weisen nur geringe Unterschiede hinsichtlich Protein-, Fett- und Fasergehalt auf (siehe **Tabelle 7**). Die Werte für die Wasseraktivität der getrockneten Larven liegen in allen Fällen unter 0,6, was einen mikrobiellen Verderb ausschließt. Lipidoxidation, enzymatische und nicht-enzymatische Reaktionen können weiterhin stattfinden. Exakt gleiche  $a_w$ -Werte zwischen den Proben konnten mangels Online-Feuchtemessung jedoch nicht realisiert werden. Entsprechend konnte die Trocknung lediglich so eingestellt werden, dass ein

Produkt mit einem  $a_w$ -Wert von unter 0,6 entstand, da die benutzten Geräte kein laufendes Monitoring ermöglichten. Die Bildung des Aldehyds 4-HNE ist bei mikrowellengetrockneten Larven am niedrigsten. Die Gefriertrocknung führt, entgegen den Erwartungen, zu deutlich höheren Werten an 4-HNE. Eine bestehende Hypothese wird darauf begründet, dass eventuell auftretende Bräunungssubstanzen, welche bei der Maillard-Reaktion, die bei der Gefriertrocknung keine entscheidende Rolle spielt, gebildet werden, die Lipidoxidation reduzieren [Zamora und Hidalgo 2005]. Eine höhere Lipidoxidation bei der Gefriertrocknung im Vergleich zur Mikrowellentrocknung wurde auch in anderen Untersuchungen festgestellt [Lenaerts et al. 2018]. Die Proteinlöslichkeit ist bei der Vakuumtrocknung am höchsten, gefolgt von der Gefriertrocknung. Die anderen Verfahren bewirken erwartungsgemäß aufgrund der höheren Prozesstemperaturen eine niedrigere Proteinlöslichkeit.

**Tabelle 7: Zusammengefasste Ergebnisse der unterschiedlichen Trocknungsmethoden für *T. molitor* Larven. Werte mit einem gleichen hochgesetzten Buchstaben sind nicht signifikant unterschiedlich ( $p < 0,05$ ; ANOVA/ Bonferroni post hoc Test)**

Trocknungsverfahren	$a_w$ -Wert [-]	Wassergehalt [%]	Protein [%]	Proteinlöslichkeit [%]	Fett [%]	Faser [%]	4-HNE [ $\mu\text{g/ml}$ ]
Stikkenofen	0,13 ± 0,00 <sup>e</sup>	1,50 ± 0,10 <sup>e</sup>	57,00 ± 0,42 <sup>a</sup>	14,10 ± 0,28 <sup>e</sup>	27,10 ± 0,00 <sup>a,b</sup>	7,50 ± 0,42 <sup>a</sup>	42,50 ± 0,02 <sup>c,d</sup>
Vakuumofen	0,18 ± 0,01 <sup>e</sup>	1,70 ± 0,07 <sup>e</sup>	54,80 ± 0,28 <sup>b</sup>	49,70 ± 0,00 <sup>b</sup>	31,40 ± 0,00 <sup>a</sup>	7,60 ± 0,00 <sup>a</sup>	58,50 ± 0,05 <sup>b</sup>
Gefriertrocknung	0,23 ± 0,00 <sup>d</sup>	3,90 ± 0,06 <sup>d</sup>	53,20 ± 0,07 <sup>c</sup>	40,70 ± 0,21 <sup>c</sup>	27,70 ± 0,07 <sup>a,b</sup>	7,80 ± 0,21 <sup>a</sup>	111,00 ± 0,01 <sup>a</sup>
Mikrowelle	0,36 ± 0,01 <sup>c</sup>	5,40 ± 0,01 <sup>c</sup>	55,50 ± 0,07 <sup>b</sup>	12,70 ± 0,07 <sup>f</sup>	27,10 ± 0,07 <sup>a,b</sup>	6,60 ± 0,07 <sup>b</sup>	34,00 ± 0,01 <sup>e</sup>
Wirbelschicht	0,54 ± 0,00 <sup>b</sup>	7,20 ± 0,12 <sup>b</sup>	50,00 ± 0,14 <sup>d</sup>	19,30 ± 0,21 <sup>d</sup>	30,50 ± 0,00 <sup>a,b</sup>	5,90 ± 0,14 <sup>c</sup>	44,50 ± 0,01 <sup>c</sup>
Frische Larven	0,94 ± 0,00 <sup>a</sup>	62,90 ± 0,27 <sup>a</sup>	52,00 ± 0,12 <sup>d</sup>	53,24 ± 0,37 <sup>a</sup>	26,80 ± 0,02 <sup>b</sup>	6,10 ± 0,02 <sup>c</sup>	39,50 ± 0,08 <sup>d</sup>

Werden die Farbunterschiede auf **Abbildung 23** herangezogen, fällt auf, dass die Larven, die mittels Vakuumofen und Stikkenofen getrocknet wurden, ungleichmäßige Bräunungsgrade innerhalb der Proben aufweisen. Dies kann auf eine ungleichmäßige Beladung und Überdeckung von Proben untereinander hinweisen. Die Larven mit der intensivsten Bräunung, die mit Wirbelschicht und Stikkenofen getrocknet wurden, weisen sehr niedrige 4-HNE Werte auf, obwohl diese hohen thermischen Belastungen ausgesetzt waren. Ein Zusammenhang zwischen Bräunungsgrad und 4-HNE-Gehalt besteht allerdings nicht, wie die Ergebnisse zeigen.



**Abbildung 23: Farbunterschiede der Mehlkäferlarven vor und nach der Trocknung. 1) Mikrowellen; 2) Gefriertrocknung; 3) Ungetrocknete Larven; 4) Stikkenofen; 5) Vakuumofen; 6) Wirbelschicht**

Diese Untersuchungen zeigen, dass die Mikrowellen- und Vakuumofentrocknung eine Alternative zur konventionellen Gefriertrocknung darstellen könnten. Auch Kostenfaktoren sollten berücksichtigt werden. Im Vergleich zur Gefriertrocknung ist z. B. die Mikrowellentrocknung kostengünstiger [Lenaerts et al. 2018].

In einem Folgeversuch wurden weitere Trocknungsversuche mit Mehlkäferlarven durchgeführt, um den Effekt dreier verschiedener Trocknungstechniken (Gefriertrocknung, Vakuumtrocknung, Stikkenofentrocknung) auf die Fettsäurezusammensetzung und das Auftreten von volatilen Komponenten in Larven von *Tenebrio molitor* zu untersuchen. Zusätzlich wurde der Gesamtzinkgehalt in den getrockneten Insektenlarven sowie die Biozugänglichkeit des essentiellen Spurenelementes Zink nach Durchführung eines *in vitro* Gastrointestinal-Verdau analysiert. Es wurden dieselben Einstellungen für die Temperatur und Trocknungszeit wie in dem ersten Versuch verwendet.

Die Ergebnisse tragen dazu bei, das Wissen um prozesstechnologisch induzierte Veränderungen von ernährungsrelevanten Komponenten aus Insekten zu vertiefen. Diese Veränderungen könnten aus ernährungsphysiologischer Sicht Verschlechterungen darstellen, wenn beispielsweise die Verdaulichkeit herabgesetzt wird oder andere Faktoren ungünstig beeinflusst werden, wie die Wasserlöslichkeit von Proteinen oder der Gehalt beziehungsweise die Aufnahme von essentiellen Mineralstoffen.

Um kontinuierliche Systeme hinsichtlich einer zukünftigen Automatisierung und effizienteren Prozessgestaltung zu etablieren, können Trocknungsverfahren aus anderen Industriebereichen genutzt werden [Wankhade et al. 2013; Haque und Somerville 2013; Lababidi und Baker 2003]. Die jeweiligen Parameter für das zu verwendende Trocknungssystem müssen jedoch auf das zu trocknenden Gut angepasst werden.

Eine Variante ist die Nutzung von Bandtrocknungssystemen. Dabei wird das zu trocknende Insektenmaterial von temperierter Luft durchströmt. Nach einer definierten Verweilzeit im Bandtrockner verlässt das getrocknete Material mit einer definierten Endfeuchte den Prozess. Bei diesem Verfahren gibt es verschiedene Einflussgrößen, die zuvor ermittelt und angepasst werden müssen. Das sind zum Beispiel die Trocknungstemperatur, die Schichthöhe und Porosität des Insektenmaterials (Haufwerk) auf dem Band, die Luftgeschwindigkeit, das treibenden Konzentrationsgefälle des Dampfdruckes und, wie schon erwähnt, die Länge des Trocknungsprozesses (Verweilzeit) [Heindl 2016]. In der **Tabelle 8** ist dargestellt, wie sich die Änderung der Trocknungstemperatur auf die Qualität des Endproduktes und den zeitlichen Verlauf einer Trocknung bei den Larven von *Tenebrio molitor* auswirken kann.

**Tabelle 8: Einfluss der Trocknungstemperatur auf die Qualität des Proteinträgers *Tenebrio molitor*: Trocknungsfläche 2500 cm<sup>2</sup> (50 cm x 50 cm), Schichthöhe 4,5 cm, Luftgeschwindigkeit 0,52 m/s, Ausgangs-Gesamtkeimzahl 8,2 x 10<sup>6</sup> cfu/g (Durchschnittswerte dreier Replikate ± Standardabweichung)**

Trocknungszeit [min]	70	70	30
Trocknungstemperatur [°C]	80	100	120
Feuchte [%]	10,9 ± 0,00	3,4 ± 0,00	6,0 ± 0,00
Protein [%]	53,4 ± 0,42	56,4 ± 0,21	55,7 ± 0,28
Fett [%]	23,3 ± 0,07	25,1 ± 0,00	24,5 ± 0,07
Lösliches Protein [%]	27,1 ± 0,28	20,7 ± 0,07	16,9 ± 0,00
Gesamtkeimzahl [cfu/g]	2,5x10 <sup>5</sup>	1,8x10 <sup>5</sup>	2,0x10 <sup>4</sup>

Die entstandenen Endprodukte wurden mittels Wender-Analyse genau untersucht.

Um Produkte schonend zu trocknen, werden Temperaturen unter 80 °C angestrebt, damit die Denaturierungseffekte des Proteins so gering wie möglich, jedoch die Trocknungszeit so kurz wie möglich sind. Ein Maß für die Denaturierung des Proteins ist die Bestimmung des löslichen Proteins. Mit steigender Temperatur nehmen die Proteinlöslichkeit ab bzw. die Denaturierungseffekte zu.

Weiterhin ist die Endfeuchte des Materials von entscheidender Bedeutung. Nach einer Trocknungszeit von 70 Minuten liegt diese bei den gewählten Parametern bei 10,9 % und ist futtermittelrechtlich (Futtermittelkennzeichnung (EG) Nr. 767/2009) unter dem geforderten Wert von 14 %. Unter Lagerbedingungen hat sich jedoch gezeigt, dass es hinsichtlich des Verderbs als kritisch anzusehen ist. Abhängig von der Feuchte und dem damit verbundenen  $a_w$ -Wert, ist besonders auf das Wachstum von Schimmelpilzen hinzuweisen.

Ein weiterer Aspekt bei der Bewertung von Prozessen ist die Effizienz des gesamten Prozesses. An Hand des Beispiels in Tabelle 8 gibt es einen deutlichen Unterschied zwischen dem Versuch mit 80 °C/100 °C und einer Verweilzeit von 70 Minuten verglichen mit dem Versuch von 120 °C und der reduzierten Verweilzeit von 30 Minuten. Zu berücksichtigen ist, dass bei diesen Parametern das lösliche Protein sehr stark reduziert wird, d. h. die Nährstoffverfügbarkeit abgenommen hat.

Bezogen auf den Einsatz des Proteinträgers in der Futtermittelindustrie kann sich die verminderte Proteinverfügbarkeit in einer möglichen Leistungsdepression der Tiere äußern [Kampues 2004].

Ein weiterer Aspekt bezogen auf den thermischen Prozess ist der Hygienestatus des zu trocknenden Materials. Ausgehend vom Ausgangsmaterial *Tenebrio molitor* mit einer Gesamtkeimzahl von  $8.2 \times 10^6$  cfu/g erfolgte mit jeder thermischen Beanspruchung eine Keimreduzierung, d. h. eine Verbesserung des hygienischen Zustandes [DFG 2016].

Die Ergebnisse dieses Projektes liefern wichtige grundlegende Erkenntnisse für das zukünftige Design prozessoptimierter Trocknungsstrategien.

## **5.2. Trocken- und Nassaufbereitung der Insekten**

Neben den verschiedenen Trocknungstechnologien, welche innerhalb der Prozesskette verwendet werden können, ist besonders die Trennung von Fett- und Proteinträger des Insektenmaterials zu berücksichtigen.

in den letzten Jahren hat sich z. B. in den Niederlanden, Frankreich und auch Deutschland eine Industrie zur Verarbeitung bzw. Aufbereitung von Insekten entwickelt, deren Produkte in Chips, Burgern, Riegeln und Mehlen in der Futtermittel-, Petfood- und Lebensmittelindustrie Anwendung finden.

Je nach Industriezweig haben die aus den Insekten gewonnenen Produkte unterschiedliche Eigenschaften.

Insektenmehle können sich zum Beispiel erheblich in ihren Eigenschaften (Proteingehalt, Restfettgehalt, Chitin) unterscheiden, weil der Proteinträger aufgrund unterschiedlicher Prozesse verschiedenen thermischen und mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt ist. Es

gibt Produkte für die Lebensmittelindustrie, in denen die Insekten oder deren Larven erst getrocknet und dann zerkleinert werden (Variante 1). Da dieses Material einen sehr hohen Fettgehalt (32 % bis 45 %) [FAO 2013], abhängig von der Insektenspezies, hat, ist es für die Verwendung als Futtermittel schwierig einzusetzen. Ähnliche Einschränkungen gibt es bei Extraktionsschroten, -kuchen sowie Leguminosen und Ölsaaten. Es bestehen Einschränkungen in den Einsatzmöglichkeiten durch hohe Fettgehalte [Finke 2002].

Für eine optimale Rezepturgestaltung in der Futtermittelindustrie ist es notwendig, die proteinhaltigen Insektenmehle zu entfetten (Variante 2). Ein Vorteil, der durch die Reduzierung des Fettgehaltes im Insektenmehl resultiert, ist der steigende Proteingehalt im Insektenmehl auf Werte von über 70 % Rohproteingehalt (**Tabelle 9**). In beiden Fällen (Variante 1 und 2) enthält das Insektenmehl entsprechend dem Aufbau der Insekten neben Protein, Fett und Wasser auch Chitin [Le Féon et al. 2019; Thévenot et al. 2018].

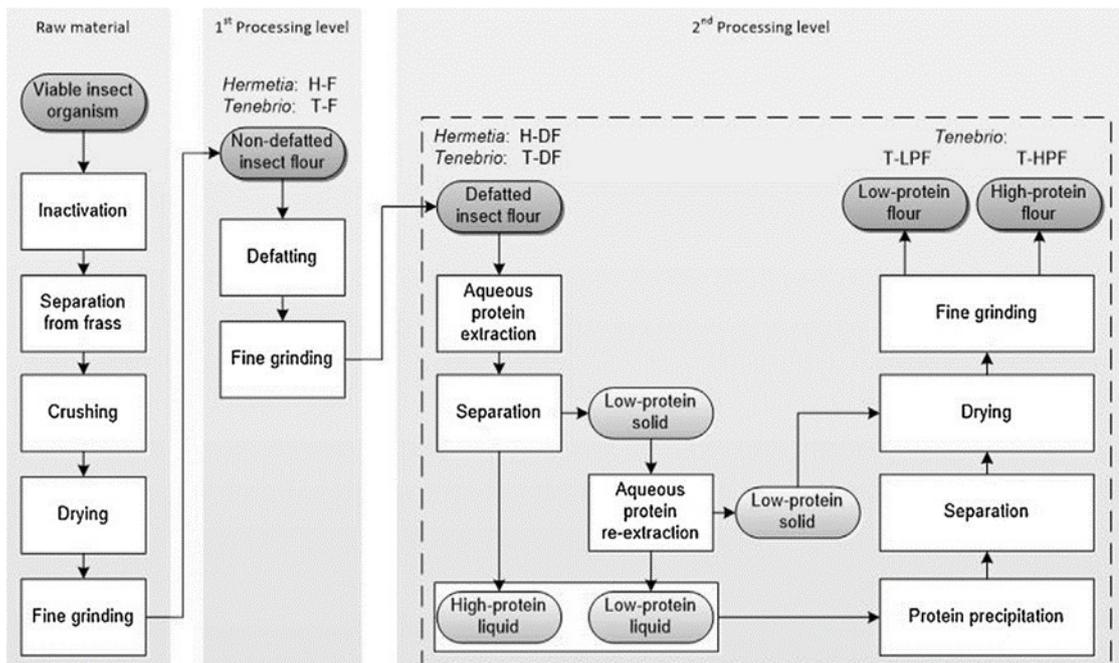
Chitin wiederum ist in der Natur nicht nur in den Panzern und Schalen von Insekten sondern auch Krebstieren sowie als Gerüststoff in Pilzen weit verbreitet. Es ist das zweithäufigste Polysaccharid nach Cellulose und kann in Chitosan mit einer höheren Wertschöpfung umgewandelt werden, daher gibt es unter den Proteinmehlen aus Insekten auch Produkte frei von Chitin (Variante 3).

Allein bei den in diesem kurzen Abschnitt beschriebenen Varianten der Proteinmehle wird deutlich, dass zur Aufbereitung von Insekten verschiedene Verfahren genutzt werden.

Im Allgemeinen kann man unabhängig von den verschiedenen Unternehmen und Industriezweigen grundsätzlich in Nass- und Trockenverfahren zur Aufbereitung unterscheiden.

Ausgehend von der Trockenaufbereitung kann das getrocknete Larvenmaterial auf verschiedenste Art und Weise entfettet werden.

Untersuchungen von S. Bußler und O. Schlüter beschäftigen sich mit dem Thema und stellen Möglichkeiten der Aufarbeitung dar (**Abbildung 24**).

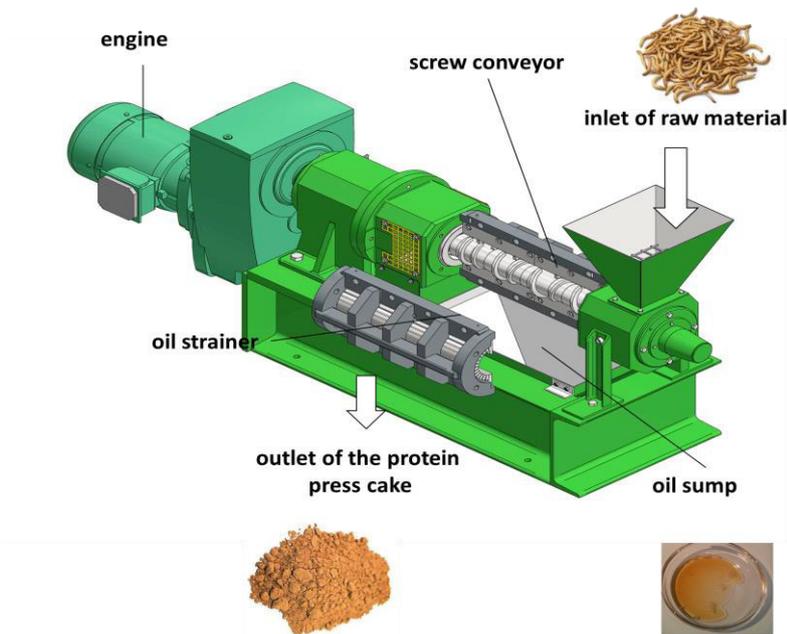


**Abbildung 24: Schematische Darstellung der Verarbeitung und Fraktionierung von Larven von *T. molitor* und *H. illucens* [Bußler et al. 2013]**

Inhaltlich wurden die proteinogenen Eigenschaften der Insekten nach der Aufarbeitung auf unterschiedlichen Wegen untersucht. Erwähnt werden muss, dass das Extrahieren des Fettes durch organische Lösemittel erfolgte und damit nicht im Einklang mit der EFSA Opinion steht [EFSA, 2015].

### 5.2.1 Trockenaufbereitung der Insekten

Ein anderes lösemittelfreies Verfahren, welches in diesem Projekt untersucht wurde, ist die Möglichkeit der Verwendung einer Seiherschneckenpresse (**Abbildung 25**). Ein Verfahren bekannt aus der Ölsaatenverarbeitenden Industrie, z. B. zum Entölen von Soja oder Raps.

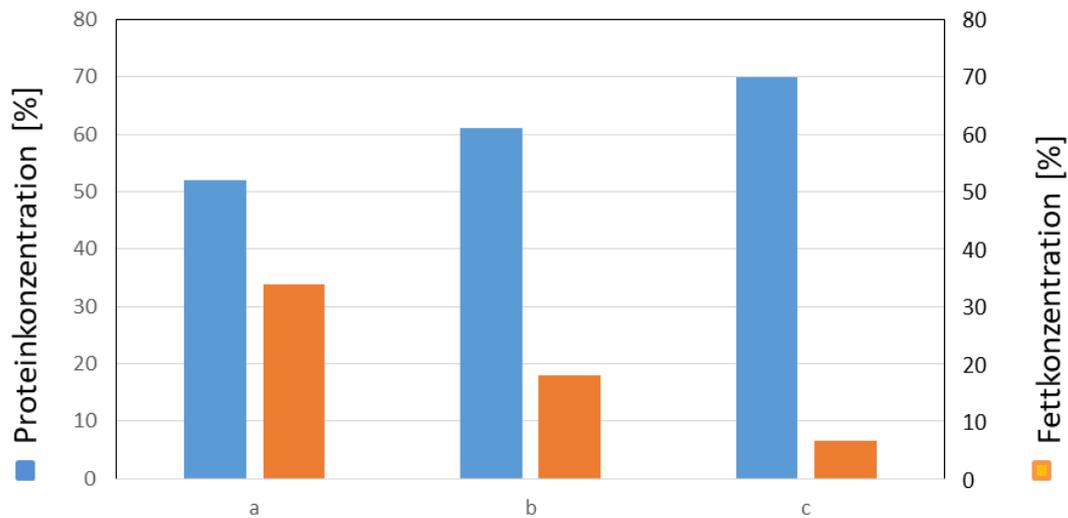


**Abbildung 25: Schematische Darstellung des Seiherschneckenprozesses zur Proteinextraktion von Mehlkäferlarven in Presskuchen und Lipid (*Tenebrio molitor*)**

Am Ende des Pressprozesses entstehen zwei Endprodukte: ein proteinreicher Feststoff (Proteinmehl) und das abgepresste Insektenfett. Auch dieser Prozess kann von verschiedenen Parameter beeinflusst werden, die nicht nur das Verfahren sondern auch die Qualität des Proteinträgers beeinflussen (Konfiguration von Seihers und Presskopf, Materialfeuchte).

Während bei der Nutzung des Presskopfes mit der Konusscheibe ein sehr fettreicher Presskuchen erzeugt wurde, konnte mittels Pelletscheibe ein kontinuierlicher Materialfluss mit einer sauberen Abtrennung des Öls und einem Proteinpresskuchen mit einem Restfettgehalt von 6,5 % erzeugt werden (**Abbildung 26**).

Um die Repräsentativität und Vergleichbarkeit der Versuche untereinander zu gewährleisten, wurde ofengetrocknetes Larvenmaterial aus einer Charge und mit gleicher Endfeuchte verwendet.



**Abbildung 26:** Zusammensetzung von *Tenebrio molitor* a) nach dem Trocknen und nach dem Abpressen des Fettes mittels Schneckenpresse durch zwei unterschiedliche Presskopfkongfigurationen b) mittels Konunsscheibe c) mittels Pelletscheibe.

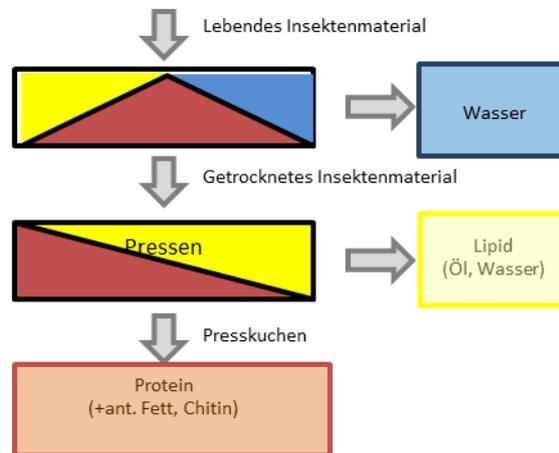
In **Tabelle 9** sind Analysedaten von *Tenebrio molitor* Larven nach der Trocknung und nach dem Seiherschneckenpressen vergleichend gegenüber Fischmehl dargestellt.

**Tabelle 9:** Wender-Analysedaten der getrockneten Larve des *Tenebrio molitor* sowie des Presskuchens nach der Aufbereitung mittels Seiherschneckenpresse verglichen mit handelsüblichem Fischmehl (Durchschnittswerte dreier Replikate  $\pm$  Standardabweichung).

Material	Fischmehl	<i>Tenebrio molitor</i> getrocknet	<i>Tenebrio molitor</i> Presskuchen
Feuchte [%]	5,7 $\pm$ 0,00	5,4 $\pm$ 0,00	3,9 $\pm$ 0,00
Rohprotein [%]	70,8 $\pm$ 0,35	48,6 $\pm$ 0,07	70,1 $\pm$ 0,07
Fett [%]	10,1 $\pm$ 0,00	34,9 $\pm$ 0,07	6,5 $\pm$ 0,00

Die Daten der Tabelle 9 zeigen, dass der erreichte Restfettgehalt im Presskuchen unter dem des analysierten Fischmehls liegt. Die Rezepturgestaltung in der Futtermittelindustrie lässt sich damit ähnlich anderer Einzelfuttermittel wie Soja oder Fischmehl gestalten bzw. die Insektenfette können für andere Industriebereiche eingesetzt werden, denn sie sind reich an mehrfach ungesättigten Fettsäuren.

In der **Abbildung 27** ist der Gesamtprozess der Trockenaufbereitung im Überblick dargestellt.

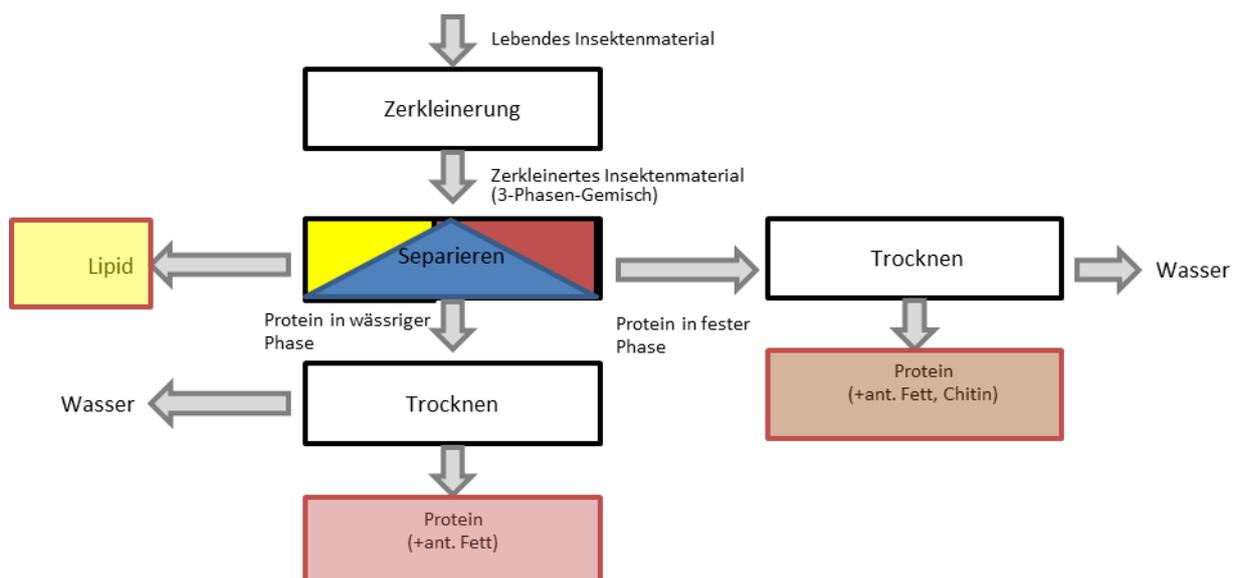


**Abbildung 27: Schema einer Trockenaufbereitung für Insekten**

Die Seiherschneckenpresse arbeitete in den Versuchen mit einer Durchsatzleistung von 14 kg/h. Der Presskuchen hatte eine gleichbleibende Qualität.

### 5.2.2 Nassaufbereitung der Insekten

Gegensätzlich zur Trockenaufbereitung werden Insekten zu Proteinmehl und separiertem Fett nass aufbereitet. In der **Abbildung 28** ist schematisch der Prozessablauf abgebildet.



**Abbildung 28: Schematische Darstellung der Nassaufbereitung von Insekten**

Die ungetrockneten Insekten oder deren Larven werden erst zerkleinert und nach der Zerkleinerung mittels Separationstechnik in Protein und Fett überführt. Die Effizienz des Prozesses ist in diesem Fall u. a. davon abhängig, mit welcher Trennschärfe das 3-Phasen-Gemisch aufbereitet werden kann. Die Trennschärfe wiederum ist abhängig von verschiedenen Faktoren wie z. B. der Partikelgröße nach dem Zerkleinern, der Verweilzeit und Temperierung nach dem Zerkleinern sowie der Homogenisierung des Insektenmaterials im Rührbehälter, der verwendeten g-Zahl beim Zentrifugieren und der Zentrifugationszeit. Weiterhin kann über die Trennschärfe die Qualität der Endprodukte und deren weiterer Aufbereitung beeinflusst werden [Purschke 2018].

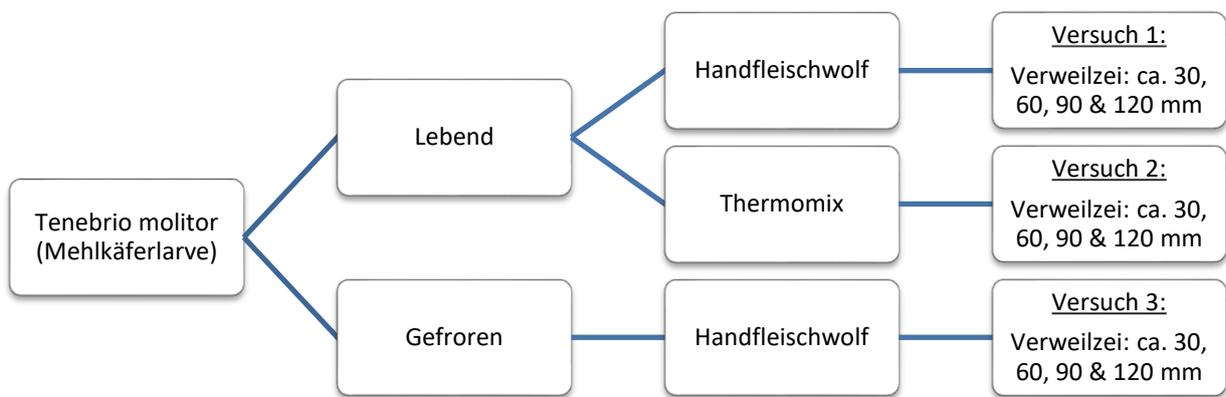
Die Ergebnisse der Zentrifugationsversuche sind in der **Tabelle 10** zusammengestellt.

**Tabelle 10: Ergebnisse der Zentrifugationsversuche zur Nassaufbereitung**

	TS (%)	Fett (%) (TS) Soxhlet	Fett (%) (TS) Gerber	Protein (%) (TS) Faktor 6,25
<b>Ausgangsmaterial</b>				
Insektenmaterial lebend I und II	32,55	25,3		58,81
Insektenmaterial gefroren III	31,01	23,4		58,44
<b>Versuch I Fleischwolf</b>				
30 Feststoff	29,73	19,4		69,15
Wasser Phase	6,23		0,3	52,38
60 Feststoff	27,42	19,7		69,2
Wasser Phase	5,95		0,2	61,51
90 Feststoff	26,18	16,3		70,12
Wasser Phase	6,25		0,1	59,86
120 Feststoff	26,97	15,8		72,45
Wasser Phase	7,44			56,66
<b>Versuch II Thermomix</b>				
30 Feststoff	30,64	22,2		73,98
Wasser Phase	5,75		0,25	58,19
60 Feststoff	28,59	21,5		71
Wasser Phase	6,1		0,1	55,7
90 Feststoff	27,39	15,5		78,31
Wasser Phase	6,43		0,15	54,52
120 Feststoff	28,33	14,7		79,46
Wasser Phase	5,89		0,3	58,42
<b>Versuch III Fleischwolf</b>				
30 Feststoff	29,48	24,2		62,63
Wasser Phase	6,38		0,95	40,82
60 Feststoff	29,6	24,1		58,18
Wasser Phase	6,31			41,98
90 Feststoff	28,96	19,5		60,65
Wasser Phase	6,19			45,06
120 Feststoff	28,73	16,8		55,12
Wasser Phase	7,02			44,12

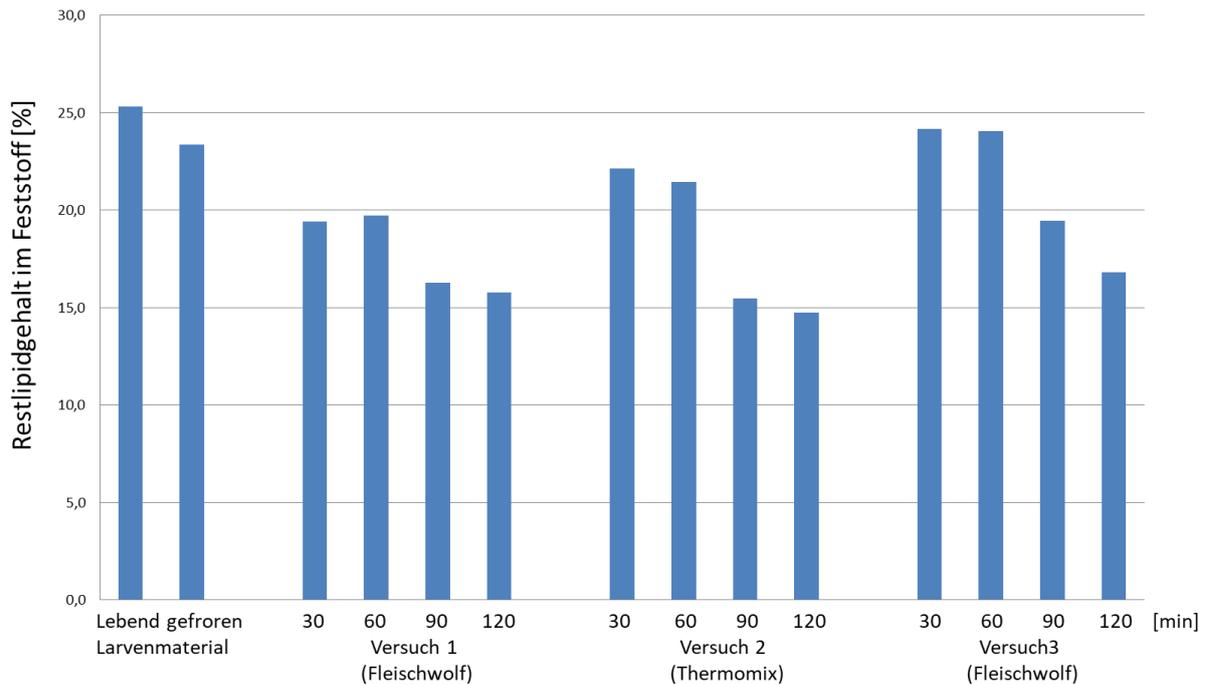
Es wurden drei verschiedene Prozesse miteinander verglichen und ausgewertet. In der ersten Variante wurde lebendes Larvenmaterial mittels kochendem Wasser (Verweilzeit 3 Minuten) abgetötet und dann hinsichtlich der Partikelgröße zum einen mit dem Fleischwolf und zum anderen mit dem Thermomix zerkleinert.

In der zweiten Variante wurden die zuvor eingefrorenen Larven ebenfalls mittels Fleischwolf zerkleinert. Auf diese Weise haben sich mehrere Einstellungen ergeben, welche bei variierenden Verweilzeiten des zerkleinerten Materials hinsichtlich ihrer Trennbarkeit untersucht und analysiert wurden (**Abbildung 29**).



**Abbildung 29: Überblick über die Versuchseinstellungen zur Nassaufbereitung der Insekten**

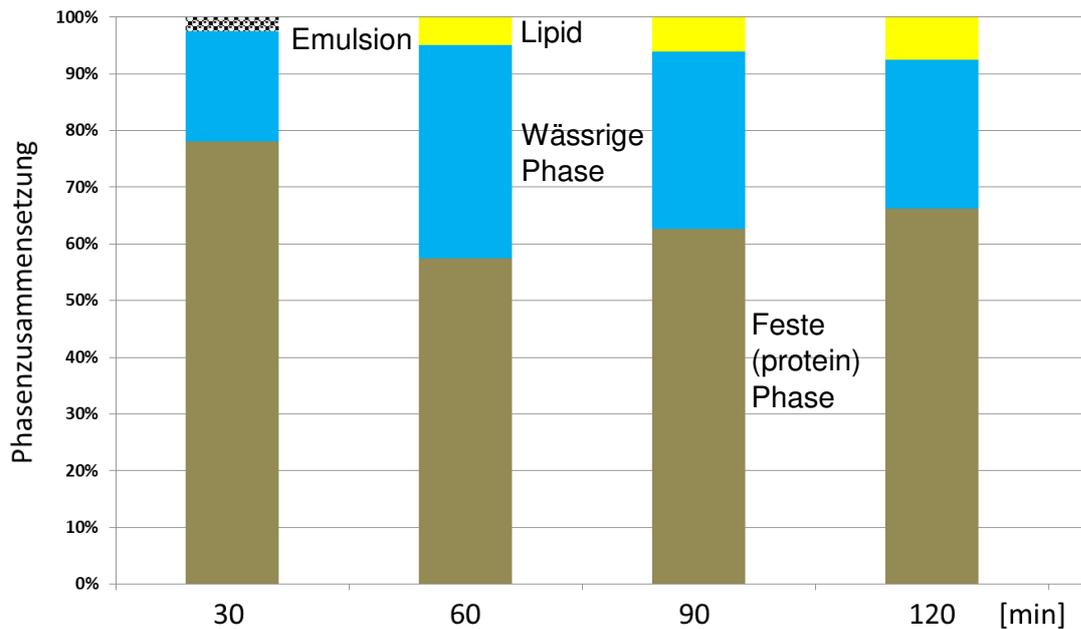
Der **Abbildung 30** kann entnommen werden, dass sich mit zunehmender Verweilzeit des zerkleinerten Materials im Rührbehälter sich der Anteil des Fettes im Feststoff reduziert und auf diese Weise im Überstand ansteigt. Weiterhin haben sich in den Versuchen zwei und drei Emulsionen mit unterschiedlicher Ausprägung gebildet.



**Abbildung 30: Darstellung der Restfettgehalte im Proteinfeststoff der Zentrifugationsversuche zur Nassaufbereitung von Insekten über die Zeit**

Als Emulsion bezeichnet man ein fein verteiltes Gemisch zweier Flüssigkeiten, welche nicht miteinander mischbar sind, wie Öl und Wasser. Eine Flüssigkeit (Phase) bildet kleine Tröpfchen feinverteilt in der anderen Flüssigkeit. Emulsionen sind thermodynamisch instabil, d. h. nach einer definierten Verweilzeit liegen beide Phasen wieder getrennt voneinander vor.

Im Versuch 2 wurde beobachtet, dass bei der Verwendung der lebenden Larve und der Verwendung des Thermomix im Gegensatz zum Fleischwolf die Emulsionsbildung am Anfang des Prozesses höher ist (**Abbildung 31**), sich dieser Effekt bezogen auf die Verweilzeit aber wieder abbaut.



**Abbildung 31: Darstellung der Phasenzusammensetzung der zerkleinerten Mehlkäferlarven mittels Thermomix und der daraus resultierenden Zentrifugationsversuche**

Eine Erklärung dafür ist, dass mit dem Thermomix aufgrund des Schneidmessers mit definierter Umfangsgeschwindigkeit kleinere Partikel erzeugt werden. Durch die Verkleinerung der Tropfen bei der Herstellung einer Emulsion erhöht sich die Grenzfläche zwischen den beiden Phasen. Dabei muss die Grenzflächenspannung überwunden und eine neue Grenzfläche geschaffen werden. Dies erfordert Arbeit, die mechanisch in das System eingebracht werden muss. In Fall der Versuchseinstellung erfolgte dies durch das Schneidmesser des Thermomix. Durch die größeren Scherkräfte werden die Tröpfchen kleiner verglichen mit dem Fleischwolf. Gegensätzlich dazu verhält sich das zuvor gefrorene Material. Trotz der Zerkleinerung mittels Fleischwolf zeigte sich bei allen Ergebnissen nach dem Zentrifugieren, dass ein Teil der Flüssigkeit als Emulsion vorlag.

Aufgrund des vorherigen Einfrierens des Materials ist davon auszugehen, dass die Zellstrukturen aufplatzen, auf diese Weise kleinere Lipidtröpfchen erzeugt werden und dadurch die Neigung zur Emulsionsbildung zum einen größer ist und zum anderen länger erhalten bleibt. Durch eine zusätzliche Absenkung des pH-Wertes sollte dem entgegengewirkt werden. Trotz des niedrigeren pH-Wertes verglichen mit der Versuchseinstellung 1 (frisches Larvenmaterial, Fleischwolf) blieb die Emulsion erhalten.

Dieses Verhalten des Insektenmaterials wirkt sich negativ auf den Trennprozess und damit auf die Trennschärfe aus. Verglichen mit allen anderen Versuchen wurde bei dieser Verfahrensweise der höchste Restfettgehalt im Proteinfeststoff festgestellt.

Die Ergebnisse dieses Projektes liefern wichtige grundlegende Erkenntnisse für zukünftige Versuche mit dem Separator und tragen zur Ermittlung von Scale-Up-Kriterien bei.

### 5.2.3 Fettsäurezusammensetzung

Aus Mehlwurmlarven mittels Methanol/Chloroform-Extraktion gewonnene Fettfraktionen wurden einer Trimethylsulfoniumhydroxid-Derivatisierung unterzogen und mittels GC-FID (Shimadzu 2025; DB-23 Säule) hinsichtlich ihrer Fettsäurezusammensetzung analysiert. In **Tabelle 11** ist die Fettsäurezusammensetzung der Mehlkäferlarven in Abhängigkeit von dem Trocknungsverfahren aufgeführt. Dargestellt sind Mittelwerte und SEM aus drei unabhängigen Bestimmungen.

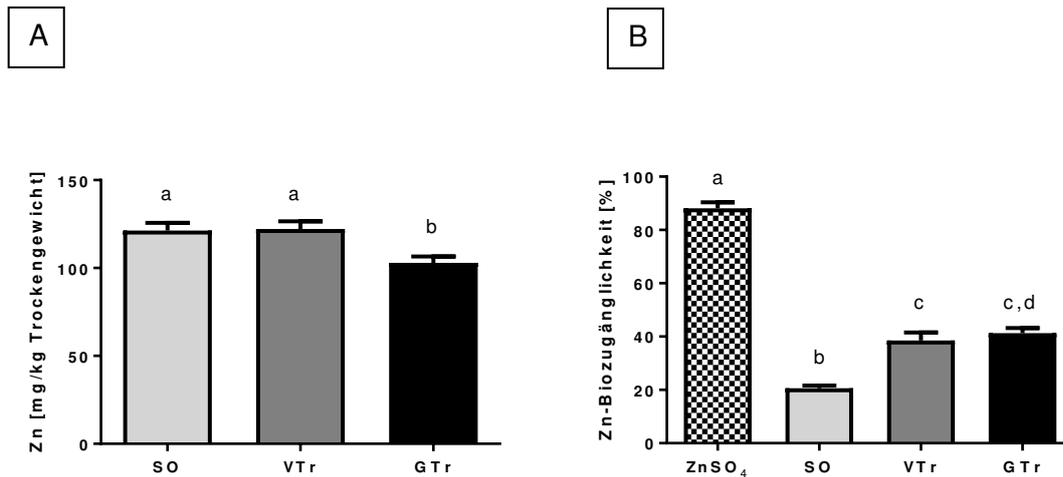
In den hier untersuchten Mehlwurmproben wurden im Gegensatz zu anderen Studien [Dreassi et al. 2017; Lenaerts et al. 2018] lediglich Fettsäuren bis zu einer Kettenlänge von C18 nachgewiesen. Neben trocknungsinduzierten Effekten können das Alter der Larven zum Zeitpunkt der Probenentnahme oder aber Unterschiede im angebotenen Futter mögliche Ursachen hierfür sein.

**Tabelle 11: Fettsäurezusammensetzung von *Tenebrio molitor* in Abhängigkeit von der Trocknungsvariante. Werte mit einem gleichen hochgesetzten Buchstaben sind nicht signifikant unterschiedlich ( $p < 0,05$ ; ANOVA/ Bonferroni post hoc Test)**

Fettsäure	Gesamtfettsäuren [%]		
	Stikkenofen	Vakuumtrocknung	Gefriertrocknung
Myristinsäure (C14:0)	2,61 ± 0,048 <sup>a</sup>	2,87 ± 0,051 <sup>a</sup>	2,20 ± 0,077 <sup>b,c</sup>
Palmitinsäure (C16:0)	18,08 ± 0,299 <sup>a</sup>	21,89 ± 0,758 <sup>b</sup>	17,41 ± 0,387 <sup>a,c</sup>
Palmitoleinsäure (C16:1)	1,95 ± 0,012 <sup>a</sup>	1,57 ± 0,037 <sup>b</sup>	1,42 ± 0,015 <sup>c</sup>
Stearinsäure (C18:0)	2,70 ± 0,095 <sup>a</sup>	4,27 ± 0,258 <sup>b</sup>	3,52 ± 0,046 <sup>b</sup>
Ölsäure (C18:1)	36,56 ± 0,351 <sup>a</sup>	32,93 ± 1,109 <sup>a</sup>	36,07 ± 0,735 <sup>a</sup>
Linolsäure (C18:2)	36,44 ± 0,633 <sup>a</sup>	34,99 ± 0,250 <sup>a</sup>	37,66 ± 1,121 <sup>a</sup>
Linolensäure (C18:3)	1,64 ± 0,062 <sup>a</sup>	1,48 ± 0,025 <sup>a</sup>	1,66 ± 0,100 <sup>a</sup>

### 5.2.3 Zinkgehalt und Biozugänglichkeit

Definierte Mengen an Mehlwurmlarven wurden vor bzw. nach Inkubation mit Gastrointestinalsekreten [Böhmer et al. 2017] mittels FAAS auf ihren Zinkgehalt untersucht und (A) die Gesamtzinkgehalte sowie (B) die Biozugänglichkeit berechnet (siehe **Abbildung 32**). Dargestellt sind Mittelwerte und SEM aus drei unabhängigen Bestimmungen.

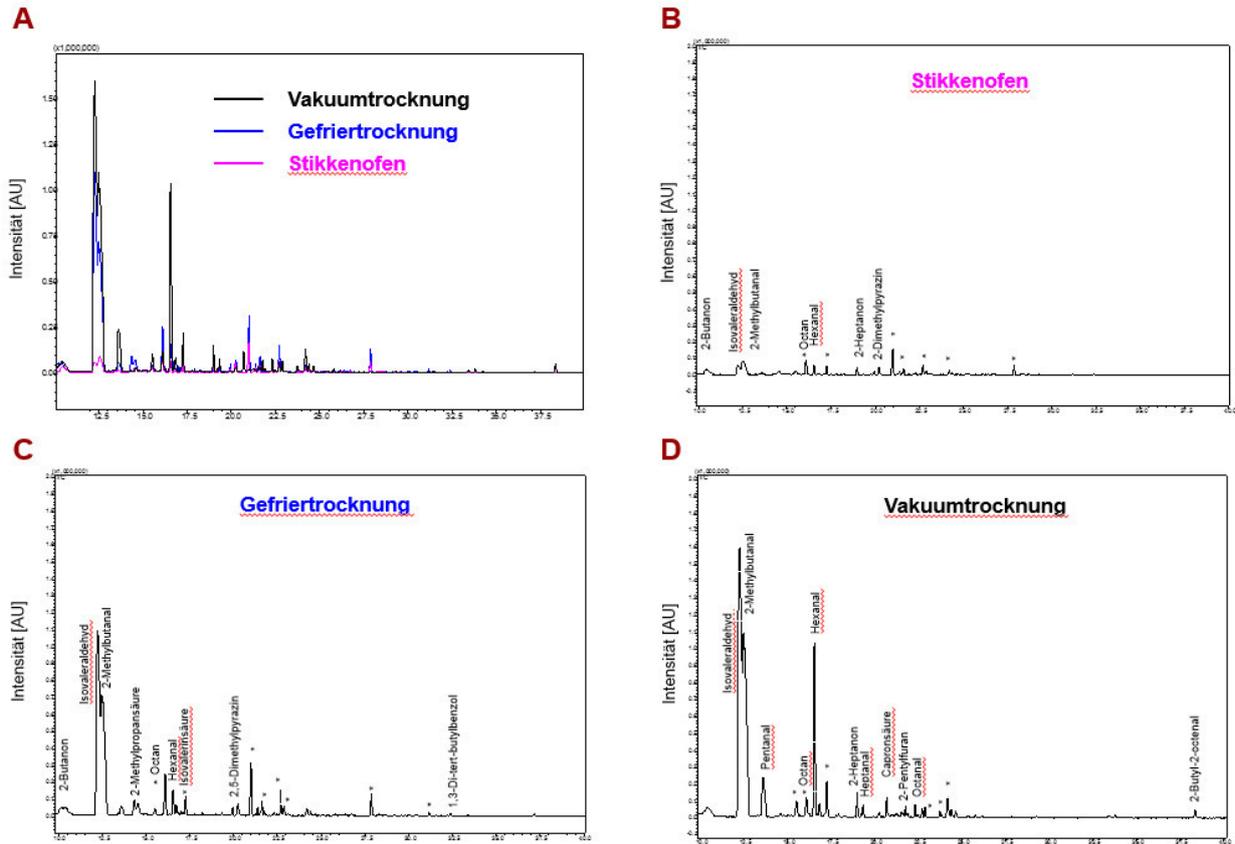


**Abbildung 32: Gesamt-Zinkgehalte und dessen enzymatische Freisetzbarkeit aus *Tenebrio molitor* Larven. Werte mit einem gleichen hochgesetzten Buchstaben sind nicht signifikant unterschiedlich ( $p < 0,05$ ; ANOVA/ Bonferroni post hoc Test)**

Die für *Tenebrio molitor* publizierten absoluten Zinkgehalte sind extrem weit gefächert [Mwangi et al. 2018]. Theoretisch würde mit einem Verzehr von ca. 100 g der hier untersuchten Mehlwurmlarven (siehe Abbildung 32 A) die empfohlene tägliche Zufuhrmenge für Zink von 7-10 mg abgedeckt werden [Maret und Sandstead 2006]. Jedoch zeigte sich, dass nach *in vitro* Gastrointestinal-Verdau abhängig von der Trocknungsvariante nur ca. 20-40 % der Zinkspecies in eine potenziell resorbierbare Form überführbar sind (siehe Abbildung 32 B).

### 5.2.4 Volatile Komponenten

Je 1 g Larven wurden in ein 20 ml Headspace-Vial eingewogen und die durch Erhitzung in die Gasphase überführten Moleküle mittels GC-MS (Shimadzu GC-17A, Detektor GCMS-QP5000) analysiert. **Abbildung 33** stellt die GC-Chromatogramme repräsentativ für die Ergebnisse von drei unabhängigen Experimenten übersichtsweise (A) sowie im Detail (B-D) für die einzelnen Trocknungsproben dar. Auffällig ist das vergleichsweise häufige Vorkommen von Alkanen ( $< 0,002$  % w/w markiert als \*), deren Ursprung möglicherweise in einer Übertragung aus dem Futter kommen könnte.



**Abbildung 33: Headspace-GC-MS-Analysen von unterschiedlich getrockneten *Tenebrio molitor* Larven**

*Tenebrio molitor* Larven sind aufgrund ihres hohen Gehaltes an Mikro- und Makronährstoffen als Lebens- und Futtermittel von Relevanz. Bezüglich der hier betrachteten drei Trocknungsvarianten

- wurden keine großen Effekte auf die Fettsäurezusammensetzung beobachtet,
- erwies sich insbesondere die Trocknung im Stikkenofen als am stärksten inhibitorisch auf die enzymatische Freisetzbarkeit des essentiellen Spurenelementes Zink.

Die Ergebnisse tragen dazu bei, prozessoptimierte Trocknungsstrategien zu entwickeln, um *Tenebrio molitor* zukünftig sowohl unter nährstoffqualitativen als auch quantitativen Aspekten bestmöglich verarbeiten zu können. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die geeignetste Trocknungsart in Bezug auf den Gehalt von 4-HNE sowie der Biozugänglichkeit von Zink die Trocknung mittels Vakuumofen ist. Die Gefriertrocknung zeigt einen mit der Vakuumofentrocknung vergleichbaren Erhalt der Biozugänglichkeit von Zink, weist allerdings eine stark erhöhte Lipidperoxidation auf. Ungeeignet scheint die Trocknung im Stikkenofen insbesondere im Hinblick auf die hierdurch stark verminderte Biozugänglichkeit von Zink.

### 5.3 AS 3: Herstellung von Mischfutter mit insektenbasierten Rohstoffen und Bewertung (IFF)

Die drei wichtigsten Verfahrensschritte zur Herstellung von Mischfutter sind die Rohwarenerkleinerung, das Mischen der Einzelkomponenten und das Veredeln des Mischfutters z. B. in Form des Pelletierprozesses.

#### 5.3.1 Rohwarenerkleinerung

Die Zerkleinerung der Rohwaren spielt aus ernährungsphysiologischen und verfahrenstechnischen Gründen eine maßgebliche Rolle, weil aus dem Vermahlungsgrad und der daraus resultierenden Partikelgrößenverteilung der Futterkomponenten Effekte mit unterschiedlichen Wirkungen auf das Tier erwachsen [Fastinger et al. 2003; Hancock 1999].

Neben der unmittelbaren Beeinflussung der Nährstoffverdaulichkeit und der Tiergesundheit werden mit der Rohwarenerkleinerung eine Reihe wesentlicher technologischer Effekte erzielt. Damit z. B. Schweine, deren tägliche Futteraufnahme bei Ferkeln bis deutlich unter 1 kg reicht, Rationen mit gleichmäßigen Nähr- sowie Wirkstoffkonzentrationen erhalten, müssen aus bis zu 30 Komponenten homogene und möglichst stabile Mischungen hergestellt werden. Während Zusatzstoffe, um ihre hinreichende Verteilbarkeit in der Futtermatrix zu gewährleisten, fast ausschließlich aus Teilchen mit Partikelgrößen unter 0,5 mm bestehen, ist der weit überwiegende Anteil der Rohwaren agrarischen Ursprungs durch wesentlich gröbere Partikel mit Partikelgrößen von mehreren Millimetern (Getreidekörner: ca. 2 mm Durchmesser, ca. 5 mm Länge; Mais: ca. 5 mm Durchmesser) gekennzeichnet. Für die Erzeugung stabiler Futtermischungen ist es daher unerlässlich, die Rohwaren zu zerkleinern [Heidenreich et al. 1999 und 2003], wodurch zugleich ihre Fähigkeit zur Aufnahme und gleichmäßigen Verteilung zugesetzter flüssiger Makro- (Öl, Melasse) und Mikrokomponenten (z. B. Aminosäuren, Enzyme) maßgeblich gesteigert wird. Daneben werden durch eine angemessene Zerkleinerung Störungen der Fütterungstechnik verhindert.

Der aus der Trockenaufbereitung der Insekten resultierende Presskuchen hat eine sehr breite Partikelgrößenverteilung von einigen Millimetern bis zu mehreren Zentimetern (**Abbildung 34, Tabelle 12**).



Abbildung 34: Presskuchen nach dem Austritt aus der Seiherschneckenpresse

Tabelle 12: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach Austritt aus der Seiherschneckenpresse

Siebma- schen- weite w	Masse auf Sieb g	Masse auf Sieb %	Durch- gang g	Durch- gang %	Vertei- lungs- summe Q <sub>3</sub>	w (quer) µm	Vertei- lungs- dichte q <sub>3</sub> 1/mm
0	0,20	0,27	0,00	0,00	0,000	32	0,043
63	3,20	4,31	0,20	0,27	0,003	94	0,695
125	5,40	7,27	3,40	4,58	0,046	188	0,581
250	5,20	7,00	8,80	11,84	0,118	303	0,667
355	4,80	6,46	14,00	18,84	0,188	428	0,446
500	6,70	9,02	18,80	25,30	0,253	605	0,429
710	6,00	8,08	25,50	34,32	0,343	855	0,278
1000	8,60	11,57	31,50	42,40	0,424	1200	0,289
1400	11,00	14,80	40,10	53,97	0,540	1700	0,247
2000	7,30	9,83	51,10	68,78	0,688	2250	0,197
2500	3,20	4,31	58,40	78,60	0,786	2650	0,144
2800	3,70	4,98	61,60	82,91	0,829	2975	0,142
3150	5,40	7,27	65,30	87,89	0,879	3575	0,086
4000	3,00	4,04	70,70	95,15	0,952	4800	0,025
5600	0,20	0,27	73,70	99,19	0,992	5950	0,004
6300	0,40	0,54	73,90	99,46	0,995	7150	0,003
8000	0,00	0,00	74,30	100,00	1,000	9000	0,000

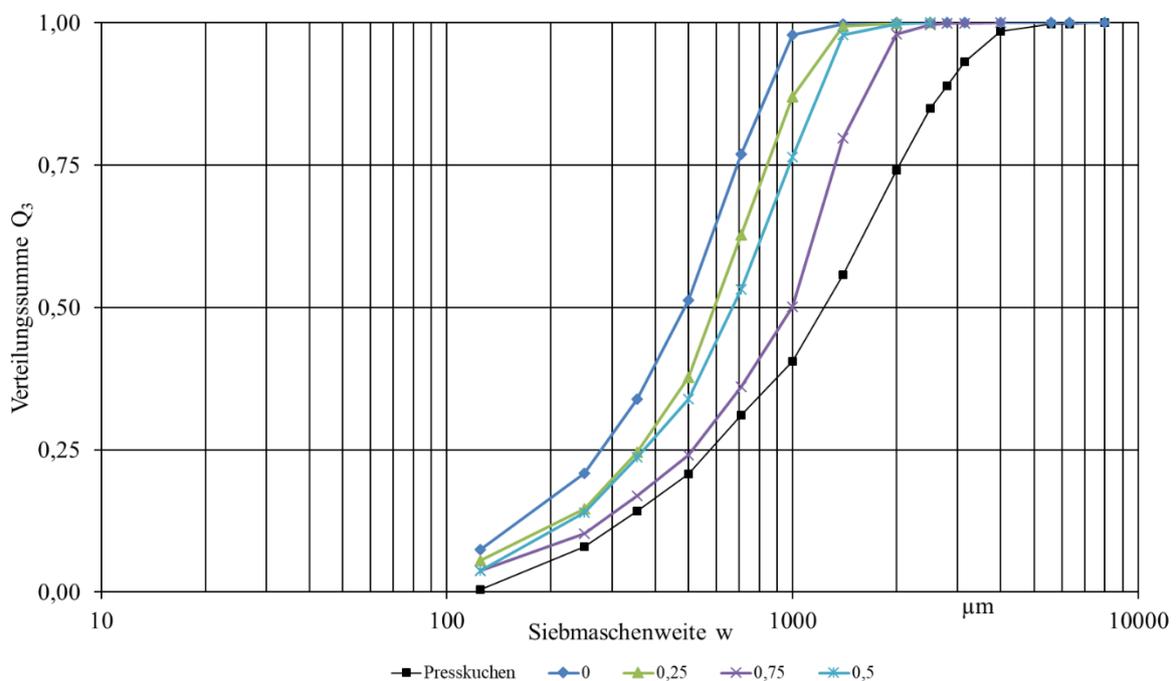
Grundsätzlich stehen für die Zerkleinerung der Rohwaren verschiedene Geräte zur Verfügung. Üblicherweise werden Hammermühlen eingesetzt, welche Futterstrukturen erzeugen, die durch einen erheblichen Feingutanteil gekennzeichnet sind.

Ein weiteres Gerät mit anderer Wirkungsweise auf die Partikel ist der Walzenstuhl. Das Zerkleinerungsprinzip des ein- oder mehrpaarig gestalteten Walzenstuhls beruht auf Druck- und Scherbeanspruchungen, denen die zugeführten Partikel in Mahlspalten zwischen jeweils zwei geriffelten, mit unterschiedlicher Geschwindigkeit rotierenden Walzen ausgesetzt werden [Ulmer 2009; Klabunde et al. 2003].

Die Vermahlungsintensität und damit die Feinheit des resultierenden Zerkleinerungsproduktes lassen sich durch Einstellung des Walzenabstands bzw. der Mahlspaltweite sowie des den Schereffekt beeinflussenden Drehzahlverhältnisses (üblicherweise im Bereich von 1:1,2 bis 1:2) regulieren.

Dabei werden die Körner ganz überwiegend zu kleinen Partikeln, aber in einem weit geringeren Maß als bei der Hammermühle zu feinsten bzw. staubförmigen Teilchen zerkleinert.

Des Weiteren ist der Energieeintrag signifikant geringer als bei der Vermahlung mit der Hammermühle. In **Abbildung 35 (Tabellen 12-16)** ist die Zerkleinerung des Presskuchens bei unterschiedlichen Walzenspaltweiten dargestellt.



**Abbildung 35: Darstellung der Partikelgrößenverteilung nach der Zerkleinerung des Presskuchens mittels Walzenstuhl bei unterschiedlichen Spaltweiten (0 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 0,75 mm)**

**Tabelle 13: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach der Zerkleinerung mittels Walzenstuhl Walzenspalt 0,0 mm**

Siebma- schen- weite	Masse auf Sieb	Masse auf Sieb	Durch- gang	Durch- gang	Vertei- lungs- summe		Vertei- lungs- dichte
w					Q <sub>3</sub>	w (quer)	q <sub>3</sub>
µm	g	%	g	%		µm	1/mm
0	4,90	7,47	0,00	0,00	0,000	63	0,598
125	8,80	13,41	4,90	7,47	0,075	188	1,073
250	8,50	12,96	13,70	20,88	0,209	303	1,234
355	11,40	17,38	22,20	33,84	0,338	428	1,198
500	16,90	25,76	33,60	51,22	0,512	605	1,227
710	13,70	20,88	50,50	76,98	0,770	855	0,720
1000	1,30	1,98	64,20	97,87	0,979	1200	0,050
1400	0,10	0,15	65,50	99,85	0,998	1700	0,003
2000	0,00	0,00	65,60	100,00	1,000	2250	0,000

**Tabelle 14: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach der Zerkleinerung mittels Walzenstuhl Walzenspalt 0,25 mm**

Siebma- schen- weite	Masse auf Sieb	Masse auf Sieb	Durch- gang	Durch- gang	Vertei- lungs- summe		Vertei- lungs- dichte
w					Q <sub>3</sub>	w (quer)	q <sub>3</sub>
µm	g	%	g	%		µm	1/mm
0	4,30	5,56	0,00	0,00	0,000	63	0,444
125	7,00	9,04	4,30	5,56	0,056	188	0,724
250	7,70	9,95	11,30	14,60	0,146	303	0,947
355	10,20	13,18	19,00	24,55	0,245	428	0,909
500	19,40	25,06	29,20	37,73	0,377	605	1,194
710	18,80	24,29	48,60	62,79	0,628	855	0,838
1000	9,50	12,27	67,40	87,08	0,871	1200	0,307
1400	0,40	0,52	76,90	99,35	0,994	1700	0,009
2000	0,10	0,13	77,30	99,87	0,999	2250	0,003
2500	0,00	0,00	77,40	100,00	1,000	2650	0,000

**Tabelle 15: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach der Zerkleinerung mittels Walzenstuhl Walzenspalt 0,5 mm**

Siebma- schen- weite	Masse auf Sieb	Masse auf Sieb	Durch- gang	Durch- gang	Vertei- lungs- summe		Vertei- lungs- dichte
w					Q <sub>3</sub>	w (quer)	q <sub>3</sub>
µm	g	%	g	%		µm	1/mm
0	2,80	3,76	0,00	0,00	0,000	63	0,301
125	7,60	10,22	2,80	3,76	0,038	188	0,817
250	7,20	9,68	10,40	13,98	0,140	303	0,922
355	7,60	10,22	17,60	23,66	0,237	428	0,704
500	14,40	19,35	25,20	33,87	0,339	605	0,922
710	17,30	23,25	39,60	53,23	0,532	855	0,802
1000	15,90	21,37	56,90	76,48	0,765	1200	0,534
1400	1,40	1,88	72,80	97,85	0,978	1700	0,031
2000	0,20	0,27	74,20	99,73	0,997	2250	0,005
2500	0,00	0,00	74,40	100,00	1,000	2650	0,000

**Tabelle 16: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach der Zerkleinerung mittels Walzenstuhl Walzenspalt 0,75 mm**

Siebma- schen- weite	Masse auf Sieb	Masse auf Sieb	Durch- gang	Durch- gang	Vertei- lungs- summe		Vertei- lungs- dichte
w					Q <sub>3</sub>	w (quer)	q <sub>3</sub>
µm	g	%	g	%		µm	1/mm
0	2,70	3,61	0,00	0,00	0,000	63	0,289
125	7,10	9,49	2,70	3,61	0,036	188	0,759
250	5,90	7,89	9,80	13,10	0,131	303	0,751
355	7,00	9,36	15,70	20,99	0,210	428	0,645
500	9,40	12,57	22,70	30,35	0,303	605	0,598
710	14,50	19,39	32,10	42,91	0,429	855	0,668
1000	21,60	28,88	46,60	62,30	0,623	1200	0,722
1400	6,30	8,42	68,20	91,18	0,912	1700	0,140
2000	0,20	0,27	74,50	99,60	0,996	2250	0,005
2500	0,10	0,13	74,70	99,87	0,999	2650	0,004
2800	0,00	0,00	74,80	100,00	1,000	2975	0,000

Für die Zerkleinerung des Presskuchens wurde ein Walzenstuhl der Firma Miag verwendet. Mit abnehmendem Walzenspalt geht die Partikelgrößenverteilung Q<sub>3</sub> in den feineren Bereich über. Gekennzeichnet ist dieses Verhalten durch den abnehmenden Äquivalenzdurchmesser d<sub>50</sub>, welcher bei dem unzerkleinerten Presskuchen bei 1400 µm liegt und bei einem Walzen-

spalt von 0,75 mm bei 1000 µm, d. h. 50 % der Partikel sind kleiner 1000 µm. Durch die weitere Verringerung des Walzenspaltes auf 0,5 und 0,25 mm wird der Äquivalenzdurchmesser auf einen Wert von 710 µm reduziert und liegt bei der Nullspalteinstellung (Minimalabstand der Walzen) bei 500 µm. Die größere Partikelgröße bezogen auf den verwendeten Mahlspace wird durch die Riffelung der Walzenoberfläche sowie durch unterschiedliche Partikelformen verursacht.

Einerseits ist eine Zerkleinerung des Proteinträgers grundsätzlich notwendig, um die mit der möglichst vollständigen Nutzung der Nährstoffe im Stoffwechsel unerlässliche hohe Verdaulichkeit zu gewährleisten [Fastinger et al. 2003; Hancock 1999]. Andererseits steigt mit zunehmendem Anteil sehr kleiner Futterpartikel (< 500 µm) die Wahrscheinlichkeit einer negativen Beeinflussung der Tiergesundheit. In zahlreichen Publikationen ist ein kausaler Zusammenhang zwischen einer feinen Vermahlung des Mischfutters und der Entstehung von Magengeschwüren aufgezeigt worden, während eine gröbere Vermahlung der gleichen Komponenten nicht oder in deutlich geringerem Maße zu einem entsprechenden Krankheitsbild führt [Cole et al. 2002; Grosse Liesner et al. 2009; Wintermann 2011]. Auch zeigt sich beim Einsatz eines weniger fein vermahlenden Mischfutters ein Rückgang der Besiedlung des Darmtraktes mit Salmonellen [Papenbrock et al. 2005; Visscher et al. 2009; Mikkelsen et al. 2004], da das beim mikrobiellen Abbau von Stärke anfallende Stoffwechselprodukt Butyrat deren Invasionsgene herabregelt [Gantois et al. 2006].

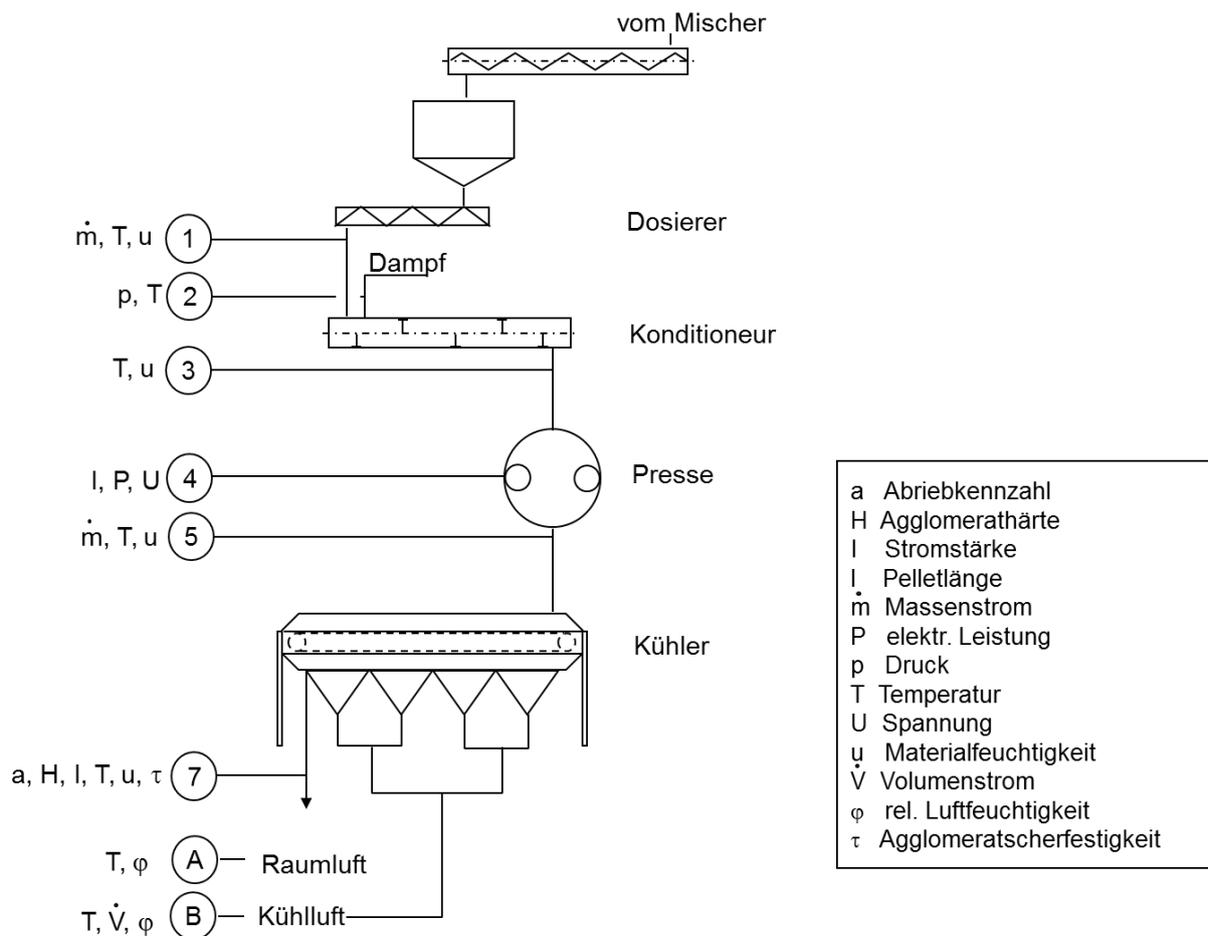
Für die Aufbereitung des insektenbasierten Proteinträgers wurde für die Einarbeitung in die verschiedenen Mischfütter eine Walzenspalteinstellung von 0,5 mm gewählt. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass der Anteil der Partikel kleiner 500 µm geringer als 30 % ist und damit in Einklang mit den Empfehlungen bezüglich der Tiergesundheit steht [Kampues 2004].

Die Ergebnisse dieses Projektes liefern wichtige grundlegende Erkenntnisse über das Zerkleinerungsverhalten eines insektenbasierten Proteinträgers mittels Walzenstuhl.

### **5.3.2 Pelletieren von Mischfutter**

Um den Mischungszustand des Proteinträgers mit den anderen Komponenten einer Rezeptur zu fixieren und eine selektive Aufnahme von Futterkomponenten zu verhindern, wird der bei weitem überwiegende Teil der Mischfütter (ca. 80 %) abschließend zu mischungsstabilen Pellets verarbeitet, die im Magen-Darm-Trakt der Nutztiere in ihre Bestandteile, die Primärpartikel, zerfallen.

Das Pelletieren umfasst die drei Verfahrensstufen Konditionieren, Verdichten und Kühlen. Die verwendete Versuchsanlage ist in **Abbildung 36** dargestellt.



**Abbildung 36: Schematische Darstellung des konventionellen Pelletierens mit Kurzzeitkonditionierung einschließlich relevanter Mess- und Probenahmestellen der Versuchsanlage im Technikum des IFF-Forschungsinstituts Futtermitteltechnik**

Die in Abbildung 36 verwendete Kurzzeitkonditionierung dient der Vorbereitung und Anpassung von mehlförmigem Mischfutter an die anschließende Verdichtungsstufe des Pelletierprozesses. Mit den Prozessparametern Temperatur, Zeit und Feuchtigkeit wird das Aufgabematerial für das Pressen vorbereitet. Den Futtermischungen wird Dampf zugesetzt, dieser kondensiert und bildet an den Partikeloberflächen einen Flüssigkeitsfilm aus, der die Gleiteigenschaften im Presskanal der Matrizen verbessert und darüber hinaus zur Ausbildung von Flüssigkeitsbrücken führt, die die Festigkeit der Pressagglomerate positiv beeinflusst. Zusätzlich wird die aufzuwendende spezifische Pressenergie durch die infolge des Oberflächenfeuchtigkeitsfilms verbesserten Gleiteigenschaften des Pfropfens im Presskanal reduziert.

Die den Pellets im Prozess zugeführte Wärmeenergie und die zusätzlich eingebrachte Feuchtigkeit müssen im nachfolgenden Kühlprozess dem Produkt entzogen werden. Ziel des Kühlprozesses ist die Gewährleistung der Lagerfähigkeit des Mischfutters durch Reduzierung der Produktfeuchtigkeit auf Werte unter 14 % sowie die Aushärtung der Pellets.

Unter Berücksichtigung der drei Zieltierarten, für welche innerhalb des Projektes Mischfutter hergestellt wurden, werden die Ergebnisse der Pelletierung von Schweinefutter dargestellt.

Ausgehend von der in **Tabelle 17** aufgelisteten Rezeptur wurde anteilig das Sojaextraktionsschrot zu 25 %, zu 50 % und zu 75 % durch zerkleinerten Presskuchen der Mehlkäferlarve ersetzt (**Tabellen 18-20**). Des Weiteren wurde innerhalb der Versuchseinstellungen die Menge an zuzusetzendem Dampf variiert, die energetischen Parameter aufgezeichnet sowie die resultierende Pelletqualität bewertet.

**Tabelle 17: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters (konventionell)**

<b>Futterkomponenten</b>	<b>%</b>	<b>kg pro Mischung</b>	<b>Einwaage für 175</b>
Sojaextraktionsschrot	28,680	100,380	50,19
Weizen	31,354	109,739	54,8695
Gerste	31,352	109,732	54,866
Sojaöl	4,750	16,625	8,3125
Ferkel Vormischung	1,500	5,250	2,625
Calciumcarbonat	1,200	4,200	2,1
Natriumchlorid	0,300	1,050	0,525
L-Lysin-HCl	0,409	1,432	0,71575
DL-Methionin	0,055	0,193	0,09625
L-Threonin	0,100	0,350	0,175
Titandioxid	0,300	1,050	0,525
<b>Summe:</b>	<b>100,00</b>	<b>350,00</b>	<b>175</b>

**Tabelle 18: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters mit 25% Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot)**

<b>Futterkomponenten</b>	<b>%</b>	<b>kg pro Mischung</b>	<b>Einwaage für 175</b>
Mehlwurmpresskuchen	4,151	14,529	7,26425
Sojaextraktionsschrot	20,600	72,100	36,05
Weizen	33,832	118,412	59,206
Gerste	33,833	118,416	59,20775
Sojaöl	3,680	12,880	6,44
Ferkel Vormischung	1,500	5,250	2,625
Calciumcarbonat	1,200	4,200	2,1
Natriumchlorid	0,300	1,050	0,525
L-Lysin-HCl	0,443	1,551	0,77525
DL-Methionin	0,064	0,224	0,112
L-Threonin	0,097	0,340	0,16975
Titandioxid	0,300	1,050	0,525
<b>Summe:</b>	<b>100,00</b>	<b>350,00</b>	<b>175</b>

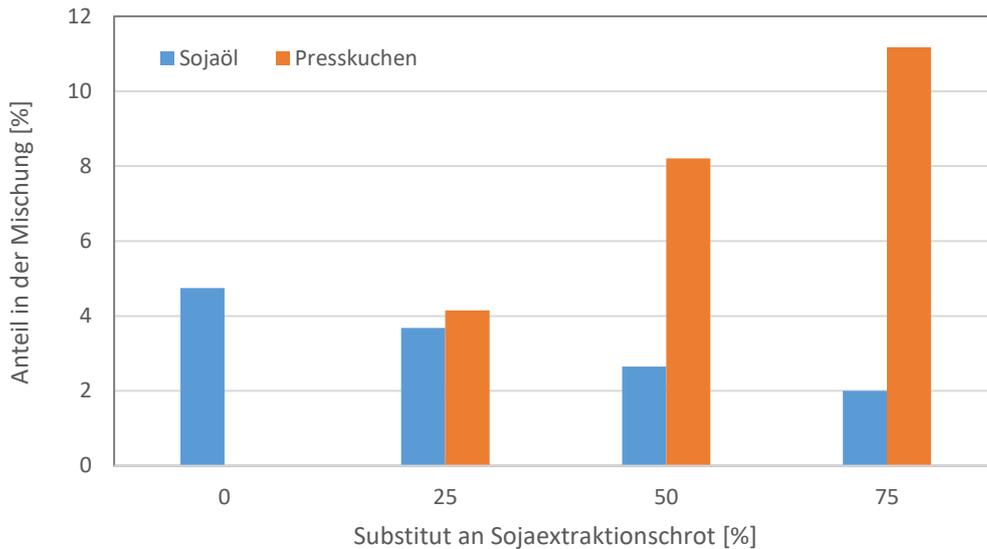
**Tabelle 19: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters mit 50 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot**

<b>Futterkomponenten</b>	<b>%</b>	<b>kg pro Mischung</b>	<b>Einwaage für 175</b>
Mehlwurmpresskuchen	8,21	28,735	14,3675
Sojaextraktionsschrot	12,700	44,450	22,225
Weizen	36,245	126,858	63,42875
Gerste	36,245	126,858	63,42875
Sojaöl	2,655	9,293	4,64625
Ferkel Vormischung	1,500	5,250	2,625
Calciumcarbonat	1,200	4,200	2,1
Natriumchlorid	0,300	1,050	0,525
L-Lysin-HCl	0,477	1,670	0,83475
DL-Methionin	0,073	0,256	0,12775
L-Threonin	0,095	0,333	0,16625
Titandioxid	0,300	1,050	0,525
<b>Summe:</b>	<b>100,00</b>	<b>350,00</b>	<b>175</b>

**Tabelle 20: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters mit 75 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot**

<b>Futterkomponenten</b>	<b>%</b>	<b>kg pro Mischung</b>	<b>Einwaage für 175</b>
Mehlwurmpresskuchen	11,173	39,106	19,55275
Sojaextraktionsschrot	7,000	24,500	12,25
Weizen	37,877	132,570	66,28475
Gerste	37,877	132,570	66,28475
Sojaöl	2,000	7,000	3,5
Ferkel Vormischung	1,500	5,250	2,625
Calciumcarbonat	1,300	4,550	2,275
Natriumchlorid	0,300	1,050	0,525
L-Lysin-HCl	0,500	1,750	0,875
DL-Methionin	0,080	0,280	0,14
L-Threonin	0,093	0,326	0,16275
Titandioxid	0,300	1,050	0,525
<b>Summe:</b>	<b>100,00</b>	<b>350,00</b>	<b>175</b>

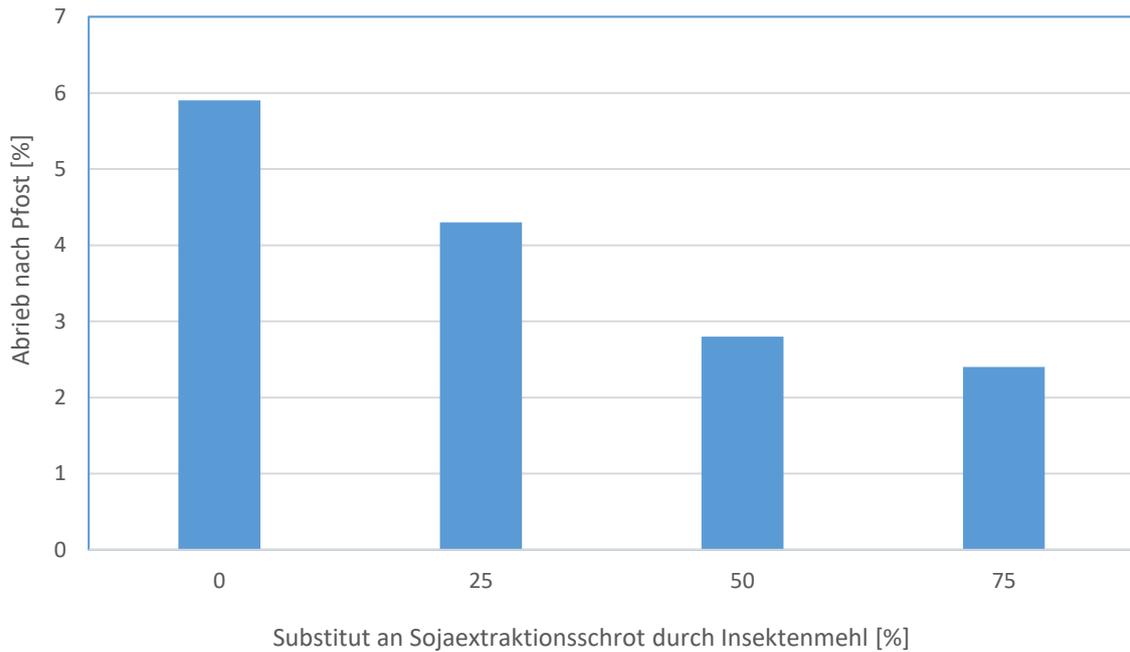
Alle Rezepturen haben den gleichen Energiegehalt. Den Tabellen 18-20 ist zu entnehmen, dass durch das Substituieren des Sojaextraktionsschrotes mit Presskuchen die Menge an zuzusetzendem Sojaöl sinkt (**Abbildung 37**). Ursache dafür ist der Restfettgehalt des Presskuchens von 6,5 %. In der Abbildung 37 ist die Abnahme des zuzusetzenden Sojaöls in den verschiedenen Rezepturen dargestellt.



**Abbildung 37: Prozentuale Anteile von Sojaöl und Insektenpresskuchen an der Gesamtmischung des Ferkelfutters**

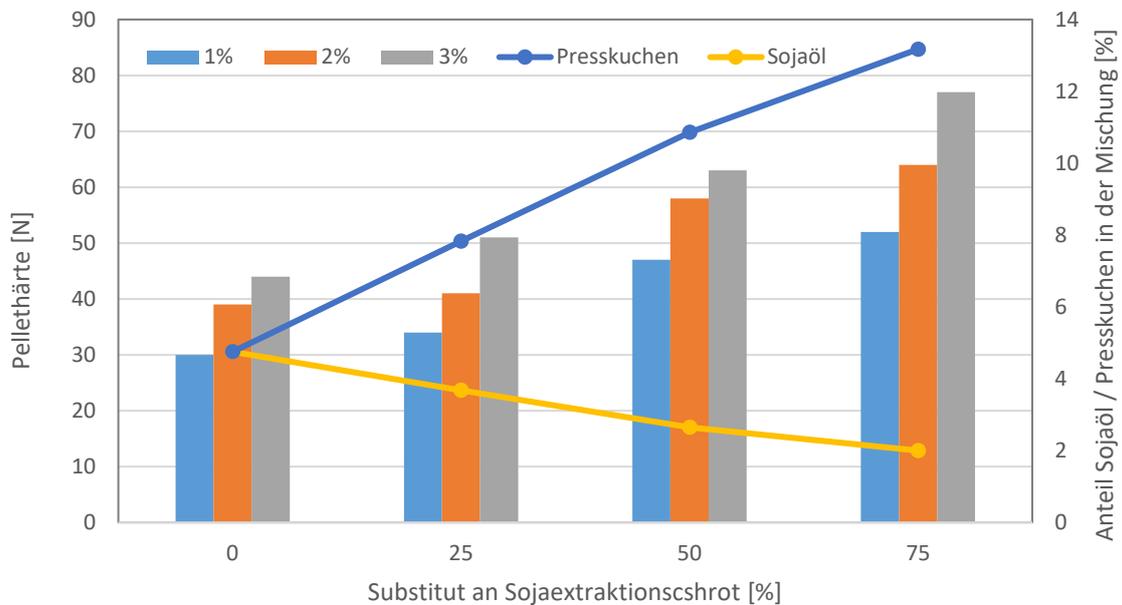
Ausgehend von einem Sojaölzusatz von 4,75 % konnte dieser, bei gleichbleibendem Energiegehalt, durch das Substituieren des Sojaextraktionsschrotes von 75 % durch den Presskuchen, auf 2 % reduziert werden.

Besonders die Zugabe von Fett beeinflusst die Verarbeitungseigenschaften von Mischfuttermitteln beim Pelletierprozess. Hohe Fettgehalte senken den spezifischen Energieverbrauch beim Pelletieren [Friedrich 1981]. Des Weiteren wirken sich hohe Fettgehalte negativ auf die Pelletqualität in Form einer ungenügenden mechanischen Festigkeit aus [Friedrich 1981]. In den **Abbildungen 39** sind zum einen der Energieverbrauch der Pelletierversuche und zum anderen die Pelletqualität in Form der Abriebkennzahl nach Pfof dargestellt.



**Abbildung 38: Darstellung der Pelletqualität in Form der Abriebkennzahl nach Pfof mit unterschiedlichen Gehalten an Insektenmehl**

Als weiterer Parameter bezüglich des Pelletierprozesses wurde die Dampfmenge in verschiedenen Einstellungen variiert. Es wurden Dampfmenngen von 1 %, 2 % sowie 3 % in verschiedenen Pelletierversuchen zugesetzt.



**Abbildung 39: Darstellung der Pelletqualität in Form der Pellethärte mit unterschiedlichen Gehalten an Insektenmehl und variierenden Dampfzusetzen (1 %, 2 %, 3 %)**

Den Futtermischungen wird Satttdampf zugesetzt, dieser kondensiert und bildet an den Partikeloberflächen einen Flüssigkeitsfilm aus, der die Gleiteigenschaften im Presskanal der Matrizen verbessert. Darüber hinaus werden Flüssigkeitsbrücken zwischen Temperatur und Feuchtigkeit bewirkt, ferner werden Hygienisierungseffekte und partielle Futterpartikel ausgebildet, die bei aufeinander gepressten genetzten Teilchen die Haftkräfte vergrößern und die Festigkeit der Pressagglomerate positiv beeinflussen. Die Erhöhung von Stärkeaufschluss führt zur Verbesserung der Nährstoffverfügbarkeit.

Ausgehend von der Abbildung 39 ist zu beobachten, dass das Zusetzen von Dampf in allen Versuchen zu stabileren Pellets gekennzeichnet durch eine zunehmende Härte führte. Weiterhin ist bei gleichbleibendem Energiegehalt der Rezeptur, jedoch unterschiedlicher Zusammensetzung der Mischfutter bezogen auf das Zusammenspiel von Presskuchen, Sojaöl und Sojaextraktionsschrot, eine Zunahme der Pellethärte festzustellen. Da die höhere Dosierung von Sojaöl in der Rezeptur ohne Presskuchen schlechtere Benetzungseigenschaften bezüglich des Dampfes zwischen den Partikeln bewirkt, wirkt sich der Restfettgehalt im Presskuchen vorteilhaft auf die Festigkeit der Pellets aus. Auch wenn Pelletfestigkeit und Pelletqualität in Form des Abriebs nicht immer korrelieren, ist bezüglich der Pelletqualität eine Reduzierung des Abriebs mit steigendem Dampfanteil zu verzeichnen (**Abbildung 39**).

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die stetig wachsende Weltbevölkerung und die damit verbundene Notwendigkeit der Bedarfsdeckung der Menschen mit Protein erfordert ein Nachdenken über alternative Proteinträger. Bereits 1972 hat der *Club of Rome* in seinem Bericht „Die Grenzen des Wachstums“ geäußert, dass bei unveränderter Zunahme der Weltbevölkerung und damit verbunden der Industrialisierung und der Nahrungsmittelproduktion die absoluten Wachstumsgrenzen der Erde „im Laufe der nächsten hundert Jahre“ erreicht würden. „Nachhaltigkeit“ ist das Stichwort, das für immer mehr Lebensbereiche zur ökologischen Bewertung herangezogen wird.

In diesem Zusammenhang sind Insekten als ein möglicher alternativer Proteinträger in den Bereich der Forschung gerückt.

Insekten bieten neben einer platzsparenden Haltung weitere Vorteile wie:

- sie liefern sehr hochwertige Proteine, die alle 21 proteinogenen Aminosäuren enthalten,
- sie sind exzellente Futtermittelverwerter mit Protein-Konversionsraten um 1,5:1 und
- haben eine kurze Generationszeit, mitunter weniger als 4 Wochen,
- sie haben einen geringen Platz- und Wasserbedarf und
- eine geringe Produktion an Treibhausgasemissionen im Vergleich mit anderen Nutztieren [Van Huis 2013].

Ziel der vorliegenden Arbeit war der Aufbau eines innovativen Funktionsmusters zur automatischen Insektenzucht. Dies sollte mit geeigneten Anlagen zur Vorverarbeitung der Insekten zu Einzelfuttermitteln verknüpft werden. Mit der anschließenden Herstellung eines exemplarischen Mischfutters durch Zerkleinern, Mischen, Kurzzeitkonditionierung und Pelletierung (inkl. Kühlung) sollte die verfahrenstechnische Eignung der erzeugten Einzelfuttermittel validiert werden. Die Einsatzigenschaften sollen durch physikalische und chemische Analysen nachgewiesen werden.

Die angestrebten Erkenntnisse sollen auf diese Weise nicht nur die Einsatzmöglichkeiten von Insekten als Proteinträger in der Ernährung von Nutztieren absichern, sondern sollen auch erstmals die Möglichkeit nachweisen, durch die Automatisierung der Zucht den Rohstoff „Insektenproteinmehl“ in ausreichend großen Mengen produzieren zu können.

Um dieses Ziel zu erreichen haben vier Forschungsstellen in enger Kooperation zusammengearbeitet (IFF, HSB, GAU, LSTM) und folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Es wurde ein Konzept zur Automatisierung der Insektenzucht (LSTM) inkl. der Tötung sowie der Beachtung von Hygiene und Reinigung erarbeitet:
  - Dazu wurde ein Anlagenlayout konzipiert und ausgearbeitet. Wesentlich war in diesem Zusammenhang zum einen die hygienegerechte Aufstellung und Anordnung sowie zum anderen die Erstellung eines Komponentenrasters als Basis zur Ausarbeitung eines ganzheitlichen Automatisierungskonzepts der einzelnen Untereinheiten. Dabei wurden Sensoren und Aktoren der Prozessierungseinheiten in eine gemeinsame Automatisierungsumgebung und -struktur eingebettet und konzeptionell aufeinander abgestimmt.

Es wurden vier Aufgabenfelder als essentiell angesehen: Die Klimatisierung, um eine effiziente, optimierte Zucht zu gewährleisten, die Klassierung von Faeces, Futterresten, Mehlkäferlarven und Eier, die Überwachung des Mastverlaufs für die Bestimmung des Erntezeitpunkts und die Zudosierung des Futters.
  - Im folgenden Schritt erfolgte die konstruktive und bauliche Verkettung der einzelnen Einheiten zu einer einzigen Produktionslinie:
    - Dazu gehörten die Substrat- und Insektenzugabe.
    - Weiterhin wurde die Bewertung der Wachstumsphase der Larven in der Transportbox auf dem Fließband umgesetzt.
    - Nach dem Wachstum wurde ein System zur mechanischen Ernte und Abtrennung vom Substrat sowie Vorbereitung zur Weiterverarbeitung der Larven entwickelt.

- Eine analytische und mikrobiologische Analyse und Bewertung erfolgte aufbauend auf im Rahmen von LN 27 gewonnenen und entwickelten Erkenntnissen und Erfahrungen an der HSB.
  - Parallel zum Aufbau und Test der Gesamtanlage an der HSB erfolgte die Entwicklung und Ausarbeitung eines Reinigungskonzepts der Anlage. Das Reinigungskonzept wurde am Beispiel der Reinigung der Insektenboxen umgesetzt und erprobt.
    - Es haben sich GA-Behälter zur Haltung der Larve als am günstigsten erwiesen.
    - Weiterhin wurde ein Reinigungsprogramm unterteilt in drei Schritte entwickelt.
- Es wurden umfassende Kenntnisse zur Fraktionierung (HSB) und Trocknung (IFF) der Larve von *Tenebrio molitor* erarbeitet:
  - In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Batch-Trocknungsverfahren untersucht:
    - Wirbelschichttrocknen
    - Trocknen mit dem Stikkenofen
    - Vakuumtrocknen
    - Gefriertrocknen
    - Mikrowellentrocknung

In den Versuchen zeigten sich große Unterschiede hinsichtlich der volatilen Komponenten, der 4HNE-Gehalte sowie der Zusammensetzung des Proteins.

- Weiterhin wurden in Bezug auf die kontinuierliche Trocknung, angelehnt an das Bandtrocknungsverfahren, Erkenntnisse mit konstantem Luftstrom und konstanter Bandbeladung ermittelt. Es wurde bei hohen Trocknungstemperaturen kürzere Trocknungszeiten und eine Senkung des löslichen Proteins ermittelt.
- Bei den Fraktionierungsverfahren wurden grundlegende Erkenntnisse zur Trocken- und Nassaufbereitung ermittelt:
  - Bei der Trockenaufbereitung des Insektenmaterials mittels Seiherschneckenpresse konnte ein Presskuchen mit einem Restfettgehalt von 6,5 % und einem Rohproteingehalt von 70 % erzeugt und weiterverarbeitet werden.
  - Bei der Nassaufbereitung zeigte sich in Zentrifugationsversuchen mit zerkleinertem, frischem und gefrorenem Larvenmaterial, dass im Feststoff der Restfettgehalt bei 14 % und der Rohproteingehalt von 70 % lag. Des Weiteren wurden 10 % Rohprotein im wässrigen Überstand nachgewiesen.

- Das zerkleinerte, gefrorene Larvenmaterial neigte zur Emulsionsbildung während der Versuche.
- Aufgrund unterschiedlicher Zerkleinerungstechniken (Fleischwolf, Schneidmesser mit definierter Umfangsgeschwindigkeit) und damit verbundenen variierenden Partikelgrößen wurden verschiedene Restfettgehalte im Proteinfeststoff ermittelt.
- Die Validierung des Funktionsmusters erfolgte einerseits durch die Herstellung von Mischfutter unter Verwendung der hergestellten insektenbasierten Rohstoffe (IFF) und der damit nachzuweisenden Sicherstellung der verfahrenstechnischen Eignung, andererseits durch die Untersuchung der chemischen und physikalischen Eigenschaften (IFF).
  - Aufgrund der hohen Bedeutung in der Mischfutterindustrie konzentrierte sich dieser AS auf die Herstellung eines pelletierten Mischfutters durch Kurzzeitkonditionierung, Pressen und Kühlen.
    - Es zeigte sich, dass durch die Substitution des Sojaextraktionsschrots durch den Insektenpresskuchen die zuzusetzenden Mengen an Sojaöl reduziert werden konnten.
    - In diesem Zusammenhang konnte mit steigendem Anteil an Insektenpresskuchen eine Zunahme der Pelletfestigkeit, eine Reduzierung des Abriebs der Pellets und damit verbunden eine steigende Qualität sowie ein erhöhter spezifischer Energieverbrauch beim Pelletieren ermittelt werden.
    - Das Zusetzen des Dampfes (1 %, 2 %, 3 %) bewirkte eine Steigerung der Qualität in Form eines reduzierten Abriebs der Pellets sowie eine Reduzierung des aufzuwendenden spezifischen Energieeinsatzes.
    - Weiterhin konnte durch das Zusetzen des Dampfes eine Hygienisierung der Pellets in Form einer reduzierten Gesamtkeimzahl bewirkt werden.
- Dadurch das, dass das Projekt flankierend zu zwei anderen Projekten LN 28, LN 27 abgearbeitet wurde, konnte auf die Auswertung der Fütterungsversuche, welche in dem Projekt LN 28 ausführlich beschrieben werden, verzichtet werden.

Hinweise in der Literatur [SKLM] weisen gerade bezüglich der Aufarbeitung und der Automatisierung der Einzelprozesse sowie der charakteristischen Eigenschaften der insektenbasierten Endprodukte Forschungsbedarf auf. Aus diesem Projekt ergeben sich diesbezüglich folgende Fragestellungen:

- Welchen Einfluss hat der Zerkleinerungsprozess auf den späteren Trennprozess bei der Nassaufbereitung?

- Welchen Einfluss hat der pH-Wert der zerkleinerten Insektenmischung auf die Trenngrenze des Separationsprozesses?
- Kann durch biologische Proteinfällungsmittel die Trenngrenze des Separationsprozesses verschoben werden?
- Wie wirkt sich die Verweilzeit und -temperatur des zerkleinerten Insektenmaterials auf den Separationsprozess aus?
- Welches Trocknungsverfahren eignet sich am besten für den proteinhaltigen Feststoff nach dem Separationsprozess?
- Welches Trocknungsverfahren eignet sich am effizientesten für die weitere Aufbereitung mit der Seiherschneckenpresse?
- Welchen Einfluss hat die Endfeuchte nach dem Trocknungsprozess auf das Seiherschneckenpressen?
- Wie unterscheiden sich die Endprodukte hinsichtlich ihrer hygienischen und physikochemischen Eigenschaften nach der Aufbereitung des Insektenmaterials?

Es wird angestrebt, diesen Fragestellungen in einem neuen Projekt nachzugehen.

Für KMU sind solche Untersuchungen aus betrieblichen und kapazitiven Gründen nicht leistbar.

## **7 Nachweis der Verwendung der Zuwendung**

### **7.1 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten**

Im Rahmen des Projektes wurden nicht nur die nötigen Grundlagen und erkenntnisorientierten Fragestellungen aufgegriffen, die so nur im Rahmen eines derartigen Forschungsprojektes effektiv bearbeitet werden, es wurden schon während der Projektlaufzeit vorwettbewerbliche Schritte und Strategien eingeschlagen, die im Anschluss an die Laufzeit einen effektiven Transfer in die Wirtschaft und eine Umsetzung der Ergebnisse ermöglichen. Die erfolgreiche Etablierung neuartiger technischer Entwicklungen im Markt bedarf erfahrungsgemäß 2-5 Jahre Vorlaufzeit nach Projektende. Dies soll unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenbedingungen von KMU erfolgen. Dazu erfolgte die Konstruktion und Fertigung der einzelnen Einheiten in enger Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses und KMU sowohl des Maschinenbaus als auch Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik bzw. Prozessautomation.

Den interessierten Wirtschaftszweigen (insbesondere Futtermittel, Maschinen- und Anlagenbau, Mess- und Regelungstechnik) steht das im Rahmen des Vorhabens realisierte Funktionsmuster zur automatisierten Insektenzucht zur Verfügung, welches die Grundlagen zur industrietauglichen Umsetzung der Forschungsergebnisse demonstriert. Wesentliche Merkmale einer direkten industriellen Nutzung wie Robustheit von Hard- und Software, Verfügbarkeit, Bedienungsfreundlichkeit und Betriebssicherheit werden in diesem Vorhaben vor allem konzeptionell betrachtet. Eine Bedienung der entstehenden Versuchsanlage kann nur durch das Personal der beteiligten Forschungsstellen durchgeführt werden. Über die Umsetzbarkeit im Hinblick auf die genannten vorwettbewerblichen Einschränkungen können sich in konkreten Fällen interessierte Unternehmen anhand des Funktionsmusters informieren. Prinzipielle Anforderungen der Industrie wurden aber bereits in der Konzeption berücksichtigt, so dass in dieser Hinsicht keine Hinderungsgründe zu erwarten sind.

Es ist davon auszugehen, dass die zu entwickelnde verfahrenstechnische Lösung zur Prozessierung bzw. Zucht von Insekten hinsichtlich der Kostenstruktur gerade für innovative KMU finanziell erreichbare Größenordnungen einer industriellen Umsetzung und Nutzung bietet. Zum einen stellt die angestrebte insektenproduzierende Anlage an sich eine Innovation dar, zum anderen lassen sich die einzelnen Verfahrensschritte (z. B. Substratzugabe, Insektenboxendesign, Boxentransport, Klimatisierung der Zuchteinheit, Sortierungseinheit der Insekten) auch getrennt umsetzen oder an andere Aufgaben anpassen.

## **7.2 Verwendung der zugewendeten Mittel**

### **Personaleinsatz**

#### **IFF:**

#### **Forschungsstelle 1**

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

HPA A und B: Personenmonate 7,2675

Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

- Geräte: keine
- Leistungen Dritter: keine

#### **LSTM, FAU Erlangen-Nürnberg**

#### **Forschungsstelle 2**

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

HPA A: Personenmonate 26,52

Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

- Geräte: Versuchsanlage Proteingewinnung aus Insekten EUR 31.094,70
- Leistungen Dritter: keine

#### **HSB (Hochschule Bremerhaven)**

#### **Forschungsstelle 3**

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

HPA A: Personenmonate 9,24

- Planung, Organisation und Leitung der verschiedenen Untersuchungen zur Trocknung

Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

Geräte: Klimaraum EUR 18.904,88

Automatisierungsbox EUR 9.936,50

Leistungen Dritter: keine

## 7.3 Plan zum Ergebnistransfer

### Bereits durchgeführte Maßnahmen

FS	Maßnahme	Ziel	Aktion	Datum
IFF	Projektbegleitender Ausschuss (Kickoff-Treffen)	Diskussion der Forschungsgegenstände und geplanten Vorgehensweise	B1: Vorstellung der angepassten Projektablaufplanung und Abstimmung der Forschungsfokussierung (IFF in Braunschweig)	09.10.2015
IFF	Projektbegleitender Ausschuss (intern) Projektbegleitender Ausschuss (Göttingen)	Diskussion der ersten Teilergebnisse Diskussion der ersten Fütterungsversuche	Abstimmung über den weiteren zeitlichen Ablauf (Verzahnung der Teilprojekte) Abstimmung über den weiteren Projektablauf	16.12.2016 24.03.2017
IFF	Projektbegleitender Ausschuss Projektbegleitender Ausschuss (Göttingen)	Diskussion der ersten Fütterungsversuche	Abstimmung über den weiteren zeitlichen Ablauf (Verzahnung der Teilprojekte) Abstimmung über den weiteren Projektablauf	24.03.2017
IFF, LSTM	Projektbegleitender Ausschuss intern	Diskussion weiteres Vorgehen	ProjektAbstimmung	10.08.2017
IFF, LSTM	Telefonkonferenz	Diskussion weiteres Vorgehen	ProjektAbstimmung	24.08.2017
IFF	IFF-Praktikerlehrgang „Pelletieren von Mischfutter“	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Einbindung in das Vortragsthema Zerkleinern	26.-27.01.2016
IFF	IFF Practical Course „Fundamentals in feed-compounding technology“	Internationale Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen	Einbindung in die Vortragsthemen Zerkleinern und Dosieren	04.-08.04.2016
IFF	33. IFF-Seminar für Fach- und Führungskräfte der Mischfutterindustrie und verwandter Bereich	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Vorträge und Diskussion rund um das Thema Insekten	13.-14.09.2016
IFF	IFF-Praktikerlehrgang „Basisstufen der industriellen Mischfutterproduktion“	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Einbindung in die Vortragsthemen Zerkleinern und Dosieren	20.-21.09.2016
IFF	IFF-Praktikerlehrgang „Pelletieren von Mischfutter“	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Einbindung in das Vortragsthema Zerkleinern/Pelletieren	24.-25.01.2017

IFF	Sitzung des Wissenschaftlichen Beirates	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Bericht über das Projekt	23.03.2017
IFF, HSB, LSTM,	Insecta	Vortragspräsentationen	Bericht über Fütterungsversuche und Automatisierungsfortschritte	20.09.2017
IFF	Sitzung des Wissenschaftlichen Beirates	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Bericht über das Projekt	21.09.2017
IFF	IFF-Praktikerlehrgang „Basisstufen der industriellen Mischfutterproduktion“	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Einbindung in die Vortragsthemen Zerkleinern und Dosieren	17.-18.10.2017
IFF	Tagung „Generation Feed“	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Bericht über das Projekt	01.03.2018
IFF, HSB, LSTM,	Insecta	Vortragspräsentationen	Bericht über Aufbereitung, Haltung und Automatisierungsfortschritte	05.-07..09.2018
IFF	IFF-Praktikerlehrgang „Pelletieren von Mischfutter“	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Einbindung in das Vortragsthema Zerkleinern	23.-24.01.2018
IFF	IFF Practical Course „Fundamentals in feed-compounding technology“	Internationale Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen	Einbindung in die Vortragsthemen Zerkleinern und Dosieren	09.-13.04.2018
IFF, HSB, LSTM	Projektbegleitender Ausschuss (Erlangen)	Diskussion der Teilergebnisse  Vorstellung des Funktionsmusters	Abstimmung über den weiteren Projektablauf	23.04.2018
IFF	IFF-Praktikerlehrgang „Basisstufen der industriellen Mischfutterproduktion“	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Einbindung in die Vortragsthemen Zerkleinern und Dosieren	18.-19.09.2018
IFF, HSB, LSTM	Projektbegleitender Ausschuss (Bremerhaven)	Vorstellung des Funktionsmusters mit Aufzucht der Insekten	Abstimmung über den weiteren Projektablauf	25.09.2018
IFF	Eurotier	Vorstellen des Projektes und Diskussion mit Messebesuchern	Vorstellen des Projektes (Flyer)	13.-16.11.2018
IFF	Geno-Akademie	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne	Vortrag „Von der Larve zum Futtermittel“	11.12.2018

		eigene Forschungskapazitäten		
IFF	Feedforum	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Bericht über das Projekt	18.04.2018

## Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Aktion	Verantwortlichkeit		
			IFF	LSTM	HS B
F: Weiterbildung und Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über IFF-Veranstaltungen	Weiterbildung von Mitarbeitern vorrangig kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	F1: Übernahme der Ergebnisse in IFF-Weiterbildungsveranstaltungen (2. Halbjahr 2019)	X	-	-
G: Veröffentlichung	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	G1: Beitrag in internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften wie Archives of Animal Nutrition, Poultry Science u. a. (1. Halbjahr 219)	X	X	X
		G2: Beitrag in praxisnaher Fachzeitschrift z. B. Mühle und Mischfutter, Feed Magazine/Krafftutter u. a. (1. Halbjahr 2019)	X	-	-
		G3: Veröffentlichung des Schlussberichtes auf der Website der IFF	X	-	-
		G4: Verbreitung ausgewählter Ergebnisse mittels IFF-Newsletter	X	-	-
		G5: Posterpräsentation der Ergebnisse in IFF-Seminaren, Fachtagungen und Messen (u.a. Victam 12. - 14.06.2019 Köln)	X	X	X
		G6: Vorstellung der Ergebnisse auf nationalen und internationalen Fachtagungen wie - Insecta (September 2019) - GDL-Kongress (September 2019) - Meeting of the European Federation of Animal Science City of Ghent (Augsut 2019)	X	X	X
H: Transfer in die Industrie	Umfassende Verbreitung der Ergebnisse sowie direkte Umsetzung in der betrieblichen Praxis	H1: Einbeziehung der Projektergebnisse in die Beratung von vorrangig kleinen und mittleren Unternehmen der Mischfutterbranche	X	X	X
J: Aus- und Weiterbildung	Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre bzw. berufliche Aus- und Weiterbildung	J1: Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre im Rahmen der Vorlesungen Bioprozessautomation und Biotechnik an der Universität Erlangen-Nürnberg	-	X	-

#### **7.4 Einschätzung der Realisierbarkeit des Transferkonzeptes**

Die Maßnahmen zum Ergebnistransfer wurden im Wesentlichen wie geplant umgesetzt. Auch die nach Abschluss des Forschungsprojektes geplanten Maßnahmen werden als gut realisierbar eingeschätzt.

## 7.4 Veröffentlichungen, Tagungsbeiträge

### Publikationen

Böschen, V.; Blume, R.-M. (2016). Proteine 2020 – Insekten als Einzelfuttermittel. Mühle + Mischfutter 153 (2016) 16, S. 522.

Kröncke, N., Böschen, V., Woyzichovski, J., Demtröder, S., Benning, R. (2018). Comparison of suitable drying processes for mealworms (*Tenebrio molitor*). Innovative Food Science and Emerging Technologies 50 (2018), S. 20-25.

Böschen, V., Franke, G., Kiehne, V., Kirchner, A., Neumann, K.-D. (2019). Forschung für die Futtermittelindustrie – Wie gelingt die „Innovationsproduktion“? Veröffentlichung vorgesehen für: Mühle + Mischfutter 156 (2019) 7.

### Vorträge

Kröncke, N., Böschen V., Keil, C., Grebenteuch, S., Demtröder, S., Thünemann, A., Kroh, L., Haase, H., Benning, R. (2018). Comparison of suitable drying techniques on nutritional quality of mealworms (*Tenebrio molitor* L.). Insecta 2018 – 5<sup>th</sup> International Symposium on Insects. September 2018, Gießen.

Kröncke, N., Woyzichovski, J., Böschen, V., Demtröder, S., Benning, R. (2018). Entwicklung geeigneter Verfahren zur Trocknung von Mehlkäferlarven (*Tenebrio molitor*). Kurzvortrag. Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Lebensmittelverfahrenstechnik. 5.-6. März 2018, Berlin.

Kröncke, N., Böschen, V., Keil, C., Grebenteuch, S., Demtröder, S., Thünemann, A., Kroh, L., Haase, H., Benning, R. (2018). Vergleich geeigneter Verfahren zur Trocknung von Mehlkäferlarven (*Tenebrio molitor* L.). GDL-Kongress Lebensmitteltechnologie. 11.-13. Oktober 2018, Bremerhaven.

Woyzichovski, J., Kröncke, N., Demtröder, S., Benning, R., Baur, A., Hussein, M., Delgado, A. (2017). Industrial rearing optimization of *T. molitor* larvae (Coleoptera, Tenebrionidae) with respect to high rearing densities and alternative possibilities of non-invasive monitoring systems. Insecta 2017 – 3<sup>rd</sup> International Symposium on Insects as Feed, Food and Non-Food. 7.-8. September 2017, Berlin.

Böschen, V. (2018). Comparison of wet and dry processing and fractionation for mealworms (*Tenebrio molitor*). Insecta 2018, Giessen, 5.-7. September 2018

Böschen, V. (2018). Von der Larve bis zum Futtermittel. Technischer Workshop „Futtermittelherstellung“, Gütersloh, 10.-11. Dezember 2018

### Poster

Baur, A., Groß, F., Hussein, M., Delgado, A. (2017). Noninvasive monitoring systems for the industrial rearing of *Tenebrio molitor* larvae. Insecta 2017 – 3<sup>rd</sup> International Symposium on Insects as Feed, Food and Non-Food. 7.-8. September 2017, Berlin.

Baur, A., Hussein, M., Delgado, A. (2018). Separation of Faeces, Exuvia and Residues from *Tenebrio molitor* larvae. Insecta 2018 – 4<sup>th</sup> International Symposium on Insects. 5.-7. September 2018, Gießen.

Keil, C., Kröncke, N., Grebenteuch, S., Böschen, V., Demtröder, S., Kroh, L., Thünemann, A., Haase, H., Benning, R. (2018). Vergleich geeigneter Trocknungstechniken bezüglich der Nährstoffqualität von *Tenebrio molitor* (L.). 47. Deutscher Lebensmittelchemikertag. 17.-19. September 2018, Berlin. (Posterpreis)

Kröncke, N., Woyzichovski, J., Bösch, V., Demtröder, S., Benning, R. (2018). Entwicklung geeigneter Verfahren zur Trocknung von Mehlkäferlarven (*Tenebrio molitor*). Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Lebensmittelverfahrenstechnik. 5.-6. März 2018, Berlin.

Kröncke, N., Bösch, V., Keil, C., Grebenteuch, S., Demtröder, S., Thünemann, A., Kroh, L., Haase, H., Benning, R. (2018). Comparison of suitable drying techniques on nutritional quality of mealworms (*Tenebrio molitor* L.). Insecta 2018 – 4<sup>th</sup> International Symposium on Insects. 5.-7. September 2018, Gießen.

Kröncke, N., Bösch, V., Keil, C., Grebenteuch, S., Demtröder, S., Thünemann, A., Kroh, L., Haase, H., Benning, R. (2018). Vergleich geeigneter Verfahren zur Trocknung von Mehlkäferlarven (*Tenebrio molitor* L.). GDL-Kongress Lebensmitteltechnologie. 11.-13. Oktober 2018, Bremerhaven.

## Literaturverzeichnis

- Awoniyi, T. A. M., Aletor, V. A. and Aina, J. M.: Performance of Broiler – Chickens Fed on Maggot Meal in Place of Fishmeal. *International Journal of Poultry Science*, 2003: 271-274.
- Böhmert L., Girod M., Hansen U., Maul R., Knappe P., Niemann B., Weidner SM., Thünnemann AF., Lampen A. (2014). Analytically monitored digestion of silver nanoparticles and their toxicity on human intestinal cells. *Nanotoxicology*. 8 (6):631-42.
- Bohnet, M. (2012). *Mechanische Verfahrenstechnik*. John Wiley & Sons.
- Bußler, S., Rumpold, B. A., Jander, E., Harshadrai, M. R., Schlüter, O. K. (2016). Recovery and techno-functionality of flours and proteins from two edible insect species: Mealworm (*Tenebrio molitor*) and black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *Heliyon* 2: e00218.
- Dankwa, D., Oddoye, E .O. K. and Mzamo, K. B.: Preliminary studies on the complete replacement of fishmeal by house-fly-larvae-meal in weaner pig diets: effects on growth rate, carcass characteristics, and some blood constituents. *Ghana Journal of Agricultural Science*, 2000: 223-227.
- DFG (2016). Sicherheitsaspekte bei der Herstellung von Lebensmitteln und Lebensmittelinhaltsstoffen aus Insekten. DFG Senatskommission zur gesundheitlichen Bewertung von Lebensmitteln.
- Dreassi E., Cito A., Zanfini A., Materozzi L., Botta M. Francardi V. (2017). Dietary fatty acids influence the growth and fatty acid composition of the yellow mealworm *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Lipids*. 52(3): 285-294.
- EFSA Scientific Committee (2015). Risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. *EFSA Journal* 13 (10): 4257 (60 pp.).
- FAO (2009). *How to Feed the World in 2050*. Information prospect.
- FAO (2013). *Edible insects. Future prospects for food and feed security*. Forestry Paper, Rome.
- Fastinger, N.D., Mahan, D.C. (2003). Effect of soybean meal particle size on amino acid and energy digestibility in grower-finisher swine. *Journal of Animal Science* 81 (3), 697-704.
- Friedrich, W., Robohm, K.F.: Der Verdichtungs Vorgang in der Futtermittelpresse – Einfluss und Betriebsbedingungen auf Energiebedarf und Pelletfestigkeit, *Die Mühle + Mischfüttertechnik*, Jahrg. 116, Nr. 39, S. 527-530 (1979).
- Friedrich, W.: Verarbeitung von fetthaltigen Futtermitteln, Einfluss von Fettart, Fettmenge und Art der Zugabe auf die Pelletierung, *AiF Schlussbericht* 4525 (1981)
- Figura, L.O., 2006. *Lebensmittelp Physik: Physikalische Kenngrößen – Messung und Anwendung*. Springer-Verlag.
- Finke, M. D. (2002). Complete nutrient composition of commercially raised invertebrates used as food for insectivores. *Zoo Biology*, 21, 269-285.
- Frenzel, B., Gebhard, F., 2009. *Physik Formelsammlung: mit Erläuterungen und Beispielen aus der Praxis für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer-Verlag.
- Gillandt, I., Fritsching, U., Riehle, C., 1996. Zur mehrphasigen Strömung in einem Zick-Zack-Sichter. *Forschung im Ingenieurwesen* 62, 315-321.
- Hancock, J.D. (1999). Grinding to improve growth performance in pigs. *Feed Tech*. 3 (4), 24-27.
- Heidenreich, E., Sundermeier T. (1995). Entwicklungen in der Futterzerkleinerung. *Krafftutter* 78 (4), 161-168.

Heidenreich, E., Löwe, R., Strauch, W. (2003). Verbesserung der Mischungshomogenität und -stabilität von Feststoffmischungen durch Anpassung der Komponentenstruktur. *Schüttgut* 9 (3), 172-176.

Hermetia (2011). Endbericht zum Forschungsvorhaben "Entwicklung eines Verfahrens zur industriellen Produktion von Präpuppen der Fliege *Hermetia illucens* zur Futterproteinproduktion.

Haque, N. und Somerville M. (2013). Techno-Economic and Environmental Evaluation of Biomass Dryer. *Procedia Engineering*, Vol. 56, 650-655.

Husain, R.A., Zayed, A.S., Ahmed, W.M., Elhaji, H.S., 2015. Image segmentation with improved watershed algorithm using radial bases function neural networks, in: *Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2015 16th International Conference On. IEEE, pp. 121-126.

Heindl, A., 2018, *Praxisbuch Bandtrocknung, Grundlagen, Anwendung, Berechnung.*

IPIFF (2017). IPIFF position paper on the use of insect proteins as animal feed. Brussels, 1-3.

Jansen, H. D. und W. Friedrich: Einfluss der Aufbereitung auf Pressfähigkeit und Energiebedarf bei der Mischfutterproduktion, *Die Mühle + Mischfuttertechnik*, Jahrg. 122, Nr. 45, S. 619-625 (1985)

Jain, A.K., Mao, J., Mohiuddin, K.M., 1996. Artificial neural networks: a tutorial. *Computer* 29, 31-44. <https://doi.org/10.1109/2.485891>.

H.D. Jansen und W. Friedrich: Einfluss der Aufbereitung auf Pressfähigkeit und Energiebedarf bei der Mischfutterproduktion, *Die Mühle + Mischfuttertechnik*, Jahrg. 122, Nr. 45, S. 619-625 (1985).

Ji, X., Li, Y., Cheng, J., Yu, Y., Wang, M., 2015. Cell image segmentation based on an improved watershed algorithm, in: *Image and Signal Processing (CISP)*, 2015 8th International Congress On. IEEE, pp. 433-437.

Kaiser, F., 1963. Der Zickzack-Sichter – ein Windsichter nach neuem Prinzip. *Chemie Ingenieur Technik* 35, 273-282.

Kamphues, J. 2004, *Supplemente zu Vorlesungen und Übungen in der Tierernährung*, 198-199.

Klabunde, H. in P. Erling, Hrsg. (2003). *Handbuch Mehl- und Schälmmüllerei*. Agri-Media GmbH, Bergen/Dumme.

Kroeckel, S. et al.: When a turbot catches a fly: Evaluation of a pre-pupae meal of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as fish meal substitute — Growth performance and chitin degradation in juvenile turbot (*Psetta maxima*). *Aquaculture*, 2012: 345-352.

Kutz, M. [Ed.] (2013). *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering*. Academic Press. ISBN: 978-0-12-385881-8.

Lababidi, H.M.S., und Baker, C.G.J. (2003). Web-based expert system for food dryer selection. *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 27, Iss. 7, 997-1009.

Le Féon, S., Thévenot, A., Maillard, F., Macombe, C., Forteau, L., Aubin, J. (2019). Life Cycle Assessment of fish fed with insect meal: Case study of mealworm inclusion in trout feed, in France. *Aquaculture*, 500, 82-91.

Lenaerts, S., Van der Borght, M., Callens, A., Van Campenhout, L. (2018). Suitability of microwave drying for mealworms (*Tenebrio molitor*) as alternative to freeze drying: Impact on nutritional quality and colour. *Food Chemistry* 254: 129-136.

Lenze, B., 1997. *Einführung in die Mathematik neuronaler Netze: mit C-Anwendungsprogrammen im Internet*. Logos-Verlag.

- Lippmann, R., 1987. An introduction to computing with neural nets. IEEE ASSP Magazine 4, 4-22. <https://doi.org/10.1109/MASSP.1987.1165576>.
- Löwe, R. und Feil, A. (2011). Untersuchungen zu Struktur-Eigenschafts-Korrelationen für zerkleinerte Getreide. Schlussbericht AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15 825. Hg. v. IFF-Forschungsinstitut Futtermitteltechnik. Braunschweig-Thüne.
- Maret W., Sandstead HH. (2006). Zinc requirements and the risks and benefits of zinc supplementation. J Trace Elem Med Biol. 20(1):3-18.
- Mwangi MN., Oonincx DGAB., Stouten T., Veenenbos M., Melse-Boonstra A., Dicke M., van Loon JJA. (2018). Insects as sources of iron and zinc in human nutrition. Nutr Res Rev. 23:1-8.
- Nowak, V., Persijn, D., Rittenschober, D., Charrondiere, U. R. (2016). Review of food composition data for edible insects. Food Chemistry 193: 39-46.
- Piofczyk, T. (2015). Forschungsbericht: Entwicklung eines Verfahrens zur Entölung von Insekten für neuartige Futtermittel. ZIM-Projekt.
- Protix (2014). Method to convert insects or worms into nutrient streams and compositions obtained thereby. Patent Nr. WO2014/123420.
- Purschke, B., Mendez Sanchez, Y. D., Jäger, H. (2018). Centrifugal fractionation of mealworm larvae (*Tenebrio molitor* L.) for protein recovery and concentration. LWT, 89, 224-228.
- Rumpold, B. A., Schlüter, O. K. (2013). Potential and challenges of insects as an innovative source for food and feed production. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 17, 1 – 11.
- Stieß, M., 2008. Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1. Springer-Verlag.
- Strauch W. (2003). Marktübersicht Feststoffmischer. Mühle + Mischfutter (140) 24, 721-725.
- Sun, H.Q., Luo, Y.J., 2009. Adaptive watershed segmentation of binary particle image. Journal of microscopy 233, 326-330.
- Thévenot, A., Rivera, J. L., Wilfart, A., Maillard, F., Hassouna, M., Senga-Kiesse, T., Le Féon, S., Aubin, J. (2018). Mealworm meal for animal feed: Environmental assessment and sensitivity analysis to guide future prospects. Journal of Cleaner Production, 170, 1260-1267.
- Tvardovskiy, A.V. [Ed.] (2007). Experimental measurements and theoretical description of sorption equilibria in swelling systems, Interface Science and Technology, Vol. 13, 88-130.
- Ulmer, K. (2009). Maschinenkunde Müllerei. Schweizerische Berufsbildungskommission Müller, Zollikofen/CH.
- UN (2017). World Population Prospects. Data Booklet. 2017 Revision.
- Van Huis, A. (2013). Potential of Insects as Food and Feed in Assuring Food Security. Annual Review of Entomology, 58, 563-583.
- Veldkamp, T. et al.: Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets – a feasibility study. Report 638, Lelystad: Wageningen UR Livestock Research, 2012.
- Verordnung (EG) Nr. 258/97 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 1997 über neuartige Lebensmittel und neuartige Lebensmittelzutaten.
- Verordnung (EG) Nr. 999/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Mai 2001 mit Vorschriften zur Verhütung, Kontrolle und Tilgung bestimmter transmissibler spongiformer Enzephalopathien.
- Verordnung (EG) Nr. 767/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juli 2009 über das Inverkehrbringen und die Verwendung von Futtermitteln, zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1831/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Richtlinien 79/373/EWG des Rates, 80/511/EWG der Kommission, 82/471/EWG

des Rates, 83/228/EWG des Rates, 93/74/EWG des Rates, 93/113/EG des Rates und 96/25/EG des Rates und der Entscheidung 2004/217/EG der Kommission (Text von Bedeutung für den EWR).

Verordnung (EU) 2015/2283 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2015 über neuartige Lebensmittel, zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 1169/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 258/97 des Europäischen Parlaments und des Rates und der Verordnung (EG) Nr. 1852/2001 der Kommission (Text von Bedeutung für den EWR).

Verordnung (EU) 2017/893 der Kommission vom 24. Mai 2017 zur Änderung der Anhänge I und IV der Verordnung (EG) Nr. 999/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Anhänge X, XIV und XV der Verordnung (EU) Nr. 142/2011 der Kommission in Bezug auf die Bestimmungen über verarbeitetes tierisches Protein (Text von Bedeutung für den EWR).

Wankhade, P.K., Sapkal, R.S. und Sapkal, V.S. (2013). Drying Characteristics of Okra Slices on Drying in Hot Air Dryer. *Procedia Engineering*, Vol. 51, 371-374.

Widrow, B., Winter, R.G., Baxter, R.A., 1988. Layered neural nets for pattern recognition. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 36, 1109-1118. <https://doi.org/10.1109/29.1638>.

Ynsects (2018). Chitin, hydrolysate and method for the production of one or more de-sired products by means of enzymatic hydrolysis, including pre-treatment with an oxidizing agent. Patent Nr. US20180002452A1.

Zamora, R., Hidalgo, F. J. (2005). Coordinate contribution of lipid oxidation and Maillard reaction to the nonenzymatic food browning. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 45: 49-59.

Zanardi, E., Jagersma, C. G., Ghidini, S., Chizzolini, R. (2002). Solid phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry for the evaluation of 4-hydroxy-2-nonenal in pork products. *J. Agric. Food Chem.* 50: 5268-5272.