

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 28 LN

## Thema

Entwicklung geeigneter Verfahren zur Herstellung von Futtermitteln

## Berichtszeitraum

01.04.2016 - 30.04.2019

## Forschungsvereinigung

Internationale Forschungsgemeinschaft Futtermitteltechnik e. V.

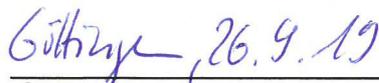
## Forschungseinrichtung(en)

Forschungsinstitut Futtermitteltechnik der IFF

Georg-August-Universität Göttingen, Tierernährungsphysiologie



Dr. V. Böschen, IFF



Ort, Datum

  
Prof. Dr. J. Hummel

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

Gefördert durch:

## Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
1 Einleitung .....	9
2 Stand der Wissenschaft und Technik .....	10
3 Forschungsziel .....	11
3.1 Angestrebte Ergebnisse .....	11
3.2 Innovativer Beitrag .....	12
4 Material und Methoden.....	12
4.1 Bestimmung der Produkteigenschaften von Mischfutter .....	12
4.1.1 Partikelgrößenverteilung .....	12
4.1.2 Feuchtigkeit.....	12
4.1.3 Mikrobiologischer Zustand.....	13
4.1.4 Pelletfestigkeit.....	13
4.1.5 Chemische Stoffeigenschaften.....	13
4.1.6 Lösliches Protein.....	13
4.1.7 Lagerungsstabilität .....	13
4.1.8 Fließfähigkeit.....	14
4.1.9 Mischungshomogenität .....	15
4.1.10 Bestimmung des Staubungsverhaltens von Schüttgütern.....	15
4.1.11 Bestimmung der Lagerungsstabilität der Lipide .....	16
4.2 Herstellen von Mischfutter .....	17
4.2.1 Pelletieren .....	17
4.2.2 Expandieren .....	18
4.2.3 Extrudieren.....	19
4.3 Trocknung .....	21
4.3.1 Wirbelschichttrockner .....	21
4.3.2 Stikkenofen .....	21
4.3.3 Vakuumofen.....	21
4.3.4 Mikrowelle .....	21
4.3.5 Gefriertrockner .....	21
4.3.6 Bandtrockner.....	21
4.4 Datenerhebung zur Bestimmung der Energieeffizienz .....	21
4.4.1 Strom, Spannung, Leistungsmessung, Energiemessung nach Trendows .....	21
4.5 Fütterungsversuche.....	21
4.5.1 Bewertung der Futtermischungen.....	22
4.5.2 Bestimmung des Aminosäurespektrums .....	22

5	Ergebnisse und Diskussion .....	23
5.1	AS 1: Aufbereitung der Insekten für die Futtermittelherstellung (IFF, HSB) .....	23
5.1.1	Vergleich geeigneter Verfahren zur Trocknung von Mehlkäferlarven.....	23
5.1.2	Trocken- und Nassaufbereitung der Insekten .....	27
5.1.2.1	Trockenaufbereitung der Insekten .....	28
5.1.2.2	Nassaufbereitung der Insekten.....	31
5.1.2.3	Fettsäurezusammensetzung und Fettverderb (UGO).....	35
5.1.2.4	Aminosäure-Zusammensetzung des Proteinträgers (UGO).....	38
5.2	AS 2: Bestimmung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der Proteineinzelfuttermittel sowie hygienische Bewertung (Futtermittelsicherheit) .....	39
5.2.1	Weender Analyse .....	39
5.2.3	Mikrobiologischer Zustand.....	40
5.2.4	Lagerungsstabilität .....	41
5.2.4.1	Lagerungsstabilität der getrockneten Larven.....	41
5.2.5	Fließfähigkeit.....	45
5.2.6	Mischungshomogenität .....	46
5.2.7	Staubungsverhalten .....	50
5.2.8	Carry-over .....	50
5.3	AS 3: Herstellen von Futtermitteln (Pelletieren/Expandieren/Extrudieren) .....	51
5.3.1	Rohwarenerkleinerung .....	51
5.3.2	Pelletieren von Mischfutter .....	56
5.3.3	Expandieren .....	61
5.3.4	Extrudieren.....	62
5.4	AS 4 Evaluierung durch Fütterungsversuche an Broilern, Absetzferkeln und Nutzfischen.....	63
5.4.1	Evaluierung der Fütterungsversuche an Tilapien.....	64
5.4.2	Evaluierung der Fütterungsversuche an Masthähnchen .....	70
5.4.3	Evaluierung der Fütterungsversuche an Aufzuchtferkeln.....	82
5.5	AS 5: Bewertung der Energieeffizienz anhand der Fütterungserfolge.....	86
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	87
7	Nachweis der Verwendung der Zuwendung .....	90
7.1	Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten .....	90
7.2	Verwendung der zugewendeten Mittel.....	92
7.3	Plan zum Ergebnistransfer .....	93
7.4	Einschätzung der Realisierbarkeit des Transferkonzeptes .....	98
7.5	Veröffentlichungen, Tagungsbeiträge .....	99

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: 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). .....	24
Tabelle 2: 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) .....	26
Tabelle 3: Weender 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). ..	30
Tabelle 4: Ergebnisse der Zentrifugationsversuche zur Nassaufbereitung.....	32
Tabelle 5: 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) .....	35
Tabelle 6: Ergebnisse der Ranzimat-Untersuchungen der verschiedenen abgepressten Lipide der Mehlkäferlarven im Vergleich mit anderen Fetten und Ölen in Abhängigkeit der Lagerdauer.....	37
Tabelle 7: Übersicht über die Aminosäurezusammensetzung der Mehlkäferlarven (MKL) bei verschiedenen Trocknungstemperaturen und der verschiedenen Presskuchen TMP-Chargen [g/16 g N].....	38
Tabelle 8: Weender Analysedaten für verschiedene Insektenfraktionen im Vergleich zu Fischmehl und Sojaextraktionsschrot .....	40
Tabelle 9: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters (konventionell).....	47
Tabelle 10: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters mit 25 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot) .....	47
Tabelle 11: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters mit 50 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot) .....	48
Tabelle 12: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters mit 75 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot) .....	48
Tabelle 13: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach Austritt aus der Seiherschneckenpresse .....	52
Tabelle 14: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach der Zerkleinerung mittels Walzenstuhl Walzenspalt 0 mm.....	53
Tabelle 15: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach der Zerkleinerung mittels Walzenstuhl Walzenspalt 0,25 mm.....	54
Tabelle 16: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach der Zerkleinerung mittels Walzenstuhl Walzenspalt 0,5 mm.....	54
Tabelle 17: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach der Zerkleinerung mittels Walzenstuhl Walzenspalt 0,75 mm.....	55
Tabelle 18: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters (konventionell).....	57
Tabelle 19: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters mit 25 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot) .....	58

Tabelle 20: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfeeders mit 50 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot) .....	58
Tabelle 21: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfeeders mit 75 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot) .....	59
Tabelle 22: Zusammensetzung der verwendeten Insektenmehle (% der Originalsubstanz) .	66
Tabelle 23: Zusammensetzung der Versuchsdieten .....	67
Tabelle 24: Wachstumsleistung und Proteinverwertung .....	68
Tabelle 25: Rohnährstoffgehalt und Gehalt ausgewählter Aminosäuren des in den Versuchen mit Masthähnchen verwendeten <i>Tenebrio molitor</i> Presskuchens (TMP-2) .....	72
Tabelle 26: In Versuch 1 (Vorversuch) eingesetzte Futtermischungen .....	74
Tabelle 27: Zusammensetzung der in Versuch 2 verwendeten Futtermischungen .....	75
Tabelle 28: Zusammensetzung der in Versuch 2 eingesetzte Futtermischungen zum Direktvergleich bei Met:Cys = 50:50 .....	76
Tabelle 29: Zusammensetzung der in der Starterphase (Tag 1-21) von Versuch 3 verwendeten Futtermischungen. ....	77
Tabelle 30: Zusammensetzung der in Versuch 3 eingesetzte Futtermischungen zum Direktvergleich bei Met:Cys = 50:50 .....	78
Tabelle 31: Mittlere Wachstumsergebnisse des Vorversuchs (Versuch 1, n = 3 in Gruppen 1 und 2, n = 2 in Gruppe 3).....	79
Tabelle 32: Mittlere Wachstumsergebnisse und Proteinqualität in Versuch 2 (n = 8) .....	80
Tabelle 33: Ergebnisse der precaecalen Verdaulichkeit [%] ausgewählter Inhaltsstoffe der Futtermischungen in Versuch 2 (n = 3).....	81
Tabelle 34: Mittlere Wachstumsergebnisse in Versuch 3 (n = 6) .....	81
Tabelle 35: Rohnährstoffzusammensetzung und Gehalt ausgewählter Aminosäuren des im Ferkelversuch verwendeten <i>Tenebrio molitor</i> Presskuchens (TMP-3) .....	83
Tabelle 36: Die im Wachstumsversuch mit Ferkeln eingesetzten Futtermischungen (Angaben in g/kg Futtermischung) .....	83
Tabelle 37: Mittlere Wachstumsergebnisse im Ferkelversuch .....	85
Tabelle 38: Ergebnisse der scheinbaren Verdaulichkeit [%] von Rohprotein (XP) und ausgewählter Aminosäuren im Ferkelversuch (n = 10) .....	85

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auslandsanteil am Futteraufkommen in verdaulichem Eiweiß in % in den Wirtschaftsjahren 2013/14 bis 2017/18 [BMEL, 2019] .....	9
Abbildung 2: Prinzip eines Ringschergerätes [D. Schulze, 2015].....	14
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Prüfeinrichtung für das Verfahren mit rotierender Trommel.....	16
Abbildung 4: Prinzip der Arbeitsweise eines Ranzimaten [A. K. Agarwal, 2011] .....	17
Abbildung 5: Schematische Darstellung des konventionellen Pelletierens mit Kurzzeitkonditionierung einschließlich relevanter Mess- und Probenahmestellen.....	18

Abbildung 6: Funktionsprinzip Ringspalt-Expander (IFF-Forschungsinstitut) .....	19
Abbildung 7: Prinzipskizze des Extrusionsprozesses .....	20
Abbildung 8: Darstellung des Trocknungsprozesses mit den verschiedenen Trocknungsverfahren.....	24
Abbildung 9: Farbunterschiede der Mehlkäferlarven vor und nach der Trocknung. 1) Mikrowellen; 2) Gefriertrocknung; 3) Ungetrocknete Larven; 4) Stikkenofen; 5) Vakuumofen; 6) Wirbelschicht.....	25
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Verarbeitung und Fraktionierung von Larven von <i>T. molitor</i> und <i>H. illucens</i> [Bußler et al. 2013].....	28
Abbildung 11: Schematische Darstellung des Seiherschneckenprozesses zur Proteinextraktion von Mehlkäferlarven in Presskuchen (Reinartz GmbH) und Lipid ( <i>Tenebrio molitor</i> ) .....	29
Abbildung 12: Zusammensetzung von <i>Tenebrio molitor</i> a) nach dem Trocknen und nach dem Abpressen des Fettes mittels Schneckenpresse durch zwei unterschiedliche Presskopfkfigurationen b) mittels Konusscheibe c) mittels Pelletscheibe.....	30
Abbildung 13: Schema einer Trockenaufbereitung für Insekten.....	31
Abbildung 14: Schematische Darstellung der Nassaufbereitung von Insekten.....	31
Abbildung 15: Überblick über die Versuchseinstellungen zur Nassaufbereitung der Insekten .....	33
Abbildung 16: Darstellung der Restfettgehalte im Proteinfeststoff der Zentrifugationsversuche zur Nassaufbereitung von Insekten über die Zeit.....	33
Abbildung 17: Darstellung der Phasenzusammensetzung der mittels Thermomix zerkleinerten Mehlkäferlarven und der daraus resultierenden Zentrifugationsversuche .....	34
Abbildung 18: Darstellung der Induktionszeit in Abhängigkeit vom Alter der Probe (Lagerungsstabilität) .....	36
Abbildung 19: Entwicklung des Gesamtkeimgehaltes von getrockneten <i>Tenebrio molitor</i> Proben (Tabelle 2) nach der Einlagerung .....	41
Abbildung 20: Darstellung des Gesamtkeimgehaltes von Mischfuttermitteln für Aufzuchtferkel mit steigendem Gehalt an <i>Tenebrio molitor</i> Presskuchen (25 %, 50 %, 75 % des Sojaextraktionsschrots substituiert). Eingelagert wurde 0, 3 Monate bei 25 °C und 60 % relativer Luftfeuchte in Papiertüten. ....	42
Abbildung 21: Darstellung des Gesamtkeimgehaltes von Mischfuttermitteln für Aufzuchtferkel mit steigendem Gehalt an <i>Tenebrio molitor</i> Presskuchen (25 %, 50 %, 75 % des Sojaextraktionsschrots substituiert). Eingelagert wurde 0, 3 sowie 6 Monate bei 25 °C und 60 % relativer Luftfeuchte in Plastiktüten. ....	43
Abbildung 22: Darstellung des Gesamtkeimgehaltes von Mischfuttermitteln für Aufzuchtferkel mit steigendem Gehalt an <i>Tenebrio molitor</i> Presskuchen (25 %, 50 %, 75 % des Sojaextraktionsschrots substituiert). Eingelagert wurde 0, 3, sowie 6 Monate bei 40 °C und 75 % relativer Luftfeuchte in Plastiktüten. ....	43
Abbildung 23: Darstellung des Gesamtkeimgehaltes von Mischfuttermitteln für Aufzuchtferkel mit steigendem Gehalt an <i>Tenebrio molitor</i> Presskuchen (25 %, 50 %, 75 % des Sojaextraktionsschrots substituiert) vor und nach dem Konditionieren mit 3 % Sattdampf....	44

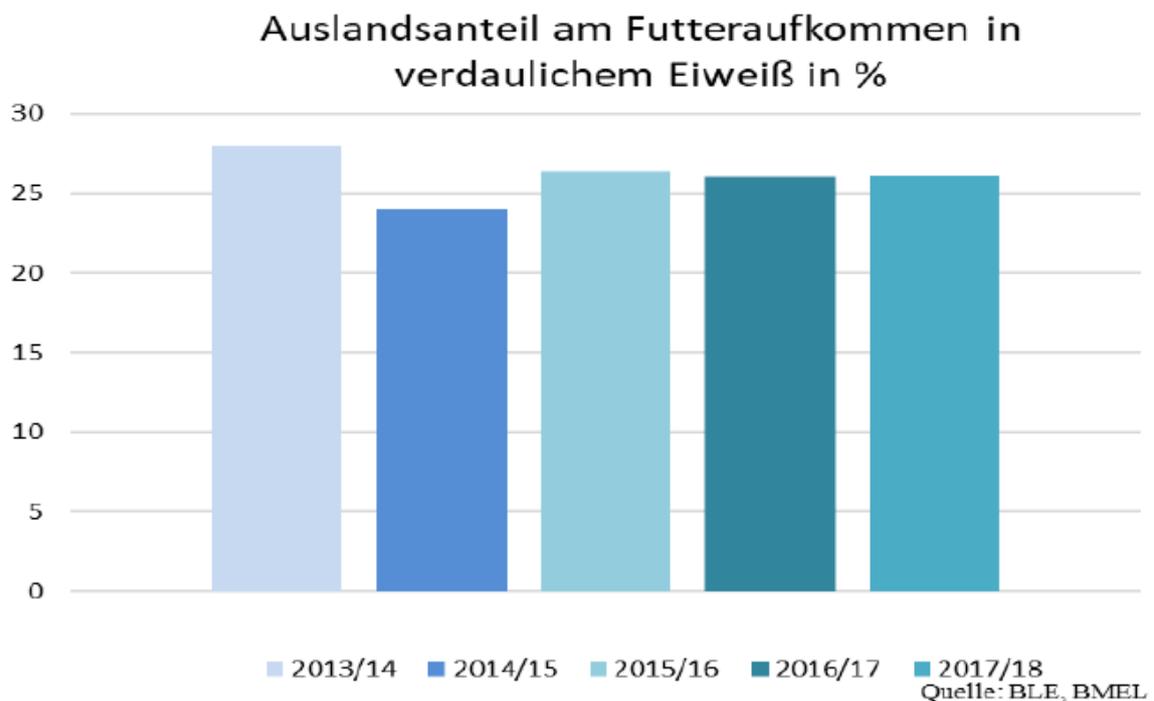
Abbildung 24: Darstellung des Gesamtkeimgehaltes von Mischfuttermitteln (Expandat) für Aufzuchtferkel mit steigendem Gehalt an <i>Tenebrio molitor</i> Presskuchen (25 %, 50 %, 75 % des Sojaextraktionsschrots substituiert).....	44
Abbildung 25: Darstellung des Gesamtkeimgehaltes von Mischfuttermitteln (Fischfutter Tabelle 23) für Tilapia mit steigendem Gehalt an <i>Tenebrio molitor</i> Presskuchen und Vollfett-Larvenmaterial (50 % und 100 % des Sojaextraktionsschrots substituiert). ....	45
Abbildung 26: Darstellung der Fließfähigkeit zweier Insektenproteinmehle vergleichend gegenüber Fischmehl und drei verschiedenen Schweinefutterrezepturen .....	46
Abbildung 27: Variationskoeffizienten für die Verteilung einer feindispersen Komponente in Mischung mit steigenden Anteilen an Insektenmehl .....	49
Abbildung 28: Variationskoeffizienten für die Verteilung einer feindispersen Komponente einer Masthähnchenmischung mit steigenden Anteilen an Insektenmehl .....	49
Abbildung 29: Presskuchen nach dem Austritt aus der Seiherschneckenpresse .....	51
Abbildung 30: Darstellung der Partikelgrößenverteilung nach der Zerkleinerung des Presskuchens mittels Walzenstuhl bei unterschiedlichen Spaltweiten (0 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 0,75 mm) .....	53
Abbildung 31: Schematische Darstellung des konventionellen Pelletierens mit Kurzzeitkonditionierung einschließlich relevanter Mess- und Probenahmestellen der Versuchsanlage im Technikum des IFF-Forschungsinstituts Futtermitteltechnik .....	56
Abbildung 32: Prozentuale Anteile von Sojaöl und Insektenpresskuchen an der Gesamtmischung des Ferkelfutters .....	59
Abbildung 33: Darstellung der Pelletqualität in Form der Abriebkennzahl nach Pfast mit unterschiedlichen Gehalten an Insektenmehl .....	60
Abbildung 34: Darstellung der Pelletqualität in Form der Pellethärte mit unterschiedlichen Gehalten an Insektenmehl und variierenden Dampfzusätzen (1 %, 2 %, 3 %) .....	61
Abbildung 35: Darstellung der Härte des pelletierten Expandates mit unterschiedlichen Gehalten an Insektenmehl und variierenden Dampfzusätzen (2 %, 4 %) .....	62
Abbildung 36: Darstellung der Härte des Extrudates bei einem konstanten Durchsatz von 9 kg/h und einer konstanten Konditionierung auf 18 % Gesamtfeuchte nach dem Extrudieren .....	63
Abbildung 37: Zu erwartende Verschiebungen in den Aminosäuremustern bei Austausch von Soja gegen Mehlwurmprotein (Angaben in g AS/16 g N) im Vergleich zum Idealprotein von Masthähnchen (IAAR=ideal amino acid ratio).....	64
Abbildung 38: juvenile Niltilapia .....	65
Abbildung 39: Mehlkäferlarven .....	65
Abbildung 40: Insektenmehl aus Mehlkäferlarven, vollfett (oben) und teilentfettet (Presskuchen, unten) .....	65
Abbildung 41: Pelletierte Versuchsfuttermischung mit der Komponente Insektenmehl aus Larvenmehl von <i>Tenebrio molitor</i> .....	66
Abbildung 42: Zu lange Pellets wurden per Hand auf eine zur Verfütterung geeignete Länge gekürzt .....	66
Abbildung 43: Biofiltereinheit der Kreislaufanlage .....	67
Abbildung 44: Rundbecken der Kreislaufanlage .....	67

Abbildung 45: Versuchsfische im Rundbecken der Kreislaufanlage.....	68
Abbildung 46: Ganzkörperzusammensetzung der Versuchsfische nach Verfütterung von Diäten mit unterschiedlichen Anteilen verschiedener Insektenmehle im Austausch gegen Sojaproteinkonzentrat.....	69
Abbildung 47: Presskuchen aus <i>Tenebrio molitor</i> .....	71
Abbildung 48: Haltung der Versuchstiere.....	71
Abbildung 49: Der Gastrointestinaltrakt eines Masthähnchens. Orange markiert: Darmabschnitt zur Chymusentnahme [nach Leeson und Summers, 2001].....	73
Abbildung 50: Ferkelhaltung in Einzelflatdecks mit Bodenheizung.....	84

## 1 Einleitung

Im Wirtschaftsjahr 2016/17 wurden insgesamt 23,9 Mio. t Mischfutter hergestellt. Damit war Deutschland auch im vergangenen Wirtschaftsjahr der größte Mischfutterproduzent in Europa [BMEL, 2018].

Die größte Herausforderung bei der Herstellung von Futtermitteln ist die Versorgung mit Eiweißfuttermitteln. Dabei ist der Rohproteingehalt der unterschiedlichen Eiweißfuttermittel eine wesentliche Kenngröße zur Bestimmung des Futterwerts. Dieser errechnet sich anhand des im Futtermittel enthaltenen Stickstoffs und stellt eine gute Vergleichsmöglichkeit zwischen den verschiedenen Eiweißfuttermitteln dar [OVID, 2016].



**Abbildung 1: Auslandsanteil am Futteraufkommen in verdaulichem Eiweiß in % in den Wirtschaftsjahren 2013/14 bis 2017/18 [BMEL, 2019]**

Wie aus der **Abbildung 1** ersichtlich wird, wurden 26 % des Aufkommens an verdaulichem Eiweiß über Importfuttermittel zugeführt, da das inländische Aufkommen nicht ausreichte, um den Bedarf an verdaulichem Eiweiß zu decken. Dieser Anteil aus importierten Futtermitteln wird auch als „Eiweißlücke“ bezeichnet.

Sowohl Deutschland als auch alle anderen europäischen Staaten sind nach wie vor auf diese Eiweißfuttermittel mit den daran geknüpften Rohproteingehalten aus Übersee angewiesen. Sojaextraktionsschrot (SES) ist in dieser Betrachtung weiterhin der wichtigste Lieferant von Rohprotein.

Obwohl Soja derzeit eine wichtige Rolle spielt, ist es sowohl aus ökonomischer wie auch ökologischer Sicht nötig, Alternativen zum Weg aus der Abhängigkeit von Soja-Importen zu etablieren. Mit dem Ziel, diese Importe zu reduzieren, gab es unter anderem die Eiweißpflanzenstrategie, welche das BMEL 2012 eingeführt hat [BMEL, 2012].

Die Futtermittelwirtschaft strebte die Verwendung regional verfügbarer, einheimischer oder neuer und möglichst preisgünstiger alternativer Komponenten an, die zumindest in Anteilen

herkömmliche Getreidearten und soja-basierte Proteinträger in Futterrezepturen ersetzen können.

Eine immer mehr beachtete Proteinquelle sind in diesem Zusammenhang Insekten. Die Eignung der Insekten als Proteinlieferant wird zwar seit Jahren mit dem Ergebnis untersucht, dass sich deren Protein zum Einsatz in Futtermitteln für Broiler und Schweine eignet, es fehlen jedoch Forschungsergebnisse, die das letztendliche Potenzial dieses Proteinträgers bestimmen.

Des Weiteren fehlten lange die gesetzlichen Rahmenbedingungen, um diesen Proteinträger in der Europäischen Union einzusetzen. Diese wurden mit Inkrafttreten der Regelung EU-Nr. 2017/893 zum 01.07.2017 gelockert, jedoch nur für sieben Spezies. Ein weiterer Punkt in Bezug auf die Regularien ist das Inkrafttreten der Verordnung EU-Nr. 2015/2283 (01.01.2018) zu neuartigen Lebensmitteln. Da zum Jahr 2020 eine weitere Lockerung der Regularien erwartet wird, welche die Fütterung von Geflügel und Schweinen mit Insektenprotein betrifft, sollten zu diesem Zeitpunkt Erkenntnisse vorliegen, welche das Potenzial des neuen Proteinträgers betreffen.

## **2 Stand der Wissenschaft und Technik**

Die Herstellung der Futtermischungen erfolgt im Regelfall in Einstrang-Produktionsanlagen, d. h. auf der gleichen Linie werden unterschiedliche Produkte, in diesem Fall Mischfutter, hergestellt. Im Allgemeinen werden Mischfutter nach dem Dosieren, Zerkleinern und Mischen der Einzelfuttermittel und Zusatzstoffe zu einem großen Anteil hydrothermischen und hydrothermisch-mechanischen Behandlungsverfahren unterzogen, um spezielle Produkteigenschaften zu erzielen.

Die Rohwarenerkleinerung stellt bei der Futtermittelproduktion einen zentralen Prozess im Herstellungsverfahren dar und übt einen maßgeblichen Einfluss auf wichtige Qualitätseigenschaften des Mischfutters aus. Die wesentlichen Anforderungen an die Zerkleinerung werden von Hammermühlen erfüllt, die in der Mischfutterindustrie üblicherweise eingesetzt werden. Die hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten ermöglichen eine flexible Zerkleinerung, sind aber durch einen hohen spezifischen Energiebedarf gekennzeichnet. Für die mit einem signifikant geringeren Energieeintrag verbundene Rohwarenerkleinerung wird in der Mischfutterindustrie unter anderem der Walzenstuhl eingesetzt.

Die Aufgabe des Mischprozesses besteht darin, die bis zu 20 Einzelkomponenten eines Mischfutters nach dem Zerkleinerungsprozess homogen zu mischen. Die Komponenten unterscheiden sich mischtechnisch in wesentlichen Eigenschaften wie z. B. Dichte, Partikelgröße oder Partikelform und werden in unterschiedlichen Massenanteilen zugegeben. Die Festlegung der erforderlichen Mischzeit erfolgt in der Regel nach experimenteller Ermittlung einer Mischzeitkurve unter betrieblichen Bedingungen und kann aufgrund der unterschiedlichen Mischprinzipien und Betriebsparameter deutliche Unterschiede aufweisen.

Bis zu 80 % des in Deutschland hergestellten Mischfutters wird in Form pelletierter Ware nachgefragt. Das Pelletieren umfasst die drei Verfahrensstufen Konditionieren, Verdichten und Kühlen. Die Kurzzeitkonditionierung dient der Vorbereitung und Anpassung von mehlartigem Mischfutter an die anschließende Verdichtungsstufe des Pelletierprozesses. Ziel des nachfolgenden Kühlprozesses ist die Gewährleistung der Lagerfähigkeit des Mischfutters durch Reduzierung der Produktfeuchtigkeit auf Werte unter 14 % sowie die Aushärtung der Pellets.

Expander beeinflussen durch die Behandlungsparameter Feuchtigkeit, Temperatur, Druck und elektromechanischem Energieeintrag die nutritive und physikalische Charakteristik des Futters. Sie können eigenständig oder als zusätzlicher Druckconditionierer vor der Pelletpresse eingesetzt werden.

Der Extrusionsprozess dient überwiegend der Herstellung hochwertiger Spezialfutter durch höhere Effekte bei Stärkeaufschluss, Hygenisierung und Formgebung.

Bei allen Futtermittel-Herstellungsprozessen ist die zuverlässige Einschätzung der Futterproteinqualität eine entscheidende Voraussetzung einer nachhaltigen und damit Ressourcen schonenden Gestaltung von Stoffwandlungsprozessen mit Nutztieren. Daher muss für neue Futtermittel eine realitätsnahe qualitative Bewertung der neuen Proteinquellen erfolgen.

### **3 Forschungsziel**

Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung von stofflichen, prozess- und anlagentechnischen Parametern bei der Verarbeitung von Insekten als tierischem Proteinträger bzw. Insektenprotein zu üblichen Mischfuttern.

Sich ändernde Marktbedingungen führten bereits zum verstärkten Einsatz alternativer Proteinträger auf pflanzlicher Basis (Eiweißstrategie) sowie Stärketrägern.

Für die Anwendung von Insekten sollten dementsprechend in dem Projekt die Verarbeitungseigenschaften in der Mischfutterherstellung ermittelt werden, so dass die Industrie diese Erkenntnisse in der industriellen Herstellung übernehmen kann. Für systematische Erprobungen und Einsatzuntersuchungen fehlen im Praxisbetrieb von KMU die betrieblichen Möglichkeiten.

Darüber hinaus sollten die angestrebten Erkenntnisse bezüglich der Insekten als tierischem Proteinträger die dringend erforderlichen Ergänzungen zu neueren Forschungsergebnissen bezüglich des Defizites in der Eigenversorgung an eiweißreichen Rohstoffen, welche Insektenproteine und -fette für die Tierfütterung favorisieren, deren Umsetzung aber nach derzeitigem Kenntnisstand technologisch nicht ohne systematische Untersuchungen möglich erscheint, füllen.

#### **3.1 Angestrebte Ergebnisse**

Das beantragte Forschungsvorhaben dient der Gewinnung von Erkenntnissen bezüglich der verarbeitungstechnologischen Eigenschaften von Insektenproteinen und -fetten bei der Mischfutterherstellung sowie ihrer Eignung hinsichtlich Produktqualität und -sicherheit auf der Basis systematischer Untersuchungen.

Im Mittelpunkt des Vorhabens stehen Untersuchungen zum Vergleich des Prozessverhaltens unterschiedlicher Rezepturen bzw. Komponenten bei der Herstellung von Mischfutter für unterschiedliche Tierarten. Als Vergleich dient eine Referenzrezeptur aus herkömmlichen Komponenten.

Als weiterer Schwerpunkt sind Untersuchungen zum spezifischen Energiebedarf, insbesondere beim Zerkleinerungs- und beim Kompaktierungsprozess, vorgesehen. Da bisher keine Daten für die Prozessierung der Insekten vorliegen, sind die Versuche für eine wirtschaftliche Umsetzung von hoher Bedeutung.

In diesem Zusammenhang sollen im Rahmen des beantragten Vorhabens folgende Fragen beantwortet werden:

1. Wie kann eine hohe Qualität der Insekten und der daraus gewonnenen Fraktionen gewährleistet werden?
2. Wie muss der tierische Proteinträger zerkleinert werden, um ernährungsphysiologisch optimal im Futter vorzuliegen?
3. Welche physikalischen und chemischen Eigenschaften weist der tierische Proteinträger auf und welche Auswirkungen hat dies auf die Verwendung und Bewertung als Einzelfuttermittel?
4. Welche Unterschiede ergeben sich beim Pelletieren, Expandieren und Extrudieren herkömmlicher und der alternativen Futtermischungen unter betriebsüblichen Bedingungen?
5. Wie verändert sich die Lagerungsstabilität der einzelnen Mischfuttermittel durch den Einsatz des neuen tierischen Proteinträgers?
6. In welchen Mengen kann der tierische Proteinträger den pflanzlichen ersetzen, um optimale tierische Leistungen zu erzielen?
7. Könnte es sich als energetisch nutzbringend erweisen, den Proteinträger vollständig, d. h. als getrocknete Larve, in das Futter einzubringen, um auf diese Weise die Prozesskette zu verkürzen und welche Einsatzbedingungen im Mischfutter (z. B. Restriktionen bei der Rezepturgestaltung) müssten dafür eingestellt werden?

### **3.2 Innovativer Beitrag**

Der innovative Beitrag des angestrebten Projekts besteht darin, dass es den überwiegend kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) der Mischfutterbranche ermöglicht wird, auf Grundlage der erarbeiteten Erkenntnisse Insektenproteine und -fette bei der Herstellung von Mischfutter für unterschiedliche Nutztierarten einzusetzen.

Die Nutzung solcher alternativer Rohstoffe verlangt die Untersuchung prozesstechnischer Eigenschaften im Herstellungsprozess, um die entsprechenden Verfahrensweisen und Betriebsparameter zu definieren. Die Berücksichtigung des Energieeinsatzes soll insbesondere die kleinen und mittelständischen Mischfutterhersteller in die Lage versetzen, auch unter Nutzung neuer Rohstoffe weiter wirtschaftlich zu produzieren.

Ein weiterer innovativer Beitrag liegt in der systematischen Untersuchung des Potenzials von vollständigen Insekten als Futtermittelkomponente. Damit lassen sich energetisch aufwendige Schritte wie Fraktionierung und Trocknung vermeiden oder vereinfachen und folglich wird die Futtermittelherstellung aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimiert.

## **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 µm) erfolgt mit einer Luftstrahlsiebmaschine.

#### **4.1.2 Feuchtigkeit**

Die Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts erfolgt durch die Bestimmung der Massendifferenz nach vierstündigem Trocknen bei 103 °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 °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 Methodenbuch Band 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 die Kjeldahl-Rohproteinbestimmung erfasst.

### **4.1.7 Lagerungsstabilität**

Hinsichtlich der Lagerung werden die Proben im Klimaschrank verschiedenen Lagerbedingungen ausgesetzt und die sich verändernden Eigenschaften über die Zeit protokolliert. Die Lagerung wird sowohl in offenen als auch in geschlossenen Behältern durchgeführt. Während die offene Lagerung die Wirkung eines konstanten Luftzustandes auf das Material zeigt, wird bei geschlossener Lagerung vorherrschend der Temperatureinfluss erfasst, der Luftanteil ist gegenüber dem Material auf ein Minimum reduziert. Die vorgenommenen Untersuchungen des Materials erfolgt für beide Lagerungsarten in gleicher Weise, so dass ein Vergleich der Ergebnisse ermöglicht wird.

Für die Lagerung werden ein trockenes, ein normal feuchtes (25 °C, 60 % Luftfeuchte) und ein extrem feuchtes Klima (40 °C, 75 % Luftfeuchte) bei gleichbleibender Lagertemperatur gewählt. Zur Feststellung der zeitlichen Änderung des Einlagerungszustandes wird das Material nach verschiedenen Lagerzeiten untersucht. Die maximale Lagerdauer beträgt sechs Monate. Lagerdauer und Häufigkeit der Analysen werden im Bedarfsfall angepasst.

#### 4.1.8 Fließfähigkeit

Für die Untersuchungen mit dem Ringschergerät ist die beim Anscheren wirksame Normalkraft durch eine geeignete Auswahl der aufgelegten Gewichte so zu wählen, dass sie den in der Praxis auf das Schüttgut wirkenden Kräften entspricht.

Bei den vorgenommenen Messungen wird ein Anschergewicht von 8 bis 2,5 kg verwendet, mit denen die im Silo bzw. im Fütterungsautomat vorherrschenden Kräfte simuliert wurden.

Die zu untersuchende Probe befindet sich in einer ringförmigen Scherzelle (s. **Abbildung 2**). Mit einem Druckstab wird über den ringförmigen Deckel der Scherzelle eine Normalkraft  $F_N$  auf die Probe ausgeübt. Dann dreht sich die Scherzelle relativ zum Deckel (Richtung  $\omega$ ), wodurch die Probe zum Fließen (Scherverformung) gezwungen wird. Die dabei in der Probe zu überwindenden Schubspannungen werden mittels Druck- und Zugstab gemessen (Kräfte  $F_1$ ,  $F_2$ ). Mit vorgegebenen Messabläufen, die das Ringschergerät RST-XS.s rechnergesteuert durchführt, werden so die Fließeigenschaften gemessen. Alle Kräfte werden bei der besonderen Konstruktion über Druck- und Zugstangen unmittelbar auf die Scherzelle aufgebracht. Dadurch ist eine eindeutige und sehr genaue Messung ohne den Einfluss z. B. von Reibungskräften möglich.

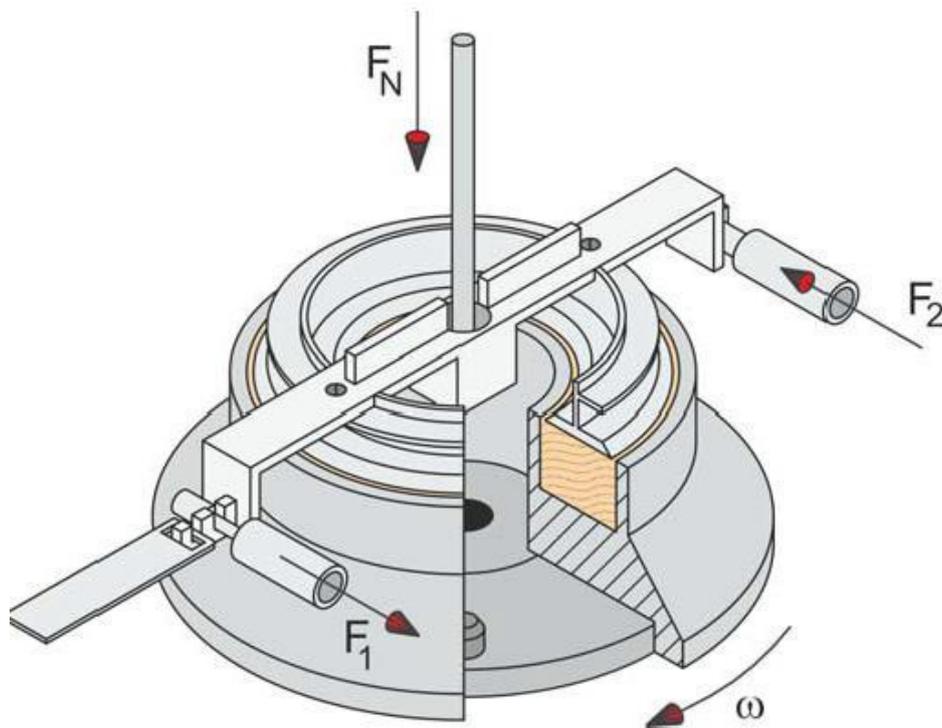


Abbildung 2: Prinzip eines Ringschergerätes [D. Schulze, 2015]

#### **4.1.9 Mischungshomogenität**

Die Untersuchungen der Mischungshomogenität erfolgt mit Hilfe einer feindispersen Farbindikatorsubstanz, die aufgrund ihrer physikalischen Stoffeigenschaften (Partikelgrößenverteilung, Dichte) das Verhalten von kritischen, organischen Zusatzstoffen in der Mischfuttermatrix simuliert [Strauch, 2002].

Im Anschluss an die Homogenisierung im Mischer werden dem Mischgut Einzelproben entnommen und diese auf den Gehalt der Indikatorsubstanz untersucht.

Die Beurteilung der Mischungshomogenität erfolgt auf Grundlage der Varianz des Farbindikators von jeweils 10 Proben, die örtlich gleichmäßig verteilt dem Mischgut entnommen werden.

#### **4.1.10 Bestimmung des Staubungsverhaltens von Schüttgütern**

Nach Einschalten des Gerätes und der Aufwärmphase wird ein Versuchsdurchlauf mit dem gesamten Heubach-Aufbau, inklusive Filter, jedoch ohne Probeneinwaage durchgeführt.

Für den Probendurchlauf wird ein Filter in den Filteraufsatz gelegt, welcher unter den Ionisator (4.5) gestellt wird, um elektrostatischer Aufladung entgegenzuwirken. Währenddessen wird das Probenmaterial in das Staubentwicklungsgefäß (4.2.c) auf 10 mg genau eingewogen. Hierbei muss die Schüttdichte der Substanz beachtet werden. Bis zu einer Schüttdichte von 0,5 g/cm<sup>3</sup> sollte die Einwaage 50 g betragen, darüber 100 g.

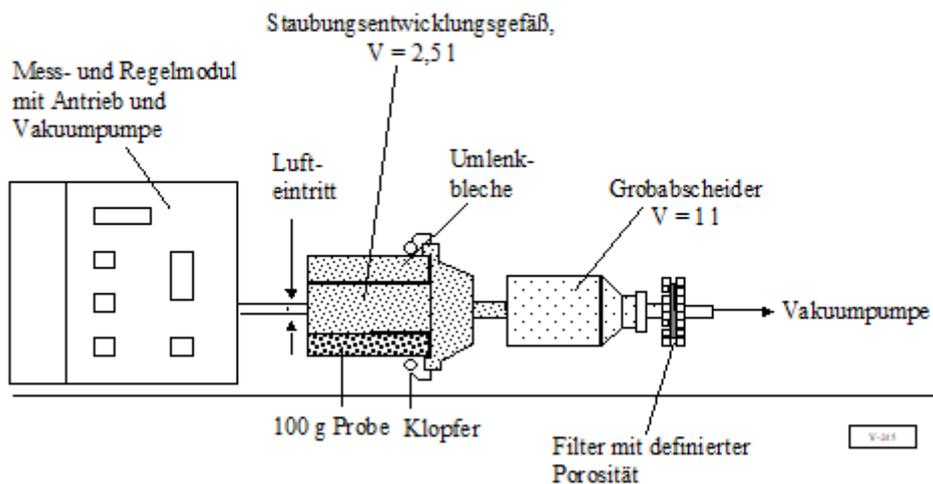
Das Gefäß wird verschlossen und auf die Antriebswelle der Regel- und Antriebseinheit (4.2.a) gesteckt. Der Filteraufsatz samt Filter wird jetzt auf der Analysenwaage (4.1) gewogen.

Für die Methode Standard Typ I (s. o.) wird der Grobabscheider (4.2.d) direkt mit dem Staubentwicklungsgefäß (4.2.c) verbunden, darauf folgt der Filteraufsatz (4.4) und der Schlauch der Vakuumpumpe.

Nun wird das Programm Standard Typ I mit 20 l/min Luftdurchsatz und einer Drehzahl von 30 U/min für 5 Minuten gestartet.

Nach dem Vorgang wird der Filteraufsatz (4.4) mit dem Filter (4.3) auf der Analysenwaage (4.1) ausgewogen.

- 4.1 Analysenwaage Kern ABS 220-4 AG, Balingen-Frommern
- 4.2 Heubach-Dustmeter, Modell 2007, bestehend aus
  - a) Regel- und Antriebseinheit (mit Luftmessung, Antriebsmotor, Vakuum-Druck-Pumpe),
  - b) Ausleger mit Haltern für d) und e),
  - c) Staubentwicklungsgefäß,
  - d) Grobabscheider (Volumen 1l),
  - e) Filtrationsgefäß.
- 4.3 Glasfaser-Rundfilter MN 85/70 BF, Ø 50 mm, Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, Düren
- 4.4 Filteraufsatz
- 4.5 Ionisator YBI-01, Kern

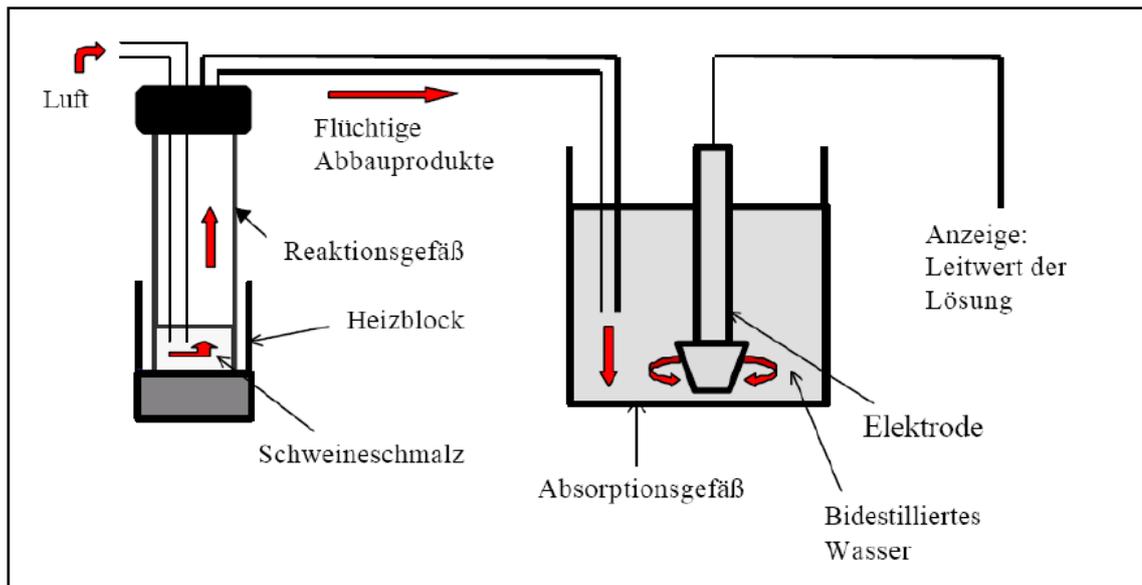


**Abbildung 3: Schematische Darstellung der Prüfeinrichtung für das Verfahren mit rotierender Trommel**

#### 4.1.11 Bestimmung der Lagerungsstabilität der Lipide

Um den Verderb oder Frischezustand von Lipiden zu bestimmen, können verschiedene Verfahren eingesetzt werden. Zum einen können organoleptische Prüfungen vorgenommen werden, zum anderen können auch Kennzahlen (Peroxidzahl, Carbonylzahl, Thiobarbitursäurezahl) für Umwandlungs- und Abbauprodukte während Oxidation bestimmt werden. Die genannten Verfahren sind abhängig von der Zeit und können nicht verkürzt werden.

Um schneller aussagefähige Ergebnisse zu erhalten, kann man die Ranzimat-Methode wählen. Bei dieser Methode wird durch das Einwirken der Temperatur und einen gleichmäßigen Luftstrom die Oxidationszeit verkürzt. Die entstehenden flüchtigen Abbauprodukte werden in ein Auffanggefäß geleitet und ändern dadurch die Leitfähigkeit (**Abbildung 4**).



**Abbildung 4: Prinzip der Arbeitsweise eines Ranzimaten [A. K. Agarwal, 2011]**

Auf diese Weise konnten verschiedene Proben unterschiedlicher Herkunft unter den gleichen Bedingungen zeitnah miteinander verglichen werden.

## 4.2 Herstellen von Mischfutter

### 4.2.1 Pelletieren

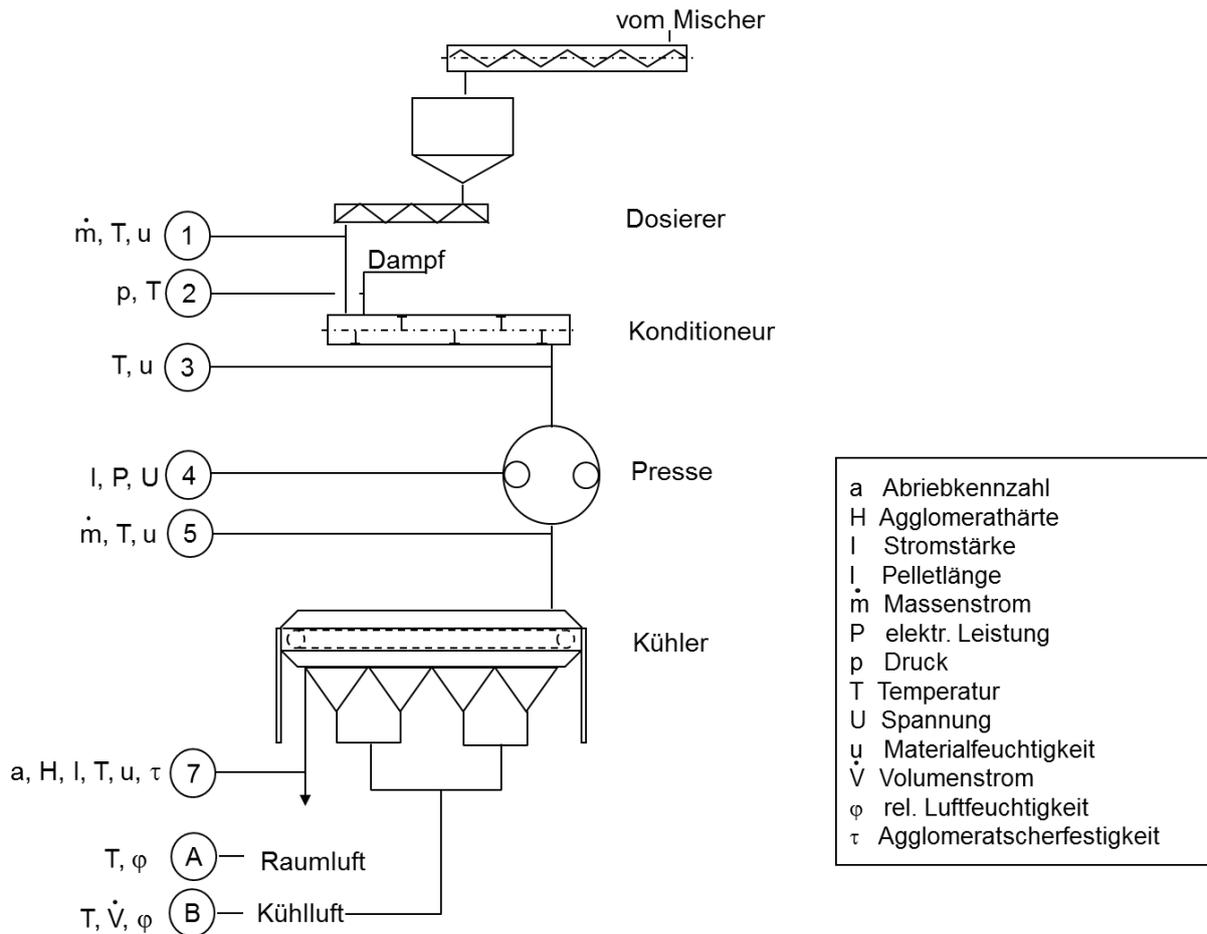
Das Pelletieren umfasst die drei Verfahrensstufen Konditionieren, Verdichten und Kühlen. Mit Blick auf die Zielstellung des Forschungsantrages beschränken sich die experimentellen Untersuchungen auf die in Deutschland für die Herstellung von Schweinemast- und Broilerfutter übliche Kombination aus Kurzzeitkonditionierung, Verdichtung in Kollergangpressen und Kühlung der Pellets zur Sicherung der Lagerfähigkeit (**Abbildung 5**).

Die Kurzzeitkonditionierung dient der Vorbereitung und Anpassung von mehlartigem 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. Dabei ergibt sich die resultierende Materialtemperatur und -feuchtigkeit aus der Menge und dem Zustand des zugegebenen Dampfes. Beste Ergebnisse werden durch Eintrag von Sattdampf erzielt.

Das konventionelle Verdichten des konditionierten Futters durch Pressen erfolgt auf Ring- oder Flachmatrizen. Beim Pressvorgang selbst wird das konditionierte Mischfutter zwischen zwei bis drei Druckrollen (Koller) und einen Ring mit radialen Bohrungen bzw. einer Scheibe mit senkrechten Bohrungen, der Matrize (Pressform), geführt. Das Futter wird von den Kollern eingezogen und verdichtet. Der aus der Matrize tretende Strang wird auf Pelletlänge abgeschnitten.

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.

Grundsätzlich ermöglichen feinstrukturierte Futtermischungen höhere Pressendurchsätze und 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 größere Partikel können in feineren Futterstrukturen zu höheren Energieeinträgen und verschlechterten Abriebeigenschaften führen [Löwe et al. 2011, Bösch et al. 2014].



**Abbildung 5: Schematische Darstellung des konventionellen Pelletierens mit Kurzzeitkonditionierung einschließlich relevanter Mess- und Probenahmestellen**

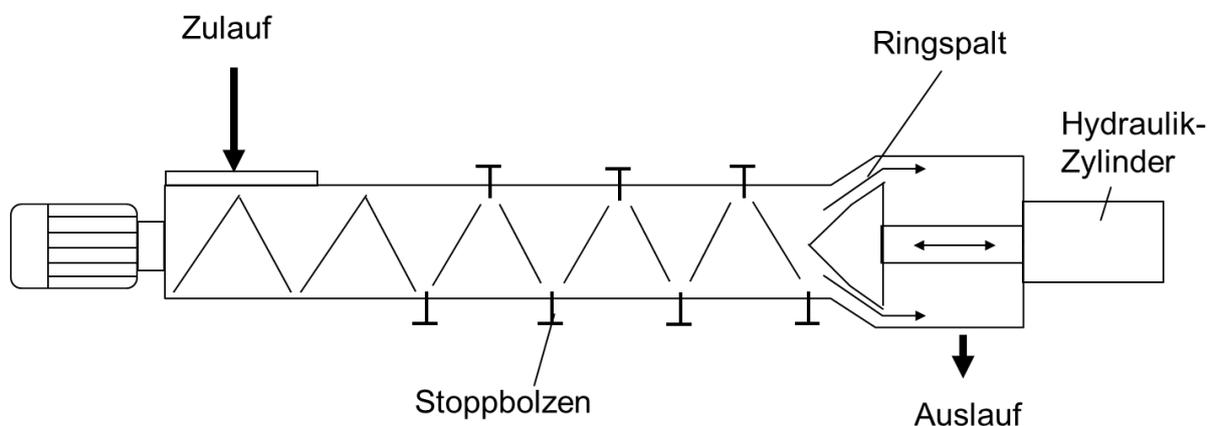
#### 4.2.2 Expandieren

Expander werden seit fast 20 Jahren für die Herstellung von Futter für Nutztiere in der Futtermittelindustrie eingesetzt. Die Behandlungsparameter Feuchtigkeit, Temperatur, Druck und elektromechanischer Energieeintrag beeinflussen die nutritive und physikalische Charakteristik des Futters [Kersten et al. 2003].

Der Expander, siehe **Abbildung 6**, besteht aus einem dickwandigen Mischrohr, das in einzelne Segmente aufgeteilt ist. Im Inneren des Rohres befindet sich eine Schnecke, die das

Futter in den Verdichtungsbereich transportiert. Auf der Expanderwelle sind Paddel verschiedener Geometrie und damit mit unterschiedlicher Wirkung montiert. In das Rohr ragen sogenannte Stoppbolzen hinein, die den Durchlauf des Futters bremsen. Paddel und Stoppschrauben bewirken bei der Durchförderung des Produktes einen Misch-, Scher- und Kneteffekt. Am Auslauf ist ein verstellbarer Kegel angebracht, der mit dem Rohrende einen Ringspalt bildet. Durch die Verstellung des Kegels sind der Druck, die Intensität der Knetarbeit, die Produkterwärmung und die Energieaufnahme zu steuern. In Richtung des Auslaufs baut sich ein Druck auf, der durch die Auslaufgeometrie beeinflussbar ist [Kersten et al. 2003; Lucht 2007].

Generell arbeiten Expander mit Drücken zwischen 20 und 40 bar und Temperaturen von ca. 80-120 °C. Die Durchlaufzeit beträgt wenige Sekunden. Am Auslass fällt der Druck im Material sofort schlagartig auf den Umgebungsdruck ab, was die Expansion bewirkt, wobei ein Großteil des zugesetzten Wassers spontan verdampft (Flash-Verdampfung). Infolge dieser Wasserverdampfung sinkt die Produkttemperatur schlagartig.



**Abbildung 6: Funktionsprinzip Ringspalt-Expander (IFF-Forschungsinstitut).**

Zur Sicherung des gewünschten Behandlungserfolgs sollte zuvor eine Konditionierung des Futters in einem Durchlaufmischer unter Zugabe von Sattdampf erfolgen. Sie dient der notwendigen Erhöhung der Materialfeuchtigkeit auf über 17 % und bewirkt durch den hydrothermischen Energieeintrag zudem eine Verringerung des mechanischen Energiebedarfs unter Beibehaltung der angestrebten stoffverändernden Wirkung. Der Gesamtenergiebedarf, der hydrothermische Energieeintrag im Expander, ist die zentrale Führungsgröße für die Prozesssteuerung.

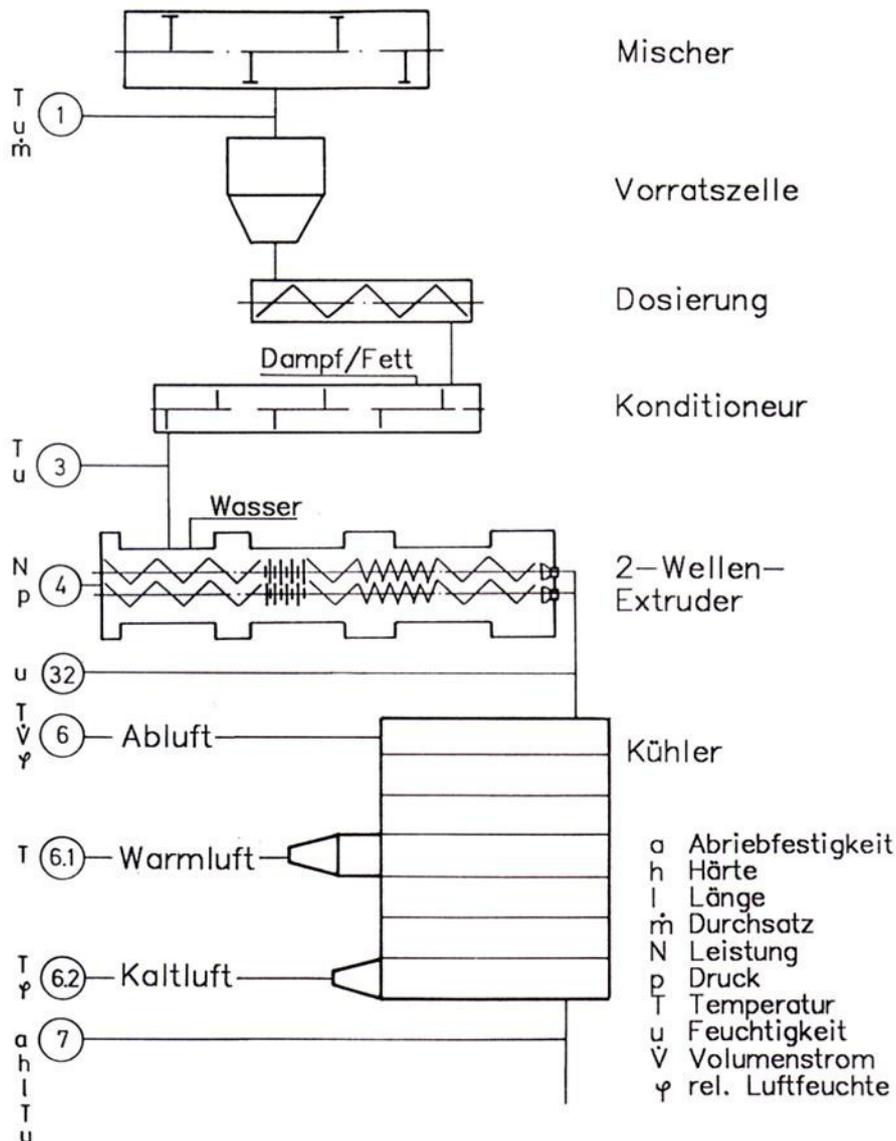
Der Expander kann eigenständig („stand-alone“) zur Produktion eines unpelletierten Endproduktes (Expandat) oder als zusätzlicher Druckkonditionierer vor der Pelletpresse eingesetzt werden, wobei im letzteren Fall das Produkt eine definierte Formgebung erhält.

#### 4.2.3 Extrudieren

Der Extrusionsprozess, siehe **Abbildung 7**, dient überwiegend der Herstellung hochwertiger Spezialfutter, beispielsweise für früh abgesetzte Ferkel, Fische oder Heimtiernahrung. Die Materialfeuchtigkeit wird auf 20-30 % angehoben, um ausreichende Effekte bezüglich Stärkeaufschluss, Hygienisierung, Formgebung und eine sichere Prozessführung zu gewährleisten.

Die Zugabe der Feuchtigkeit erfolgt in Form von max. 5 % Sattdampf während der Vorkonditionierung und führt zu einer entsprechenden Temperaturerhöhung. Sie kann auch durch direkte Zugabe von Wasser in den Extruder realisiert werden. Die Materialtemperatur erhöht

sich durch Energiedissipation im Extruder auf max. 150 °C. Im Extruderkopf entstehen in Abhängigkeit von der Schneckenkonfiguration Drücke von etwa 30 bis max. 100 bar. Dadurch wird das Material verdichtet, bevor es durch eine formgebende Düse ausgepresst und von einem umlaufenden Messer abgeschnitten wird. In Folge der Expansion beim Austritt aus den Düsen kommt es zu einer Flash-Verdampfung der Feuchtigkeit. Das verdampfende Wasser entzieht dem Extrudat auf diese Weise Wärme, so dass diese sich auf Temperaturen um ca. 100 °C abkühlen.



**Abbildung 7: Prinzipskizze des Extrusionsprozesses**

Die aus den Düsen austretenden Extrudate haben, bedingt durch die Homogenisierung im Extruder, im Gegensatz zu pelletiertem Mischfutter eine über den Querschnitt gleichmäßige Temperaturverteilung.

Trotz des Wärme- und Feuchtigkeitsverlustes bei der Flash-Verdampfung muss im Allgemeinen ein Teil der zugeführten Wärme und Feuchtigkeit in einem nachgeschalteten Trocknungs- und Kühlprozess wieder entzogen werden.

## **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 Bandtrockner**

Für die Versuche zur Bandtrocknung wurde eine Eigenkonstruktion der Firma Amandus Kahl GmbH & Co. KG 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.

## **4.5 Fütterungsversuche**

Die Prüfung der jeweiligen tierartsspezifischen Testdiäten erfolgte überwiegend durch sogenannte Wachstumsstudien, in denen Körpermasseentwicklung und Futterverzehr der Tiergruppen (Fische je Becken, Masthähnchen je Box in Bodenhaltung) bzw. Einzeltiere (Ferkel) erfasst und daraus Parameter der Futterverwertung (Futtermittelverbrauch, FCR) abgeleitet wurden. Ergänzend wurden Körpernährstoffansatzmessungen vorgenommen (Fische, Masthähnchen), die die Durchführung aufwändiger Ganzkörperanalysen von repräsentativen Einzeltieren (Masthähnchen) bzw. repräsentativen Sammelproben (Fische) zu Versuchsbeginn und Versuchsende erforderten. Mit diesen Informationen war die Berechnung von Nährstoffansatzwerten möglich, die wiederum, mit der jeweiligen Nährstoffaufnahme ins Verhältnis gesetzt, Kennzahlen zur Nährstoffverwertung lieferten. Dieses Vorgehen war insbesondere für die Proteinfraktion vorgesehen und lieferte Aussagen zum Wirkungsgrad der Proteinfraktion des Futters. Da derartige Parameter (wie Physiologischer Proteinnutzwert oder Net Protein Utilization, NPU) in ihrer Höhe von der Proteinaufnahme beeinflusst werden, kam generell eine Standardisierung dieser Parameter mit Hilfe des Göttinger N-Verwertungsmodells zur Anwendung,

die diesen Einflussfaktor auf dem Wege der Modellierung der Zusammenhänge ausschaltet. Somit kann eine uneingeschränkte direkte Vergleichbarkeit dieser Parameter sichergestellt werden.

#### 4.5.1 Bewertung der Futtermischungen

Als klassische Maßstäbe für die Bewertung der Futtermischungen anhand zootechnischer Parameter dienten die spezifische Wachstumsrate (Specific Growth Rate, SGR) und die Futterverwertung (Feed Conversion Ratio, FCR). Basierend auf den Ergebnissen der Ansatzmessungen (Ganzkörperanalytik) wurde zudem die Nettoproteinverwertung (NPU = Net Protein Utilization) ermittelt. Dieser Parameter charakterisiert die Gesamtverwertung des Futterproteins der eingesetzten Mischungen [Liebert, 2017]. Die mittels Modellierung durchgeführte Standardisierung des NPU ( $NPU_{std}$ ) erfolgte mit dem Ziel, Unterschiede hinsichtlich der N-Aufnahme innerhalb der Versuchsgruppen im Hinblick auf einen zuverlässigen Vergleich der Diäten auszugleichen. Dieser Schritt sichert eine bestmögliche Vergleichbarkeit der Parameter für Proteinverwertung bzw. -qualität. Die genannten Parameter wurden wie folgt kalkuliert:

$$SGR [\%] = \frac{\ln_{Endlebensmasse} - \ln_{Startlebensmasse}}{Anzahl_{Versuchstage}} * 100$$

$$FCR [g/g] = \frac{Futteraufnahme}{Lebensmassezunahme}$$

$$NPU [\%] = \frac{NR_{maxT} * (1 - e^{-b*N-Aufnahme})}{N-aufnahme (g)} * 100$$

$$b = \frac{\ln_{NR_{maxT}} - \ln_{NR_{maxT}-NR}}{N-aufnahme}$$

$$NR [mg/LM_{kg}^{0,67} /d] = ND + NMR$$

$$ND [mg/LM_{kg}^{0,67} /d] = N-Aufnahme - N-Ausscheidung$$

mit  $NMR = 70 \text{ mg/LM}_{kg}^{0,67}/d$  und  $NR_{maxT} = 388 \text{ mg/LM}_{kg}^{0,67}/d$  [Liebert et al., 2006]

#### 4.5.2 Bestimmung des Aminosäurespektrums

Die Bestimmung des Aminosäurespektrums (außer Tryptophan) erfolgte mittels Ionenaustauschchromatographie nach der Methode 4.11.1 unter Verwendung einer sauren Hydrolyse mit 6 N Salzsäure zur Freisetzung der Aminosäuren aus den einzelnen Peptidketten. Da die Aminosäuren Methionin und Cystein bei diesem Hydrolyseschritt zerstört werden, muss der Hydrolyse ein Derivatisierungsschritt vorangestellt werden, bei dem unter Verwendung von Perameisensäure die hydrolysestabilen Verbindungen Methioninsulfon und Cysteinsäure entstehen. Die chromatographische Trennung der Aminosäuren erfolgte mittels Aminosäureanalytator (Biochrom 30, Fa. Biochrom Ltd.) durch Elution mehrerer Pufferlösungen verschiedenen pH-Wertes unter Verwendung einer PEEK-Trennsäule für Hydrolysate.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Zu Beginn des Gesamtprojektes wurde an der Hochschule Bremerhaven (HSB) eine Insektenmast etabliert. Die Bewertung des Masterfolges wurde in diesem Teilprojekt von den Forschungsstellen IFF und UGO anhand der Qualität des neu gewonnenen Futtermittels vorgenommen. Die Untersuchungen zur Bewertung der insektenbasierten Futtermittel wurden anhand der folgenden Arbeitsschritte (AS) durchgeführt:

### 5.1 AS 1: Aufbereitung der Insekten für die Futtermittelherstellung (IFF, HSB)

Für die spätere Verwendung wurde das proteinreiche Insektenmaterial einer Aufbereitung unterzogen. Dazu zählen Zerkleinerung, Fraktionierung, Trocknung sowie die Vorverarbeitung des Produktes zu einem Futtermittel. Die Fraktionierung und Aufbereitung der Insekten ermöglichte eine Vereinfachung der Rezepturgestaltung für die Futterherstellung und die Fütterungsversuche (TP 1). Diese Aufgabe wurde mit „Bordmitteln“ erfüllt (über vorhandene institutseigene Geräte bei HSB und IFF sowie durch die Mitwirkung des Projektbegleitenden Ausschusses). An dieser Stelle wurde auf etablierte Verfahren zurückgegriffen. Zum einen wurde auf das Verfahren aus der Fischmehlverarbeitung zurückgegriffen (Nassaufbereitung) und zum anderen wurde ein etabliertes Verfahren aus der Ölsaatenindustrie verwendet (Trockenaufbereitung). Grundsätzlich erweisen sich deren verfahrenstechnische Abläufe für die Übertragung auf die Insektenaufbereitung als geeignet, mussten jedoch an das spezifische Prozessverhalten des Insektenmaterials angepasst werden.

#### 5.1.1 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 für verschiedene Trocknungsverfahren von Mehlkäferlarven mit unterschiedlichen Parametern für die Temperatur und die Trocknungsdauer untersucht. Ziel der untersuchten Verfahren war, ein lagerungsstabiles 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 8** 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 lagerungsstabiles Produkt zu erhalten (Feuchte < 7 %, Wasseraktivität < 0,6).

Die Probenaufbereitung 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 8: Darstellung des Trocknungsprozesses mit den verschiedenen Trocknungsverfahren.**

Die prozessierten Larven weisen nur geringe Unterschiede hinsichtlich Protein-, Fett- und Fasergehalt auf (siehe **Tabelle 1**). 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 1: 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 [ $\mu\text{g/ml}$ ]
<b>Stikkenofen</b>	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>
<b>Vakuumofen</b>	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>
<b>Gefriertrocknung</b>	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>
<b>Mikrowelle</b>	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>
<b>Wirbelschicht</b>	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>
<b>Frische Larven</b>	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 9** 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 9: 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-Versuches 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 an 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 trocknende 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 2** 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 2: 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
Rohprotein [%]	53,4 ± 0,42	56,4 ± 0,21	55,7 ± 0,28
Rohfett [%]	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 Weender Analyse genau untersucht.

Um Produkte schonend zu trocknen, wurden 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 Lagerungsbedingungen hat sich jedoch gezeigt, dass diese Restfeuchte von 10,9 % hinsichtlich des Verderbs als kritisch anzusehen ist. Abhängig von der Feuchte und dem damit verbundenen a<sub>w</sub>-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 2 gibt es einen deutlichen Unterschied zwischen dem Versuch mit 80 °C/100 °C und einer Verweilzeit von 70 Minuten verglichen mit dem Versuch

mit 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.

Weitere Ergebnisse, welche zu zukünftigen Trocknungsstrategien beitragen können, werden in dem Schlussbericht 27 LN ausgeführt und diskutiert.

### 5.1.2 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 aus der Reduzierung des Fettgehaltes im Insektenmehl resultiert, ist der steigende Proteingehalt im Insektenmehl auf Werte von über 70 % Rohproteingehalt (**Tabelle 3**). 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].

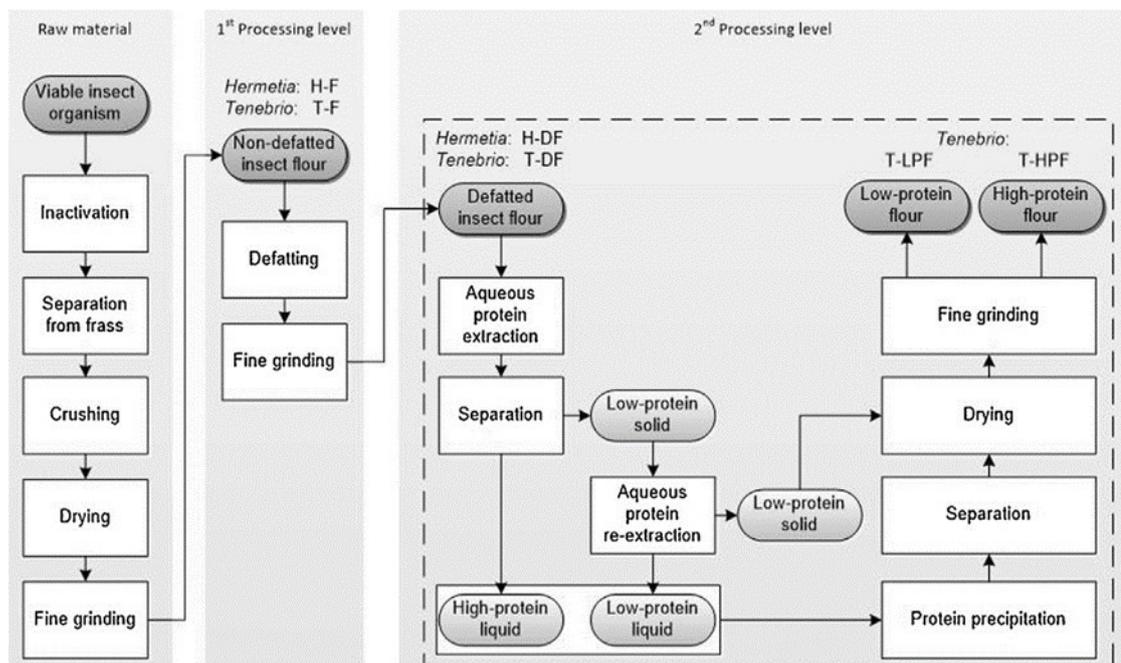
Chitin wiederum ist in der Natur nicht nur in den Panzern und Schalen von Insekten sondern auch Krebstieren sowie als Gerüststoff in Pilzen weit verbreitet. Es ist das zweithäufigste Polysaccharid nach Cellulose und kann in Chitosan mit einer höheren Wertschöpfung umgewandelt werden, daher gibt es unter den Proteinmehlen aus Insekten auch Produkte die frei von Chitin sind (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 Aufbereitung dar (**Abbildung 10**).

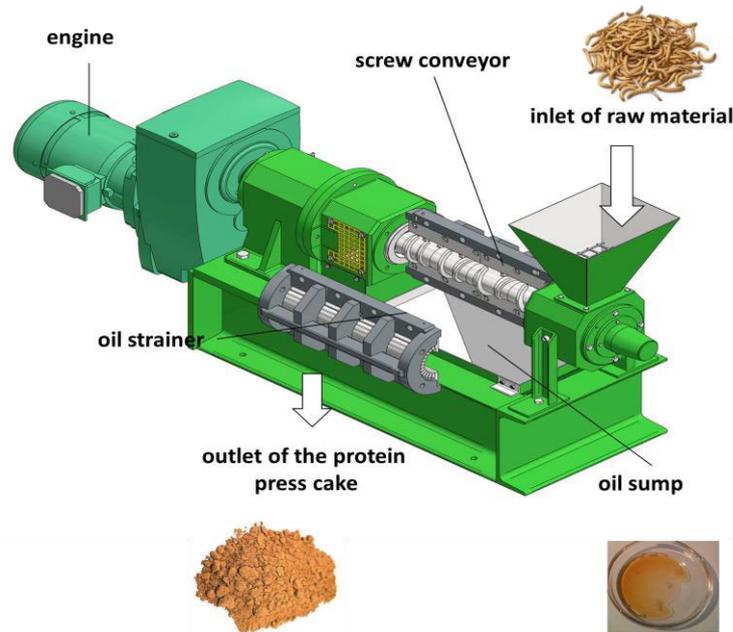


**Abbildung 10: Schematische Darstellung der Verarbeitung und Fraktionierung von Larven von *T. molitor* und *H. illucens* [Bußler et al. 2013]**

Inhaltlich wurden die proteinogenen Eigenschaften der Insekten nach der Aufbereitung 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].

### 5.1.2.1 Trockenaufbereitung der Insekten

Ein anderes lösemittelfreies Verfahren, welches in diesem Projekt untersucht wurde, ist die Verwendung einer Seiherschneckenpresse (**Abbildung 11**) [Hermetia, 2011, Piofczyk, T., 2015], die auch in der Ölsaatenverarbeitenden Industrie, z. B. zum Entölen von Soja oder Raps eingesetzt wird.

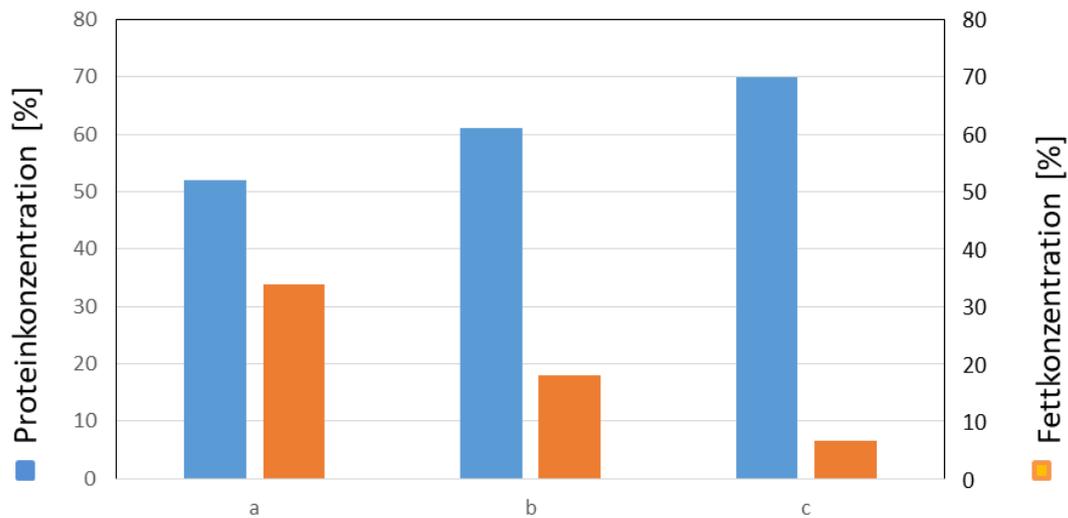


**Abbildung 11: Schematische Darstellung des Seiherschneckenprozesses zur Proteinextraktion von Mehlkäferlarven in Presskuchen (Reinartz GmbH) und Lipid (*Tenebrio molitor*)**

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 Seiherschnecke 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 12**).

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



**Abbildung 12:** Zusammensetzung von *Tenebrio molitor* a) nach dem Trocknen und nach dem Abpressen des Fettes mittels Schneckenpresse durch zwei unterschiedliche Presskopfkonfigurationen b) mittels Konusscheibe c) mittels Pelletscheibe.

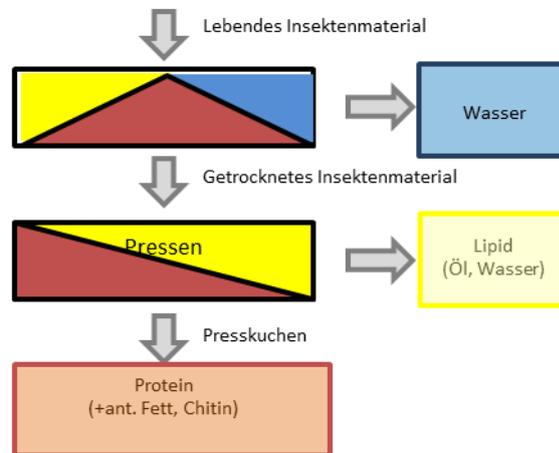
In **Tabelle 3** sind Analysedaten von *Tenebrio molitor* Larven nach der Trocknung und nach dem Seiherschneckenpressen vergleichend gegenüber Fischmehl dargestellt.

**Tabelle 3:** Weender 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
Rohfett [%]	10,1 $\pm$ 0,00	34,9 $\pm$ 0,07	6,5 $\pm$ 0,00

Die Daten der Tabelle 3 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 13** ist der Gesamtprozess der Trockenaufbereitung im Überblick dargestellt.

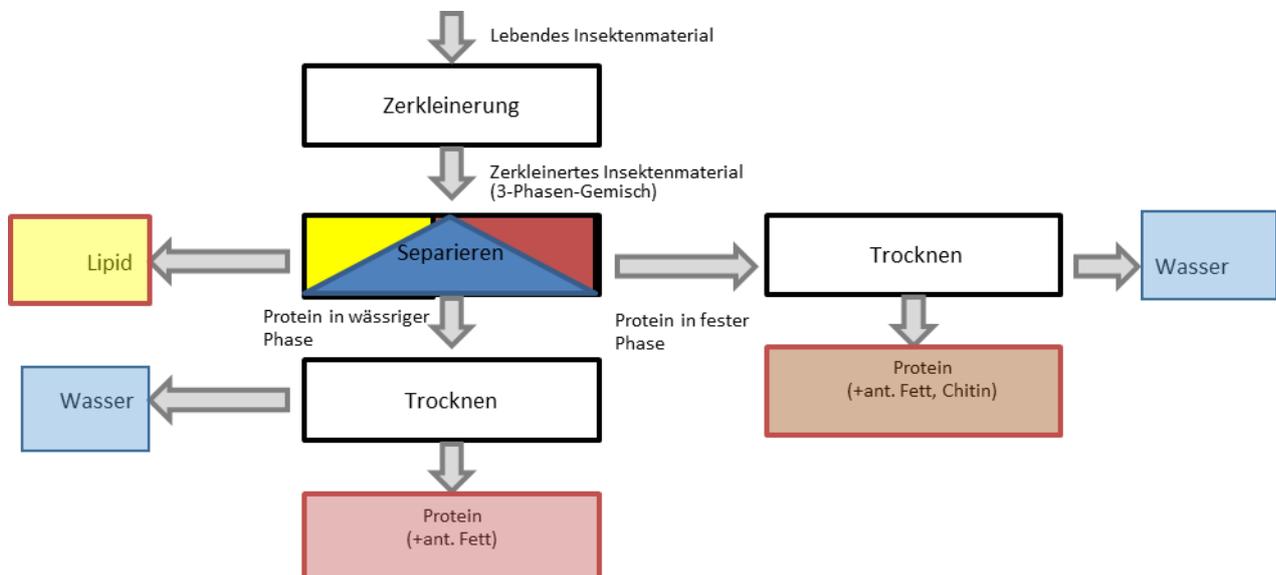


**Abbildung 13: Schema einer Trockenaufbereitung für Insekten**

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

### 5.1.2.2 Nassaufbereitung der Insekten

Gegensätzlich zur Trockenaufbereitung werden Insekten zu Proteinmehl und separiertem Fett nass aufbereitet. In der **Abbildung 14** ist schematisch der Prozessablauf abgebildet.



**Abbildung 14: 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].

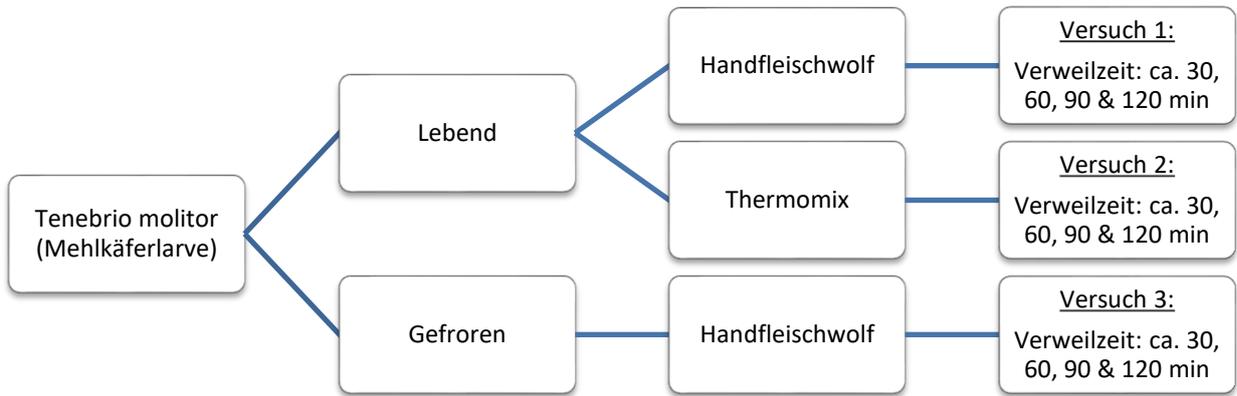
Die Ergebnisse der Zentrifugationsversuche sind in der **Tabelle 4** zusammengestellt.

**Tabelle 4: 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

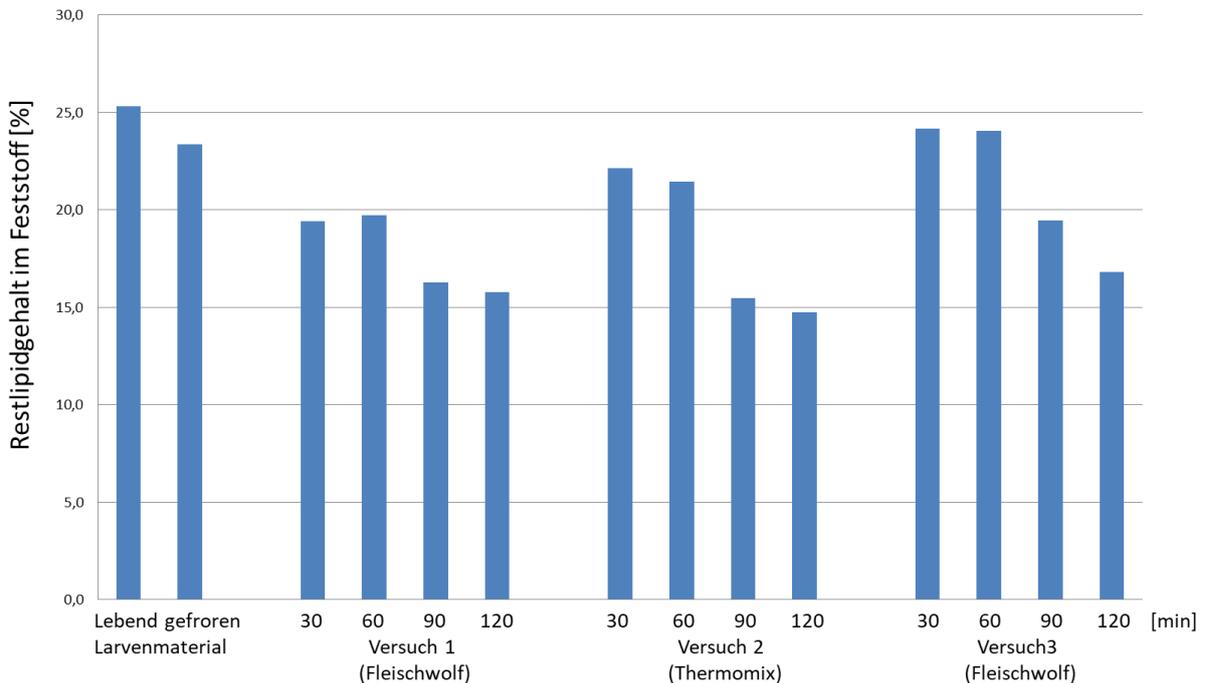
Es wurden drei verschiedene Prozesse miteinander verglichen und ausgewertet. In der ersten Variante wurde lebendes Larvenmaterial mittels kochendem Wasser (Verweilzeit 3 Minuten) abgetötet und dann hinsichtlich der Partikelgröße zum einen mit dem Fleischwolf und zum anderen mit dem Thermomix zerkleinert.

In der zweiten Variante wurden die zuvor eingefrorenen Larven ebenfalls mittels Fleischwolf zerkleinert. Auf diese Weise haben sich mehrere Zwischenprodukte ergeben, welche bei variierenden Verweilzeiten des zerkleinerten Materials hinsichtlich ihrer Trennbarkeit untersucht und analysiert wurden (**Abbildung 15**).



**Abbildung 15: Überblick über die Versuchseinstellungen zur Nassaufbereitung der Insekten**

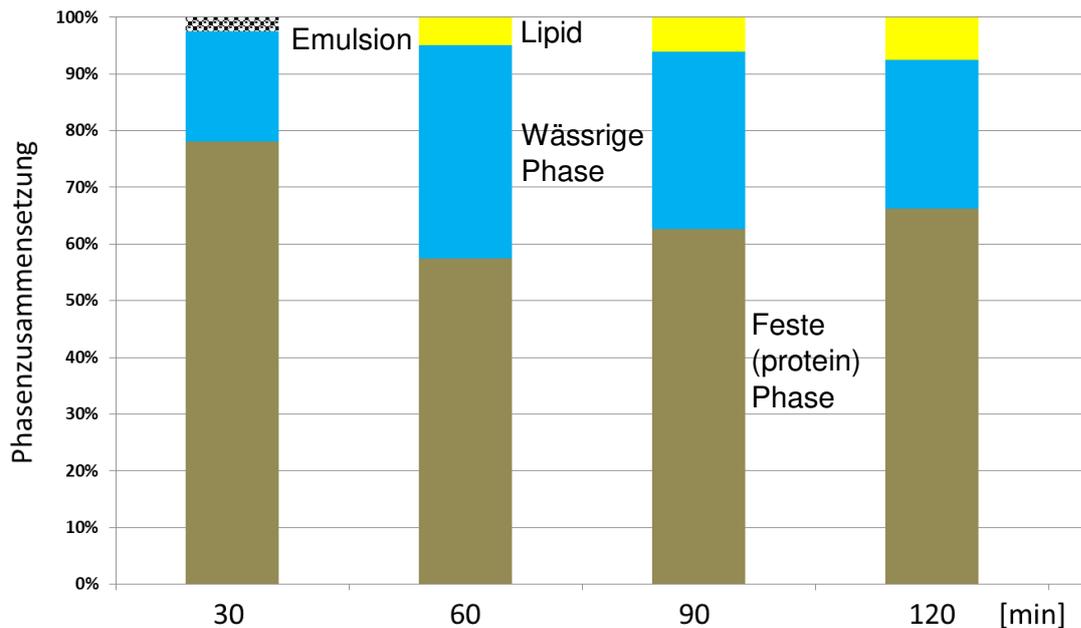
Der **Abbildung 16** kann entnommen werden, dass sich der Anteil des Fettes im Feststoff mit zunehmender Verweilzeit des zerkleinerten Materials im Rührbehälter reduziert und auf diese Weise im Überstand ansteigt. Weiterhin haben sich in den Versuchen zwei und drei Emulsionen mit unterschiedlicher Ausprägung gebildet.



**Abbildung 16: 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 17**), sich dieser Effekt aber mit zunehmender Verweilzeit wieder abbaut.



**Abbildung 17: Darstellung der Phasenzusammensetzung der mittels Thermomix zerkleinerten Mehlkäferlarven 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.

### 5.1.2.3 Fettsäurezusammensetzung und Fettverderb (UGO)

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 5** ist die Fettsäurezusammensetzung der Mehlkäferlarven in Abhängigkeit von dem Trocknungsverfahren aufgeführt. Dargestellt sind Mittelwerte und SEM aus drei unabhängigen Bestimmungen.

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

**Tabelle 5: 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>

Unterschiede zeigten sich auch im Fettverderb (Frischezustand), der ebenfalls abhängig von der Fettsäurezusammensetzung sowie von der Aufbereitungsmethode des gesamten Lipides ist.

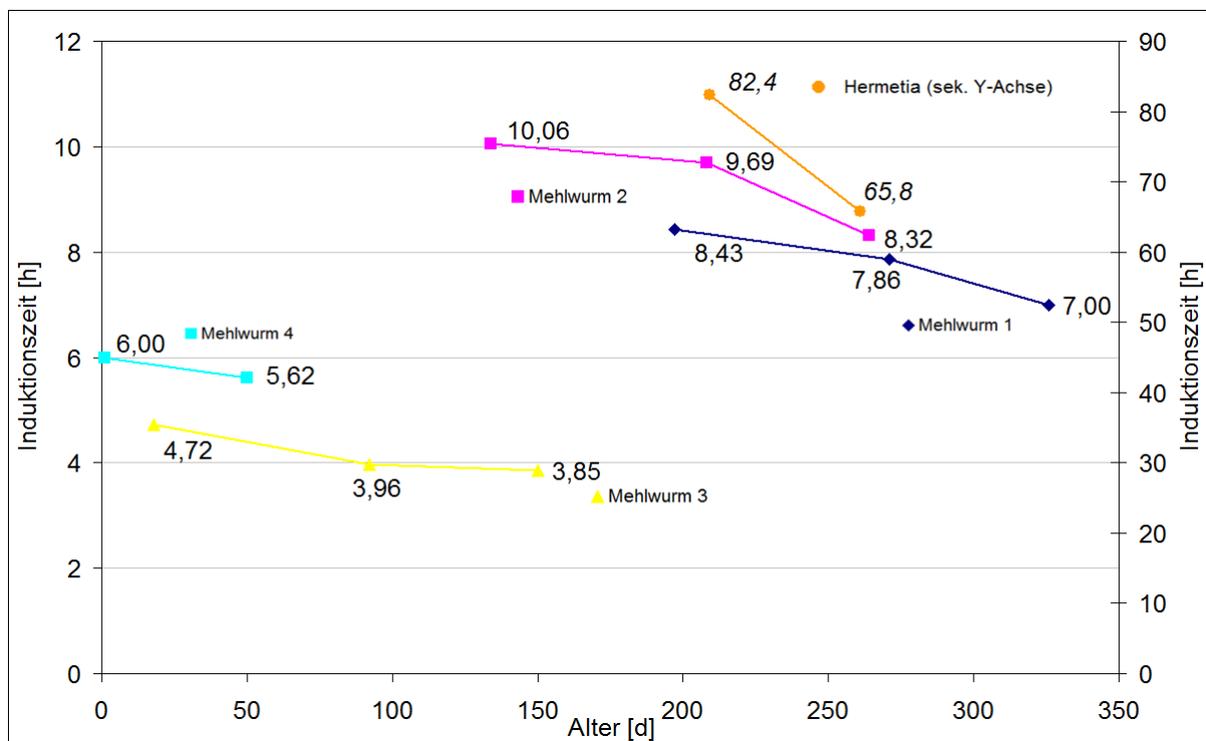
Um den Verderb oder Frischezustand von Lipiden bestimmen zu können, werden verschiedene Verfahren eingesetzt. Zum einen können organoleptische Prüfungen vorgenommen werden, zum anderen können auch Kennzahlen (Peroxidzahl, Carbonylzahl, Thiobarbitursäurezahl) für Umwandlungs- und Abbauprodukte während Oxidation bestimmt werden. Die genannten Verfahren sind abhängig von der Zeit und können nicht verkürzt werden. Im Gegensatz dazu kann mittels Ranzimat-Methode mit verkürztem Zeitaufwand eine Kennzahl ermittelt werden, welche eine Aussage zur Lagerungsstabilität (Oxidationsverhalten) trifft.

Für die Untersuchungen in diesem Projekt wurde der Ranzimat-Test mit dem Ranzimat 679 (Fa. Metrohm) bei 120 °C und 20 L/h Luftdurchfluss durchgeführt. Es wurde die Zeitspanne (Induktionszeit) gemessen, bei der die ersten Oxidationsprodukte als Veränderung der Leitfähigkeit gemessen werden konnten. Das bedeutet, je höher die Induktionszeit, desto höher ist die oxidative Stabilität (Lagerungsstabilität).

Lipide mit einem hohen Gehalt an ungesättigten Fettsäuren gehen leichter eine Verbindung mit Sauerstoff ein und bilden freie Radikale. Daraus lässt sich schließen, dass pflanzliche Öle mit einem hohen Anteil an ungesättigten Fettsäuren eine niedrige Oxidationsstabilität aufweisen [Bertrand, 2014].

Auf diese Weise konnten innerhalb des Projektes verschiedene Proben unterschiedlicher Herkunft unter den gleichen Bedingungen zeitnah miteinander verglichen werden.

In der **Abbildung 18** und der **Tabelle 6** ist ein Vergleich der Lipide von Proben verschiedener Herkunft der Mehlkäferlarve verglichen mit dem Lipid der Larven der schwarzen Soldatenfliege dargestellt.



**Abbildung 18: Darstellung der Induktionszeit in Abhängigkeit vom Alter der Probe (Lagerungsstabilität)**

Der Abbildung 18 und der dazugehörigen Tabelle 6 ist zu entnehmen, dass die Lipidprobe, welche über das Nassverfahren gewonnen wurde (Mehlwurm 1), die kürzeste Induktionszeit hatte. Dieses Verhalten kann man auch bei Pflanzenölen vorfinden. In der Tabelle 6 sind Sojaöl, Sonnenblumenöl und Rapsöl vergleichend mit aufgelistet. Zusätzlich wurden in der Tabelle 6 Literaturwerte von kaltgepresstem Rapsöl, welches mechanisch abgepresst wurde, und raffiniertem Rapsöl gegenüber gestellt. Das kaltgepresste Rapsöl hat ähnliche wie die Lipidprobe vom Nassverfahren weniger temperaturintensive Prozessschritte durchlaufen als das raffinierte Pflanzenmaterial.

**Tabelle 6: Ergebnisse der Ranzimat-Untersuchungen der verschiedenen abgepressten Lipide der Mehlkäferlarven im Vergleich mit anderen Fetten und Ölen in Abhängigkeit der Lagerdauer**

Produkte		Alter [d]	Induktionszeit [h]
Produkt	Mehlwurmfett-1. Charge	197	8,43
Herst./Lieferdatum	27.04.2017	271	7,86
bei RT	flüssig	326	7,00
Produkt	Mehlwurmfett-2. Charge	134	10,06
Herst./Lieferdatum	29.06.2017	208	9,69
bei RT	flüssig	264	8,32
Produkt	Mehlwurmfett-3-Öl- phase	18	4,72
Herst./Lieferdatum	23.10.2017	92	3,96
bei RT	flüssig	150	3,85
Produkt	Mehlwurmfett-4	1	6,00
Herst./Lieferdatum	30.01.2018	50	5,62
bei RT	flüssig		
Produkt	Hermetiafett	209	82,35
Herst./Lieferdatum	28.06.2017	261	65,77
bei RT	fest		
Produkt	Rapsöl	19	6,22
Herst./Lieferdatum	28.12.2017	84	5,24
bei RT	flüssig		
Rapsöl (raffiniert)	flüssig		7,0-8,5 [Bertrand, 2004]
Rapsöl (kaltgepresst)	flüssig		3,0-5,5 [Bertrand, 2004]
Produkt	Sonnenblumenöl	22	2,88
Herst./Lieferdatum	19.10.2017	89	2,32
bei RT	flüssig	148	2,06
Produkt	Sojaöl	65	5,31
Herst./Lieferdatum	06.09.2017	191	4,61
bei RT	flüssig		

Beim Vergleich der Induktionszeiten der Lipide von *Tenebrio molitor* Larven mit dem Lipid der *Hermetia illucens* wird deutlich, dass die Induktionszeit und damit die Lagerungsstabilität des Lipides der *Hermetia illucens* Probe viel größer ist.

Das Lipid der Larven der *Hermetia illucens* ist zum einen anders zusammengesetzt [WO2013/191548A1, 2013] und wurde durch das Trockenverfahren gewonnen, zum anderen

enthält das Trockenverfahren sehr temperaturintensive Prozessschritte. Beide Punkte führen dazu, dass die Induktionszeit sehr viel größer ist, als bei den Lipidproben des Mehlwurmes.

#### 5.1.2.4 Aminosäure-Zusammensetzung des Proteinträgers (UGO)

Ein weiterer Parameter, welcher sich in Abhängigkeit zur thermischen Beanspruchung ändert, ist der Gehalt an löslichem Protein. Bei diesem Verfahren wird ausgehend vom gleichbleibenden Rohproteingehalt der Probe die Löslichkeit dieses Proteins auf wässriger Basis (der Futtermittelanalytik entsprechend) bestimmt. Zusätzlich wurde die Aminosäure-Zusammensetzung des Proteinträgers ermittelt.

Verglichen wurden die Proben (MKL-V2, MKL-V3), welche mittels Bandtrocknung bei 100 °C und 120 °C (**Tabelle 7**) getrocknet wurden, und Presskuchen, welche unterschiedliche Verfahrensparameter durchlaufen haben. TMP-1 (Kuchen 100 °C) TMP-2 (Kuchen 80 °C) TMP-3 (anderer Presskopf)

**Tabelle 7: Übersicht über die Aminosäurezusammensetzung der Mehlkäferlarven (MKL) bei verschiedenen Trocknungstemperaturen und der verschiedenen Presskuchen TMP-Chargen [g/16 g N]**

Inhaltstoffe	MKL-1	MKL-V2	MKL-V3	TMP-1	TMP-2	TMP-3
Cys	0,78	0,83	0,91	0,85	0,92	0,91
Met	1,22	1,30	1,29	1,30	1,25	1,35
Asp	8,25	8,38	8,42	8,61	8,78	8,76
Thr	3,73	3,92	3,90	3,94	4,15	3,99
Ser	4,45	4,43	4,35	4,57	4,92	4,54
Glu	11,78	12,54	12,37	12,71	15,56	13,47
Pro	6,10	6,13	6,08	6,47	6,44	6,59
Gly	5,06	5,25	5,18	5,34	5,82	5,39
Ala	6,61	7,37	7,28	6,97	7,30	6,99
Val	5,73	6,06	6,00	5,74	5,45	6,24
Ile	4,06	4,24	4,17	4,28	4,11	4,35
Leu	7,11	7,07	7,02	7,09	7,49	7,24
Tyr	9,60	6,00	5,87	8,34	15,86	7,60
Phe	3,88	3,46	3,44	3,66	3,87	3,77
His	3,14	2,88	2,78	3,27	3,10	3,20
Lys	5,51	5,36	5,19	5,75	6,04	5,72
Arg	5,04	5,14	4,98	5,32	5,25	5,36

Tabelle 7 zeigt die Aminosäurezusammensetzung der verschiedenen Trocknungsprodukte der Mehlkäferlarven (MKL) sowie die der teilentfetteten Mehlwurmpresskuchen (TMP). Dabei war MKL-1 das Ausgangsprodukt für die Versuche mit Tilapien und Masthähnchen und wurde undefiniert ofengetrocknet.

Das Ausgangsmaterial für den Ferkelversuch sollte aus den Zuchtversuchen der Hochschule Bremerhaven stammen und wurde hinsichtlich zweier Trocknungsversuche (MKL-V2 und

MKL-V3) untersucht. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Temperatur zum einen die Proteinlöslichkeit abnimmt (Tabelle 2) und zum anderen die analysierte Lysinkonzentration sinkt (Tabelle 7). Ähnliche Ergebnisse wurden in der Studie von Pastuszewska und Buraszewski 1997 ermittelt [Pastuszewska, 1997]. Gegenstand der Untersuchungen war die Analyse von löslichem Protein als Indikator für das Überhitzen (Überprozessierung) von Rapsmehl und dem entstehenden Presskuchen in Kombination mit Wachstumsversuchen an Ratten.

Die stark schwankenden Werte für Tyrosin sind analytisch bedingt, da es zwischen dem internen Standard Norleucin und der Aminosäure Tyrosin einen Störpeak gibt, von dem Tyrosin bei den einzelnen Chargen unterschiedlich stark beeinflusst wurde.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Prozessparameter während der Aufbereitung einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des Endproduktes haben, und liefern wichtige grundlegende Erkenntnisse für zukünftige Versuche zur Ermittlung der am besten einzusetzenden Technik.

## **5.2 AS 2: Bestimmung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der Proteineinzelfuttermittel sowie hygienische Bewertung (Futtermittelsicherheit)**

Jedes Einzelfuttermittel muss, damit es in den Verkehr gebracht werden kann, den Anforderungen der EG-Verordnung Nr. 178/2002 entsprechen. In dieser werden in drei Artikeln der Zweck, der Anwendungsbereich und Begriffsbestimmungen für die Verordnung festgelegt. Die Verordnung gilt für alle Produktions-, Verarbeitungs- und Vertriebsstufen von Lebensmitteln und Futtermitteln.

### **5.2.1 Weender Analyse**

Die Futtermittelanalytik umfasst alle Untersuchungen, die erforderlich sind, um den Nährwert und den Schadstoffgehalt eines Futtermittels anzugeben. Für die Nutztierhaltung hat der Energiegehalt der Futtermittel eine große Bedeutung. Die „Weender Futtermittelanalyse“ dient der Bestimmung der Rohnährstoff-Fractionen wie des Rohprotein-, Rohfaser-, Rohfettgehaltes sowie des Rohaschegehalts. In dem Projekt wurden verschiedene Analyseproben aus den Larven des *Tenebrio molitor* untersucht. Alle Daten werden vergleichend mit den potenziellen Substituenten Sojaextraktionsschrot und Fischmehl betrachtet (**Tabelle 8**). Des Weiteren sind Proben während der Aufbereitung der Larven über diese Methode untersucht worden.

**Tabelle 8: Weender Analysedaten für verschiedene Insektenfraktionen im Vergleich zu Fischmehl und Sojaextraktionsschrot**

Produkt	Feuchte [%]	Rohprotein [%]	Rohfett [%]	Rohasche [%]	Rohfaser [%]
Fischmehl	5,7	70,8	10,1	13,9	0,3
Sojaextraktionsschrot	11,1	52,2	2,4	7,1	6,7
<i>Hermetia illucens</i>	3,6	62,2	5,4	8,1	12,7
<i>Tenebrio molitor</i> (China, ofengetrocknet)	5,4	48,5	34,8	2,9	5,4
<i>Tenebrio molitor</i> HSB (120 °C ofengetrocknet)	1,5	57,0	27,1		7,2
Presskuchen (Pelletscheibe)	3,9	70,0	6,5	4,6	8,2
Presskuchen (Konus)	3,3	61,4	18,1		
<i>Tenebrio molitor</i> ohne Trocknung	62,7	21,2	10,3	1,7	2,5

Beim Vergleich der Daten ist zu erkennen, dass der Presskuchen, welcher mittels Pelletscheibe gewonnen wurde, einen ähnlich hohen Rohproteingehalt wie Fischmehl hatte und den von Sojaextraktionsschrot übertrifft. Verglichen mit *Hermetia* Mehl sind die Werte für Rohasche und Rohfasergehalt niedriger. Ein weiterer Punkt sind die großen Unterschiede im Rohproteingehalt, wenn man das getrocknete Material aus China mit dem aus Bremerhaven vergleicht. Diese Unterschiede können unter anderem auf unterschiedliche Substrate zur Fütterung der Larven zurückzuführen sein und zeigen den Bedarf an weiterer Forschung hinsichtlich der Zusammensetzung der Larven.

### 5.2.3 Mikrobiologischer Zustand

Aufgrund ihres Wassergehaltes von typischerweise < 14 % entsprechen Futtermittel trockenen Lebensmitteln. Trotz niedriger Wasseraktivität ( $a_w$ ) können Mischfutter immer wieder mit pathogenen Mikroorganismen kontaminiert sein [Anderson, 1997]. Das höchste Risiko geht hierbei von Salmonellen spp. aus, wobei spezielle Komponenten Ölsaaten und Eiweiß tierischen Ursprungs in diesem Zusammenhang als Hochrisiko-Futtermittel gelten [EFSA, 2008]. Zusammengerechnet gehen mehr als 80 % der Meldungen bezüglich Salmonellen im Europäischen Schnellwarnsystem für Lebens- und Futtermittel (Rapid Alert System for Food and Feed, RASFF) auf diese Komponenten zurück [RASFF]. Neben Salmonella spp. kann Mischfutter auch mit anderen Pathogenen wie Clostridium perfringens oder Listeria monocytogenes kontaminiert sein, welche unter den im Mischfutter vorherrschenden Bedingungen längere Perioden überleben können [Tessari, 2014, Maciorowski, 2007]. Mittels Gesamtkeimanalyse kann ein erster Hinweis bezüglich des Auftretens von Keimen und deren Vermehrung während der Lagerung ermittelt werden. Innerhalb des Projektes wurde der mikrobiologische Zustand der Insektenmehle und resultierenden Futtermittel mittels Gesamtkeimzahlanalyse untersucht, da diese Ausgangsstoffe für die Erzeugung von sicheren Lebensmitteln tierischer Herkunft von entscheidender Bedeutung sein können.

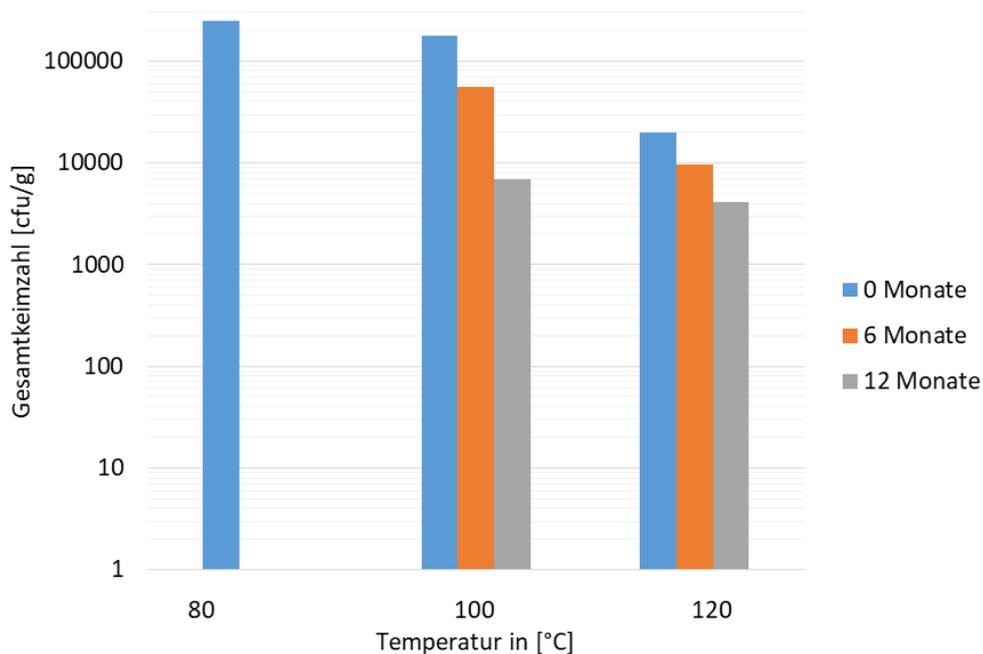
## 5.2.4 Lagerungsstabilität

Futtermittelrechtlich entsprechend der Richtlinie 95/53/EG „Grundregeln für die Durchführung der amtlichen Futtermittelkontrollen“, sind von jeder eingehenden und ausgehenden Ware entsprechend der Verordnung (EG) Nr. 691/2013 (152/2009) Proben zu entnehmen und als Rückstellmuster aufzubewahren. Da die Qualität der Ware maßgeblich durch die Lagerung beeinflusst werden kann, entspricht die Lagerdauer dem Mindesthaltbarkeitsdatum. Die zu Projektbeginn beschaffte Ware war mit einer Mindesthaltbarkeit von mehr als 12 Monaten angegeben.

In diesem Projekt wurden daher verschiedene Proben unter definierten Bedingungen eingelagert und auf ihren Gehalt an Keimen untersucht. Der Ausgangskeimgehalt der eingefrorenen Larven betrug  $8,2 \times 10^6$  [cfu/g], welche dann den zuvor beschriebenen Trocknungsprozessen zugeführt wurden (Tabelle 2).

### 5.2.4.1 Lagerungsstabilität der getrockneten Larven

Damit das frische Larvenmaterial für die Futtermittel- oder Lebensmittelindustrie verwendet werden kann, muss es in vielen Fällen im ersten Prozessschritt getrocknet werden. Daher wurden im ersten Ansatz zur weiteren Analyse die getrockneten Proben auf ihre Lagerungsstabilität untersucht. Das Material aus den Bandtrocknungsversuchen (Tabelle 2) wurde nach Lagerung unter Raumbedingungen nach 0,6 und 12 Monaten untersucht.



**Abbildung 19: Entwicklung des Gesamtkeimgehaltes von getrockneten *Tenebrio molitor* Proben (Tabelle 2) nach der Einlagerung**

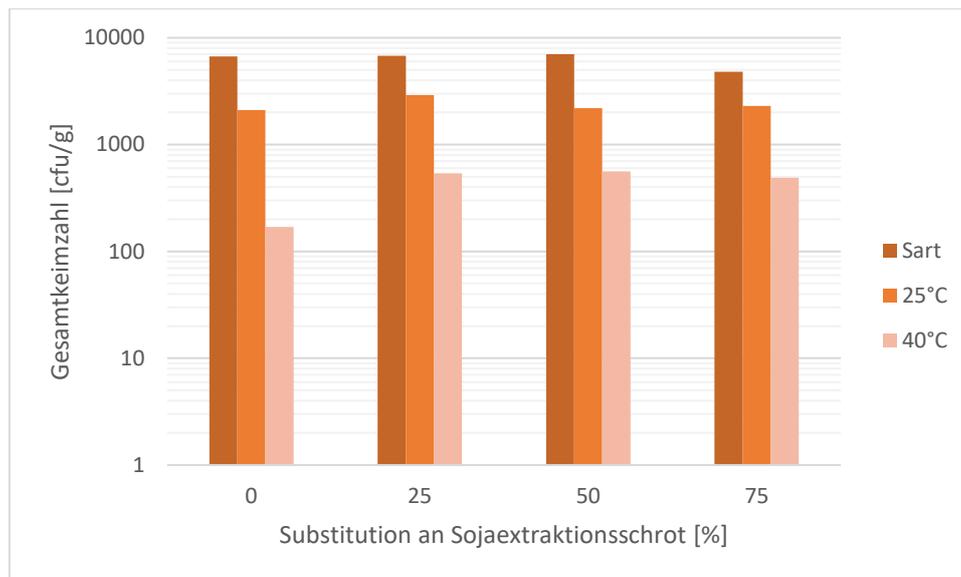
Es zeigte sich, dass der Gesamtkeimgehalt der getrockneten Proben über die Zeit abnahm. Da das Material, welches bei 80 °C getrocknet wurde, eine höhere Restfeuchte aufwies (10 %), trat nach zwei Wochen eine starke Schimmelbildung ein und diese Probe wurde aufgrund des hohen Keimgehaltes nicht weiter untersucht.

Im Gegensatz zum Futtermittel ist daher bei der Trocknung der Larven eine Restfeuchte unterhalb von 10 % anzustreben, da sonst keine genügende Lagerungsstabilität vorliegt.

Der Presskuchen, welcher der Kette folgend ebenfalls untersucht wurde, blieb über eine Lagerung von 12 Monaten stabil, d. h. bei einem Gesamtkeimgehalt von  $< 10^2$  cfu/g.

Aus dem Presskuchen wurden entsprechend des Projektes Futtermittel zur Evaluierung an den Nutztierarten Tilapia, Broiler und Aufzuchtferkeln durchgeführt. Diese Futtermittel wurden bei der Herstellung an verschiedenen Stellen beprobt und ebenfalls auf ihren Gesamtkeimgehalt untersucht.

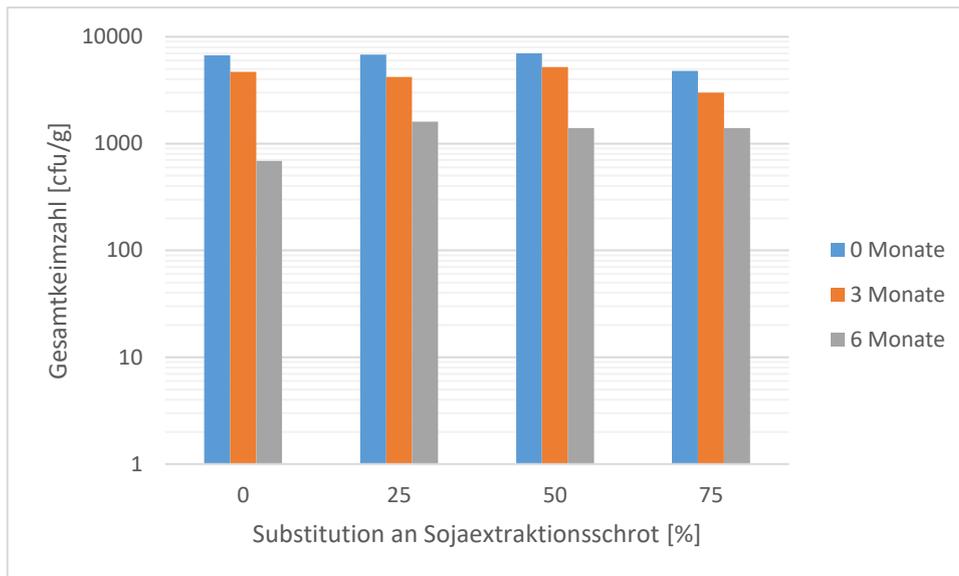
Es wurden für die Bereitstellung des Futters für die Aufzuchtferkel unterschiedliche Lagerbedingungen gewählt. Zum einen wurde bei einer Temperatur von 25 °C und 60 % relativer Luftfeuchte eingelagert und zum anderen bei 40 °C und 75 % relativer Luftfeuchte. Weiterhin wurde in Plastiktüten und Papiertüten eingelagert.



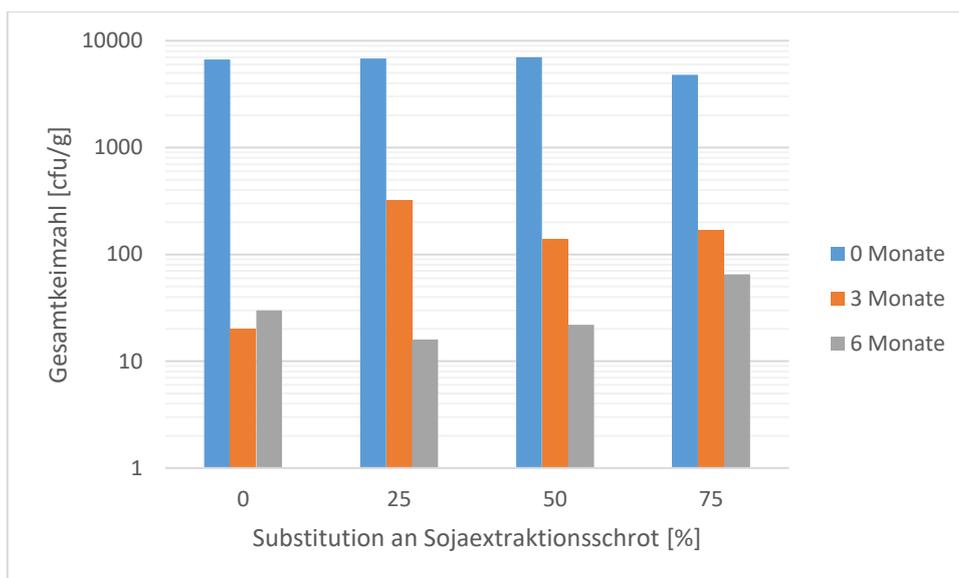
**Abbildung 20: Darstellung des Gesamtkeimgehaltes von Mischfuttermitteln für Aufzuchtferkel mit steigendem Gehalt an *Tenebrio molitor* Presskuchen (25 %, 50 %, 75 % des Sojaextraktionsschrots substituiert). Eingelagert wurde 0, 3 Monate bei 25 °C und 60 % relativer Luftfeuchte in Papiertüten.**

Nach den ersten Analysen der Proben zeigte sich, dass die Einlagerung der Proben in Plastiktüten (Vergleich der **Abbildungen 20 und 21**) am sensitivsten bezüglich der Ermittlung des Gesamtkeimgehaltes war. Die Keimreduktion über die Zeit war signifikant, jedoch nicht so dicht an der Nachweisgrenze von  $< 10^2$  cfu/g.

In den Abbildungen 21 und 22 sind die entsprechenden Keimzahlen nach der Einlagerung in Plastiktüten abgebildet.



**Abbildung 21:** Darstellung des Gesamtkeimgehaltes von Mischfuttermitteln für Aufzuchtferkel mit steigendem Gehalt an *Tenebrio molitor* Presskuchen (25 %, 50 %, 75 % des Sojaextraktionsschrots substituiert). Eingelagert wurde 0, 3 sowie 6 Monate bei 25 °C und 60 % relativer Luftfeuchte in Plastiktüten.

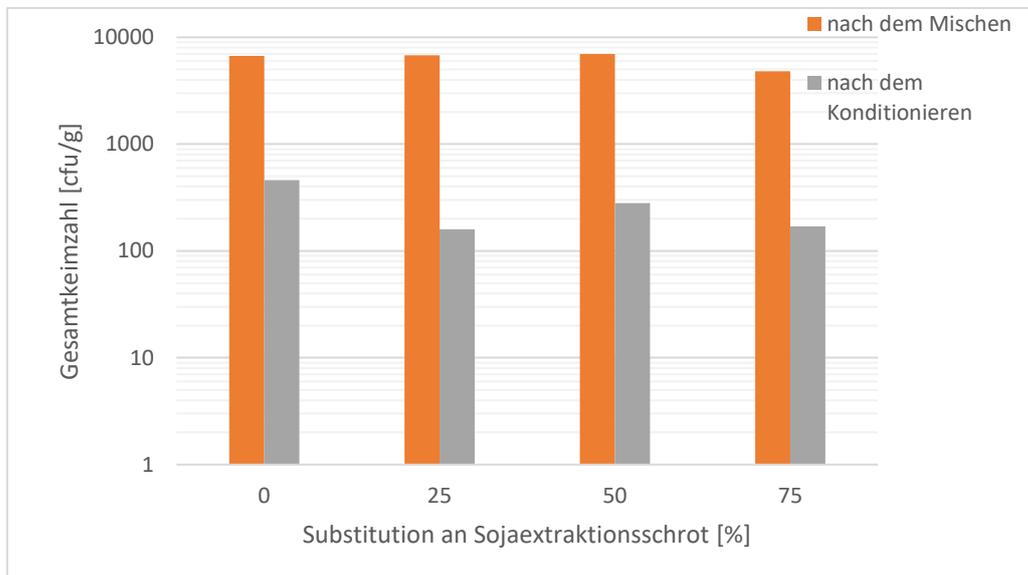


**Abbildung 22:** Darstellung des Gesamtkeimgehaltes von Mischfuttermitteln für Aufzuchtferkel mit steigendem Gehalt an *Tenebrio molitor* Presskuchen (25 %, 50 %, 75 % des Sojaextraktionsschrots substituiert). Eingelagert wurde 0, 3, sowie 6 Monate bei 40 °C und 75 % relativer Luftfeuchte in Plastiktüten.

Beiden Abbildungen ist zu entnehmen, dass die Gesamtkeimzahl über die Zeit abnimmt. Da die Unterschiede bei der Temperatur von 40 °C sehr schnell in den Bereich der Nachweisgrenze <math>10^2</math> cfu/g führten, wurde für weitere Versuche bei einer Temperatur von 25 °C und 60 % relativer Luftfeuchte weitergearbeitet.

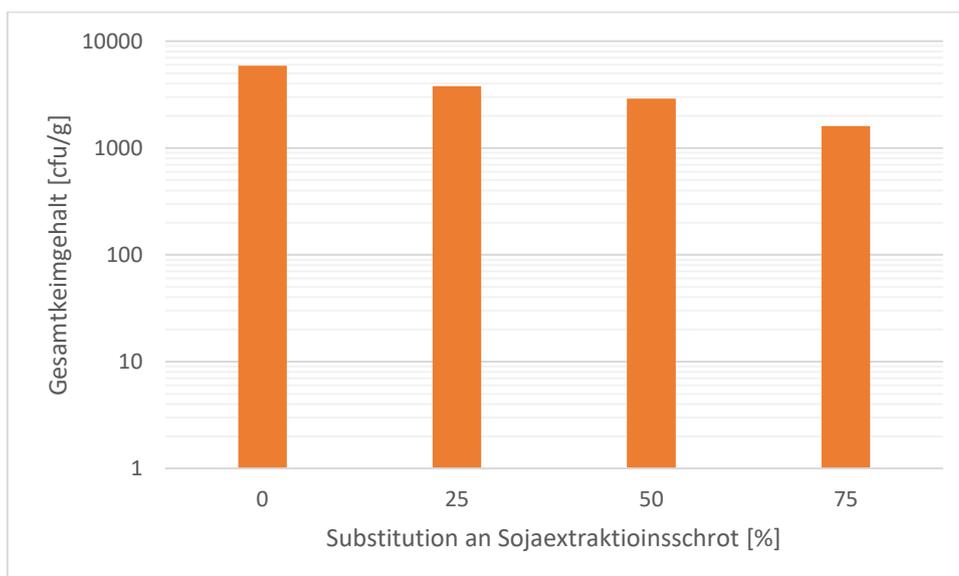
Da im weiteren Verlauf das Material zum Pelletieren und Expandieren durch den Einsatz von Satttdampf konditioniert wird, ist in der folgenden **Abbildung 23** ein Vergleich des Keimgehaltes nach dem Mischen und nach dem Konditionieren dargestellt. Durch das Konditionieren hat

im Mischfutter eine Temperaturerhöhung auf 70 °C stattgefunden, welche während des Pelletierprozesses aufgrund von Reibung weiter zunimmt. Aufgrund der beim Konditionieren erfolgten Zugabe von Satttdampf steigt die Feuchtigkeit innerhalb der Mischung, so dass diese Proben nicht eingelagert werden konnten.



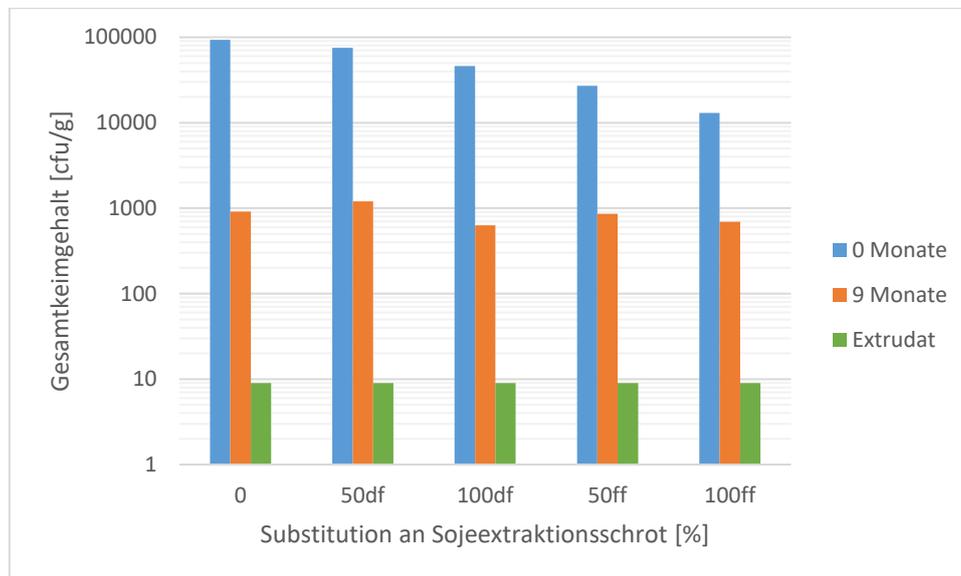
**Abbildung 23: Darstellung des Gesamtkeimgehaltes von Mischfuttermitteln für Aufzuchtferkel mit steigendem Gehalt an *Tenebrio molitor* Presskuchen (25 %, 50 %, 75 % des Sojaextraktionsschrots substituiert) vor und nach dem Konditionieren mit 3 % Satttdampf**

In den Versuchen wurde weiterhin erwartet, dass sich durch das Zusetzen des Presskuchens mit einem Gesamtkeimgehalt von  $< 10^2$  cfu/g die Anfangskeimgehalte der Mischungen senken. Da sich dies bei den grobstrukturierten Mischungen für die Aufzuchtferkel aufgrund von Inhomogenitäten nicht deutlich zeigte, wurden die feiner vermahlene Formulierungen (die gleiche Rezeptur) zum Expandieren auf ihren Anfangskeimgehalt untersucht.



**Abbildung 24: Darstellung des Gesamtkeimgehaltes von Mischfuttermitteln (Expandat) für Aufzuchtferkel mit steigendem Gehalt an *Tenebrio molitor* Presskuchen (25 %, 50 %, 75 % des Sojaextraktionsschrots substituiert).**

Der **Abbildung 24** ist zu entnehmen, dass mit dem Zusetzen des Presskuchens der Gesamtkeimgehalt ähnlich einer Verdünnungsreihe abnimmt. Dieses Verhalten spiegelt sich ebenfalls bei den Fischfutterformulierungen wieder (**Abbildung 25**). Mit steigendem Gehalt an Presskuchen (df) und steigendem Gehalt an Vollfett-Larve sinkt der Gesamtkeimgehalt. Weiterhin ist der **Abbildung 25** zu entnehmen, dass nach dem Extrusionsprozess die Gesamtkeimzahl unter die Nachweisgrenze sinkt ( $< 10^2$  cfu/g). Der zeitliche Abstand zur Probenanalyse musste variiert werden, weil der institutseigene Autoklav defekt war.



**Abbildung 25: Darstellung des Gesamtkeimgehaltes von Mischfuttermitteln (Fischfutter Tabelle 23) für Tilapia mit steigendem Gehalt an *Tenebrio molitor* Presskuchen und Vollfett-Larvenmaterial (50 % und 100 % des Sojaextraktionsschrots substituiert).**

Insgesamt wurden innerhalb des Projektes mehr als 300 Proben auf die Gesamtkeimzahl analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Einlagerung von Proben unter unterschiedlichen Bedingungen möglich ist und dass das Insektenprotein nicht nachteilig auf die Produktformulierung wirkt. Des Weiteren blieb der Presskuchen aus den getrockneten Larven des *Tenebrio molitor* über einen Zeitraum von 1,5 Jahren konstant bei einem niederen Keimgehalt von  $< 10^2$  cfu/g. Weitere Untersuchungen zum Spektrum der Keime (Salmonellen, Enterobacteriaceae) wären empfehlenswert.

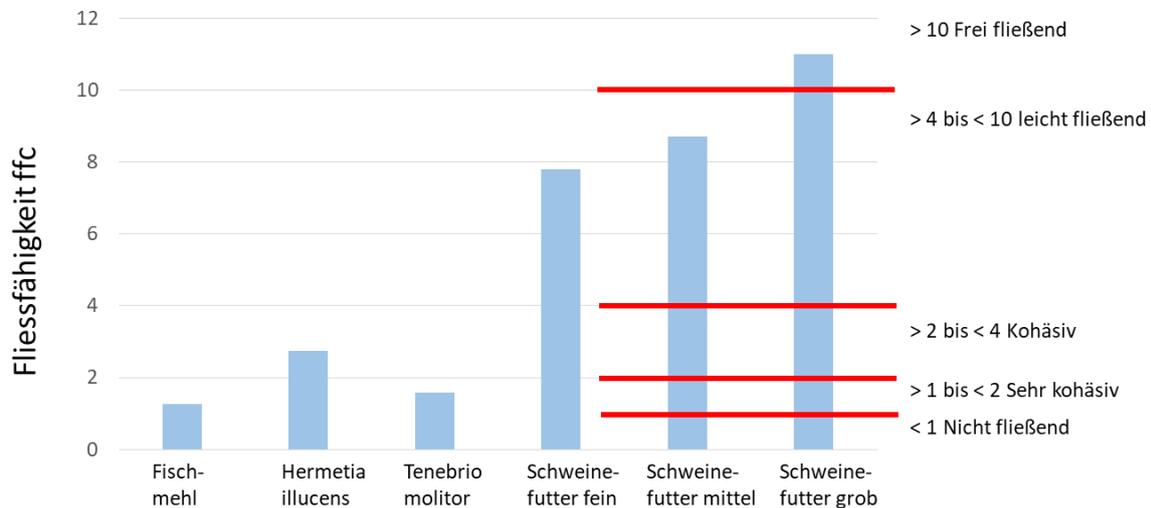
### 5.2.5 Fließfähigkeit

Die Fließeigenschaften eines Pulvers oder Schüttgutes bestimmen, wie es sich bei der Handhabung verhält, z. B. bei Förder- oder Dosierprozessen, in Behältern und Gebinden bei Kurz- und Langzeitlagerung und in Silos. Bei Lagerungs- und Transportprozessen mehlförmigen Futters kommt es in der Praxis häufig zu Reklamationen, wenn das Futter aufgrund von Schacht- und Brückenbildung nur unzureichend oder gar nicht aus Silos oder Vorratsbehältern abfließt [Neumann, 2018]. Die Kenntnis der Fließeigenschaften ist daher wichtig für die Produktentwicklung und Prozessabläufe, um später auftretende Fließprobleme zu vermeiden [Schulze, 2015]. Ebenso wichtig sind die Fließeigenschaften für die Qualitätskontrolle. Durch das Prüfen der Fließeigenschaften eines Produktes vor dem Einbringen in die Produktionsanlage oder dem Ausliefern an Kunden können ungeeignete Chargen zurückhalten werden.

Für Vergleichsmessungen, Qualitätskontrolle etc. ist die **Fließfähigkeit ffc**, die aus der Druckfestigkeit berechnet wird, die entscheidende Größe.

Ziel der Untersuchungen war es, grundlegende Aussagen zum Fließverhalten für ein neues Einzelfuttermittel zu treffen, damit Prozessabläufe besser bestimmt werden können.

In der **Abbildung 26** sind vergleichend verschiedene Proben neben denen des Proteinmehls der *Tenebrio molitor* Larven und dem Proteinmehl der *Hermetia illucens* dargestellt.



**Abbildung 26: Darstellung der Fließfähigkeit zweier Insektenproteinmehle vergleichend gegenüber Fischmehl und drei verschiedenen Schweinefutterrezepturen**

Für mehlartige Futtermittel wird grundsätzlich ein frei fließendes oder leicht fließendes Verhalten angestrebt, damit das Material, wenn es in Silozellen eingelagert wird, auch wieder vollständig ausgetragen werden kann. Ausgehend von den Werten der Insektenmehle sind diese ähnlich wie Fischmehl nicht frei fließend sondern im Gegensatz dazu kohäsiv bis sehr kohäsiv. Eine Einlagerung in Silozellen ist aus diesem Grunde nicht zu empfehlen, da es zur Brückenbildung kommen würde.

### 5.2.6 Mischungshomogenität

Bei mehlartigen Mischfuttern, welche aus unterschiedlichen Einzelkomponenten mit unterschiedlichen Partikelgrößen, -dichten sowie unterschiedlichen Partikeloberflächen bestehen, ist immer die Entmischungsneigung zu berücksichtigen. Der Umfang, mit dem sich Entmischung vollzieht, hängt neben der Beanspruchungsart und -intensität wesentlich von der Größe sowie von der Form der einzelnen Partikel ab. Ein weiterer Aspekt ist das Zusetzen von Flüssigkeit, da Flüssigkeiten fein disperse Partikel binden können.

In den Versuchen zur Mischungshomogenität und -stabilität wurden die produzierten Futtermittel (Broilerfutter, Schweinefutter) nach dem Zusetzen von unterschiedlichen Anteilen an *Tenebrio molitor* Mehl mit einem Farbindikator versetzt und nach dem Mischprozess beprobt. Ziel der Untersuchungen war es, zu beurteilen, wie sich mehlartige Mischfuttermischungen durch das Zusetzen von Insektenmehl, hinsichtlich eines feindispersen Zusatzstoffes verhalten, der durch den Farbindikator simuliert wird.

Den **Tabellen 9-12** ist zu entnehmen, dass mit steigendem Anteil an Insektenmehl der Anteil an zuzusetzendem Sojaöl abnimmt.

**Tabelle 9: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters (konventionell)**

<b>Futterkomponenten</b>	<b>%</b>	<b>kg pro Mischung</b>	<b>Einwaage für 175 kg</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 10: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters mit 25 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot)**

<b>Futterkomponenten</b>	<b>%</b>	<b>kg pro Mischung</b>	<b>Einwaage für 175 kg</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>

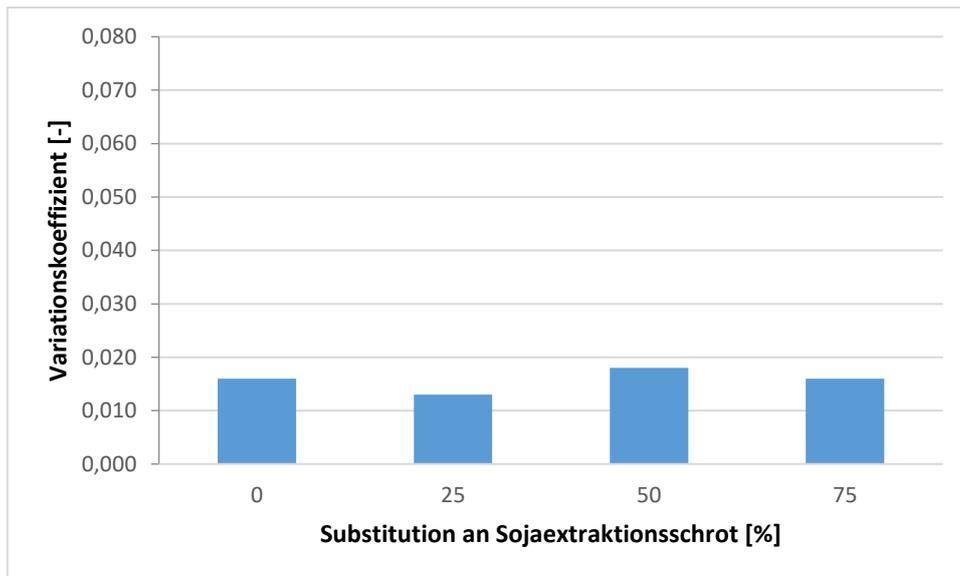
**Tabelle 11: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters mit 50 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot**

<b>Futterkomponenten</b>	<b>%</b>	<b>kg pro Mischung</b>	<b>Einwaage für 175 kg</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 12: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters mit 75 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot**

<b>Futterkomponenten</b>	<b>%</b>	<b>kg pro Mischung</b>	<b>Einwaage für 175 kg</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>

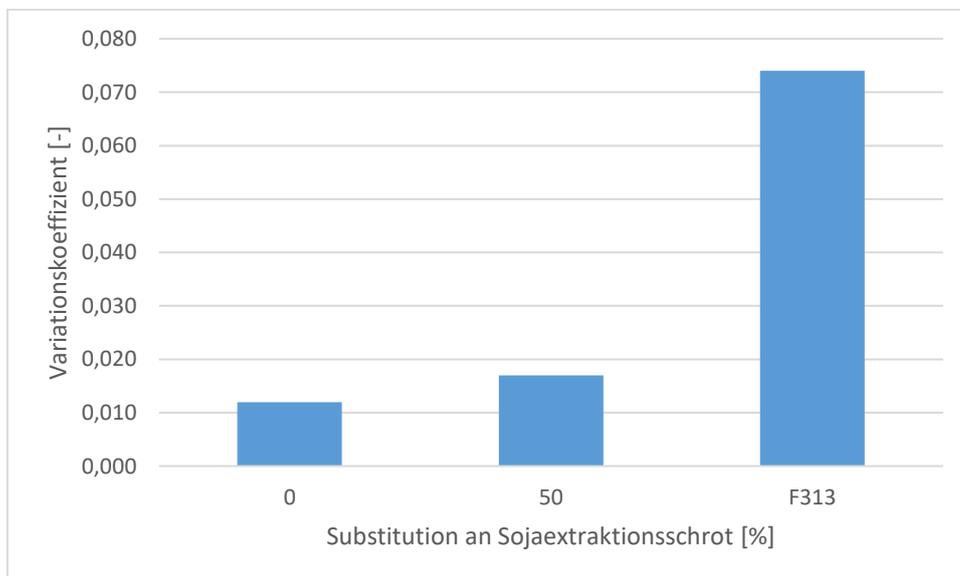
In der **Abbildung 27** sind die dazugehörigen Ergebnisse hinsichtlich der Mischungshomogenität dargestellt. Im Allgemeinen wird eine Mischgüte, die mit einem Variationskoeffizienten von  $\leq 0,07$  bzw. 7 % gekennzeichnet ist, angestrebt [Neumann, 2007]. Der Variationskoeffizient für das mehlförmig strukturierte Ferkelaufzuchtfutter (Abbildung 5) innerhalb einer Mischung war unter dem Wert und 0,07, d. h. es wurde eine stabile Mischung in allen Formulierungen hergestellt.



**Abbildung 27: Variationskoeffizienten für die Verteilung einer feindispersen Komponente in Mischung mit steigenden Anteilen an Insektenmehl**

Des Weiteren ist aus anderen Forschungsprojekten [Neumann, 2007] bekannt, dass sich das Zusetzen von Futterfett positiv auf die Mischungsstabilität und -homogenität auswirken kann.

In der **Abbildung 28** sind die Ergebnisse der Variationskoeffizienten für die Masthähnchenversuche dargestellt. Die Variationskoeffizienten liegen deutlich unter 0,07, d. h. die fein verteilte Komponente wurde homogen in die Formulierungen eingemischt. Zum Vergleich ist aus dem AiF-Projekt ZN44 der Variationskoeffizient für ein grob strukturiertes Broilerfutter ( $d_{50}$  1.600  $\mu\text{m}$ , F313) dargestellt. Aufgrund der Unterschiede in der Struktur zeigte sich bei dieser Formulierung eine ungenügende Verteilung der fein zugesetzten Komponente.



**Abbildung 28: Variationskoeffizienten für die Verteilung einer feindispersen Komponente einer Masthähnchenmischung mit steigenden Anteilen an Insektenmehl**

Mit den erzielten Ergebnissen kann die Aussage getroffen werden, dass sich das Zusetzen von Insektenmehl nicht negativ sondern ähnlich dem Zusetzen anderer Einzelkomponenten verhält und eine stabile homogene Mischung hergestellt werden kann.

### 5.2.7 Staubungsverhalten

Die Überwachung von Staubemissionen beim Handhaben und Transportieren von Schüttgütern ist für die Gestaltung und Durchführung vieler industrieller Prozesse von großer Bedeutung. Überhöhte Schwebstaubgehalte sind an Arbeitsplätzen aus diversen Gründen unerwünscht:

- sie können eine Gesundheitsgefährdung für die Beschäftigten darstellen,
- ihre Überwachung kann den Einsatz kostenintensiver Entlüftungs- und Filtersysteme erfordern,
- sie können Maschinen und Produkte kontaminieren,
- sie können, was Produktverluste anbelangt, kostspielig sein.

Daher ist es von Vorteil, wenn Fachkräften für Arbeitshygiene und Verfahrenstechnikern relevante Informationen im Hinblick auf die Neigung von Schüttgut, bei der Handhabung Schwebstaub zu erzeugen („Staubigkeit“, d. h. Staubungsverhalten des Schüttguts), zur Verfügung stehen, so dass Risiken bewertet, kontrolliert und minimiert werden können [DIN 15051:2006].

Gemessen wird das Staubungsverhalten als Verhältnis der ausgetragenen Staubmenge in Milligramm zu je 100 g Probe [DIN 55992-1:2006].

Untersucht wurden die Proben, welche mittels Walzenstuhl (**Abbildung 29**) zerkleinert wurden. Die untersuchten Zerkleinerungsprodukte zeigten keine Staubungsneigung, denn es waren keine gravimetrischen Unterschiede der rückgewogenen Filter zu verzeichnen.

### 5.2.8 Carry-over

Bevor Insekten wie Mehlwürmer als geeignet für z. B. den menschlichen Verzehr eingestuft werden können, muss das mögliche Vorhandensein und die Anhäufung von Verunreinigungen bzw. Kontaminationen aufgeklärt werden. In der vorliegenden Studie wurden die Auswirkungen des Mykotoxins Zearalenon und seiner Metaboliten auf Insektenlarven untersucht. Sieben verschiedene Diäten wurden vorbereitet: Kontrolle, versetzt (S1: 558,5 µg/kg ZEN; S2: 2254 µg/kg ZEN), künstlich kontaminiert (A1: 427,0 µg/kg ZEN; A2: 2283 µg/kg ZEN) und natürlich kontaminiert (N1: 602,3 µg/kg ZEN; N2: 919,3 & mgr; g/kg ZEN). Die Menge an ZEN und seinen Metaboliten im Futter, in den Larven und im Rückstand (Kombination von Futterresten und Faeces) wurde mittels HPLC-MS / MS gemessen. Ein signifikanter Unterschied in der individuellen Gewichtszunahme der Larven wurde zwischen den Diäten mit natürlich kontaminiertem Weizen (N1: 7,80 mg; N2: 9,25 mg) und den anderen Diäten nach achtwöchiger Exposition festgestellt. In den *Tenebrio molitor* Larven wurden nach der Ernte keine ZEN- oder ZEN-Metaboliten nachgewiesen [Maul et al., 2019].

In den Rückstandsproben wurden jedoch ZEN,  $\alpha$ - und  $\beta$ -ZEL gefunden. Zuletzt wurden ZEN- und ZEL-Sulfate nur in der Kontrolle und den natürlich kontaminierten Proben nachgewiesen. Dies deutet darauf hin, dass während des Larvenstoffwechsels hauptsächlich eine Umwandlung von ZEN zu ZEL oder von ZENS zu ZELS stattfindet.

Die vollständigen Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in dem Bericht zum IGF-Projekt 27 LN „Zuchtversuche von *Tenebrio molitor* auf verschiedenen Substraten“ dargestellt.

### 5.3 AS 3: Herstellen von Futtermitteln (Pelletieren/Expandieren/Extrudieren)

Die drei wichtigsten Verfahrensschritte zur Herstellung von Mischfutter sind die Rohwarenerkleinerung, das Mischen der Einzelkomponenten und das Veredeln des Mischfutters in Form des Pelletier-, Expandier- oder Extrudierprozesses.

#### 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 Futtermenge 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 größere 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., 1995 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 29, **Tabelle 13**).



**Abbildung 29: Presskuchen nach dem Austritt aus der Seiherschneckenpresse**

**Tabelle 13: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach Austritt aus der Seiherschneckenpresse**

Siebma- schen- weite w	Masse auf Sieb	Masse auf Sieb	Durch- gang	Durch- gang	Vertei- lungs- summe Q <sub>3</sub>	w (quer)	Vertei- lungs- dichte q <sub>3</sub>
µm	g	%	g	%		µm	1/mm
0	0,2	0,27	0,00	0,00	0,000	32	0,043
63	3,2	4,31	0,20	0,27	0,003	94	0,695
125	5,4	7,27	3,40	4,58	0,046	188	0,581
250	5,2	7,00	8,80	11,84	0,118	303	0,667
355	4,8	6,46	14,00	18,84	0,188	428	0,446
500	6,7	9,02	18,80	25,30	0,253	605	0,429
710	6,0	8,08	25,50	34,32	0,343	855	0,278
1000	8,6	11,57	31,50	42,40	0,424	1200	0,289
1400	11,0	14,80	40,10	53,97	0,540	1700	0,247
2000	7,3	9,83	51,10	68,78	0,688	2250	0,197
2500	3,2	4,31	58,40	78,60	0,786	2650	0,144
2800	3,7	4,98	61,60	82,91	0,829	2975	0,142
3150	5,4	7,27	65,30	87,89	0,879	3575	0,086
4000	3,0	4,04	70,70	95,15	0,952	4800	0,025
5600	0,2	0,27	73,70	99,19	0,992	5950	0,004
6300	0,4	0,54	73,90	99,46	0,995	7150	0,003
8000	0,0	0,00	74,30	100,00	1,000	000	0,000

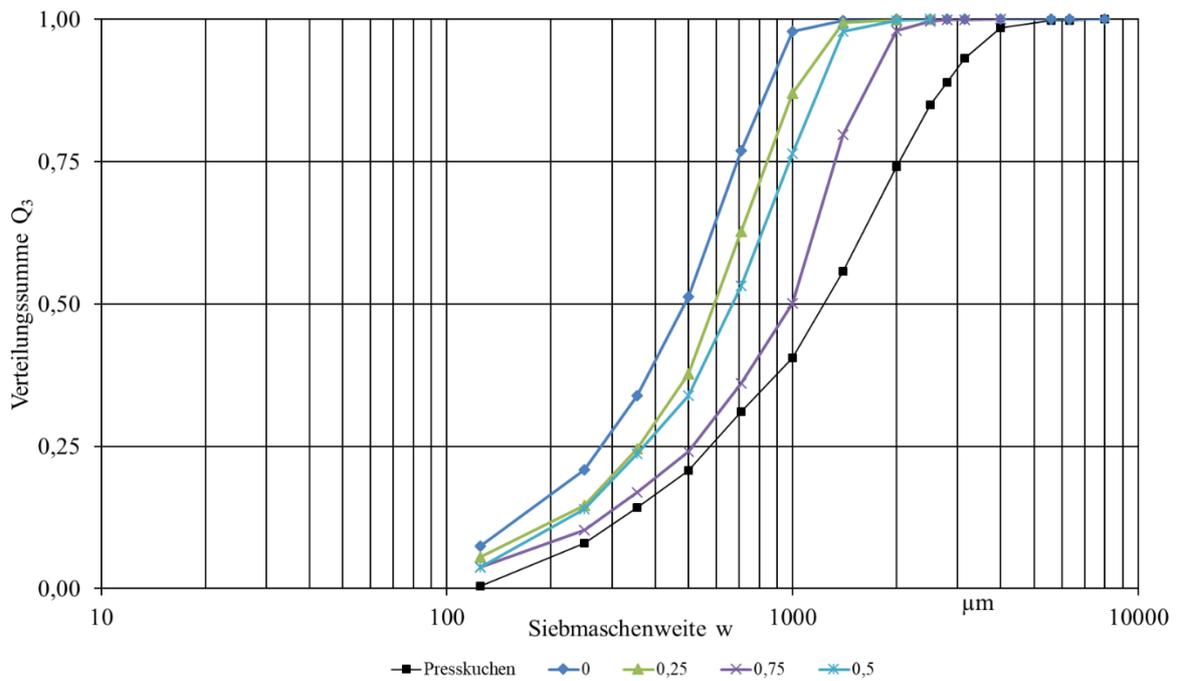
Grundsätzlich stehen für die Zerkleinerung der Rohwaren verschiedene Geräte zur Verfügung. Üblicherweise werden Hammermühlen eingesetzt, welche Futterstrukturen erzeugen, die durch einen erheblichen Feingutanteil gekennzeichnet sind.

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 Mahlpalten 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 Mahlpaltweite 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 30 (Tabellen 14-17)** ist die Zerkleinerung des Presskuchens bei unterschiedlichen Walzenspaltstellungen dargestellt.



**Abbildung 30: 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 14: Partikelgrößenverteilung des Presskuchens nach der Zerkleinerung mittels Walzenstuhl Walzenspalt 0 mm**

Siebmaschenweite	Masse auf Sieb	Masse auf Sieb	Durchgang	Durchgang	Verteilungssumme		Verteilungsdichte
w					$Q_3$	w (quer)	$q_3$
$\mu\text{m}$	g	%	g	%		$\mu\text{m}$	1/mm
0	4,9	7,47	0,00	0,00	0,000	63	0,598
125	8,8	13,41	4,90	7,47	0,075	188	1,073
250	8,5	12,96	13,70	20,88	0,209	303	1,234
355	11,4	17,38	22,20	33,84	0,338	428	1,198
500	16,9	25,76	33,60	51,22	0,512	605	1,227
710	13,7	20,88	50,50	76,98	0,770	855	0,720
1000	1,3	1,98	64,20	97,87	0,979	1200	0,050
1400	0,1	0,15	65,50	99,85	0,998	1700	0,003
2000	0,0	0,00	65,60	100,00	1,000		

**Tabelle 15: 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	4,3	5,56	0,00	0,00	0,000	63	0,444
125	7,0	9,04	4,30	5,56	0,056	188	0,724
250	7,7	9,95	11,30	14,60	0,146	303	0,947
355	10,2	13,18	19,00	24,55	0,245	428	0,909
500	19,4	25,06	29,20	37,73	0,377	605	1,194
710	18,8	24,29	48,60	62,79	0,628	855	0,838
1000	9,5	12,27	67,40	87,08	0,871	1200	0,307
1400	0,4	0,52	76,90	99,35	0,994	1700	0,009
2000	0,1	0,13	77,30	99,87	0,999	2250	0,003
2500	0,0	0,00	77,40	100,00	1,000		

**Tabelle 16: 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	2,8	3,76	0,00	0,00	0,000	63	0,301
125	7,6	10,22	2,80	3,76	0,038	188	0,817
250	7,2	9,68	10,40	13,98	0,140	303	0,922
355	7,6	10,22	17,60	23,66	0,237	428	0,704
500	14,4	19,35	25,20	33,87	0,339	605	0,922
710	17,3	23,25	39,60	53,23	0,532	855	0,802
1000	15,9	21,37	56,90	76,48	0,765	1200	0,534
1400	1,4	1,88	72,80	97,85	0,978	1700	0,031
2000	0,2	0,27	74,20	99,73	0,997	2250	0,005
2500	0,0	0,00	74,40	100,00	1,000		

**Tabelle 17: 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	2,7	3,61	0,00	0,00	0,000	63	0,289
125	7,1	9,49	2,70	3,61	0,036	188	0,759
250	5,9	7,89	9,80	13,10	0,131	303	0,751
355	7,0	9,36	15,70	20,99	0,210	428	0,645
500	9,4	12,57	22,70	30,35	0,303	605	0,598
710	14,5	19,39	32,10	42,91	0,429	855	0,668
1000	21,6	28,88	46,60	62,30	0,623	1200	0,722
1400	6,3	8,42	68,20	91,18	0,912	1700	0,140
2000	0,2	0,27	74,50	99,60	0,996	2250	0,005
2500	0,1	0,13	74,70	99,87	0,999	2650	0,004
2800	0,0	0,00	74,80	100,00	1,000		

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 Walzenspalt 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 [Grosse Liesner et al., 2009; Wintermann, 2010]. 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 Walzenspalteneinstellung von 0,5 mm gewählt. Auf diese Weise

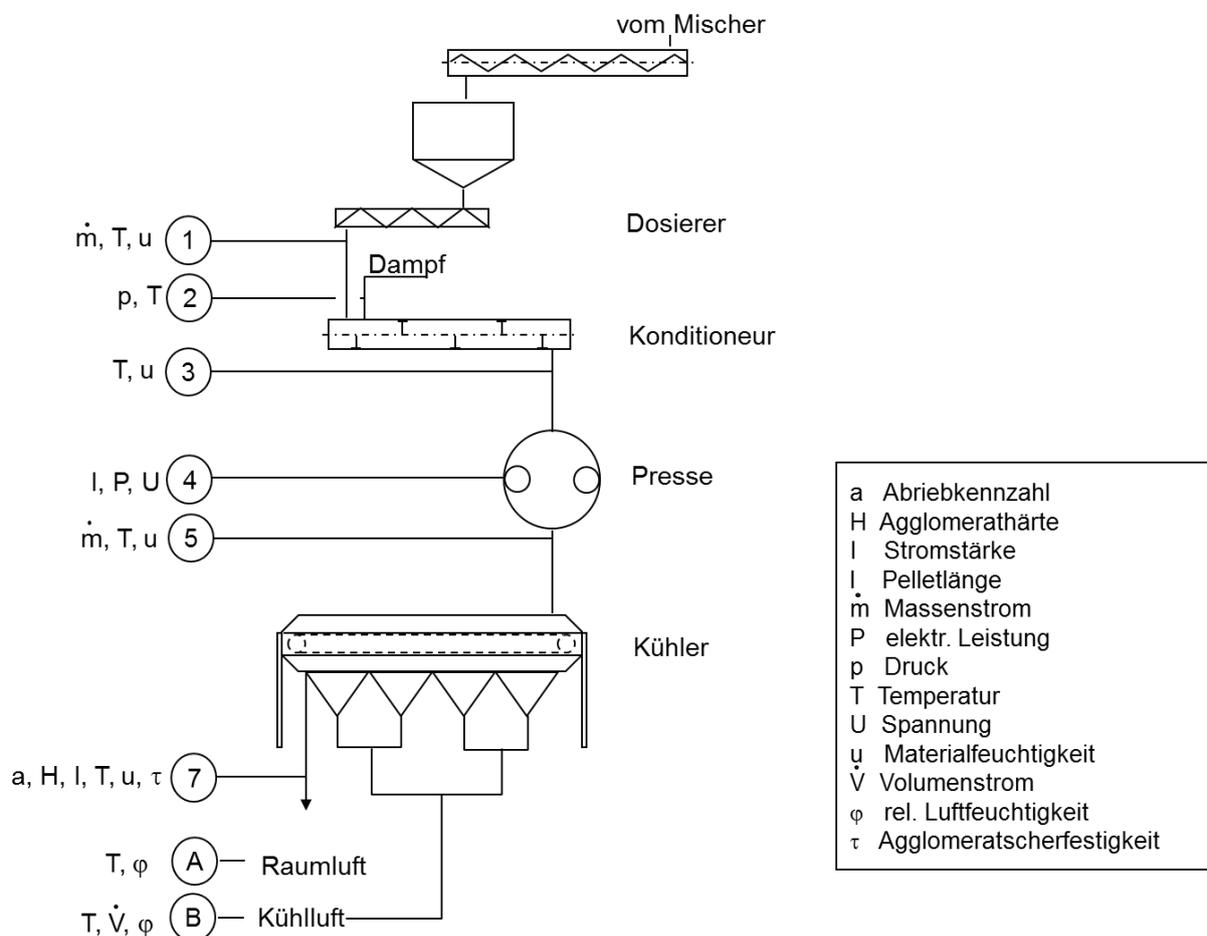
wird gewährleistet, dass der Anteil der Partikel kleiner 500 µm geringer als 30 % ist und damit in Einklang mit den Empfehlungen bezüglich der Tiergesundheit steht [Kamphues, 2004].

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 Mischfutter (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 31** dargestellt.



**Abbildung 31: Schematische Darstellung des konventionellen Pelletierens mit Kurzzeitkonditionierung einschließlich relevanter Mess- und Probenahmestellen der Versuchsanlage im Technikum des IFF-Forschungsinstituts Futtermitteltechnik**

Die in Abbildung 31 verwendete Kurzzeitkonditionierung dient der Vorbereitung und Anpassung von mehlartigem Mischfutter an die anschließende Verdichtungsstufe des Pelletierpro-

zesses. 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 Lagerungsfähigkeit des Mischfutters durch Abkühlung auf Umgebungstemperatur und Reduzierung der Produktfeuchtigkeit auf Werte unter 14 % sowie die Aushärtung der Pellets.

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

Ausgehend von der in **Tabelle 18** aufgelisteten Rezeptur wurde anteilig das Sojaextraktionsschrot zu 25 %, zu 50 % und zu 75 % durch zerkleinerten Presskuchen der Mehlkäferlarve ersetzt (**Tabellen 19-21**). Des Weiteren wurde innerhalb der Versuchseinstellungen die Menge an zuzusetzendem Dampf variiert, die energetischen Parameter aufgezeichnet sowie die resultierende Pelletqualität bewertet.

**Tabelle 18: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters (konventionell)**

<b>Futterkomponenten</b>	<b>%</b>	<b>kg pro Mischung</b>	<b>Einwaage für 175 kg</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 19: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters mit 25 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot)**

<b>Futterkomponenten</b>	<b>%</b>	<b>kg pro Mischung</b>	<b>Einwaage für 175 kg</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>

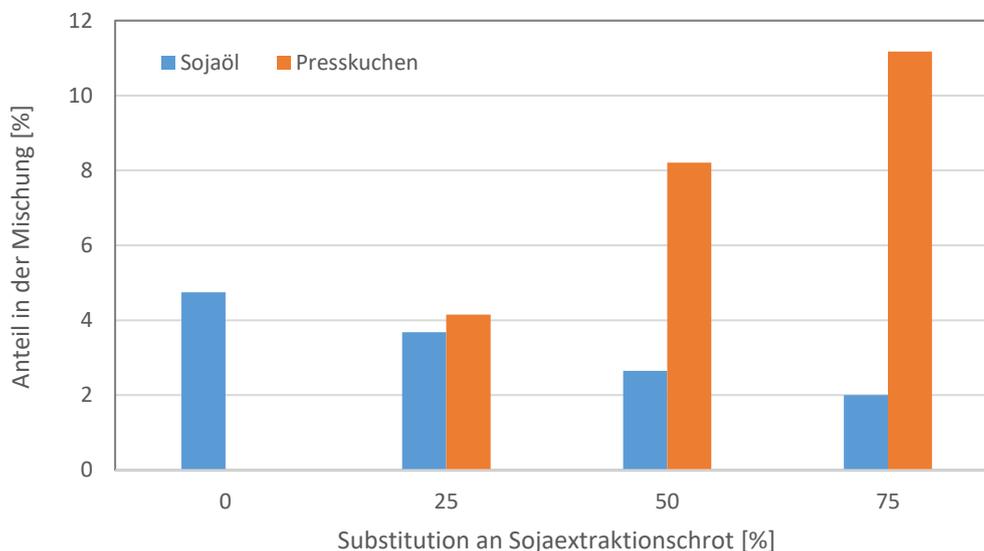
**Tabelle 20: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters mit 50 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot)**

<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 21: Rezeptur des Ferkelaufzuchtfutters mit 75 % Insektenmehl (Substitut vom Sojaextraktionsschrot)**

Futterkomponenten	%	kg pro Mischung	Einwaage für 175 kg
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
Summe:	<b>100,00</b>	<b>350,00</b>	175

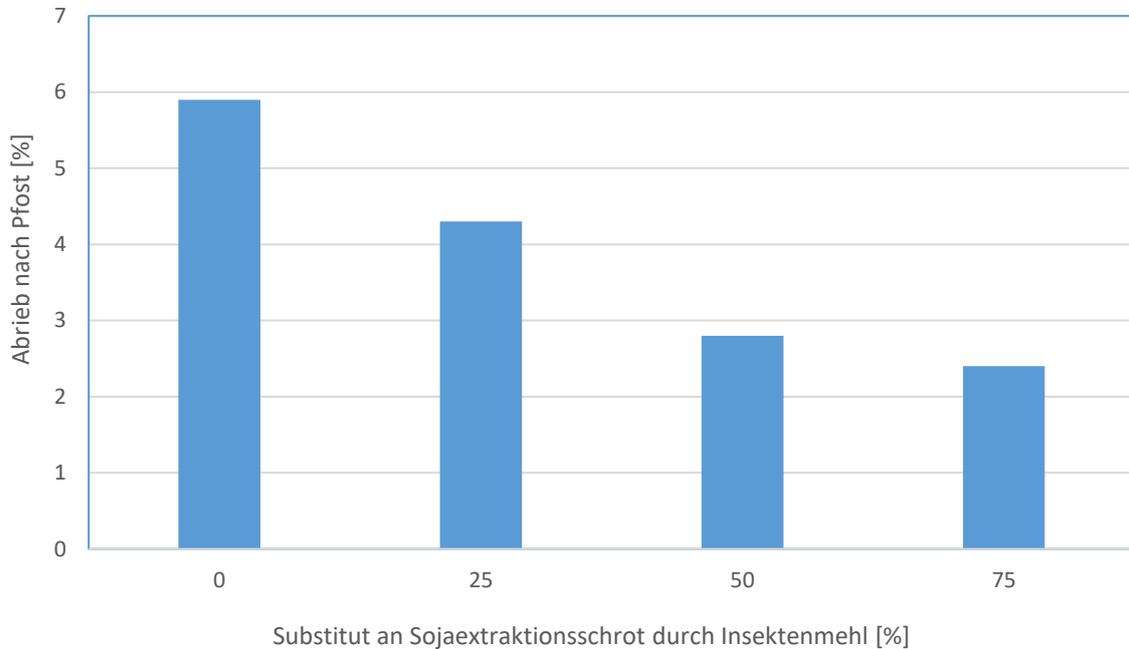
Alle Rezepturen haben den gleichen Energiegehalt. Den Tabellen 19-21 ist zu entnehmen, dass durch das Substituieren des Sojaextraktionsschrotes mit Presskuchen die Menge an zuzusetzendem Sojaöl sinkt (**Abbildung 32**). Ursache dafür ist der Restfettgehalt des Presskuchens von 6,5 %. In der Abbildung 32 ist die Abnahme des zuzusetzenden Sojaöls in den verschiedenen Rezepturen dargestellt.



**Abbildung 32: Prozentuale Anteile von Sojaöl und Insektenpresskuchen an der Gesamt-mischung des Ferkelfutters**

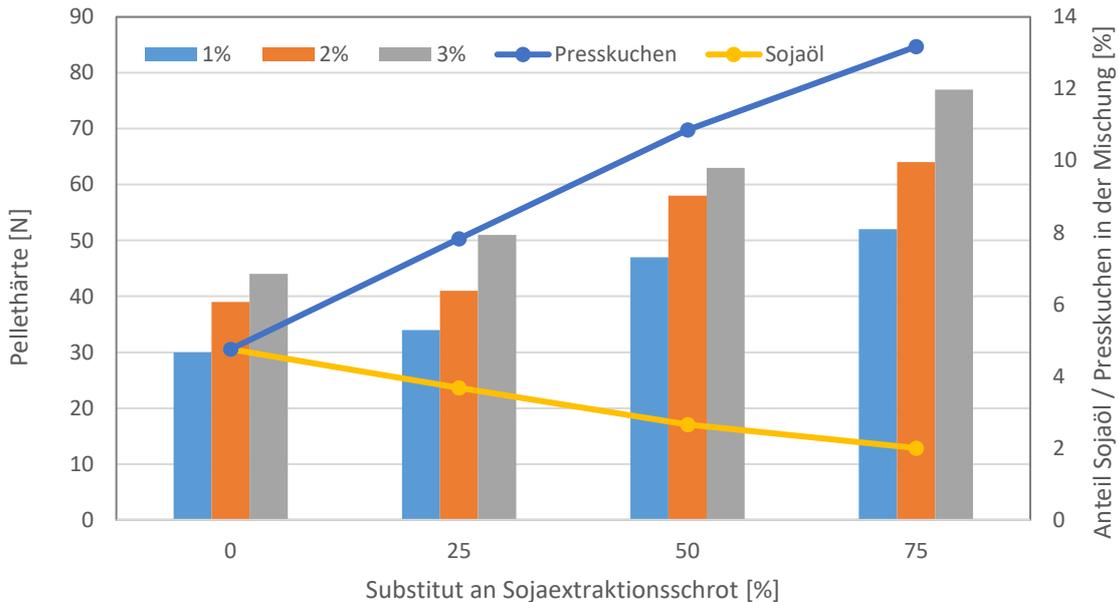
Ausgehend von einem Sojaölzusatz von 4,75 % konnte dieser, bei gleichbleibendem Energiegehalt, durch das Substituieren des Sojaextraktionsschrotes von 75 % durch den Presskuchen, auf 2 % reduziert werden.

Besonders die Zugabe von Fett beeinflusst die Verarbeitungseigenschaften von Mischfuttermitteln beim Pelletierprozess. Hohe Fettgehalte senken den spezifischen Energiebedarf beim Pelletieren [Friedrich, 1981]. Des Weiteren wirken sich hohe Fettgehalte negativ auf die Pelletqualität in Form einer ungenügenden mechanischen Festigkeit aus [Friedrich, 1981]. In der **Abbildung 33** sind zum einen der Energiebedarf der Pelletierversuche und zum anderen die Pelletqualität in Form der Abriebkennzahl nach Pfof dargestellt.



**Abbildung 33: 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.



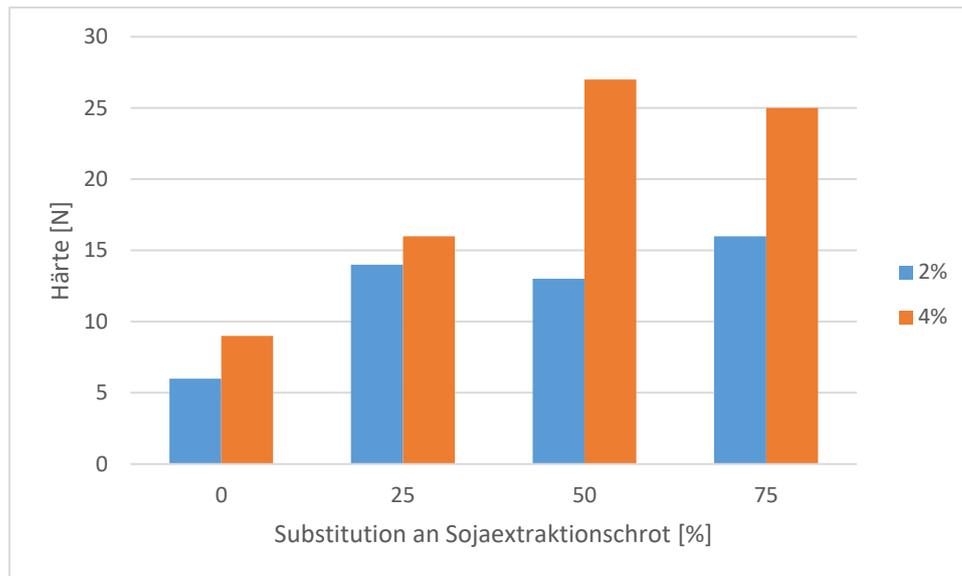
**Abbildung 34: Darstellung der Pelletqualität in Form der Pelletthärte mit unterschiedlichen Gehalten an Insektenmehl und variierenden Dampfzusätzen (1 %, 2 %, 3 %)**

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 des Stärkeaufschlusses führt zur Verbesserung der Nährstoffverfügbarkeit.

Ausgehend von der **Abbildung 34** 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 durch das Zusammenspiel von Presskuchen, Sojaöl und Sojaextraktionsschrot, eine Zunahme der Pelletthärte 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 34).

### 5.3.3 Expandieren

Um den Stärkeaufschluss zu erhöhen und bessere Hygienisierungseffekte in den jeweiligen Futterrezepturen zu erzielen, wird in der Praxis unter anderem das Verfahren des Expandierens verwendet. Bei diesem Verfahren kann unter erhöhtem Druck eine höhere Temperatur auf das Futter wirken. Vergleichend mit den Ergebnissen der Pelletierung wurde ebenfalls erwartet, dass die Pelletthärte zunimmt. In der **Abbildung 35** zeigt sich, dass diese These bestätigt wird. Zum einen zeigte sich, dass Zusetzen von Dampf die Härte der Pellets erhöhte, zum anderen nimmt die Härte mit steigendem Anteil an Insektenmehl zu.



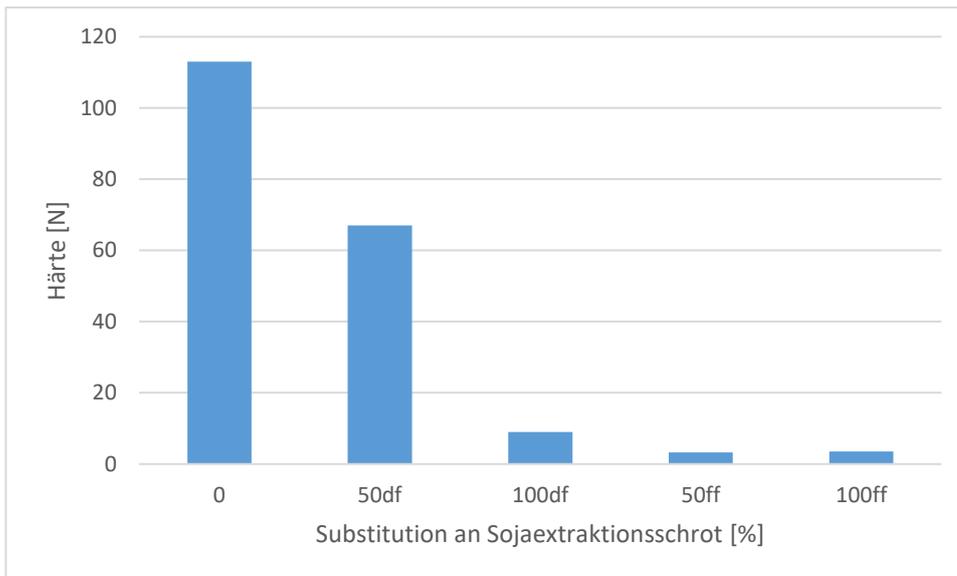
**Abbildung 35: Darstellung der Härte des pelletierten Expandates mit unterschiedlichen Gehalten an Insektenmehl und variierenden Dampfzusätzen (2 %, 4 %)**

### 5.3.4 Extrudieren

Das Extrudieren ist ein Verfahren, welches bei der Herstellung von Mischfutter vorwiegend in der Aquakultur anzutreffen ist. Die Materialtemperatur erhöht sich durch Energiedissipation im Extruder auf max. 150 °C. Im Extruderkopf entstehen in Abhängigkeit von der Schneckenkonfiguration Drücke von etwa 30 bis max. 100 bar (Abbildung 5). Dadurch wird das Material verdichtet, bevor es durch formgebende Düsen ausgepresst und von umlaufenden Messern abgeschnitten wird. In Folge der Expansion kommt es beim Austritt aus den Düsen zu einer Flash-Verdampfung der Feuchtigkeit und zum Einschluss von Luft im Extrudat, welches sich in Form einer höheren Porosität des Endproduktes zeigt. Auf diese Weise können unterschiedliche Schwimm- und Sink-Eigenschaften speziell im Fischfutterbereich erzielt werden.

Ausgehend von den Versuchen beim Pelletieren und Expandieren wurde auch für den Extrusionsprozess erwartet, dass die Endqualität der Extrudate in Form der Härte mit steigendem Anteil an Insektenmehl zunimmt.

Diese Annahme konnte in den Versuchen nicht bestätigt werden.



**Abbildung 36: Darstellung der Härte des Extrudates bei einem konstanten Durchsatz von 9 kg/h und einer konstanten Konditionierung auf 18 % Gesamtfeuchte nach dem Extrudieren**

Der **Abbildung 36** kann entnommen werden das mit zunehmendem Anteil an Insektenproteinmehl (df entfettet) die Härte der Extrudate abnimmt. Durch das Einsetzen der getrockneten und vermahlenden ganzen Larve wurde dieser Effekt noch verstärkt. Diese Beobachtungen wurden auch von Förster auf der IFTC-Conference in Köln vorgestellt. In der Präsentation wurden Versuche mit entfettetem *Hermetia* Mehl zur Herstellung von Karpfenfutter ausgewertet. Es wurde Fischmehl zu 50 % und 100 % substituiert [Förster, 2019].

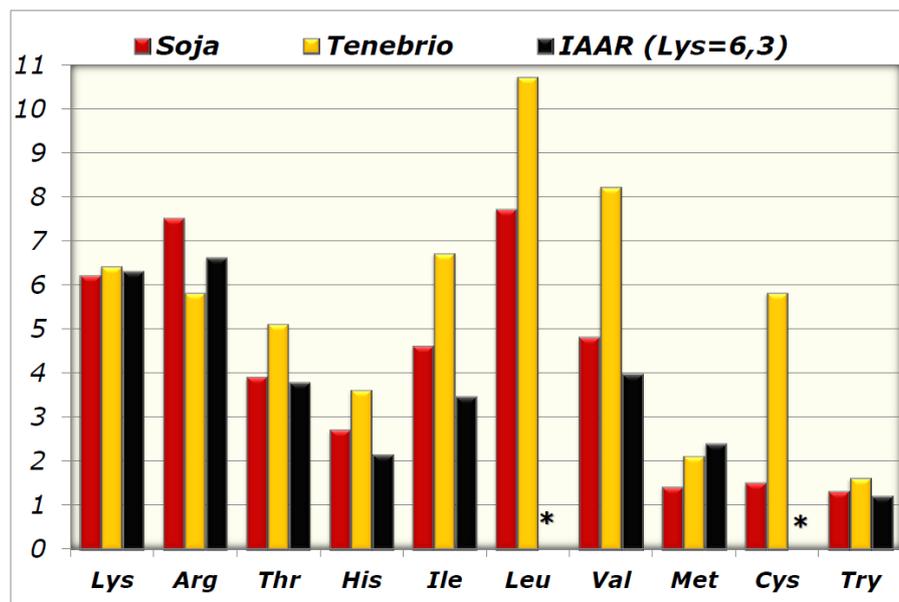
#### **5.4 AS 4 Evaluierung durch Fütterungsversuche an Broilern, Absetzferkeln und Nutzfischen**

Ziel der Untersuchungen war die qualitative Bewertung von potenziellen Futtermitteln, die auf Basis von unter Industriebedingungen gezüchteten Insektenlarven (Mehlkäfer, *Tenebrio molitor*) gewonnen wurden. Die Eignung der erzeugten Insektenmehle als Bestandteil optimierter Mischfuttermittel sollte dabei durch Fütterungsversuche an verschiedenen Nutztierarten (Absetzferkel, Broiler, Nutzfische) evaluiert werden. Hierzu erfolgten Vergleiche von Standardrezepturen als Referenz (Hauptproteincomponente Sojaextraktionsschrot bzw. Sojaproteinkonzentrat) und Futtermischungen mit differenziertem Ersatz von Sojaprotein durch Insektenprotein aus *Tenebrio molitor*. Neben der Erfassung klassischer Parameter von Futtermittelverzehr, Wachstum und Futtermittelverwertung stand die Proteinqualitätsbewertung der erzeugten Futtermischungen im Mittelpunkt. Hierfür waren zusätzlich Messungen der Nährstoffverdaulichkeit, der Körperzusammensetzung als Grundlage von Nährstoffansatzberechnungen sowie Ableitungen zur Effizienz der Nährstoffverwertung erforderlich. Die Ergebnisse von Proteinqualitätsbewertungen waren mit Hilfe von Modellierungen (N-Verwertungsmodell Göttingen) in ihrer Vergleichbarkeit zu optimieren und biostatistisch zu bewerten.

Die Prüfung der jeweiligen tierartspezifischen Testdiäten erfolgte überwiegend durch sogenannte Wachstumsstudien, in denen Körpermasseentwicklung und Futtermittelverzehr der Tiergruppen (Fische je Becken, Masthähnchen je Box in Bodenhaltung) bzw. Einzeltiere (Ferkel) erfasst und daraus Parameter der Futtermittelverwertung (Futtermittelaufwand, FCR) abgeleitet wurden. Ergänzend wurden Körpernährstoffansatzmessungen vorgenommen (Fische, Masthähn-

chen), die die Durchführung aufwändiger Ganzkörperanalysen von repräsentativen Einzeltieren (Masthähnchen) bzw. repräsentativen Sammelproben (Fische) zu Versuchsbeginn und Versuchsende erforderten. Mit diesen Informationen war die Berechnung von Nährstoffansatzwerten möglich, die wiederum, mit der jeweiligen Nährstoffaufnahme ins Verhältnis gesetzt, Kennzahlen zur Nährstoffverwertung lieferten. Dieses Vorgehen war insbesondere für die Proteinfraction vorgesehen und lieferte Aussagen zum Wirkungsgrad der Proteinfraction des Futters. Da derartige Parameter (wie Physiologischer Proteinnutzwert oder Net Protein Utilization, NPU) von der Proteinaufnahme beeinflusst werden, kam generell eine Standardisierung dieser Parameter mit Hilfe des Göttinger N-Verwertungsmodells zur Anwendung, die diesen Einflussfaktor auf dem Wege der Modellierung der Zusammenhänge ausschaltet. Somit kann eine uneingeschränkte direkte Vergleichbarkeit dieser Parameter sichergestellt werden. Es erscheint nicht sinnvoll, die Einzelheiten dieses bereits seit geraumer Zeit wissenschaftlich verifizierten Vorgehens hier im Detail darzustellen. Deshalb wird an entsprechender Stelle auf relevante Übersichtsarbeiten verwiesen. Punktuell wurden auch Verdaulichkeitsparameter erhoben, auf die bei den Versuchsdarstellungen näher eingegangen wird.

Grundsätzlich war bei der Gesamtzielsetzung zu beachten, dass bei einer größeren Zahl an Aminosäuren, ausgenommen Lysin, nicht unerhebliche Effekte auf das Aminosäuremuster zu beachten sind (**Abbildung 37**).



\* Aktuell keine zuverlässigen Angaben möglich

**Abbildung 37:** Zu erwartende Verschiebungen in den Aminosäuremustern bei Austausch von Soja gegen Mehlwurmprotein (Angaben in g AS/16 g N) im Vergleich zum Idealprotein von Masthähnchen (IAAR=ideal amino acid ratio)

Im Folgenden sind das methodische Vorgehen und die erzielten Ergebnisse der einzelnen Versuche nach Nutztierarten dargestellt.

#### 5.4.1 Evaluierung der Fütterungsversuche an Tilapien

Ziel der Versuchsreihe an Niltilapia (*Oreochromis niloticus*) war die Bewertung resultierender zooteknischer Parameter (Futteraufnahme, Futtermittelverwertung, Wachstumsleistung) sowie die Ermittlung von Proteinqualitätsparametern bei Ersatz von Sojaproteinkonzentrat (SPC) durch vollfettes bzw. teilentfettetes Insektenmehl von *Tenebrio molitor* in Alleinfuttermischungen für juvenile Fische.

Bei der Untersuchung handelte es sich um einen 56-tägigen Wachstumsversuch mit Körperansatz- sowie N-Bilanzmessung. Dabei kamen 400 juvenile, rein männliche Niltilapia (*Oreochromis niloticus*) zum Einsatz (**Abbildung 38**).



**Abbildung 38: juvenile Niltilapia**

Für den Versuch standen zwei verschiedene, im industriellen Maßstab produzierte, Insektenmehle zur Verfügung – eine vollfette (TMff) sowie eine teilentfettete Version (TMdf  $\triangleq$  TMP-1, siehe Geflügelversuche) (**Tabelle 22; Abbildung 40**). Beide Insektenmehle wurden vom Forschungsinstitut Futtermitteltechnik (Braunschweig) bereitgestellt. Als Ausgangsmaterial dienten ofengetrocknete Mehlkäferlarven (*Tenebrio molitor*; importiert aus China über ERHARD ANDREAS GmbH, Bremen, Dtl.; **Abbildung 39**). Dieser Schritt wurde erforderlich, da bei Versuchsdurchführung noch keine projekteigenen Mehlkäferlarven in ausreichender Menge vorlagen.



**Abbildung 39: Mehlkäferlarven (*Tenebrio molitor*), ofengetrocknet**



**Abbildung 40: Insektenmehl aus Mehlkäferlarven, vollfett (oben) und teilentfettet (Presskuchen, unten)**

Es wurden fünf iso-nitrogene und iso-energetische Futtermischungen (ausgehend von den aktuellen Versorgungsempfehlungen für Tilapia; NRC, 2011) formuliert – eine Kontrollmischung (Kontrolle) sowie vier Testmischungen, bei denen 50 bzw. 100 % des SPC jeweils durch vollfettes (TMff 50, TMff 100) oder teilentfettetes (TMdf 50, TMdf 100) Insektenmehl ausgetauscht wurde (Tabelle 2). Alle Futtermischungen stellten eine mehr als ausreichende Versorgung mit

essentiellen Aminosäuren sicher und wurden am Forschungsinstitut Futtermitteltechnik (Braunschweig) zu Pellets (Durchmesser 4 mm; **Abbildung 41**) verarbeitet.



**Abbildung 41:** Pelletierte Versuchsfuttermischung mit der Komponente Insektenmehl aus Larvenmehl von *Tenebrio molitor*



**Abbildung 42:** Zu lange Pellets wurden per Hand auf eine zur Verfütterung geeignete Länge gekürzt

Die bereitgestellten Pellets wiesen vergleichsweise wenig Abrieb und eine für den Versuch ausreichende Wasserstabilität auf. Allerdings war die Länge der Pellets sehr heterogen. Zu lange Pellets mussten deshalb vor der Verfütterung per Hand zerkleinert werden, um eine zügige Futteraufnahme zu gewährleisten (**Abbildung 42**).

Die verwendeten Insektenmehle werden hinsichtlich ihrer Nährstoffgehalte in Tabelle 22 näher charakterisiert.

**Tabelle 22: Zusammensetzung der verwendeten Insektenmehle (% der Originalsubstanz)**

	<i>Tenebrio</i> -Mehl (vollfett) TMff	<i>Tenebrio</i> -Mehl (teilentfettet) TMdf (TMP-1)
Trockenmasse	95,1	96,1
Rohprotein (N×6,25)	51,3	70,0
Rohfett	34,8	6,5
N-freie Extrakte*	6,0	15,0
Chitin	4,2	7,2
Rohasche	3,0	4,6

\* berechnete Fraktion = Trockenmasse - (Rohprotein + Rohfett + Rohasche)

In **Tabelle 23** werden die im Versuch eingesetzten Futtermischungen im Hinblick auf Rezeptur und ausgewählte Nährstoffe zusammengefasst.

**Tabelle 23: Zusammensetzung der Versuchsdänten**

	Gehalte im Futter [%]				
	Kontrolle	TMff 50	TMff 100	TMdf 50	TMdf 100
Fischmehl	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1
Fischöl	6,5	3,7	0,9	6,0	5,5
Weizenmehl	26,7	29,0	29,0	29,0	29,0
Weizenstärke (nativ)	10,4	10,9	13,3	9,9	11,2
Weizengluten	8,1	11,0	14,2	7,4	7,0
<i>Tenebrio</i> Mehl (teilentfettet, TMP-1)	-	-	-	15,6	31,2
<i>Tenebrio</i> Mehl (vollfett)	-	15,6	31,2	-	-
Sojaproteinkonzentrat	31,2	15,6	-	15,6	-
Sojaöl	6,5	3,7	0,9	6,0	5,5
Premix	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
CaHPO <sub>4</sub>	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
CaCO <sub>3</sub>	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Carboxymethylcellulose (Binder)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
<i>Nährstoffgehalt [% der TS]</i>					
Trockenmasse (TM)	89,4	89,5	90,2	90,1	91,1
Rohprotein (N×6,25)	38,2	38,7	39,2	39,4	39,4
Rohfett	15,9	15,7	15,0	15,9	16,3
Bruttoenergie [MJ/kg TS]	22,1	22,2	22,2	22,3	22,4

Die Versuchsdurchführung erfolgte in einer halbgeschlossenen Kreislaufanlage mit 20 Rundbecken (Fassungsvermögen je Becken 320 l) (**Abbildungen 43 und 44**).



**Abbildung 43: Biofiltereinheit der Kreislaufanlage**



**Abbildung 44: Rundbecken der Kreislaufanlage**



**Abbildung 45: Versuchsfische im Rundbecken der Kreislaufanlage**

Jede Futtermischung wurde in 4 Becken ( $\cong$  4 Wiederholungen) getestet, wobei jedes Becken mit 20 Fischen (mittleres Startgewicht: 22,8 g) besetzt war (**Abbildung 45**).

Die Tiere wurden am Anfang und am Ende des Experiments individuell gewogen und daraus die mittlere Körpermasse im jeweiligen Becken ermittelt. Die Futtergabe erfolgte zweimal täglich per Hand bis zur scheinbaren Sättigung (tägl. Futtermenge entsprechend 2,2 % des Körpergewichts). Die tatsächliche Futteraufnahme wurde täglich durch Rückwaage der nicht verabreichten Futtermenge erfasst. Die Ergebnisse dienten als Grundlage zur Ableitung von Wachstums- und Futterverwertungskennzahlen. Eine konstante Wassertemperatur (24,5 °C) sowie Beleuchtung (14 h hell/10 h dunkel) waren gewährleistet. Kritische Wasserparameter ( $O_2$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ , pH) wurden regelmäßig überwacht und die Einhaltung der Wasserqualität sichergestellt. Als Referenz für die Nährstoffansatzberechnungen und nachfolgende Proteinqualitätsbeurteilung erfolgte zu Versuchsbeginn die Probennahme von zehn repräsentativen Fischen zur Ganzkörperanalyse (Lagerung bei -18 °C). Zudem wurden insgesamt 12 Fische pro Versuchsdiät (drei Fische pro Becken) am Ende der Versuchsreihe zur Analyse der Ganzkörperzusammensetzung herangezogen.

Alle Versuchsdiäten wurden ohne Probleme von den Fischen akzeptiert. Der Austausch von SPC durch Insektenmehl war unter diesem Aspekt demnach unproblematisch. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 24** zusammengefasst.

**Tabelle 24: Wachstumsleistung und Proteinverwertung**

Futtermischung	Kontrolle	TMff 50	TMff 100	TMdf 50	TMdf 100
Startgewicht [g]	22,8 $\pm$ 0,0	22,7 $\pm$ 0,1	22,8 $\pm$ 0,0	22,8 $\pm$ 0,0	22,7 $\pm$ 0,3
Endgewicht [g]	56,1 $\pm$ 1,3 <sup>a</sup>	61,5 $\pm$ 0,9 <sup>b</sup>	62,0 $\pm$ 0,4 <sup>bc</sup>	61,4 $\pm$ 1,1 <sup>b</sup>	64,4 $\pm$ 2,0 <sup>c</sup>
FA [g TS/KG <sub>kg</sub> <sup>0.67</sup> /d]	6,47 $\pm$ 0,05	6,41 $\pm$ 0,03	6,45 $\pm$ 0,05	6,41 $\pm$ 0,02	6,38 $\pm$ 0,06
NPU <sub>std</sub> [%]	47,8 $\pm$ 0,7 <sup>a</sup>	52,8 $\pm$ 0,5 <sup>c</sup>	49,8 $\pm$ 0,5 <sup>b</sup>	50,2 $\pm$ 0,7 <sup>b</sup>	50,9 $\pm$ 0,8 <sup>b</sup>
SGR [%]	1,6 $\pm$ 0,0 <sup>a</sup>	1,8 $\pm$ 0,0 <sup>b</sup>	1,8 $\pm$ 0,0 <sup>b</sup>	1,8 $\pm$ 0,0 <sup>b</sup>	1,9 $\pm$ 0,0 <sup>c</sup>
FCR [g/g]	1,29 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>	1,14 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup>	1,12 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup>	1,13 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup>	1,05 $\pm$ 0,02 <sup>c</sup>

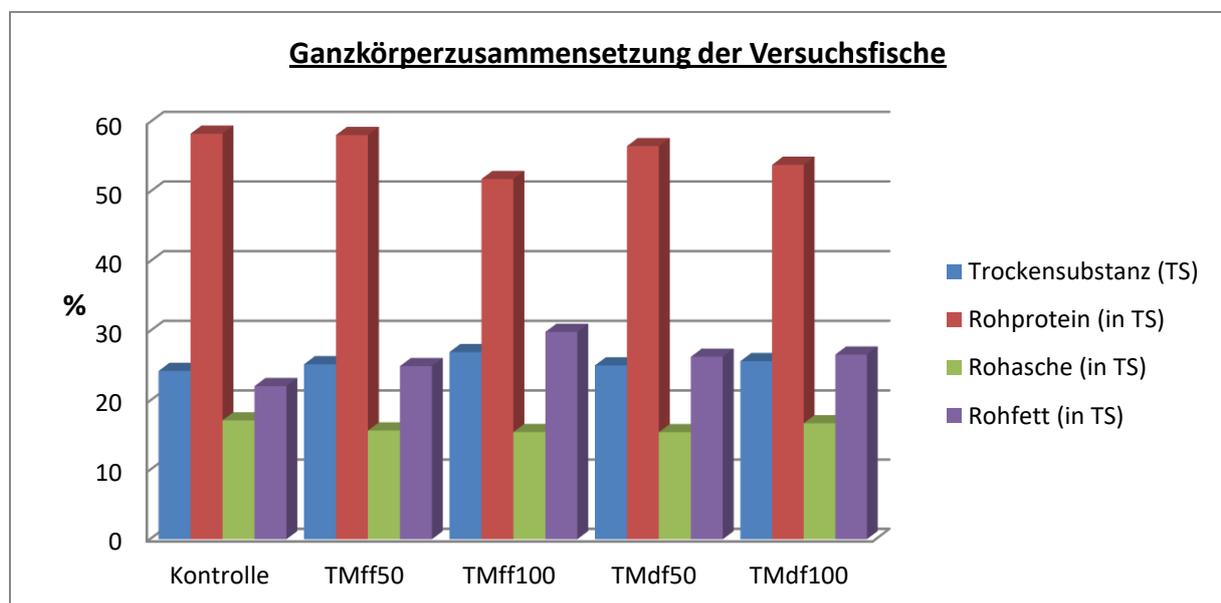
FA = Futteraufnahme, bezogen auf die metabolische Körpergröße; TS = Trockensubstanz; KG = Körpergewicht; NPU<sub>std</sub> = standardisierte Nettoproteinverwertung; SGR = Spezifische Wachstumsrate; FCR = Futterverwertung, unterschiedliche hochgestellte Buchstaben innerhalb der Zeilen kennzeichnen signifikante Unterschiede (p < 0,05)

Wie die Resultate zeigen, wurden die beste Wachstumsrate und Futtermittelverwertung bei vollständigem Austausch von SPC durch teilentfettetes *Tenebrio* Mehl (TMdf 100) bei tendenziell geringerer Futteraufnahme erzielt. Der Futteraufwand (FCR) sowie die spezifische Wachstumsrate (SGR) waren mit dieser Mischung allen anderen Mischungen signifikant überlegen. Aber auch die übrigen Mischungen mit Insektenprotein waren bezüglich FCR und SGR signifikant besser als die Kontrolle.

Ebenso verbesserte der Einsatz von Insektenprotein die Proteinverwertung ( $NPU_{std}$ ) signifikant. Die absolut höchste Proteinverwertung wurde aber bei einer 50%igen Substitution von SPC mit vollfettetem *Tenebrio* Mehl (TMff 50) erreicht.

Der Austausch von SPC durch Insektenmehl bis zu einem Anteil von 50 % war somit vorteilhafter unter Verwendung der vollfetten Variante, wohingegen bei höheren Austauschraten die teilentfettete Variante etwas besser abschnitt. Zudem musste in keiner der untersuchten Futtermischungen eine Supplementierung mit kristallinen Futteraminoäuren erfolgen, um die derzeitigen Versorgungsempfehlungen für Tilapia [NRC, 2011] zu erfüllen.

Die Körperzusammensetzung der Fische zeigte sich ebenfalls von der Versuchsdiet beeinflusst. Die mit den Mischungen TMff100 bzw. TMdf100 gefütterten Tilapia wiesen tendenziell höhere Fettgehalte und niedrigere Proteingehalte im Ganzkörper auf als die Fische mit den Mischungen TMdf50 und insbesondere TMff50 (**Abbildung 46**). Allerdings basieren die ermittelten Werte zur Ganzkörperzusammensetzung auf gepoolten Proben aus den jeweils vier Wiederholungen bzw. Becken jeder Versuchsmischung. Deshalb war eine statistische Analyse nicht möglich und eine abschließende Bewertung dieser Beobachtung muss noch offenbleiben. Weitere Untersuchungen sind für eine abschließende Bewertung dieses möglichen Effektes erforderlich.



**Abbildung 46: Ganzkörperzusammensetzung der Versuchsfische nach Verfütterung von Diäten mit unterschiedlichen Anteilen verschiedener Insektenmehle im Austausch gegen Sojaproteinkonzentrat**

Die im Tilapiafutter vorgenommene Substitution von Sojaproteinkonzentrat, einer qualitativ hochwertigen Proteinquelle in Aquafeed, sowohl durch vollfettes als auch teilentfettetes Insektenmehl aus Mehlwurmlarven (*Tenebrio molitor*) führte zu einer hohen Akzeptanz der Futtermischungen bei juvenilen Tilapia.

Zugleich zeigten sich signifikant positive Effekte auf Wachstum, Futtermittelverwertung sowie Proteinverwertung und -qualität.

Beide Insektenmehle bieten daher aus ernährungsphysiologischer Sicht eine zukunftsfähige Option als Proteinquelle auf dem Weg zu einer nachhaltig ausgerichteten Produktion von Futtermischungen für die Aquakultur.

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse wird allerdings empfohlen, bei Austauschraten von > 50 % SPC bzw. Anteilen von >16 % an Insektenmehl innerhalb der Futtermischungen eine vorherige Teilentfettung des Insektenmehls vorzunehmen. Der Chitingehalt der beiden untersuchten Insektenmehle lässt bei den gewählten Einsatzraten keine negativen Auswirkungen auf Wachstum und Proteinverwertung erkennen. Weitere Untersuchungen u. a. hinsichtlich einer Anhebung des Anteils an Insektenmehl in der Futtermischung (z. B. durch zusätzlichen Austausch von Fischmehl), das Potenzial einer Optimierung der Futterproteinqualität durch Supplementation mit kristallinen Aminosäuren, die Auswirkung von verschiedenen Prozessbedingungen bei der Insektenmehlproduktion auf Wachstum und Proteinverwertung sowie die ernährungsphysiologischen Auswirkungen der Fettsäurezusammensetzung der Insektenmehle auf die Fische als Nahrungsmittel bieten zusätzliche Ansatzpunkte zur weiteren Optimierung der Einsatzbedingungen von Insektenmehlen aus *Tenebrio molitor* in Aquafeed.

#### 5.4.2 Evaluierung der Fütterungsversuche an Masthähnchen

Analog zum vorher beschriebenen Vorgehen im Fischversuch sollte die Auswirkung der Substitution von Sojaprotein durch Insektenprotein auf Akzeptanz, Futtermittelverwertung, Wachstumsleistung und Futterproteinqualität bei Masthähnchen untersucht werden. Außerdem sollte ein Vergleich mit einem alternativen kommerziellen Insektenmehl aus Larven der Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) als potenzielle Proteinquelle durchgeführt werden.

Aus wissenschaftlicher Sicht war zusätzlich der Frage einer möglichen Ingerenz hoher Insektenproteinanteile auf das optimale Verhältnis von Methionin zu Cystein im Masthähnchenfutter nachzugehen. Zwei Aspekte waren hierfür ausschlaggebend:

1. der erhöhte Bedarf des wachsenden Geflügels an S-haltigen Aminosäuren und insbesondere auch an Cystein für die Federproteinsynthese
2. der aus ernährungsphysiologischer Sicht suboptimale relative Anteil von Cystein an den S-haltigen Aminosäuren insgesamt sowie dessen unzureichend bekannte Bioverfügbarkeit aus Insektenmehl.

Da eine Bereitstellung von Cystein ansonsten aus der essentiellen Aminosäure Methionin erfolgen muss [Übersicht Brede et al. 2018], war diese Frage von wesentlicher Relevanz für die weiteren Schlussfolgerungen zur möglichen Einsatzhöhe der Insektenmehle beim Broiler.

Im Ergebnis der Untersuchungen zeigte sich aber kein signifikanter Einfluss dieses Faktors. Deshalb werden nachfolgend zwar alle geprüften Mischungen angegeben, aus pragmatischer Sicht bei der Ergebnisdarstellung aber eine Beschränkung auf die direkten Proteinträgervergleiche bei gleichem Met:Cys Verhältnis im Futter vorgenommen. Damit soll der generelle Fokus des Teilprojektes auf die vorgenommenen Proteinträgeraustausche gewahrt werden.

Für die Versuche stand ebenso wie im Fischversuch ein teilentfettetes Insektenmehl, nachfolgend als *Tenebrio molitor* Presskuchen (TMP) bezeichnet, zur Verfügung. Als Ausgangsmaterial dienten hier ebenfalls Mehlkäferlarven, die in ofengetrockneter Form analog zum Fischversuch aus China bezogen (gleiche Charge Ausgangsprodukt wie im Fischversuch) und unter

fachlicher Betreuung durch das Forschungsinstitut Futtermitteltechnik in Braunschweig in einer Schneckenpresse (AP08, Fa. Reinartz GmbH & Co. KG) mit 6-Lochscheiben teilentfettet wurden (neu aufbereitete Charge gegenüber dem Fischversuch; TMP-2).

Der TMP war strukturell sehr grobkörnig (**Abbildung 47**), so dass das Material vor der Herstellung der Futtermischungen in den Versuchseinrichtungen der Abteilung Tierernährungsphysiologie der Georg-August-Universität Göttingen mit einer herkömmlichen Schrotmühle (RVO332, Fa. Neurero Farm- und Fördertechnik GmbH) fein vermahlen werden musste, um ein homogenes Vermischen mit den anderen Einzelfuttermitteln sicherzustellen.



**Abbildung 47:** Presskuchen aus *Tenebrio molitor*



**Abbildung 48:** Haltung der Versuchstiere

In der Abteilung Tierernährungsphysiologie der Georg-August-Universität Göttingen wurden insgesamt drei Wachstumsversuche mit Masthähnchen durchgeführt.

Für Versuch 1 wurden 48, für die Versuche 2 und 3 jeweils 240 männliche Eintagsküken der Genetik Ross 308 von der Pro Care Brüterei in Elsnigk aufgestellt. Direkt nach Ankunft wurden die Tiere einzeln gewogen und so in die Versuchsgruppen eingeteilt, dass die Lebendmasse im Mittel der Gruppen zu Versuchsbeginn vergleichbar war.

Versuch 1 war als Vorversuch angelegt und wurde mit 3 Versuchsgruppen à 3 Boxen (Gruppen 1 und 2) bzw. 2 Boxen (Gruppe 3) mit jeweils 6 Tieren durchgeführt.

Im 2. Versuch kamen 6 Versuchsgruppen mit je 40 Tieren zum Einsatz. Die Tiere wurden in Gruppen von jeweils 5 Tieren, also in 8 Bodenhaltungsboxen pro Versuchsgruppe, gehalten. Versuch 3 bestand aus 8 Versuchsgruppen mit je 30 Tieren pro Gruppe, die in jeweils 6 Boxen mit je 5 Tieren gehalten wurden (**Abbildung 48**).

Die Boxen hatten die Maße von 70 x 150 cm (Versuchseinheit 1) bzw. 108 x 120 cm (Versuchseinheit 2) und waren mit einer selbstfüllenden Kunststofftränke ausgestattet. Das Futter

wurde in einem langen Futtertrog vorgelegt. Die Haltung erfolgte während des gesamten Versuches auf Holzspänen. Beide Versuchseinheiten waren mit einem Zu- und Abluftsystem ausgestattet und es wurde ein Hell:Dunkel-Rhythmus von 23:1 h angewandt. Die Temperatur lag zu Beginn der Versuche bei ca. 33 °C und wurde im weiteren Verlauf langsam auf ca. 21 °C abgesenkt. Jeder Versuch hatte eine Dauer von 35 Tagen, die sich in eine Starter- (Tag 1-21) und eine Growerphase (Tag 22-35) unterteilten.

Während des gesamten Versuchszeitraumes erhielten die Tiere Futter und Wasser *ad libitum*. Die Futtermischungen wurden mit Hilfe des Programmes WinFumi (Vers. 3.9, Fa. HYBRIMIN®) auf Grundlage der analysierten Rohnährstoff- und AS-Gehalte der verwendeten Einzelkomponenten kalkuliert. Die Vorlage des Versuchsfutters erfolgte in pelletierter Form. Für eine bessere Mischgenauigkeit wurde eine Vormischung aus dem Prämix, den Mineralstoffen, den zugesetzten kristallinen Aminosäuren sowie bei den Mischungen für Verdaulichkeitsmessungen einem unverdaulichen Marker (TiO<sub>2</sub>) hergestellt (Mischer M20MK, Fa. Gebrüder Lödige Maschinenbau GmbH). Die so erhaltenen Vormischungen wurden danach mit den restlichen Komponenten der Futtermischungen mit einem Mischer der Marke Lödige (FM150D.1MZ, Fa. Gebrüder Lödige Maschinenbau GmbH) gemischt und mit einer Pelletiermaschine (3530FPP20, Fa. R.A. Lister & Co Ltd.) pelletiert (Starterphase: 2 mm Pelletdurchmesser, Growerphase: 4 mm Pelletdurchmesser).

In **Tabelle 25** wird das eingesetzte, teilentfettete Insektenmehl aus *Tenebrio molitor* im Detail charakterisiert.

**Tabelle 25: Rohnährstoffgehalt und Gehalt ausgewählter Aminosäuren des in den Versuchen mit Masthähnchen verwendeten *Tenebrio molitor* Presskuchens (TMP-2)**

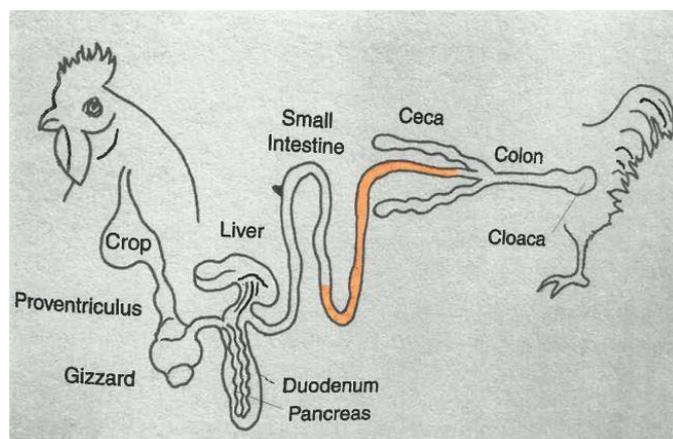
Nährstoffzusammensetzung	TMP-2
<i>Rohnährstoffe [% TS]</i>	
Trockensubstanz	95,1
Rohprotein	70,7
Rohfett	10,4
Rohfaser	7,6
Rohasche	4,1
<i>Aminosäuregehalte [g/16 g N]</i>	
Arg	5,25
Cys	0,92
His	3,10
Ile	4,11
Leu	7,49
Lys	6,04
Met	1,25
Thr	4,15
Val	5,45

Zur Ermittlung der zootechnischen Parameter wurden die Tiere sowie die nicht verzehrten Futterreste einmal pro Woche gewogen. Basierend auf dieser Datengrundlage konnten Lebendmasseentwicklung, Futteraufnahme (FA) und Futteraufwand (FCR = Feed conversion ratio) kalkuliert werden.

Die Bewertung der Futter-Proteinqualität wurde auf Grundlage einer Körper-N-Ansatzmessung vorgenommen. Hierfür wurden die N-Gehalte der Ganzkörper repräsentativer Tiere zu Versuchsbeginn, am Ende der Starterphase und am Ende der Growerphase bestimmt. Dafür wurde am Ende der Starterphase (Tag 21) sowie am Ende der Growerphase (Tag 35) aus jeder Box ein repräsentatives Tier für die Ganzkörperanalyse ausgewählt. Die Tiere wurden nach 24-stündiger Nüchternung mittels CO<sub>2</sub> euthanasiert und bis zur weiteren Analyse bei -20 °C eingefroren. Für die Analysen wurde der komplette Tierkörper inklusive Federn homogenisiert, indem der Tierkörper in gefrorenem Zustand zunächst mit einer Bandsäge (FK 22, Fa. Bizerba) in kleinere Stücke zerteilt und anschließend ebenfalls noch in gefrorenem Zustand mittels zweimaligem Durchlaufen eines Fleischwolfes (EM 82 VL-S, Fa. Edertal) zu einer homogenen Masse verarbeitet wurde. Für die weiteren Analysen wurde die Probenmasse gefriergetrocknet und homogenisiert.

Anhand der Körpermasseentwicklung der Versuchsgruppen lieferten die N-Gehaltswerte den jeweiligen N-Ansatz. Mit Hilfe des Göttinger N-Verwertungsmodells [Liebert 2008, 2015, 2017] wurden direkt vergleichbare Proteinqualitätsparameter, unabhängig von der variierenden Höhe der N-Aufnahme, abgeleitet. Nachfolgend wird die Gesamtverwertung der Proteinfraction mit dem am besten geeigneten standardisierten Physiologischen Proteinnutzwert (NPU<sub>std.</sub> in %) charakterisiert, womit grundsätzlich die Höhe des retinierten N im Körperansatz in Prozent der N-Aufnahme zum Ausdruck gebracht wird. Damit wird der Wirkungsgrad der Futterproteinfraction bestmöglich beschrieben.

Zudem wurde ausgewählten Tieren am Ende von Versuch 2 und 3 Dünndarm-Chymus zur Bestimmung der scheinbaren precaecalen Verdaulichkeit (pcV) entnommen. Dafür mussten die Tiere 12 Stunden vor der Tötung genüchert werden. Zwei Stunden vor der Tötung wurde das Futter wieder vorgelegt. Dadurch sollte eine hohe Futteraufnahme und damit verbunden eine möglichst große und vergleichbare Chymusmenge im zu entnehmenden Darmabschnitt erreicht werden. Von jeweils 5 Tieren einer Versuchsgruppe wurde eine Poolprobe gebildet. Diese 5 Tiere wurden zusammen euthanasiert und anschließend entsprechend der von [Kluth et al., 2005] und [Kluth und Rodehutschord, 2009] beschriebenen Methode die letzten zwei Drittel des Dünndarmabschnittes vom Meckel'schen Diverticulum bis etwa 2 cm vor Einmündung der Blinddärme in das *terminale Ileum* entnommen (**Abbildung 47**). Aus diesem Darmabschnitt wurde dann der Chymus ausgestreift und nach der Probennahme bei -20 °C eingefroren, später gefriergetrocknet und auf 0,5 mm gemahlen.



**Abbildung 49: Der Gastrointestinaltrakt eines Masthähnchens. Orange markiert: Darmabschnitt zur Chymusentnahme [nach Leeson und Summers, 2001]**

## Versuch 1

Die in Versuch 1, der als Vorversuch lief, einbezogenen Futtermischungen zeigt **Tabelle 26**. Damit sollte zunächst geklärt werden, in welchem Umfang AS-Supplementationen in den aufbauenden Versuchen erforderlich werden.

**Tabelle 26: In Versuch 1 (Vorversuch) eingesetzte Futtermischungen**

Futtermischung	Starterphase (Tag 1-21)			Growerphase (Tag 22-35)		
	1	2	3	1	2	3
	TMP nK	TMP pK	SES pK	TMP nK	TMP pK	SES pK
TMP-2	219	198	-	197	185	-
Sojaextraktionsschrot	-	-	390	-	-	330
Weizen	617	600	326	430	430	360
Mais	93	100	163	240	240	180
Weizenstärke	-	16,3	-	42,5	45,4	-
Sojaöl	30	30	78,5	50	50	91
DCP	23	23	11	20	20	10
CaCO <sub>3</sub>	6	6	11	5	5	8
NaCl	2,5	2,5	3	2,5	2,5	2,5
Prämix	10	10	10	10	10	10
L-Lysin·HCl	-	4,37	2,53	-	2,67	1,80
L-Cystein·HCl·H <sub>2</sub> O	-	-	1,98	-	-	1,31
L-Arginin	-	3,95	-	-	2,64	-
L-Threonin	-	0,36	0,28	-	-	0,12
DL-Methionin	-	2,34	2,24	-	1,69	1,72
L-Tryptophan	-	0,13	-	-	-	-
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	3	3	3

Futtermischung 1 diene als negative Kontrolle (nK) des TMP, das heißt, es wurden keinerlei Aminosäuren (AS) supplementiert. In Futtermischung 2 (positive Kontrolle, pK) mit TMP wurde dagegen eine Supplementation gemäß der AS-Bedarfsrelationen vorgenommen. Futtermischung 3 enthielt traditionell Sojaextraktionsschrot (SES) an Stelle vom TMP und diene als weitere positive Kontrolle (pK) beim Vergleich der beiden Proteinquellen.

## Versuch 2

Die Futtermischungen waren grundsätzlich vergleichbar zu denen aus dem Vorversuch aufgebaut. Im Gegensatz zum Vorversuch wurde hier jedoch eine schwache Limitierung der schwefelhaltigen AS eingestellt. Dies war erforderlich, um eine Wirksamkeitsmessung von Methionin im Futter zu ermöglichen. Die Einbettung der Versuche in die Fragestellung zum optimalen Methionin:Cystein-Verhältnis wurde bereits eingangs kurz begründet. Auf die Details dieser Problematik soll hier nicht weiter eingegangen werden [Übersicht Brede et al. 2018], da sie bei der weiteren Ergebnisdarstellung aus ebenfalls eingangs genannten Gründen nicht berücksichtigt wird.

**Tabelle 27** vermittelt einen Überblick über alle Mischungen in Versuch 2.

**Tabelle 27: Zusammensetzung der in Versuch 2 verwendeten Futtermischungen**

Versuchsgruppe	Starterphase (Tag 1-21)						Growerphase (Tag 22-35)					
	A TMP 40:60	B TMP 45:55	C TMP 50:50	D TMP 55:45	E TMP 60:40	F SES 50:50	A TMP 40:60	B TMP 45:55	C TMP 50:50	D TMP 55:45	E TMP 60:40	F SES 50:50
TMP-2	160	160	160	160	160	-	148,80	148,80	148,80	148,80	148,80	-
SES	-	-	-	-	-	321	-	-	-	-	-	298,53
Weizen	580	580	580	580	580	374	539,40	539,40	539,40	539,40	539,40	347,82
Mais	160	160	160	160	160	170	148,80	148,80	148,80	148,80	148,80	158,10
Weizenstärke	13,34	13,50	13,64	13,80	13,90	8,28	80,17	80,31	80,44	80,60	80,66	73,69
Sojaöl	30	30	30	30	30	80	30	30	30	30	30	80
DCP	23	23	23	23	23	15	19	19	19	19	19	11
CaCO <sub>3</sub>	6	6	6	6	6	10	5	5	5	5	5	8
Viehsalz	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	3,0	2	2	2	2	2	2
Prämix	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
L-Lysin-HCl	6,23	6,23	6,23	6,23	6,23	4,63	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	4,21
L-Cysteine·HCl·H <sub>2</sub> O	1,93	1,43	0,94	0,45	-	0,24	1,76	1,30	0,85	0,37	-	0,20
L-Arginin	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	1,85	4,78	4,78	4,78	4,78	4,78	1,66
L-Threonin	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,24	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,10
DL-Methionin	0,12	0,46	0,81	1,14	1,49	0,76	0,09	0,41	0,73	1,05	1,36	0,69
L-Tryptophan	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	-	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	-
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	3	3	3	3	3	3

In **Tabelle 28** ist eine Fokussierung auf die Mischungen im Direktvergleich vorgenommen.

**Tabelle 28: Zusammensetzung der in Versuch 2 eingesetzte Futtermischungen zum Direktvergleich bei Met:Cys = 50:50**

Futtermischung	Starterphase (Tag 1-21)		Growerphase (Tag 22-35)	
	1 TMP	2 SES	1 TMP	2 SES
TMP-2	160	-	149	-
SES	-	321	-	299
Weizen	580	374	539	348
Mais	160	170	149	158
Weizenstärke	13.6	8.3	8.0	7.4
Sojaöl	30	80	30	80
DCP	23	15	19	11
CaCO <sub>3</sub>	6	10	5	8
NaCl	2.5	3.0	2.0	2.0
Prämix	10	10	10	10
L-Lysin·HCl	6.23	4.63	5.70	4.21
L-Cystein·HCl·H <sub>2</sub> O	0.94	0.24	0.85	0.20
L-Arginin	5.20	1.85	4.78	1.66
L-Threonin	1.31	1.24	1.16	1.10
DL-Methionin	0.81	0.76	0.73	0.69
L-Tryptophan	0.37	-	0.34	-
TiO <sub>2</sub>	-	-	3	3

Die Verwendung von Titandioxid als Marker in den Grower-Mischungen sollte am Versuchsende eine Bewertung von Parametern der precaecalen Verdaulichkeit ermöglichen.

### Versuch 3

In Versuch 3 sollte der Presskuchen TMP mit einem teilentfetteten Mehl aus *Hermetia illucens* (HM) verglichen werden. Die Futtermischungen waren wieder vergleichbar aufgebaut, es wurde jedoch in Anbetracht des angestrebten Direktvergleiches der beiden Insektenmehle auf eine Futtermischung mit SES als Kontrolle (Versuch 2) verzichtet. Ebenso lag in den Mischungen im Gegensatz zu Versuch 2 keine gezielte AS-Limitierung vor. Damit sollte das Futterpotenzial bei ausbalancierter AS-Versorgung im Vergleich der beiden Insektenproteine bewertet werden. **Tabelle 29** vermittelt wiederum alle untersuchten Mischungen, **Tabelle 30** fokussiert auf den direkten Vergleich.

**Tabelle 29: Zusammensetzung der in der Starterphase (Tag 1-21) von Versuch 3 verwendeten Futtermischungen.**

Versuchsgruppe	A	B	C	D	E	F	G	H
	TMP 50:50	TMP 55:45	TMP 60:40	TMP pK	HM 50:50	HM 55:45	HM 60:40	HM pK
TMP-2	162	162	162	157	-	-	-	-
HM-Mehl	-	-	-	-	185,5	185,5	185,5	181,0
Weizen	580	580	580	600	560	560	560	560
Mais	160	160	160	140	150	150	150	140
Weizenstärke	10,81	10,98	11,06	8,50	21,42	21,56	21,73	28,99
Sojaöl	30	30	30	32	29	29	29	30
DCP	23	23	23	23	10	10	10	11
CaCO <sub>3</sub>	6	6	6	6	11	11	11	11
Viehsalz	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0
Prämix	10	10	10	10	10	10	10	10
L-Lysin-HCl	6,13	6,13	6,13	6,38	7,18	7,18	7,18	7,33
L-Cystein·HCl·H <sub>2</sub> O	0,93	0,42	-	3,13	1,29	0,80	0,29	3,46
L-Arginin	5,13	5,13	5,13	5,28	6,52	6,52	6,52	6,67
L-Threonin	1,25	1,25	1,25	1,40	2,07	2,07	2,07	2,13
DL-Methionin	0,79	1,13	1,47	2,62	0,92	1,26	1,60	2,69
L-Tryptophan	0,36	0,36	0,36	0,65	-	-	-	-
L-Isoleucin	0,57	0,57	0,57	0,70	0,96	0,96	0,96	1,09
L-Leucin	0,53	0,53	0,53	0,84	2,15	2,15	2,15	2,42
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabelle 30: Zusammensetzung der in Versuch 3 eingesetzte Futtermischungen zum Direktvergleich bei Met:Cys = 50:50**

Futtermischung	Starterphase (Tag 1-21)		Growerphase (Tag 22-35)	
	1 TMP	2 HM	1 TMP	2 HM
TMP1	157	-	146	-
HM-Mehl	-	181	-	173
Weizen	600	560	558	521
Mais	140	140	130	140
Weizenstärke	8,5	29,0	70,1	83,1
Sojaöl	32	30	32	29
DCP	23	11	23	10
CaCO <sub>3</sub>	6	11	6	11
NaCl	2,5	2,0	2,5	2,0
Prämix <sup>1</sup>	10	10	10	10
L-Lysin·HCl	6,38	7,33	5,84	6,59
L-Cystein·HCl·H <sub>2</sub> O	3,13	3,46	2,87	0,70
L-Arginin	5,28	6,67	4,85	6,01
L-Threonin	1,40	2,13	1,25	1,87
DL-Methionin	2,62	2,69	2,41	1,15
L-Tryptophan	0,65	0,22	0,59	-
L-Isoleucin	0,70	1,09	0,62	0,86
L-Leucin	0,84	2,42	0,73	1,94
TiO <sub>2</sub>	-	-	3	3

### Versuch 1

Sowohl in der Starter- als auch in der Growerphase von Versuch 1 sowie bei Betrachtung des gesamten Versuchszeitraums (**Tabelle 31**) konnten in Bezug auf die Wachstumsparameter keine signifikanten Unterschiede zwischen Futtermischung 2 (TMP pK) und 3 (SES pK) festgestellt werden. Futtermischung 1 (TMP nK) wies dagegen bei allen Parametern signifikant geringere Werte auf. So war die End-Lebendmasse der Tiere ohne AS-Ergänzung nur halb so hoch wie bei Futtermischung 2 (TMP pK).

**Tabelle 31: Mittlere Wachstumsergebnisse des Vorversuchs (Versuch 1, n = 3 in Gruppen 1 und 2, n = 2 in Gruppe 3)**

<b>Futtermischung</b>	<b>1 TMP nK</b>	<b>2 TMP pK</b>	<b>3 SES pK</b>
Starterphase (Tag 1-21)			
Endlebensmasse (g)	577 <sup>a</sup> ± 48	1029 <sup>b</sup> ± 35	981 <sup>b</sup> ± 11
Tägliche Zunahme (g/d)	25 <sup>a</sup> ± 2	47 <sup>b</sup> ± 2	45 <sup>b</sup> ± 1
Futteraufnahme (gTS/d)	42,3 <sup>a</sup> ± 4,7	51,9 <sup>b</sup> ± 1,8	53,5 <sup>b</sup> ± 0,3
FCR	1,68 <sup>a</sup> ± 0,15	1,11 <sup>b</sup> ± 0,01	1,21 <sup>b</sup> ± 0,01
Growerphase (Tag 22-35)			
Endlebensmasse (g)	1214 <sup>a</sup> ± 128	2424 <sup>b</sup> ± 45	2381 <sup>b</sup> ± 49
Tägliche Zunahme (g/d)	46 <sup>a</sup> ± 6	100 <sup>b</sup> ± 5	100 <sup>b</sup> ± 3
Futteraufnahme (gTS/d)	76,9 <sup>a</sup> ± 8,6	131,7 <sup>b</sup> ± 4,5	139,6 <sup>b</sup> ± 2,2
FCR	1,69 <sup>a</sup> ± 0,05	1,32 <sup>b</sup> ± 0,03	1,40 <sup>b</sup> ± 0,06
Gesamtversuch (Tag 1-35)			
Endlebensmasse (g)	1214 <sup>a</sup> ± 128	2424 <sup>b</sup> ± 45	2381 <sup>b</sup> ± 49
Tägliche Zunahme (g/d)	33 <sup>a</sup> ± 5	68 <sup>b</sup> ± 1	67 <sup>b</sup> ± 1
Futteraufnahme (gTS/d)	56,2 <sup>a</sup> ± 5,7	83,8 <sup>b</sup> ± 0,8	87,9 <sup>b</sup> ± 0,7
FCR	1,69 <sup>a</sup> ± 0,10	1,24 <sup>b</sup> ± 0,01	1,32 <sup>b</sup> ± 0,04

Somit konnte aus Versuch 1 (Vorversuch) gefolgert werden, dass eine hohe Akzeptanz der TMP-Mischung vorlag und welche AS-Zusätze für die weiteren Untersuchungen relevant sein werden.

### Versuch 2

Ebenso wie im Vorversuch bei AS-Ausgleich gab es in Versuch 2 (**Tabelle 32**) in der Starterphase keine signifikanten Unterschiede zwischen den Futtermischungen 1 (TMP) und 2 (SES). Tendenziell nahmen die Tiere mit Futtermischung 2 jedoch etwas mehr Futter auf, was sich in einem tendenziell höheren Futteraufwand zeigte.

In der Growerphase und bei Betrachtung des gesamten Versuchszeitraums war der Unterschied in Bezug auf den Futteraufwand signifikant, die anderen Parameter unterschieden sich jedoch nicht.

Die Proteinqualität ( $NPU_{std.}$ ) wies in beiden Futtermischungen keine signifikanten Unterschiede auf, mit zunehmendem Alter der Tiere war sie in Futtermischung 1 (TMP) tendenziell höher als in Futtermischung 2 (SES).

**Tabelle 32: Mittlere Wachstumsergebnisse und Proteinqualität in Versuch 2 (n = 8)**

Futtermischung	1 TMP	2 SES
Starterphase (Tag 1-21)		
Endlebensmasse (g)	981 ± 91	1017 ± 42
Tägliche Zunahme (g/d)	44 ± 4	46 ± 2
Futteraufnahme (gTS/d)	55,8 ± 4,4	60,5 ± 3,7
FCR	1,26 ± 0,05	1,31 ± 0,06
NPU <sub>std.</sub> (%)	59,1 ± 1,9	58,9 ± 2,1
Growerphase (Tag 22-35)		
Endlebensmasse (g)	2378 ± 221	2247 ± 119
Tägliche Zunahme (g/d)	100 ± 13	88 ± 9
Futteraufnahme (gTS/d)	148,0 ± 13,6	155,8 ± 13,6
FCR	1,49 <sup>b</sup> ± 0,10	1,78 <sup>a</sup> ± 0,16
NPU <sub>std.</sub> (%)	61,9 ± 5,0	55,7 ± 4,1
Gesamtversuch (Tag 1-35)		
Endlebensmasse (g)	2378 ± 221	2247 ± 119
Tägliche Zunahme (g/d)	67 ± 6	63 ± 3
Futteraufnahme (gTS/d)	92,7 ± 7,6	98,7 ± 6,1
FCR	1,40 <sup>b</sup> ± 0,06	1,57 <sup>a</sup> ± 0,09
NPU <sub>std.</sub> (%)	59,8 ± 1,8	57,3 ± 2,2

Die scheinbare precaecale Verdaulichkeit des Rohproteins und ausgewählter AS (**Tabelle 33**) unterschied sich nicht zwischen Futtermischung 1 (TMP) und 2 (SES). Lediglich für Phenylalanin lag der Wert für Futtermischung 2 signifikant höher. Eine ernährungsphysiologische Interpretation dieser Beobachtung erscheint schwierig.

**Tabelle 33: Ergebnisse der precaecalen Verdaulichkeit [%] ausgewählter Inhaltsstoffe der Futtermischungen in Versuch 2 (n = 3)**

Futtermischung	1 TMP	2 SES
XP	74,7 ± 2,2	75,2 ± 1,3
Lys	79,2 ± 3,5	80,8 ± 1,2
Met	75,8 ± 4,6	80,6 ± 1,2
Cys	68,6 ± 4,4	60,9 ± 2,0
Thr	67,5 ± 5,1	70,8 ± 2,8
Arg	84,4 ± 2,8	85,1 ± 0,6
His	74,3 ± 3,8	78,4 ± 0,7
Ileu	71,9 ± 4,4	76,5 ± 0,9
Leu	74,5 ± 4,6	76,6 ± 1,2
Phe	70,1 ± 4,7 <sup>a</sup>	79,4 ± 0,8 <sup>b</sup>
Val	73,9 ± 8,9	75,1 ± 1,1

### Versuch 3

Die Ergebnisse des Versuches 3 sind in **Tabelle 34** zusammengefasst.

**Tabelle 34: Mittlere Wachstumsergebnisse in Versuch 3 (n = 6)**

Futtermischung	1 TMP	2 HM
Starterphase (Tag 1-21)		
Endlebensmasse (g)	1100 ± 76	1208 ± 42
Tägliche Zunahme (g/d)	50 ± 4	55 ± 2
Futteraufnahme (gTS/d)	64,0 ± 3,6	66,0 ± 1,8
FCR	1,30 ± 0,12	1,21 ± 0,03
NPU <sub>std.</sub> (%)	57,0 ± 3,9	60,9 ± 1,1
Growerphase (Tag 22-35)		
Endlebensmasse (g)	2407 ± 192	2641 ± 103
Tägliche Zunahme (g/d)	93 ± 10	102 ± 5
Futteraufnahme (gTS/d)	158,5 ± 8,0	158,9 ± 4,9
FCR	1,71 ± 0,17	1,55 ± 0,03
NPU <sub>std.</sub> (%)	60,9 ± 4,5	61,0 ± 1,1
Gesamtversuch (Tag 1-35)		
Endlebensmasse (g)	2407 ± 192	2641 ± 103
Tägliche Zunahme (g/d)	67 ± 6	74 ± 3
Futteraufnahme (gTS/d)	101,8 ± 5,1	103,1 ± 3,0
FCR	1,52 ± 0,11	1,40 ± 0,02
NPU <sub>std.</sub> (%)	58,6 ± 3,3	60,2 ± 0,7

Der direkte Vergleich der beiden teilentfetteten Insektenmehle zeigt die höchsten Endlebensmassen aller durchgeführten Geflügelversuche, wobei *Hermetia illucens* Mehl verglichen mit

TMP die höheren Endlebensmassen mit einem numerisch niedrigeren Futteraufwand bewirkte ( $p > 0,05$ ).

Auch bei Betrachtung der Proteinqualität ( $NPU_{std.}$ ) konnte für *Hermetia illucens* Mehl das tendenziell bessere Ergebnis gefunden werden. Insgesamt war die Wirkung von TMP in Futtermischungen für Masthähnchen im Vergleich zu HM etwas schwächer, allerdings konnte die Differenz statistisch nicht abgesichert werden. Somit kann beiden Insektenmehlen eine sehr gute Eignung als Rationskomponente in Broilermischungen bescheinigt werden.

In allen drei Geflügelversuchen wurden vergleichbar hohe zootecnische Leistungen erzielt. Unter der Voraussetzung eines unerlässlichen bedarfsangepassten Aminosäureausgleiches in den Mischungen für Masthähnchen ist dem untersuchten TMP eine sehr gute Eignung als Mischfutterkomponente zu bescheinigen. Unter Berücksichtigung dessen kann Sojaextraktionsschrot bei Masthähnchen vollständig durch TMP ersetzt werden, ohne dass mit negativen Auswirkungen auf zootecnische Ergebnisse gerechnet werden muss. Im Gegenteil, die Futtermittelerverwertung war im Vergleich zur SES-Mischung sogar signifikant verbessert. Die precaecalen Verdaulichkeitswerte der Mischungen waren weitgehend vergleichbar. Im Direktvergleich (Versuch 3) war kein signifikanter Unterschied zur alternativen Proteinquelle *Hermetia* Mehl zu beobachten.

#### 5.4.3 Evaluierung der Fütterungsversuche an Aufzuchtferkeln

Die grundsätzliche Zielsetzung der Untersuchung an Ferkeln ist analog zu den bereits dargestellten Versuchen zu sehen. Zudem wurde in dieser Versuchsreihe, für eine umfassendere Bewertung des Insektenproteins, wiederum die scheinbare Verdaulichkeit des Futterproteins bzw. der essentiellen Aminosäuren bestimmt.

Grundlage der Futtermischungen für Ferkel war wiederum ein im industriellen Maßstab produzierter Presskuchen aus Larven von *Tenebrio molitor* (TMP), bereitgestellt durch das Forschungsinstitut Futtermitteltechnik Braunschweig. Für diesen Versuch stand als Ausgangsmaterial erstmals eine ausreichende Menge Mehlkäferlarven aus den Zuchtversuchen der Hochschule Bremerhaven zur Verfügung. Roh Nährstoffzusammensetzung sowie Aminosäuregehalte sind in **Tabelle 35** dargestellt.

**Tabelle 35: Rohnährstoffzusammensetzung und Gehalt ausgewählter Aminosäuren des im Ferkelversuch verwendeten *Tenebrio molitor* Presskuchens (TMP-3)**

Inhaltstoffe	TMP-3
<i>Rohnährstoffe [% TS]</i>	
Trockensubstanz	98,84
Rohprotein	75,39
Rohfett	6,83
Rohfaser	7,90
Rohasche	4,44
<i>Aminosäuregehalt (g/16 g N)</i>	
Arg	5,36
Cys	0,92
His	3,20
Ile	4,35
Leu	7,24
Lys	5,72
Met	1,35
Thr	3,99
Val	6,25

Es wurden vier Futtermischungen untersucht (**Tabelle 36**), in denen gestaffelte Anteile von TMP im Hinblick auf Akzeptanz und Wachstumsleistung geprüft werden sollten. Futtermischung A diente als Kontrollmischung mit Sojaextraktionsschrot als konventionellem Proteinkonzentrat, in den Futtermischungen B, C und D wurde 25, 50 bzw. 75 % des Sojaanteils durch den *Tenebrio molitor* Presskuchen ersetzt.

**Tabelle 36: Die im Wachstumsversuch mit Ferkeln eingesetzten Futtermischungen (Angaben in g/kg Futtermischung)**

Futtermischung	A	B	C	D
	SES	25 % TMP	50 % TMP	75 % TMP
Presskuchen TMP2	-	42	82	112
Sojaextraktionsschrot	287	206	127	70
Weizen	314	338	363	379
Gerste	314	338	363	379
Sojaöl	47,5	36,8	26,6	20
CaCO <sub>3</sub>	12	12	12	13
NaCl	3	3	3	3
Prämix	15	15	15	15
L-Lysin·HCl	4,09	4,43	4,77	5,00
L-Threonin	1,00	0,97	0,95	0,93
DL-Methionin	0,55	0,64	0,73	0,80
TiO <sub>2</sub>	3	3	3	3

Für den Wachstumsversuch wurden 40 Absatzferkel (männlich, kastriert) in den Versuchseinrichtungen der Abteilung Tierernährungsphysiologie der Georg-August-Universität Göttingen

eingestellt. Der Versuch dauerte insgesamt 41 Tage, untergliedert in 13 Tage Vorbereitungs- und 28 Tage Versuchsphase. Die Vorbereitungsphase war erforderlich, um eine stabile Trockenfutteraufnahme der unmittelbar von der Sau abgesetzten Ferkel und eine Gewöhnung an die Versuchsdiäten zu gewährleisten.



**Abbildung 50: Ferkelhaltung in Einzelflatdecks mit Bodenheizung**

Die Tiere wurden einzeln gehalten (**Abbildung 50**) bei freiem Zugang zu Tränkwasser. Die Fütterung erfolgte in zwei Mahlzeiten, um die bei freiem Futterzugang eintretenden erheblichen Streuverluste zu vermeiden. Futterreste wurden erfasst und zurückgewogen.

Für die Ermittlung der scheinbaren Verdaulichkeit wurde an mehreren Tagen frischer Kot der Tiere gesammelt, um eine repräsentative Sammel-Probe pro Einzeltier zu erhalten. Die Proben der einzelnen Tage wurden pro Tier zu einer Poolprobe zusammengefasst, mit einem Stabmixer homogenisiert und für die weiteren Analysen gefriergetrocknet.

Die Analyse sämtlicher Proben erfolgte nach den Vorgaben der VDLUFA.

Die Ergebnisse des Wachstumsversuches (**Tabelle 37**) zeigen deutlich, dass zwischen den vier Futtermischungen bezüglich Akzeptanz, Wachstumsleistung und Futterverwertung keine signifikanten Unterschiede vorlagen. Tendenziell stieg jedoch die Futteraufnahme mit steigendem Anteil an TMP in der Futtermischung an, was eine hohe Akzeptanz der alternativen Proteinquelle seitens der Ferkel unterstreicht, zugleich aber einen numerisch erhöhten Futteraufwand bei Futtermischung D (75 % TMP) bewirkte.

**Tabelle 37: Mittlere Wachstumsergebnisse im Ferkelversuch**

Futtermischung	A	B	C	D
	SES	25% TMP	50% TMP	75% TMP
Endlebensmasse (kg)	22,2 ± 2,8	22,8 ± 1,5	23,1 ± 1,7	22,4 ± 1,8
Tägliche Zunahme (g/d)	432 ± 57	447 ± 25	452 ± 34	436 ± 38
Futteraufnahme (g TS/d)	567 ± 61	593 ± 29	601 ± 35	605 ± 54
FCR	1,32 ± 0,06	1,33 ± 0,06	1,33 ± 0,05	1,39 ± 0,10

**Tabelle 38** zeigt die Ergebnisse zur scheinbaren Verdaulichkeit des Rohproteins und ausgewählter AS am Ende des Verdauungstraktes. Lediglich Methionin ( $p = 0,042$ ), Phenylalanin ( $p = 0,010$ ) und Valin ( $p = 0,007$ ) wiesen signifikante Unterschiede zwischen den Futtermischungen auf. Während bei Methionin und Valin ein Anstieg der scheinbaren Verdaulichkeit mit steigendem Anteil an TMP in der Futtermischung vorlag, war bei Phenylalanin ein Rückgang zu verzeichnen. Da die einfaktorielle ANOVA nur teilweise signifikante Gruppenunterschiede ergab, wurde für diese drei Aminosäuren eine lineare Regressionsberechnung in Abhängigkeit von der tatsächlichen Aufnahme an TMP durchgeführt. Das Ergebnis erbrachte einen signifikanten Zusammenhang zwischen TMP-Aufnahme und Höhe der scheinbaren Verdaulichkeit der genannten Aminosäuren (Met:  $p = 0,006$ ; Phe:  $p = 0,041$ ; Val:  $p = 0,004$ ).

Insgesamt zeigte sich aber kein negativer Effekt der vorgenommenen Substitution von SES, ausgenommen für die AS Phenylalanin.

**Tabelle 38: Ergebnisse der scheinbaren Verdaulichkeit [%] von Rohprotein (XP) und ausgewählter Aminosäuren im Ferkelversuch (n = 10)**

Futtermischung	A	B	C	D
	SES	25% TMP	50% TMP	75% TMP
XP	79,3 ± 1,8	79,4 ± 1,4	79,6 ± 1,9	78,7 ± 2,3
Lys	81,4 ± 2,0	82,1 ± 1,6	82,4 ± 1,9	82,2 ± 2,9
Met	75,0 ± 1,9 <sup>a</sup>	76,5 ± 1,7 <sup>ab</sup>	77,5 ± 2,3 <sup>b</sup>	77,3 ± 1,9 <sup>ab</sup>
Cys	83,5 ± 0,7	84,1 ± 1,6	83,9 ± 1,2	82,9 ± 1,8
Thr	77,1 ± 1,2	77,8 ± 1,8	78,1 ± 1,8	77,6 ± 2,1
His	85,8 ± 1,3	86,0 ± 1,3	85,9 ± 1,4	85,2 ± 1,4
Ileu	76,9 ± 2,0	77,6 ± 1,9	77,6 ± 2,2	76,5 ± 2,0
Leu	78,7 ± 1,4	79,2 ± 1,8	79,6 ± 1,8	78,9 ± 2,0
Phe	82,6 ± 1,1 <sup>a</sup>	82,1 ± 1,5 <sup>a</sup>	81,6 ± 1,5 <sup>ab</sup>	80,1 ± 1,8 <sup>b</sup>
Val	74,9 ± 2,1 <sup>a</sup>	77,0 ± 1,9 <sup>b</sup>	78,0 ± 1,8 <sup>b</sup>	77,3 ± 1,8 <sup>b</sup>

Rückblickend auf die Geflügelversuche wurde bei Versuch 2 ebenfalls eine niedrigere scheinbare precaecale Verdaulichkeit von Phenylalanin festgestellt, wenn SES durch TMP substituiert wurde. Allerdings wurde bei Geflügelversuch 2 ein kompletter Austausch von SES durch TMP vorgenommen und im Unterschied zum Ferkelversuch wurden precaecale Verdaulichkeitswerte gemessen. Zudem ist zu beachten, dass scheinbare Verdaulichkeitswerte grundsätzlich einem zusätzlichen Einfluss von der Höhe der AS-Aufnahme unterliegen, die nicht ausgeschaltet werden kann. Dieser Einflussfaktor liegt auch in den hier dargestellten Versuchen vor. Eine eindeutige und zweifelsfreie Zuordnung der Effekte zur Haupt-Proteinquelle im Futter ist somit nicht möglich. Deshalb wird eine tiefergehende Diskussion hierzu nicht für angebracht gehalten.

Auch der Ferkelversuch konnte zeigen, dass alternative Proteinquellen auf der Basis von *Tenebrio molitor* Larven (teilentfettet) problemlos und ohne Leistungseinbußen im Ferkelaufzuchtfutter eingesetzt werden können. Vergleichbare Futteraufnahmen und Lebendmassezunahmen gegenüber der konventionellen Futtermischung mit SES weisen auf eine sehr hohe Akzeptanz des untersuchten Insektenmehles als Futterkomponente hin. Die umfangreichen Verdaulichkeitsmessungen ergaben in der Gesamtschau und im Einklang mit den zootechnischen Parametern keine erkennbaren Nachteile der Mischungen mit TMP.

## **5.5 AS 5: Bewertung der Energieeffizienz anhand der Fütterungserfolge**

Die Energieeffizienz ist unter Einbeziehung des Fütterungserfolges unter anderem auch durch die entstehenden Emissionen vor und nach der Verfütterung zu bewerten.

Die Mischfutterproduktion macht dabei nur einen sehr geringen Anteil von wenigen Prozent der Treibhausgas (THG)-Emissionen von Lebensmitteln tierischen Ursprungs aus, beim Schwein sind es etwa 1 bis 3 % der Gesamtemissionen, beim Broiler ca. 2 bis 5 %. Die auf die Lebendmassenzunahme der Tiere bezogenen Emissionen sind vergleichsweise wenig durch die Konfektionierung der Futter beeinflusst [Böschen, 2016].

Der Futteranbau inklusive Düngung sowie die Stallhaltung machen bei beiden Tierarten die Hauptursachen des PCF aus und verursachen zusammen über 80 % aller klimarelevanten Emissionen. Betrachtet man den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck essbaren Proteins, so liegt in einer Minimierung des Futteraufwandes – also der je kg Protein benötigten Menge an Mischfutter – auch bei einer eventuell notwendigen Erhöhung des (energetischen) Herstellungsaufwandes im Mischfutterwerk das größte Potenzial zur Verbesserung der Gesamteffizienz von Lebensmitteln tierischer Herkunft.

Nicht erst seit der Pflicht der Unternehmen, sich dem Thema Energieeffizienz, was die DIN EN ISO 50001 einschließt, auseinanderzusetzen, ist bekannt, dass für die Mischfutterproduktion viel Energie benötigt wird. Ein großer Teil der verbrauchten Energie geht dabei auf die intensivsten Prozesse, wie die Konfektionierung (Pelletieren, Expandieren) und Zerkleinerung zurück.

Da ungefähr 80 % der Mischfutter als pelletierte Ware vom Kunden angefordert werden, ist besonders dieser Schritt näher zu betrachten. Der Abbildung 34 kann man entnehmen, dass mit steigendem Anteil an Insektenmehl die Qualität der Pellets (Härte, Abrieb) sich verbesserte. Ausgehend von diesen Versuchen kann man schließen, dass mit einer kürzeren Matrize bei gleichbleibender Qualität gearbeitet werden könnte. Eine kürzere Matrize ist wiederum mit weniger Reibung, d. h. mit einem geringeren Energieaufwand verbunden [Jansen und Friedrich, 1985].

Des Weiteren kann den Fütterungsversuchen entnommen werden, dass auch die getrockneten und vermahlenden Larven gut in die Rezepturen (Tilapien) eingearbeitet werden können. An diesem Punkt ist von den weiteren Aufbereitungswegen (Nassaufbereitung/Trockenaufbereitung) kein zusätzlicher Energieverbrauch zu erwarten, was ebenfalls zur Gesamteffizienz beiträgt.

Zusätzlich ist bekannt, dass eine feinere Vermahlung die Verdaulichkeit der Rohnährstoffe und damit den Gehalt an metabolisierbarer Energie (ME) erhöht und in Verbindung mit einer Pelletierung zur Minimierung des Futteraufwandes und der Gesamteffizienz führt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die stetig wachsende Weltbevölkerung [UN, 2017] 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 [FAO, 2009].

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 Untersuchungen war die Ermittlung von stofflichen, prozess- und anlagentechnischen Parametern bei der Verarbeitung von Insekten als tierischem Proteinträger bzw. Insektenprotein zu üblichen Mischfuttern.

In diesem Zusammenhang wurden im Rahmen des beantragten Vorhabens folgende Fragen beantwortet und neue Fragestellungen aufgeworfen:

1. Wie kann eine hohe Qualität der Insekten und der daraus gewonnenen Fraktionen gewährleistet werden?
2. Wie muss der tierische Proteinträger zerkleinert werden, um ernährungsphysiologisch optimal im Futter vorzuliegen?
3. Welche physikalischen und chemischen Eigenschaften weist der tierische Proteinträger auf und welche Auswirkungen hat dies auf die Verwendung und Bewertung als Einzelfuttermittel?
4. Welche Unterschiede ergeben sich beim Pelletieren, Expandieren und Extrudieren herkömmlicher und der alternativen Futtermischungen unter betriebsüblichen Bedingungen?
5. Wie verändert sich die Lagerungsstabilität der einzelnen Mischfuttermittel durch den Einsatz des neuen tierischen Proteinträgers?
6. In welchen Mengen kann der tierische Proteinträger den pflanzlichen ersetzen, um optimale tierische Leistungen zu erzielen?
7. Könnte es sich als energetisch nutzbringend erweisen, den Proteinträger vollständig, d. h. als getrocknete Larve, in das Futter einzubringen, um auf diese Weise die Prozesskette zu verkürzen und welche Einsatzbedingungen im Mischfutter (z. B. Restriktionen bei der Rezepturgestaltung) müssten dafür eingestellt werden?

Für die Anwendung von Insekten sollten dementsprechend in dem Projekt die Verarbeitungseigenschaften in der Mischfutterherstellung ermittelt werden, so dass die Industrie diese Erkenntnisse in der industriellen Herstellung übernehmen kann.

Darüber hinaus sollten die angestrebten Erkenntnisse bezüglich der Insekten als tierischem Proteinträger die dringend erforderlichen Ergänzungen zu neueren Forschungsergebnissen bezüglich des Defizites in der Eigenversorgung an eiweißreichen Rohstoffen, welche Insektenproteine und -fette für die Tierfütterung favorisieren, deren Umsetzung aber nach derzeitigem Kenntnisstand technologisch nicht ohne systematische Untersuchungen möglich erscheint, füllen.

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

Bei der Ermittlung von stofflichen, prozess- und anlagentechnischen Parametern bei der Verarbeitung von Insekten als tierischem Proteinträger bzw. Insektenprotein zu üblichen Mischfuttern wurden unter anderem 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 Zusammensetzung des Proteins und der Gesamtkeimgehalte.

Unter der Zusammensetzung des Proteins sind unter anderem die Gehalte der Aminosäuren, welche der Proteinträger beinhaltet, untersucht worden und zeigten Unterschiede abhängig von der Prozessierung.

- Weiterhin wurden in Bezug auf die kontinuierliche Trocknung, angelehnt an das Bandtrocknungsverfahren, Erkenntnisse mit konstantem Luftstrom und konstanter Bandbelastung ermittelt. Es wurden 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 % lagen. 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 neuen Proteinträgers 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).
  - 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 gesenkter 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.
  - Bei den physiko-chemischen Untersuchungen ist besonders beim Proteinträger (Presskuchen) eine lange Lagerungsstabilität gegeben (1,5 Jahre).
  - Bei der Herstellung der verschiedenen Mischfuttermittel zeigte sich, dass in Kombination mit Insektenprotein die Gesamtkeimzahl während der Lagerung zurückgeht.
  - Das Material hat auch nach dem Entfettungsprozess keine guten Fließeigenschaften und sollte nicht in Silozellen eingelagert werden.
- Die Fütterungsversuche an der Georg-August-Universität Göttingen an Nutzfischen, Masthähnchen und Ferkeln zeigten, dass durch die durchgeführten Studien, sich folgendes Fazit ziehen lässt:
  - Die Untersuchungen bei *Tilapia* konnten zeigen, dass neben dem *Tenebrio molitor* Presskuchen auch das vollfettete Larvenmehl problemlos zum Einsatz kommen kann, insbesondere wenn nicht mehr als 50 % der konventionellen Proteinträger ausgetauscht bzw. 16 % Vollfettmehl an der Gesamtmischung nicht überschritten werden.
  - In allen Versuchen konnten beim teilweisen als auch vollständigen Austausch der herkömmlichen Proteinquelle Sojaextraktionsschrot gegen die alternative Proteinquelle *Tenebrio molitor* Presskuchen vergleichbar hohe Leistungen erzielt werden. Insbesondere beim Mastgeflügel war dafür eine bedarfsgerechte Anpassung der Aminosäurenversorgung durch kristalline Futter-AS erforderlich.
  - Im direkten Vergleich der beiden alternativen Proteinquellen *Tenebrio molitor* Presskuchen und *Hermetia illucens* Mehl konnten für HM

gegenüber TMP tendenziell höhere Wachstumsleistungen und ein etwas günstigerer Futteraufwand registriert werden, signifikante Unterschiede bestanden aber nicht.

- Die teilweise beobachteten Unterschiede bei Verdaulichkeitsparametern hatten keine Beeinträchtigung von zootechnischen Leistungen zur Folge.
- Die Untersuchungen bestätigen insgesamt die herausragenden Möglichkeiten und Potenziale für eine weitgehende Substitution von Sojaprodukten in der Ernährung von Tilapia, Masthähnchen und Absatzferkeln. Diese liegen gegenwärtig deutlich oberhalb der wirtschaftlich relevanten und futtermittelrechtlich zulässigen Möglichkeiten.

Hinweise in der Literatur [DFG, 2016] weisen gerade bezüglich der Aufbereitung 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?

Bezüglich der Fütterungsversuche ergeben sich Fragestellungen in Bezug auf:

- Wie sehen die präzekalen Verdaulichkeiten der Aminosäuren ohne den Zusatz von kristallinen Aminosäuren aus?
- Welche Aufbereitungsvariante zeigt die beste Performance bezüglich der Fütterung?
- Sollte Chitin als Bestandteil der Insekten in den Proteinmehlen verbleiben oder ist es besser, dies durch entsprechende Aufbereitung zu entfernen?

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 eine enge Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses und KMU sowohl des Maschinenbaus als auch Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik.

Den interessierten Wirtschaftszweigen (insbesondere Futtermittel, Maschinen- und Anlagenbau) stehen die Erkenntnisse des Vorhabens zur Verfügung, welches die Grundlagen zur industrietauglichen Umsetzung der Forschungsergebnisse demonstriert.

Über die Umsetzbarkeit im Hinblick auf die genannten vorwettbewerblichen Einschränkungen können sich in konkreten Fällen interessierte Unternehmen anhand des Projektes informieren.

Es ist davon auszugehen, dass die zu entwickelnde verfahrenstechnische Lösung zur Prozessierung bzw. Aufbereitung und Verarbeitung von Insekten zu Mischfuttermitteln hinsichtlich der Kostenstruktur gerade für innovative KMU finanziell erreichbare Größenordnungen einer industriellen Umsetzung und Nutzung bietet.

## **7.2 Verwendung der zugewendeten Mittel**

### **Personaleinsatz**

#### **Forschungseinrichtung 1: IFF**

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

HPA A und B: Personenmonate 17,97

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

Geräte: Autoklav der Firma Wilhelm O. Schmidt 13.401,78 Euro

Leistungen Dritter: keine, da diese von der leistenden Firma nicht in Rechnung gestellt wurden. Diese wurden als vAW's nachgewiesen.

#### **Forschungseinrichtung 2: UGO**

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

HPA A und B: Personenmonate 25,50

Geräte:

- Aminosäureanalysator der Firma Laborservice Onken GmbH 40.000,00 Euro
- Labormühle der Firma Omnilab 4.550,44 Euro
- Gefriertrocknungsanlage der Firma Christ 41.650,01 Euro (zwei Teilrechnungen)

Leistungen Dritter: keine

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

### 7.3 Plan zum Ergebnistransfer

#### Bereits durchgeführte Maßnahmen während der Projektlaufzeit

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 UGO	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, OGO	Projektbegleitender Ausschuss intern	Diskussion weiteres Vorgehen	ProjektAbstimmung	10.08.2017
IFF, UGO	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, UGO	Fachmesse 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, UGO	Fachmesse 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, UGO	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, UGO	Projektbegleitender Ausschuss (Bremerhaven)	Vorstellung des Funktionsmusters mit Aufzucht der Insekten	Abstimmung über den weiteren Projektablauf	25.09.2018
IFF	Fachmesse 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 eigene Forschungskapazitäten	Vortrag „Von der Larve zum Futtermittel“	11.12.2018

IFF	IFF Feed Forum	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	UGO
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) 22. – 24.10.2019 Kompaktlehrgang 29.10.2019 wissenschaftliche Beirat	X	-
G: Veröffentlichung	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	G1: Beitrag in internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften wie Archives of Animal Nutrition, Poultry Science u. a. (1. Halbjahr 2019)	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
		G6: Vorstellung der Ergebnisse auf nationalen und internationalen Fachtagungen wie - Insecta (5./6. September 2019) orale Präsentation, Abstractbook S. 44 - Meeting of the European Federation of Animal Science City of Gent (26. – 30. August 2019) Abstractbook S. 403	X	
		G7: Buch: African Edible Insects As Alternativ Source of Food, Oil, Protein and Bioactive Components (Springernature) Buchkapitel: „Automation of Insect Mass Rearing and Processing Technologies of Mealworms (Tenebrio molitor)“ erscheint 2020	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

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 Bioprocessautomation und Biotechnik an der Universität Erlangen-Nürnberg	-	X
---------------------------	--	--	---	---

Transfermaßnahme durchgeführt

#### **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.

## 7.5 Veröffentlichungen, Tagungsbeiträge

### Publikationen

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

Böschen, V., Franke, G., Kiehne, V., Kirchner, A., Neumann, K.-D. (2019). Forschung für die Futtermittelindustrie – Wie gelingt die „Innovationsproduktion“? Mühle + Mischfutter 156 (2019) 7, 220-222.

Brede, A., Sünder, A., Wecke, C., Liebert, F. (2018). First investigations on the optimal methionine:cysteine ratio in diets for growing chickens with a *Tenebrio molitor* press cake as an alternative protein source. Proc. Soc. Nutr. Physiol. 27: 78.

Brede, A. (2018). Beiträge zur ernährungsphysiologischen Bewertung optimaler Methionin:Cystein Relationen in der Masthähnchenernährung unter besonderer Beachtung hoher Mischungsanteile von Insektenmehlen als alternative Eiweißquelle für Sojaprotein. Diss. Georg-August-Universität Göttingen

Dietz, C., Liebert, F. (2017). Insect protein in aquafeed – potential of *Tenebrio molitor* meal as substitute for soy protein concentrate in compound feed for Tilapia (*Oreochromis niloticus*). Proc. 3rd INSECTA, Magdeburg, Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 97: 57-59.

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

Liebert, F. (2017). Potenziale von Insektenmehlen als Proteinalternative für Nutztiere. BMEL/FLI-Workshop „Innovationen in der Tierernährung“, Braunschweig, Tagungsband 9.

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

Böschen, V. (2019). Comparison of the process parameters during pelleting with respect to the utilisation of mealworm-protein in different feed formulation. EAAP 2019, 26.-30. August 2019, Gent/B.

### Vorträge

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

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

Böschen, V. (2019). From the larva to the feed: Safety and nutritional aspects. Insecta 2019, 4.-6. September 2019, Potsdam.

### Poster

Böschen, V. (2019). From the larva to the feed: Safety and nutritional aspects during drying. 1st International Feed Technology Congress, Victam International, 12.-13. Juni 2019, Köln.

Böschen, V. (2019). Comparison of the process parameters during pelleting with respect to the utilisation of mealworm-protein in different feed formulation. EAAP 2019, 26.-30. August 2019, Gent/B.

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., Böschen, 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., 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 – 4<sup>th</sup> International Symposium on Insects. 5.-7. September 2018, Gießen.

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.

## Literaturverzeichnis

Agarwal, A. K. (2011). Oxidation stability of biodiesel produced from non-edible oils of African origin, 2011.

Anderson, R. J., Walker R. L., Hird, D. W., Blanchard, P. C. (1997). Case-control study of an outbreak of clinical disease attributable to Salmonella Menhaden infection in eight dairy herds. J. Am. Vet. Med. Assoc., Vol. 210, 528-530.

Bertrand, M. (2004). Bundesforschungsanstalt für Ernährung und Lebensmittel. Welches Fett für welchen Zweck? Fachtagung für Gemeinschaftsverpflegung, Dresden-Pillnitz (2004): 1-20.

Bertrand, M. (2014). Fette und Öle: Grundlagenwissen und praktische Verwendung. Ernährungs Umschau (2014). Vol. 3: M162-M170.

Bestimmung einer Maßzahl für die Staubentwicklung von Pigmenten und Füllstoffen- Teil 1: Rotationsverfahren DIN 55992-1:2007

BMEL, "Eiweißpflanzenstrategie des BMEL", Stand 27.11.2012

BMEL, Bericht zur Markt- und Versorgungslage Futtermittel 2018, 2018

BMEL, Bericht zur Markt- und Versorgungslage Futtermittel 2019, 2019

Böschen, V. (2014). Umweltrelevante und ökonomische Bewertung unterschiedlicher Prozessvarianten für Schweine- und Broilerfutter hinsichtlich Herstellungsaufwand und Fütterungserfolg für ausgewählte Futterzusammensetzungen. Schlussbericht AiF-Forschungsvorhaben Nr. 474 ZN. Hg. v. IFF-Forschungsinstitut Futtermitteltechnik. Braunschweig-Thune.

Brandt, M., Allam, S.M. (1987). Analytik von TiO<sub>2</sub> im Darminhalt und Kot nach Kjeldahl-Aufschluss. Archives of Animal Nutrition, 37, 453-454.

Brede, A. (2018) Beiträge zur ernährungsphysiologischen Bewertung optimaler Methionin:Cystein Relationen in der Masthähnchenernährung unter besonderer Beachtung hoher Mischungsanteile von Insektenmehlen als alternative Eiweißquelle für Sojaprotein. PhD Dissertation, Tierernährungsphysiologie, Georg-August-Universität, Göttingen, Germany.

Brede, A., Wecke, C., Liebert, F. (2018). Does the optimal dietary methionine to cysteine ratio in diets for growing chickens respond to high inclusion rates of insect meal from *Hermetia illucens*? Animals, 8, 187; doi:10.3390/ani 8110187.

- 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.
- 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.).
- European Food Safety Authority (EFSA) (2008). Scientific opinion of the panel on biological hazards on a request from the health and consumer protection, Directorate General, European Commission on Microbiological Risk Assessment in Feedingstuffs for Foodproducing Animals. *The EFSA Journal*, 720, 1-84.
- Exposition am Arbeitsplatz – Messung des Staubungsverhaltens von Schüttgütern – Teil 1: Anforderungen und Auswahl der Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 15051-1:2013
- 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.
- Finke, M. D. (2002). Complete nutrient composition of commercially raised invertebrates used as food for insectivores. *Zoo Biology*, 21, 269-285.
- Förster, J.M. (2019). Insects as a substitute for fishmeal: Influence on the extrusion process and the product properties of carp feed, oral presentation, 1st International Feed Technology Congress, Victam International, 12.-13. Juni 2019, Köln.
- Friedrich, W., Robohm, K.F. (1979). Der Verdichtungsvorgang in der Futtermittelpresse – Einfluss und Betriebsbedingungen auf Energiebedarf und Pelletfestigkeit, *Die Mühle + Mischfutter-technik*, Jahrg. 116, Nr. 39, S. 527-530.
- Friedrich, W. (1981). Verarbeitung von fetthaltigen Futtermitteln, Einfluss von Fettart, Fettmenge und Art der Zugabe auf die Pelletierung, Schlussbericht AiF-Forschungsvorhaben Nr. 4525. Hg. v. IFF-Forschungsinstitut Futtermitteltechnik. Braunschweig-Thune.
- Gantois, I., Ducatelle, R., Pasmans, F., Haesebrouck, F., Hautefort, I., Thompson, A., Ton, J. C., van Immerseel, F. (2006). Butyrate specifically down-regulates *Salmonella* pathogenicity island I gene expression. *Appl. Environ. Microbiol.* 72, 946-949.
- Grosse Liesner, V. (2008). Untersuchungen zum Einfluss der Vermahlungsintensität und der Mischfutterkonfektionierung sowie einer Zugabe von Lignozellulose auf die Gesundheit der Magenschleimhaut bei Absetzferkeln. Hannover, Tierärztl. Hochsch., Dissertation.
- Hancock, J.D. (1999). Grinding to improve growth performance in pigs. *Feed Tech.* 3 (4), 24-27.
- Haque, N., Somerville, M. (2013). Techno-economic and environmental evaluation of biomass dryer. *Procedia Engineering*, Vol. 56, 650-655.
- 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.

Heindl, A. (2016). Praxisbuch Bandrocknung, Grundlagen, Anwendung, Berechnung.

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

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

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

<https://www.faulhaber.com/de/maerkte/praezisionsueberwachung-messtechnik/ringschergeraet/>, Abgerufen 01.09.2019, Dr.-Ing. Dietmar Schulze Schüttgutmesstechnik

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

Kersten, J., Rohde, H.R., Nef, E. (2003). Mischfutterherstellung – Rohware, Prozesse, Technologie. Agrimedia Verlag, Bergen 2003.

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

Kluth, H., Mehlhorn, K., Rodehutschord, M. (2005). Studies on the intestine section to be sampled in broiler studies on precaecal amino acid digestibility. Archives of Animal Nutrition, 59, 271-279. <https://doi.org/10.1080/17450390500217058>.

Kluth, H., Rodehutschord, M. (2009). Standardisierte Futterbewertung auf der Basis der Aminosäurenverdaulichkeit beim Geflügel. Übersichten zur Tierernährung, 37, 1-26.

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

Leeson, S., Summers, J.D. (2001). Nutrition of the chicken. 4th edition, University Books, Ontario, Canada.

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.

Liebert, F., Sünder, A., Mohamed, K. (2006). Assessment of nitrogen maintenance requirement and potential for protein deposition in juvenile Tilapia genotypes by application of an exponential nitrogen utilization model. Aquaculture, 261, 1346-1355.

Liebert, F. (2008). Modelling of protein metabolism yields amino acid requirements dependent on dietary amino acid efficiency, growth response, genotype and age of growing chicken. Avian Biology Research, 1, 101-110.

Liebert, F. (2015). Basics and applications of an exponential nitrogen utilization model ("Goettingen approach") for assessing amino acid requirements in growing pigs and meat type chickens based on dietary amino acid efficiency. In: Nutritional Modelling for Pigs and Poultry. Publishing, Wallingford, 73-87.

- Liebert, F. (2017). Invited review: Further progress is needed in procedures for the biological evaluation of dietary protein quality in pig and poultry feeds. *Archives Animal Breed-ing*, 60, 259-270.
- Löwe, R., Feil, A. (2011). Untersuchungen zu Struktur-Eigenschafts-Korrelationen für zerkleinerte Getreide. Schlussbericht AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15 825. Hg. v. IFF-Forschungsinstitut Futtermitteltechnik. Braunschweig-Thune.
- Lucht, H. W. (2007). Expander mit Ringspalt- oder mit Matrizenauslauf für die hydro-thermische Druckbehandlung von Einzelfuttermitteln und speziellen Mischfuttermischungen, Teil 1. *Mühle + Mischfutter* 144 (22), 761-765.
- Maciorowski, K. G., Herrera P., Jones, F. T., Pillai, S. D., Ricke, S. C. (2007). Effects on poultry and livestock of feed contamination with bacteria and fungi. *Animal Feed Science and Technology*, Vol. 133, pp. 109-136.
- Messung des Staubungsverhaltens von Schüttgütern – Teil 1: Anforderungen und Auswahl der Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 15051-1:2013
- Mikkelsen, L.L., Naughton, P.J., Hedemann, M.S., Jensen, B.B. (2004): Effects of physical properties of feed on microbial ecology and survival of *Salmonella enterica* Serovar Typhimurium in the pig gastrointestinal tract. *Appl. Environ. Microbiol.* 70, 3485-3492.
- Neumann, C., Velten, S. und Liebert, F. (2018). Improving the dietary protein quality by amino acid fortification with a high inclusion level of micro algae (*Spirulina platensis*) or insect meal (*Hermetia illucens*) in meat type chicken diets. *Open Journal of Animal Science*, 8, 12-26. <https://doi.org/10.4236/ojas.2018.81002>.
- Neumann, C., Velten, S., Liebert, F. (2018). The Graded Inclusion of Algae (*Spirulina platensis*) or Insect (*Hermetia illucens*) Meal as a Soybean Meal Substitute in Meat Type Chicken Diets Impacts on Growth, Nutrient Deposition and Dietary Protein Quality depending on the Extent of Amino Acid Supplementation. *Open Journal of Animal Sciences*, 8, 163-183. <https://doi.org/10.4236/ojas.2018.82012>
- Neumann, K. D. (2007). Optimierung der Zerkleinerung von Schweinemastfutter hinsichtlich der Zielfunktionen Fließfähigkeit und Mischungsstabilität
- Niermans, K., Woyzichowski, J., Kröncke, N., Benning, R., Maul, R. (2019). Feeding study for the mycotoxin zearalenone in yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae – investigation of biological impact and metabolic conversion.
- NRC (National Research Council) (2011). *Nutrient Requirements of Fish and Shrimp*. National Academy Press, Washington D.C., USA.
- Nowak, V., Persijn, D., Rittenschober, D., Charrondiere, U. R. (2016). Review of food composition data for edible insects. *Food Chemistry* 193: 39-46.
- OVID Hintergrundinformation „Ohne Gentechnik“ im Tierfutter vom 01.12.2016, S. 17 von 53
- Papenbrock, S., Stemme, K., Amtsberg, G., Verspohl, J., Kamphues, J. (2005). Investigations on prophylactic effects of coarse feed structure and/or potassium diformate on the microflora in the digestive tract of weaned piglets experimentally infected with *Salmonella* Derby. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 89, 84-87.
- Pastor, A. (2014). Studien zur Aminosäurenwirksamkeit beim Mastgeflügel unter spezifischer Betrachtung der verzweigt-kettigen Aminosäuren. PhD Dissertation, Tierernährungsphysiologie, Georg-August-Universität, Göttingen, Germany.
- Pastuszewska (1997). Composition and nutritional value for chickens and rats of seeds, cake and solvent meal from low-glucosinolate yellow-seeded spring rape and dark-seeded winter rape

- Piofczyk, T. (2015). Forschungsbericht: Entwicklung eines Verfahrens zur Entölung von Insekten für neuartige Futtermittel. ZIM (BMWi), Bearbeitungszeitraum: 01.08.2013 – 31.05.2015
- 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.  
RASFF: <https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/portal/?event=SearchForm&cleanSearch=1>.
- Richtlinie 95/53/EG des Rates vom 25. Oktober 1995 mit Grundregeln für die Durchführung der amtlichen Futtermittelkontrollen.
- 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.
- Schulze, D. (2015). Spannungen in Silos (Teil 1): Schüttguteigenschaften, SiloWorld 5 (2015), 12-18.
- Strauch, W. (2002). Ursachen und Beherrschung von Verschleppung und Kreuzkontamination, Teil 1: Bei Herstellung von Vormischungen und Mischfutter, Teil 2: In Vormischungen und Fertigfutter, Krafffutter/Feed Magazine 85 (2002) 4, 151-159 und 6, 239-246.
- Tessari, E. N. C., Paschoal Cardoso, A. L. S., Kanashiro, A. M. I., Zanatta Stoppa G. F. Z., Renato Luis Luciano, R. L., Machado de Castro, A. G. (2014). Analysis of the presence of *Clostridium perfringens* in feed and raw material used in poultry production. Food and Nutrition Sciences, Vol. 5, 614-617.
- 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.
- 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.
- VDLUFA Methodenbuch, Band III. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, 3. Aufl. 1976 Gesamtwerk einschl. 1.-8. Ergänzungslieferung, 2190 S., ISBN 978-3-941273-14-6
- Veldkamp, T. et al. (2012). Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets – a feasibility study. Report 638, Lelystad: Wageningen UR Livestock Research, 2012.
- Velten, S., Neumann, C., Bleyer, M., Gruber-Dujardin, E., Hanuszewska, M., Przybylska-Gornowicz, B., Liebert, F. (2018). Effect of 50 percent substitution of soybean meal by alternative proteins from *Hermetia illucens* or *Spirulina platensis* in meat-type chicken diets with graded amino acid supply. Open Journal of Animal Sciences, 8, 119-136.  
<https://doi.org/10.4236/ojas.2018.82009>.
- Velten, S., Neumann, C., Schäfer, J., Liebert, F. (2018). Effects of the partial replacement of soybean meal by insect or algae meal in chicken diets with graded amino acid supply on parameters of gut microbiology and dietary protein quality. Open Journal of Animal Sciences, in press.
- Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), 2017. Band III – Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. VDLUFA, Speyer, Germany.

Verordnung (EG) Nr. 178/2002 des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts, zur Errichtung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit und zur Festlegung von Verfahren zur Lebensmittelsicherheit.

Verordnung (EG) Nr. 258/1997 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 1997 über neuartige Lebensmittel und neuartige Lebensmittelzutaten.

Verordnung (EU) Nr. 691/2013 der Kommission vom 19. Juli 2013 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 152/2009 hinsichtlich der Probenahmeverfahren und Analysemethoden.

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. 258/1997 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., Sapkal, V.S. (2013). Drying characteristics of okra slices on drying in hot air dryer. *Procedia Engineering*, Vol. 51, 371-374.

Wintermann, M., Betscher, S., Mößler, A., Schulze Langenhorst, C., Stalljohann, G., Beinecke, A., Kamphues, J. (2010). Einfluss von Vermahlungsgrad (grob/fein), botanischer Zusammensetzung (Gerste/Weizen) und Angebotsform (trocken/flüssig) verschiedener Futtermittel auf die Magengesundheit von Schweinen. In: Gierus, M., Kluth, H., Bulang, M., Kluge, H. (Hrsg.). 11. Tagung Schweine- und Geflügelernährung, 23.-25. November 2010 Lutharstadt Wittenberg, 127-129.

WO2013/191548A1, 2013.

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.