

Verbesserung ernährungsphysiologischer Eigenschaften von  
Ackerbohnen und Erbsen für Milchrinder durch kombinierte  
gärbiologische und thermische Behandlungen

**Dissertation**  
**zur Erlangung des**  
**Doktorgrades der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)**

der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III  
Agrar- und Ernährungswissenschaften,  
Geowissenschaften und Informatik

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

vorgelegt von M. Sc. Christian Kuhnitzsch

Gutachter: Prof. Dr. Annette Zeyner,  
Prof. Dr. Olaf Steinhöfel,  
Prof. Dr. Hans Schenkel

Verteidigung am: 06.05.2024

## WIDMUNG

Diese Arbeit widme ich  
meinen Söhnen Moritz, Fritz und Willi.

„Der höchste Wohlstand des Menschen ist seine innere  
Zufriedenheit.“

Das Vorhaben wurde durch das Bundesministerium für Ernährung und  
Landwirtschaft gefördert (Akronym SilaToast; 2815EPS020 und 2815EPS058).

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Projektträger Bundesanstalt  
für Landwirtschaft und Ernährung

**Inhalt**

Kurzfassung.....	I
Abstract .....	II
Abkürzungsverzeichnis .....	III
Abbildungsverzeichnis .....	V
Tabellenverzeichnis.....	VI
1 Einleitung .....	- 1 -
2 Literatur .....	- 2 -
2.1 Charakterisierung von Erbsen und Ackerbohnen.....	- 2 -
2.1.1 Ackerbohnen ( <i>Vicia faba</i> ) .....	- 2 -
2.1.2 Erbsen ( <i>Pisum sp.</i> ).....	- 3 -
2.2 Futterwertbestimmende Faktoren von Erbsen und Ackerbohnen .....	- 4 -
2.2.1 Protein- und Aminosäurequalität.....	- 4 -
2.2.2 Energie- und Stärkequalität .....	- 6 -
2.2.3 Sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe .....	- 8 -
2.3 Aufbereitungsverfahren für Erbsen und Ackerbohnen.....	- 11 -
2.3.1 Silierung .....	- 12 -
2.3.2 Wärmebehandlungsverfahren.....	- 14 -
2.3.2.1 Rösten.....	- 15 -
2.3.2.2 Toasten .....	- 16 -
2.3.2.3 Expansion .....	- 16 -
2.3.2.4 Extrusion .....	- 17 -
2.4 Effekte der Aufbereitung.....	- 18 -
2.4.1 Proteinqualität .....	- 18 -
2.4.2 Stärkequalität.....	- 20 -
2.5 Einsatzmengen von Erbsen und Ackerbohnen in der Fütterung landw. Nutztiere.....	- 21 -
2.5.1 Wiederkäuer .....	- 21 -
2.5.2 Monogaster.....	- 22 -
3 Aufgaben und Zielstellung .....	- 24 -
4 Experimentelle Untersuchungen zur Verbesserung des Futterwertes von Erbsen- und Ackerbohnenkörnern durch Silieren und Toasten.....	- 26 -
4.1 Material und Methoden .....	- 26 -
4.1.1 Ausgangsmaterial .....	- 26 -
4.1.2 Probengewinnung und Aufbereitung.....	- 27 -
4.1.3 Methodik .....	- 28 -
4.1.3.1 Silierung .....	- 28 -
4.1.3.2 Wärmebehandlung.....	- 29 -
4.1.3.3 <i>in vitro</i> -Untersuchungen.....	- 30 -
4.1.3.3.1 UDP-Bestimmung .....	- 30 -
4.1.3.3.2 nRP-Bestimmung .....	- 31 -
4.1.3.4 Verdaulichkeitsbestimmungen .....	- 32 -
4.1.3.5 Rasterelektronenmikroskopie (REM).....	- 34 -
4.1.3.6 Epiphytisches Mikrobiom .....	- 35 -
4.1.3.7 Fütterungsversuch .....	- 35 -
4.1.4 Analytik.....	- 36 -
4.1.4.1 Trockenmassebestimmung und Korrektur .....	- 36 -
4.1.4.1.1 Siliererfolg.....	- 37 -
4.1.4.1.2 Aerobe Stabilität.....	- 37 -
4.1.4.1.3 Rohnährstoffe .....	- 38 -
4.1.4.1.4 Antinutritive Inhaltsstoffe .....	- 38 -
4.1.4.2 Statistische Auswertung .....	- 39 -
4.1.4.2.1 Rohnährstoffe und Parameter des Fütterungserfolges.....	- 39 -
4.1.4.2.2 <i>in vitro</i> -Untersuchungen (nRP und UDP) .....	- 39 -
4.1.4.2.3 Verdaulichkeitsbestimmung .....	- 39 -
4.2 Ergebnisse und Diskussion.....	- 41 -
4.2.1 Früh ernten von Erbsen und Ackerbohnen.....	- 41 -

4.2.1.1 Nährstoffentwicklung während der Kornreife.....	- 41 -
4.2.1.2 Morphologie während der Kornreife.....	- 45 -
4.2.1.3 Phytosanitäre Vorkommen während der Kornreife.....	- 46 -
4.2.1.4 Nährstoffgehalt teigreifer Erbsen und Ackerbohnen.....	- 50 -
4.2.1.5 Silierbarkeit teigreifer Erbsen und Ackerbohnen.....	- 55 -
4.2.2 Silierung teigreifer Erbsen und Ackerbohnen.....	- 58 -
4.2.2.1 Einfluss ausgewählter MSB-Präparate.....	- 58 -
4.2.2.2 Siliererfolg.....	- 64 -
4.2.2.3 Proteinqualität.....	- 67 -
4.2.2.4 Kohlenhydratfraktionen.....	- 70 -
4.2.2.5 Morphologie.....	- 74 -
4.2.2.6 Antinutritive Inhaltsstoffe.....	- 76 -
4.2.2.7 Mikrobiom.....	- 78 -
4.2.2.8 Aerobe Stabilität.....	- 80 -
4.2.3 Wärmebehandlung silierter Erbsen und Ackerbohnen.....	- 83 -
4.2.3.1 Einfluss der Behandlungsintensität.....	- 83 -
4.2.4 Die kombinierte Behandlung (silieren + toasten) von Erbsen und Ackerbohnen.....	- 91 -
4.2.4.1 Einfluss auf die Proteinqualität.....	- 91 -
4.2.4.2 Einfluss auf den Gehalt Antinutritiver Inhaltsstoffe.....	- 96 -
4.2.4.3 Einfluss auf die Stärkemorphologie.....	- 99 -
4.2.4.4 Einfluss auf die Verdaulichkeit von Stärke und Protein.....	- 101 -
4.2.5 Fütterungstauglichkeit.....	- 105 -
4.2.5.1 Siliert und getoastete Erbsen als Rationskomponente.....	- 105 -
5 Schlussfolgerung.....	- 110 -
6 Zusammenfassung.....	- 115 -
7 Danksagung.....	- 116 -
8 Literaturverzeichnis.....	- 117 -
9 Eidesstattliche Erklärung.....	- 147 -
10 Lebenslauf.....	- 148 -
11 Referenzen.....	- 149 -
12 Anhang.....	- 152 -

**Kurzfassung**

**Problemsicht:** Mit der vorliegenden Arbeit sollte geprüft werden, inwieweit sich der Futterwert von Erbsen und Ackerbohnen durch die Silierung und anschließender Wärmebehandlung frühzeitig geernteter Körner erhöhen lässt, ohne dabei nennenswerte Schädigungen wertbestimmender Nährstoffe zu provozieren. Dabei sollte insbesondere das Reifestadium, die Silierparameter sowie die Temperaturführung so optimiert werden, dass damit Rapsextraktionsschrot (RES) in der Ration hochleistender Milchrindern nährstoffadäquat ersetzt werden kann.

**Ergebnisse:** Die Ernte von Körnerleguminosen ist bereits zur Teigreife (ab ca. 50 % Korn-Trockenmasse, TM) ohne Nährstoffverluste möglich und ab einer TM von 70 % großtechnisch umsetzbar. Das natürliche Vorkommen von Milchsäurebakterien (MSB) ist zu diesem Reifezeitpunkt gering, sodass die Zugabe von MSB als biologisches Siliermittel sinnvoll ist. Bei der Silierung der feuchten Körner sind keine nennenswerten Nährstoffverluste an Stärke und Protein aufgetreten. Die Bildung von Gärssäuren blieb auf einem niedrigen Niveau. Die Zugabe homofermentativer MSB führte zu höheren Milchsäuregehalten und entsprechend niedrigeren pH-Werten. Die Silierung der teigreifen Körner führte zu einer Reduzierung der Proteinlöslichkeit. Die sich anschließende hydrothermische Aufbereitung der Kornsilagen konnte in Abhängigkeit der Behandlungsintensität (Temperatur, Dauer, Menge) die ruminale Proteinbeständigkeit weiter steigern. Dabei wurde jedoch deutlich, dass Temperaturen über 85 °C Korntemperatur (= Temperatur des getoasteten Materials) eine zunehmende Proteinschädigung anhand steigender Anteile der Proteinfraction C nachgewiesen werden konnte. Auch die Bildung von Maillardprodukten steigerte sich ab dieser Temperatur, begleitet von einer Reduzierung ausgewählter Aminosäuren (v.a. Lysin). Die Stärkequalität sowie der Gehalt an wertbestimmenden Nährstoffen wurde durch die kombinierte Behandlung kaum beeinflusst. In dem Fütterungstest an hochleistenden Milchkühen konnte ohne Leistungs- und Qualitätsverlust der Milch ein wesentlicher Anteil an RES in der Ration durch siliert getoastete Erbsen nährstoffadäquat ausgetauscht werden.

**Fazit:** Erbsen und Ackerbohnen können mit über 50 % TM nach Silierung und anschließender hydrothermischer Behandlung bei 85 °C Korntemperatur erfolgreich importierte Proteinquellen wie RES in der Fütterung hochleistender Milchrinder ersetzen.

**Abstract**

**Problem view:** It should be examined how the feed value of peas and field beans can be increased by ensiling and subsequent heat treatment of grains harvested at an early stage. No damage to essential nutrients should occur. The maturity stage, ensiling parameters and temperature should be optimized in order to replace rapeseed extraction meal (RES) in the feeding of high-yielding dairy cattle.

**Results:** Grain legumes can be harvested at dough maturity (from about 50 % grain dry matter, DM) without loss of nutrients. From a DM of 70 %, harvesting is practically feasible. The natural occurrence of lactic acid bacteria (MSB) is low at the development stage. The addition of MSB as a biological ensiling agent is useful. Ensiling of wet grains did not provoke nutrient losses of starch and protein occurred. The formation of fermentation acids remained at a low level. Addition of homofermentative MSB resulted in higher lactic acid levels and lower pH values. Ensiling resulted in a reduction in protein solubility. Subsequent hydrothermal treatment of silages further increased ruminal protein stability. Treatment intensity (temperature, duration, quantity) is important. At temperatures above 85 °C grain temperature (= temperature of the toasted material) protein damage occurs. Maillard products are also formed and these reduces the content of amino acids, especially lysine. The starch quality is hardly changed by the combined treatment. In the feeding test on high-yielding dairy cows, a high proportion of RES in the ration could be replaced by ensiled toasted peas in a nutrient-adequate manner. Milk yield and quality losses did not occur.

**Conclusion:** Peas and field beans, with over 50 % DM after ensiling and subsequent hydrothermal treatment at 85 °C grain temperature, can successfully replace imported protein sources such as RES in the feeding of high-yielding dairy cattle.

## Abkürzungsverzeichnis

		FM	Fettsäuren [% d. FM]
		g	Frischmasse [g]
			Gramm (Maßeinheit für Gewicht)
A	Summe der Gehalte einwertiger Alkohole [% d. FM]	G6PD	Glucose-6-phosphat Dehydrogenase
AAN	Aminosäure-Stickstoff („feed amino acid nitrogen“)	GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
AB	Ackerbohne	GE	Gesamtenergie (Bruttoenergie)
ADFom	Saure Detergentienfaser („acid detergent fibre“) abzüglich RA	GVO	Gentechnisch veränderte Organismen
ADL	Saures Detergentienlignin („acid detergent lignin“)	HMF	Hydroxymethylfurfural
RF	Rohfett	HTST	Hochtemperatur Kurzzeitverfahren („high temperature/short time“)
aNDFom	Neutrale Detergentienfaser abzüglich RA und Amylase	HPLC-UV	Hochleistungsflüssigkeitschromatografie-UV-Detektoren
ANF	Antinutritive Faktoren	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Kaliumcarbonat
AZ	Ackerzahl	kg	Kilogramm
B	<i>Ordnung</i> Bacillales	keV	Kiloelektronenvolt
BBCH	<b>B</b> iologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, <b>B</b> undessortenamt und <b>ch</b> emischer Industrie; <b>B</b> ASF, <b>B</b> ayer AG, <b>C</b> iba Geigy AG, <b>H</b> oechst AG	KH	Kohlenhydrate
		kK	keimfähige Körner
		KOH	Kaliumhydroxid
		kPa	Kilopascal
		LKS	Landwirtschaftliche Kommunikations- und Servicegesellschaft
BCS	„Body condition score“		
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung	LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
CNCPS	Cornell Net Carbohydrate and Protein System	LM	Lebendmasse [kg]
CML	Carboxymethyllysin	LSM	Mittelwert der kleinsten Quadrate („least square mean“)
DNA	Desoxyribonukleinsäure		
DE	Deutschland	LTG	Luzernetrockengrün
E	Erbse	LTLT	Niedrigtemperatur Langzeitverfahren („low temperature/long time“)
ECM	Energie korrigierte Milchleistung („energy corrected milk yield“)	LVG	Lehr- und Versuchsgut
eHFT	erweiterte Hohenheimer Futterwerttest	MG-H1	Methylglyoxal-Hydroimidazolone
ENB	<i>Ordnung</i> Enterobakterien	ME	Umsetzbare Energie
		mg	Milligramm
		min	Minuten
		MJ	Megajoule
		MS	Milchsäure
et al.	und andere („et alia“)	MSB	Milchsäurebakterien
EZ	Epidermiszellen	mV	milli Volt
FC	Faser-Kohlenhydrate	N	Stickstoff
FFS	Summe an flüchtigen	NE	Nettoenergie

NEL	Nettoenergie Laktation [MJ/kg TM]	UDP	unabbaubares Futterrohprotein
NFC	Nicht-Faser-Kohlenhydrate		(„undegradable feed protein“)
NfE	Stickstofffreien Extraktstoffe	UDP8	unabbaubares Futterrohprotein bei einer Passagerate von 8 %/h
NH <sub>3</sub>	Ammoniak		vor allem
NH <sub>3</sub> -N	Ammoniak-Stickstoff	v.a.	verdauliche Energie
NPN	Nicht-Protein-Stickstoff	VE	Verdauungsquotient der organischen Masse
n.s.	nicht signifikant, $p > 0,05$	VQ OM	Verdauungsquotient
nRP	nutzbares Rohprotein am Duodenum	VQ	Wintererbse
OM	organische Masse	WE	Wintertritikale
ÖVF	ökologische Vorrangflächen	WT	Winterweizen
P	Parenchym	WW	
pcv	praececal verdaulich	z.B.	zum Beispiel
PI	Proteaseinhibitoren		
PSD	<i>Ordnung</i> Pseudomonadaceae		
PSM	Pflanzenschutzmittel		
PZ	Parenchymzelle		
RDS	ruminale Stärkeabbaubarkeit („rumen degradation of starch“)		
REM	Rasterelektronen- mikroskopie		
rRNA	ribosomale Ribonukleinsäure		
RES	Rapsextraktionsschrot		
RP	Rohprotein		
RS	Resistente Stärke		
RNB	Ruminale Stickstoff Bilanz		
S	Stärke		
SEM	Standardfehler des Mittelwertes oder Medians		
SES	Sojaextraktionsschrot		
SM	Silomais		
SN	Sachsen		
TIA	Trypsininhibitoraktivität („trypsin inhibitor activity“, [mg/g TM])		
TIU	Trypsininhibitoreinheiten („trypsin inhibitor units“, [mg])		
TM	Trockenmasse [g/kg FM]		
TM <sub>k</sub>	korrigierte TM [% d. FM]		
TM <sub>n</sub>	nicht korrigierte TM [% d. FM]		
TMR	Totale-Misch-Ration		
u.a.	unter anderem		



## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Ausgewählte Wärmebehandlungsverfahren zur Aufbereitung von Körnerleguminosen .....	- 15 -
<b>Abbildung 2:</b> Veränderung der Stärkegranula von vorvermahlten Mais und Gerste nach einer druckthermischen Behandlung .....	- 20 -
<b>Abbildung 3:</b> Relative Häufigkeit epiphytischer Bakterien im Verhältnis zur Gesamtbakterienanzahl der nativen Erbse „Astronaut“ zu ausgewählten Kornreifstadien .....	- 47 -
<b>Abbildung 4:</b> Anteil befallener Körner (500 g FM) mit dem Ackerbohnenkäfer bei ausgewählten Ackerbohnsorten .....	- 48 -
<b>Abbildung 5:</b> Veränderung des pH-Wertes über alle hergestellten Modellsilagen von Erbse und Ackerbohne nach Silierung ohne und mit MSB als Silierzusatz bei 70 % und 75 % TM im Siliergut .....	- 64 -
<b>Abbildung 6:</b> Stärkestruktur der Erbse „Alvesta“ (nativ) .....	- 74 -
<b>Abbildung 7:</b> Stärkestruktur der Erbse „Alvesta“ (rückbefeuchtet, siliert, KON) .....	- 74 -
<b>Abbildung 8:</b> Stärkestruktur der Ackerbohne „Taifun“ (nativ) .....	- 75 -
<b>Abbildung 9:</b> Stärkestruktur der Ackerbohne „Taifun“ (rückbefeuchtet, siliert MSB).....	- 75 -
<b>Abbildung 10:</b> Auswirkungen der Silierung (Zugabe MSB) von Ackerbohnen „Fanfare“ und „Taifun“ auf den Vicingehalt .....	- 76 -
<b>Abbildung 11:</b> Relative Häufigkeit epiphytischer Bakterien im Verhältnis zur Gesamtbakterienanzahl in silierten Erbsenkörnern zu ausgewählten Kornreifstadien ohne oder mit Zugabe von MSB sowie die entsprechenden pH-Werte .....	- 78 -
<b>Abbildung 12:</b> Relative Häufigkeit epiphytischer Bakterien im Verhältnis zur Gesamtbakterienanzahl in silierten Erbsenkörnern nach 7 Tagen aerober Lagerung .....	- 81 -
<b>Abbildung 13:</b> Veränderung der Proteinlöslichkeit siliierter + getoasteter Erbsen in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur .....	- 83 -
<b>Abbildung 14:</b> Veränderung der Proteinlöslichkeit siliierter + getoasteter Erbsen in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur und –dauer .....	- 84 -
<b>Abbildung 15:</b> Veränderung der Proteinbeständigkeit siliert + getoasteter Erbsen „Alvesta“ bei einer Behandlungstemperatur von 160 °C zu drei Behandlungsdauern .....	- 86 -
<b>Abbildung 16:</b> Einfluss der Behandlung auf die Proteinlöslichkeit betrachtet über alle Sorten von Erbsen und Ackerbohnen der Modellstudien .....	- 91 -
<b>Abbildung 17:</b> Veränderung des Anteils der Proteinfractionen in Folge der großtechnischen Silierung und thermischen Behandlung der Kornsilagen mit ausgewählten Temperaturen -	92 -
<b>Abbildung 18:</b> Veränderung des nRP nach der nasschemischen Methode des eHFT und in Abhängigkeit der Passagerate der Erbse „Alvesta“ in Folge der großtechnischen Silierung und thermischen Behandlung der Kornsilagen mit ausgewählten Temperaturen .....	- 93 -
<b>Abbildung 19:</b> Effekt der Silierung und anschließender thermischen Aufbereitung der Kornsilagen (160 °C, 30 Minuten) auf die Trypsininhibitoraktivität (TIA) bei ausgewählten Erbsen und Ackerbohnen .....	- 96 -
<b>Abbildung 20:</b> Veränderung der TIA der Erbse „Alvesta“ in Folge der großtechnischen Silierung und thermischen Behandlung der Kornsilagen mit ausgewählten Temperaturen -	97 -
<b>Abbildung 21:</b> Elektronenmikroskopische Aufnahmen in 500-facher Vergrößerung der Erbse „Astronaut“ zu ausgewählten Behandlungen .....	- 100 -
<b>Abbildung 22:</b> Veränderung der ruminalen Abbaubarkeit der Trockenmasse (TM), des Rohproteins (RP) sowie der Stärke nach 8 h Inkubation der Erbse „Alvesta“ in Folge der großtechnischen Silierung und thermischen Behandlung der Kornsilagen mit ausgewählten Temperaturen .....	- 102 -

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Mittlere Proteinqualität ausgewählter Körnerleguminosen im Vergleich zu Soja- und Rapsextraktionsschrot .....	- 5 -
<b>Tabelle 2:</b> Mittlere Aminosäuregehalte ausgewählter Körnerleguminosen im Vergleich zu Soja- und Rapsextraktionsschrot .....	- 5 -
<b>Tabelle 3:</b> Ausgewählte Kohlenhydratparameter und Rohfettgehalt von Erbsen und Ackerbohnen im Vergleich zu ausgewählten Proteinquellen.....	- 6 -
<b>Tabelle 4:</b> Energiegehalte von Erbsen und Ackerbohnen im Vergleich zu ausgewählten Proteinquellen.....	- 8 -
<b>Tabelle 5:</b> Effekte der Wärmebehandlung auf die Proteinqualität .....	- 19 -
<b>Tabelle 6:</b> Anbaubeschreibung des Probenmaterials der Erbsen und Ackerbohnen.....	- 26 -
<b>Tabelle 7:</b> Hergestellte Silagevarianten von Erbsen und Ackerbohnen .....	- 28 -
<b>Tabelle 8:</b> Verwendete Rationen mit entsprechenden Rationskomponenten sowie ausgewählte Nährstoffgehalte .....	- 33 -
<b>Tabelle 9:</b> Angewandte Analysemethoden .....	- 38 -
<b>Tabelle 10:</b> Entwicklung des Proteingehaltes sowie der Proteinqualität während der Kornreife der Erbse „Astronaute“ .....	- 42 -
<b>Tabelle 11:</b> Entwicklung des Proteingehaltes sowie der Proteinqualität während der Kornreife der Ackerbohne „Taifun“ .....	- 43 -
<b>Tabelle 12:</b> Entwicklung der Kohlenhydratparameter während der Kornreife der Erbse „Astronaute“ .....	- 43 -
<b>Tabelle 13:</b> Entwicklung der Kohlenhydratfraktionen während der Kornreife der Ackerbohne „Taifun“ .....	- 44 -
<b>Tabelle 14:</b> Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Proteinqualität der verwendeten Erbsensorten .....	- 50 -
<b>Tabelle 15:</b> Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Proteinqualität der verwendeten Ackerbohnsorten.....	- 51 -
<b>Tabelle 16:</b> Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Kohlenhydratfraktionen der verwendeten Erbsensorten.....	- 52 -
<b>Tabelle 17:</b> Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Kohlenhydratfraktionen der verwendeten Ackerbohnsorten .....	- 53 -
<b>Tabelle 18:</b> Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Silierbarkeit der verwendeten Erbsensorten .....	- 55 -
<b>Tabelle 19:</b> Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Silierbarkeit der verwendeten Ackerbohnsorten.....	- 56 -
<b>Tabelle 20:</b> Siliererfolg bei Zugabe ausgewählter Milchsäurebakterien zu rückbefeuchteten Erbsen „Alvesta“ (55 % TM) .....	- 60 -
<b>Tabelle 21:</b> Siliererfolg bei Zugabe ausgewählter Milchsäurebakterien zu rückbefeuchteten Erbsen „Alvesta“ (65 % TM) .....	- 60 -
<b>Tabelle 22:</b> Veränderungen der Proteinqualität bei Zugabe ausgewählter MSB zu rückbefeuchteten Erbsen „Alvesta“ (55 % TM).....	- 63 -
<b>Tabelle 23:</b> Veränderungen der Proteinqualität bei Zugabe ausgewählter MSB zu rückbefeuchteten Erbsen „Alvesta“ (65 % TM).....	- 63 -
<b>Tabelle 24:</b> Siliererfolg rückbefeuchteter und teigreif geernteter Erbsen .....	- 66 -
<b>Tabelle 25:</b> Siliererfolg rückbefeuchteter und teigreif geernteter Ackerbohnen.....	- 66 -
<b>Tabelle 26:</b> Effekte der Silierung auf die Proteinqualität von Erbsen.....	- 69 -
<b>Tabelle 27:</b> Effekte der Silierung auf die Proteinqualität von Ackerbohnen .....	- 69 -
<b>Tabelle 28:</b> Effekte der Silierung auf die Kohlenhydratfraktionen von Erbsen.....	- 72 -

**Tabelle 29:** Effekte der Silierung auf die Kohlenhydratfraktionen von Ackerbohnen ..... - 72 -

**Tabelle 30:** Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der aeroben Stabilität siliierter Erbsen mit und ohne Zugabe von Milchsäurebakterien nach 7 Tagen aerober Lagerung ..... - 80 -

**Tabelle 31:** Veränderung der ruminalen Abbaubarkeit (*in vitro*) ausgewählter Roh Nährstoffe der Erbse „Alvesta“ in Folge der Silierung sowie der anschließenden thermischen Aufbereitung ..... - 85 -

**Tabelle 32:** Veränderung der Proteinqualität siliierter Erbsen in Abhängigkeit der Behandlungsmenge und –temperatur ..... - 87 -

**Tabelle 33:** Effekte der zu wärmebehandelnden Menge auf die Proteinqualität siliierter Erbsen nach einer thermischen Behandlung in einem Trockenschrank ..... - 87 -

**Tabelle 34:** Effekte der zu wärmebehandelnden Menge auf die Proteinqualität siliierter Ackerbohnen nach einer thermischen Behandlung in einem Trockenschrank ..... - 88 -

**Tabelle 35:** Veränderung der Proteinqualität nativ getoasteter Erbsen in Abhängigkeit der Behandlungsmenge und –dauer bei einer Temperatur von 160 °C ..... - 89 -

**Tabelle 36:** Verdaulichkeit von Energie und ausgewählten Nährstoffen großtechnisch verarbeiteter Erbsen „Alvesta“ ..... - 101 -

**Tabelle 37:** Effekte der großtechnisch durchgeführten kombinierten Behandlung auf ausgewählte Parameter der Protein- und Stärkequalität der Erbse „Alvesta“ ..... - 106 -

**Tabelle 38:** Ausgewählte Parameter des Fütterungserfolges siliert und getoasteter Erbsen der Sorte „Alvesta“ ..... - 107 -



## 1 Einleitung

Körnerleguminosen werden weltweit als Protein- und Kohlenhydratquelle in der Human- und Tierernährung geschätzt (REHMAN & SHAH, 2005). Erbsen (*Pisum sativum*) und Ackerbohnen (*Vicia faba*) gehören dabei mit einer durchschnittlichen Anbaufläche von rund 100.000 Hektar zu den in Deutschland wirtschaftlich bedeutendsten Körnerleguminosen (Abbildung Anhang 1). Sie besitzen auf Basis essentieller Inhaltsstoffe wie Protein, Aminosäuren, Fett, Fettsäuren, Faser, den Energiekennzahlen sowie den Gehalt an antinutritiven Inhaltsstoffen als Hauptproteinquelle in den Rationen hochleistender Nutztiere eine geringe Konkurrenzfähigkeit gegenüber Sojaextraktionsschrot (SES) und Rapsextraktionsschrot (RES; LOSAND et al., 2003; FREITAG, 2006; PRODANOV et al., 2004). Erbsen und Ackerbohnen enthalten antinutritive Inhaltsstoffe (Tannine, Phenole, Trypsininhibitoren), die v.a. beim Monogaster Einsatzrestriktionen in der Fütterung provozieren. Die ruminale Proteinabbaubarkeit beträgt bei nativen Erbsen und Ackerbohnen > 75 % (ANDERSON et al., 2007; YU et al., 2002a; ŻEBROWSKA et al. 1997). Auf Grund des geringen Anteils an unabbaubaren Futterrohprotein (UDP) von rund 15 % (BAUMGÄRTEL et al., 2013), ist der Gehalt des nutzbaren Rohprotein am Duodenum (nRP) mit rund 180 g/kg Trockenmasse (TM) deutlich geringer im Vergleich zu RES (240 g/kg TM). Um Erbsen und Ackerbohnen in der Wiederkäuerfütterung als konkurrenzfähige Proteinquelle zu manifestieren, gilt es diese Differenz z.B. durch Wärmebehandlungsverfahren auszugleichen. Die Wärmebehandlung dient in erster Linie der Erhöhung der Proteinbeständigkeit. Eine Reduktion der antinutritiven Inhaltsstoffe (ANF) während des Prozesses hat in der Wiederkäuerfütterung keine Bedeutung (STERN et al., 1985; DIXON & HOSKING, 1992; FREITAG, 2006), da der wiederkäuertypische Verdauungsprozess sowie die Mikrobiota des Pansens diese Stoffe metabolisieren und unschädlich machen. In der Wiederkäuerfütterung werden hauptsächlich die Wärmebehandlungsprozesse Rösten, Toasten, Extrudieren und Expandieren zur Aufbereitung von Körnerleguminosen beschrieben (YU et al., 2002a). Verfahren wie Extrudieren oder Expandieren sind durch die starke Beeinflussung der Stärkeverdaulichkeit für die Monogasterernährung zu präferieren. Im Gegensatz dazu sind trockenthermische Verfahren auf Grund der unveränderten und bereits bestehenden sehr hohen Abbaubarkeit der Stärke in der Wiederkäuerernährung zu bevorzugen (MASOERO et al., 2005). Das Ziel der vorliegenden Untersuchung lag in der Steigerung der ruminale Proteinbeständigkeit (UDP, nRP) von Erbsen- und Ackerbohnen durch die Silierung frühzeitig geernteten Körner und einer nachfolgenden Wärmebehandlung. Ein möglicher Erfolg sollte anhand der Fütterungstauglichkeit an hochleistenden Milchrindern überprüft werden.

## 2 Literatur

### 2.1 Charakterisierung von Erbsen und Ackerbohnen

#### 2.1.1 Ackerbohnen (*Vicia faba*)

Im Jahr 2019 wurden in Deutschland 11 Ackerbohnen Sorten zugelassen, wovon „Fuego“, „Tiffany“ und „Fanfare“ zu den bedeutendsten Ackerbohnen Sorten zählten (Bundessortenamt, 2019). Großbritannien, Frankreich und Italien sind mit 170.000, 86.000 sowie 48.000 ha (TROEGEL, 2017) die bedeutendsten Produzenten von Ackerbohnen (UFOP, 2013). Das genetische Ertragspotenzial der Ackerbohnen wird auf 50 - 80 dt/ha (KARALUS, 2018; SAUERMAN & SASS, 2016) geschätzt. Durch klimatische und anbautechnische Verfahren liegen die realisierten Erträge allerdings niedriger (KAHNT, 2008; siehe auch Abbildung Anhang 5), was der durchschnittliche Ertrag in Deutschland von 36 dt/ha bestätigt (siehe Abbildung Anhang 2). Ackerbohnen haben keine hohen Temperaturansprüche und keimen bereits bei 0 °C. Ackerbohnen sollten, je nach vorherrschender Klimabedingung und Bodenqualität, in 4 – 8 cm Bodentiefe gesät werden (GUDDAT et al., 2010; LfL, 2011; RYBIŃSKI & GÓRYNOWCIZ, 2016; SAUERMAN & SASS, 2016). Die Aussaat kann Ende Februar bis Anfang April mit einer Saatstärke von 30 – 45 keimfähigen Körnern/m<sup>2</sup> erfolgen (GUDDAT et al., 2010; LfL, 2011; RYBIŃSKI & GÓRYNOWCIZ, 2016; SAUERMAN & SASS, 2016). Der Feldaufgang beginnt ab einer Temperatur von 5 °C. Eine große Bedeutung hat die Wasserverfügbarkeit während der Blüte und Samenbildung (RYBIŃSKI & GÓRYNOWCIZ, 2016). Vorzugsweise sollten Ackerbohnen auf mittlere bis schwere Standorte (SAUERMAN & SASS, 2016) mit feuchten, nährstoffreichen und alkalischen Böden wie z.B. Schwarz- oder Lössböden mit einer hohen Wasserspeicherkapazität angebaut werden (RYBIŃSKI & GÓRYNOWCIZ, 2016). Entsprechende Bedingungen sind in der Küstenregion Deutschlands, den Lößstandorten Mittel- und Ostdeutschland sowie in Bayern zu finden (SAUERMAN & SASS, 2016). Die Ernterückstände können 50 dt mit Düngäquivalenten von 40 kg Kaliumoxid (K<sub>2</sub>O), 20 kg Phosphorpentoxid (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) und 70 kg Stickstoff (N) pro Hektar erreichen und ermöglichen somit einen hohen Vorfruchtwert für Winterweizen und -raps (RYBIŃSKI & GÓRYNOWCIZ, 2016). Die Ackerbohne hat auf Grund pathogener Belastungen und einer Selbstunverträglichkeit Anbaupausen von vier (SAUERMAN & SASS, 2016) bis sechs Jahren (SCHMIDT et al., 2014). Zu den bedeutenden Virus- und Pilzerkrankungen zählen die Schokoladenfleckenkrankheit, der Grauschimmel, der Falsche Mehltau und der Ackerbohnenrost (GUDDAT et al., 2010; RYBIŃSKI & GÓRYNOWCIZ, 2016). Blattläuse (z.B. schwarze Bohnenlaus), Graurüssler und Ackerbohnenkäfer sind weit verbreitete Ackerbohnen schädlinge (RYBIŃSKI & GÓRYNOWCIZ,

2016). Der Ackerbohnenkäfer kann bis zu 16 Monate überleben. Für eine erfolgreiche Bekämpfung ist neben dem Einsatz von Insektiziden eine Anbaupause von mindestens drei Jahren, ein tiefes Unterpflügen sowie ein großer räumlicher Abstand zur vorjährigen Ackerbohnenanbaufläche notwendig (HÄNI et al., 2008). Die adulten Käfer können während der Blühphase durch den Einsatz entsprechender Insektizide bekämpft werden. Eine Wiederholung der Anwendung nach sieben bis zehn Tagen wird u.a. von BIDDLE & CATTILIN (2007) empfohlen. Sobald die Eier gelegt sind ist eine Bekämpfung der Larve durch Insektizide nicht mehr möglich.

### 2.1.2 Erbsen (*Pisum sp.*)

2019 wurden in Deutschland 17 Erbsensorten zugelassen, wovon „Astronaut“, „Alvesta“, „Salamanca“ und „Respect“ zu den verbreitetsten Futtererbsen zählen (Bundessortenamt, 2019). Die Erbse „Astronaut“ erreichte 2016 und 2017 auf Löß-Standorten einen mittleren Ertrag von 53 dt/ha (KARALUS, 2018). Die Sorte „Alvesta“ hat einen niedrigen Rohproteingehalt und wies mit 49 dt/ha mittlere Kornerträge auf, wohingegen die Sorte „Respect“ mit einem Ertragsvermögen von 43 dt/ha den anderen Sorten unterlegen war, aber die beste Standfestigkeit und Strohstabilität aufwies (KARALUS, 2018). Erbsen sind durch ihre gute Anpassungsfähigkeit an verschiedene Bodenverhältnisse weit verbreitet und zählen zu den bedeutendsten Körnerleguminosen der gemäßigten Klimazone. Es gibt zwei wirtschaftlich bedeutende Grundarten der Gattung *Pisum*, die sich nach ihrer Blühfarbe definieren (weißblühend = *P. sativum*; buntblühend = *P. arvense*). Spanien, Frankreich, Deutschland und Litauen haben auf europäischer Ebene die größten Anbauflächen. Die höchsten mittleren Erträge aus den Jahren 2010 - 2015 erreichten mit je 36 dt/ha Frankreich und Großbritannien (TROEGEL, 2017). Der durchschnittliche Ertrag in Deutschland lag bei 33 dt/ha (siehe Abbildung Anhang 2, Abbildung Anhang 5). Körnererbsen sollten auf sandig-lehmigen, durchlässigen und kalkhaltigen Böden in einer mäßig feuchten Klimazone angebaut werden. Die Erbsensamen keimen ab 2 °C. Die optimale Temperatur für Wachstum und Entwicklung liegt bei 13 - 18 °C (RYBIŃSKI & GÓRYNOWCIZ, 2016). Die Aussaat kann ab Mitte März erfolgen und wie bei Ackerbohnen. Die Saatstärke liegt mit 60 - 100 keimfähigen Körnern/m<sup>2</sup> höher im Vergleich zu den Ackerbohnen (SAUERMAN et al., 2002; GUDDAT et al., 2010; LfL, 2011). Zu den verbreitetsten Schaderregern der Erbse zählen die Brennfleckenkrankheiten, der Grauschimmel, Mehltau sowie im Einzelfall die Weißstängeligkeit (SAUERMAN et al., 2002; GUDDAT et al., 2010; LfL, 2011). Die Brennfleckenkrankheiten, wie *Ascochyta pisi* (JONES, 1927; BREWER & MACNEILL, 1953; WALLEN, 1965), *Mycosphaerella pinodes* (JONES, 1927;

TIVOLI et al., 1996; XUE & WARKENTIN, 2001) und *Phoma pinodella* (JONES, 1927; ALI et al., 1978; ONFROY et al., 1999) gehören weltweit zu den bedeutendsten Erkrankungen bei Erbsen (BRETAG et al., 2006; KUMAR et al., 2017; RUBIALES et al., 2018; RICCIONI et al., 2019). Zu den wichtigsten Schädlingen gehören der Erbsenwickler (THÖMING & NORLI, 2015; RIEMER et al., 2017; SCHIELER et al., 2017), die grüne und rote Erbsenlaus (GRONLE & BÖHM, 2017; AZNAR-FERNÁNDEZ et al., 2019), die Erbsengallmücke und der Blattrandkäfer (SAUERMAN et al., 2002; LfL, 2011; LENZ, 2015). Die Erbse ist selbstunverträglich (KOLBE et al., 2002). Ebenso kann ein hoher Unkrautdruck Ertragseinbußen von 40 - 70 % provozieren (HARKER et al., 2001). Es werden daher Anbaupausen von mindestens sechs (KOLBE et al., 2002; McDONALD & PECK, 2009) bis zehn Jahren (SCHMIDT et al., 2014) empfohlen. Erbsen haben eine N-Fixierungsleistung von 50 - 500 kg N/ha. Davon verbleiben 66 % als Ernterückstand bei einem Kornertrag von 33 dt/ha in Form von Stroh und Wurzeln zurück (KOLBE et al., 2002). Die Gesamtwurzelmasse von Erbsen kann bis zu 6 dt TM/ha betragen, wovon 99 % oberhalb von 45 cm Bodentiefe liegen (KUTSCHERA et al., 2018). Die Wurzeltiefe für Erbsen variiert in Abhängigkeit der Bodenqualität und dem Nährstoffangebot zwischen 60 - 110 cm (KUTSCHERA et al., 2018, siehe hierzu Abbildung Anhang 4). Innerhalb einer Bodentiefe bis 25 cm bildet die Erbse zahlreiche seitlich verlaufende Seitenwurzeln, die eine dichte Durchwurzelung erreichen (KUTSCHERA et al., 2018).

## **2.2 Futterwertbestimmende Faktoren von Erbsen und Ackerbohnen**

### **2.2.1 Protein- und Aminosäurequalität**

Erbsen und Ackerbohnen enthalten rund 230 g/kg TM sowie 300 g/kg TM Rohprotein (RP) und können als heimische Eiweißquelle in der Fütterung landwirtschaftlicher Nutztiere eingesetzt werden (CRÉPON, 2007; FREITAG, 2006). Der RP-Gehalt ist niedriger im Vergleich zu importierten Proteinquellen wie RES (~ 400 g/kg RP) und SES (~ 500 g/kg TM RP). Die Blühfarbe (weiß/bunt) kann einen Einfluss auf den Proteingehalt haben, da buntblühende Sorten oft höhere Proteingehalte (> 300 g/kg TM) erreichen als weißblühenden Sorten (< 300 g/kg TM; CRÉPON, 2007). Beide Arten weisen eine ruminale Protein-Abbaubarkeit (*in vitro*) von rund 72 - 80 % (LJØKJEL et al., 2003; LUO & XIE, 2013; ŻEBROWSKA et al., 1997) auf. Der Gehalt an nRP liegt bei rund 180 g/kg TM mit einem UDP-Gehalt von rund 15 % (FREITAG, 2006; DUNKEL et al., 2016). In der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 1) werden ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Proteinqualität für großsamige Körnerleguminosen im Vergleich zu SES und RES dargestellt.



**Tabelle 1:** Mittlere Proteinqualität (Mittelwert, MW;  $n \geq 3$  Quellen) ausgewählter Körnerleguminosen im Vergleich zu Soja- und Rapsextraktionsschrot (nach BAUMGÄRTEL et al., 2013; BELLOF & WEINDL, 2016; BUTT & BATOOL, 2010; CRÉPON, 2007; DLG-FUTTERWERTTABELLE, 1997; FREITAG, 2006; GEFROM, 2012; GRUBER et al. 2005; HOFFMANN, 2015; HARMS, 2003; LfL-Information, 2013; LIPIEC, 2016; LOSAND et al., 2003; LOSAND et al., 2016; MASOERO et al., 2005; MUSTAFA et al., 1998; MOSENTHIN et al., 2007; PRIEPKE & SANFTLEBEN, 2018; REZVANI et al., 2011; ROTH-MAIER et al., 2004; SCHÄFFLER et al., 2015; SCHINGOETHE et al., 1988; SERRANO et al., 2013; STEINGAB et al., 2012; WEBER, 2017)

<b>Parameter [g/kg TM]</b>	<b>SES</b>	<b>RES</b>	<b>Erbsen <i>Pisum sativum</i></b>	<b>Acker- bohnen <i>Vicia faba</i></b>	<b>Sojabohne <i>Glycine max</i></b>	<b>Süßlupinen <i>Lupinus angustifolius</i></b>
Rohprotein	508	391	239	294	372	355
Proteinlöslichkeit* [% d. RP]	22	31	76	61	77	78
UDP** [% d. RP]	30	37	17	17	24	22
nRP**	278	243	180	193	187	207

\*in Kaliumhydroxid (KOH); \*\*Passagerate 8 %/h; nRP, nutzbare Rohprotein am Duodenum; RES, Rapsextraktionsschrot; SES, Sojaextraktionsschrot; TM, Trockenmasse; UDP, im Pansen unabgebautes Futterrohprotein

Bei Erbsen führen Sortenunterschiede und Schwankungen zwischen den Standorten sowie Anbaujahren insbesondere in nassen und kühlen Sommern, in Folge geringerer Stickstoffaufnahmen, zu reduzierten Rohproteingehalten (CRÉPON, 2007; FREITAG, 2006). Das Aminosäureprofil von Erbsen und Ackerbohnen ist reich an Lysin (CRÉPON, 2007; KHAZAEI & VANDENBERG, 2020; 17 g/kg TM; siehe Tabelle 2). Wohingegen der Gehalt schwefelhaltiger Aminosäuren gering ausfällt (ABEL et al., 2002; CRÉPON, 2007; LOSAND et al., 2003; Methionin + Cystein: 5 g/kg TM; siehe Tabelle 2). Damit gleicht es dem von Getreide, sodass nur geringe Mengen an limitierenden Aminosäuren v.a. der Schwefelhaltigen (v.a. Methionin) für eine ausgeglichene Versorgung ergänzt werden müssen (PETTERSON & MACKINTOSH, 1994).

**Tabelle 2:** Mittlere Aminosäuregehalte (Mittelwert, MW;  $n \geq 3$  Quellen) ausgewählter Körnerleguminosen im Vergleich zu Soja- und Rapsextraktionsschrot (nach BELLOF & WEINDL, 2016; DUNKEL et al., 2016; GEFROM, 2012; JEROCH et al., 2008; JEROCH, 2016c; LIPIEC, 2016; LOSAND et al., 2003; LOSAND et al., 2016; MOSENTHIN et al., 2007; REZVANI et al., 2011; SCHÄFFLER et al., 2015; STEINGAB et al., 2012; WEBER, 2017)

<b>Parameter [g/kg TM]</b>	<b>SES</b>	<b>RES</b>	<b>Erbsen <i>Pisum sativum</i></b>	<b>Acker- bohnen <i>Vicia faba</i></b>	<b>Sojabohne <i>Glycine max</i></b>	<b>Süßlupinen <i>Lupinus angustifolius</i></b>
Lysin	31	21	17	18	24	17
Methionin	6,8	7,8	2,0	2,0	5,2	2,0
Cystin	7,5	9,5	3,3	3,5	5,7	4,2
Threonin	19	18	8,6	9,9	15	11
Arginin	38	24	20	26	26	37

RES, Rapsextraktionsschrot; SES, Sojaextraktionsschrot; TM, Trockenmasse

Nach Angaben von ABEL et al. (2002) hat die Aminosäure Lysin von Ackerbohnen eine präcecale Verdaulichkeit beim Schwein von 82 %. Threonin, Methionin inklusive Cystin und Tryptophan sind mit rund 70 % schlechter verdaulich (ABEL et al., 2002).

### 2.2.2 Energie- und Stärkequalität

Die Kohlenhydrate (KH) sind der Hauptenergieträger in der Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere. Durch höhere Protein- und Fettgehalte ist der KH-Anteil von Eiweißfuttermitteln mit 50 % der TM geringer im Vergleich zu Getreide mit rund 80 % der TM (GRUBER et al., 2005). Zucker und Stärke sind hierbei die Nichtfaser-Kohlenhydrate (NFC), welche bei Erbsen 50 % sowie bei Ackerbohnen 60 % umfassen (GRUBER et al., 2005). Den verbleibenden Anteil bilden die Faser-Kohlenhydrate (FC). Nach Untersuchungen von GRUBER et al. (2005) sind bei Ackerbohnen 25 % der KH pansenverfügbar (langsam verdauliche KH, Fraktion B) und 15 % unlöslich (Fraktion C). Erbsen haben fast die doppelte Menge an pansenverfügbaren FC, wovon nur rund 2 % unlöslich sind. Stärke ist ein Speicherkohlenhydrat und tritt als Granulat in Chloroplasten von grünen Blättern und dem Amyloplast von Samen, Hülsenfrüchten und Knollen auf (SAJILATA et al., 2006). In Körnerleguminosen umfasst die Stärke einen Anteil von 5 % (Sojabohne) – 50 % der TM (Erbse, siehe Tabelle 3).

**Tabelle 3:** Ausgewählte Kohlenhydratparameter und Rohfettgehalt (Mittelwert, MW; n ≥ 3 Quellen) von Erbsen und Ackerbohnen im Vergleich zu ausgewählten Proteinquellen (nach BELLOF & WEINDL, 2016; DLG-FUTTERWERTTABELLE, 1997; DUNKEL et al., 2016; FREITAG, 2006; GEFROM, 2012; HAN et al., 2008; JEROCH, 2016c; LfL-INFORMATION, 2013; LIPIEC, 2016; LOSAND et al., 2003; LOSAND et al., 2016; MASERO et al., 2005; MOSENTHIN et al., 2007; REZVANI et al., 2011; ROTH-MAIER et al., 2004; SCHÄFFLER et al., 2015; STEINGAß et al., 2012; WEBER, 2017)

Parameter [g/kg TM]	SES	RES	Erbsen <i>Pisum sativum</i>	Acker- bohnen <i>Vicia faba</i>	Sojabohne <i>Glycine max</i>	Süßlupinen <i>Lupinus angustifolius</i>
Rohfett	15	30	18	16	216	60
Rohfaser	64	143	67	91	66	151
aNDFom	179	265	111	149	140	240
ADFom	109	211	79	121	89	206
Stärke	68	0	488	415	55	100
beständige Stärke*	17	-	23	21	39	13
[% d. Stärke]						
Zucker	96	78	53	36	84	59

\*Anteil der im Futter enthaltenen Stärke, die nicht durch die im Pansen lebenden Mikroorganismen abgebaut wird; ADFom, saure Detergentienfaser abzüglich Rohasche; aNDFom, neutrale Detergentienfaser abzüglich Rohasche und Amylase; RES, Rapsextraktionsschrot; SES, Sojaextraktionsschrot; TM, Trockenmasse

Der Gehalt an beständiger Stärke liegt bei herkömmlichen Sorten unter 5 % der Gesamtstärke, kann allerdings sortenbedingt auf rund 15 % steigen (GDALA & BURACZEWSKA, 1997). Die Morphologie der Stärkegranula ist genotypisch und variiert je nach Pflanzenart (SINGH et al., 2010) mit einer Größe von zwei (z.B. Reisstärke; SALDANHA DO CARMO et al., 2020; SANDHU & LIM, 2008; SHEN et al. 2016) bis 100 µm (z.B. Canna-Wurzel; JANE et al., 1994). Bei Getreidestärken (z.B. Mais, Weizen) sind meist zwei Kornfraktionen zu finden mit Durchmessern von 2 - 10 und 22 - 36 µm (JANE et al., 1994). Die Granula der Erbsenstärke kann eine Größe von bis zu 40 µm erreichen (RATNAYAKE et al., 2002). Die Stärkegranula von Ackerbohnen erreicht eine Größe von 30 µm (MA et al., 2017a). Die Stärkequelle (RING et al., 1988), Nicht-Stärke-Substanzen wie z.B. Proteine (CROWE et al., 2000; HAMAKER & BUGUSU, 2003; ROONEY & PFLUGFELDER, 1986; RING et al., 1988; OATES, 1997), Lipide (BALDWIN et al., 1997; CROWE et al., 2000; HOLM et al., 1983; OATES, 1997) und Mineralstoffe (ESCARPA et al., 1997; SITOHY & RAMADAN, 2001; SINGH et al., 2008) auf der Oberfläche stellen Einflussfaktoren auf die Stärkeverdaulichkeit dar. Inhibitoren wie z.B. Tannine (BISHNOI et al., 1994; ROONEY & PFLUGFELDER, 1986; THOMPSON & GABON, 1987) und das Verhältnis von Amylose zu Amylopektin (HOOVER & SOSULSKI, 1991; HORSTMANN et al., 2017; SANDHU & LIM, 2008) beeinflussen die Stärkeverdaulichkeit ebenfalls. Die Oberflächenstruktur (ABBAS et al., 1987; AMBIGAIPALAN et al., 2011; CHIOTELLI & LE MESTE, 2002; DREHER et al., 1984; MORAN, 1982; SNOW & O'DEA, 1981) und die Größe (AMBIGAIPALAN et al., 2011; BAJAJ et al., 2018; COLONNA et al. 1992; LANGWORTHY & DEUEL, 1922; LINDEBOOM et al., 2004; ROONEY & PFLUGFELDER, 1986; SNOW & O'DEA, 1981) sowie die ergänzenden Parameter im Anhang (Tabelle Anhang 4) sind weitere verdaulichkeitsbestimmende Faktoren. Erbsenstärke kann unbehandelt bis zu einem Anteil von 34 % aus beständiger Stärke bestehen (MA et al., 2017; XU et al., 2019). Der Stärkeaufschlussgrad von Leguminosen ist sowohl *in vitro* als auch *in vivo* niedriger im Vergleich zu Getreide (HOOVER & ZHOU, 2003). Die Stärke von Erbsen und Ackerbohnen besteht zu 60 - 70 % aus Amylopektin und zu annähernd 30 - 40 % aus Amylose (SANDHU & LIM, 2008; SINGH et al., 2010; XU et al., 2019). Mais-, Weizen-, Kartoffel-, Reis- und Maniokstärke bestehen hingegen zu 70 - 80 % aus Amylose und nur annähernd zu 20 % - 30 % aus Amylopektin (TAYLOR & EMMANBUX, 2008). Erbsen haben neben einem mittleren Eiweißgehalt einen hohen Energiegehalt. Die Ackerbohne besitzt einen deutlich höheren Eiweißgehalt im Vergleich zur Erbse und damit entsprechend einen geringeren Energiegehalt. In der Fütterung landwirtschaftlicher Nutztiere ist die Berücksichtigung des Energiegehaltes zur Berechnung der Rationen erforderlich. In der Tabelle 4 sind die

Energiegehalte von Erbse und Ackerbohne im Vergleich anderer Körnerleguminosen und Proteinfuttermitteln dargestellt.

**Tabelle 4:** Energiegehalte (Mittelwert, MW;  $n \geq 3$  Quellen) von Erbsen und Ackerbohnen im Vergleich zu ausgewählten Proteinquellen (nach BELLOF & WEINDL, 2016; DLG-FUTTERWERTTABELLE, 1997; DUNKEL et al., 2016; GEFROM, 2012; LFL-INFORMATION, 2013; LOSAND et al., 2003; LOSAND et al., 2016; REZVANI et al., 2011; ROTH-MAIER et al., 2004; SCHÄFFLER et al., 2015; STEINGAB et al., 2012; WEBER & SCHULZE, 2013; WEBER, 2017)

<b>Parameter [MJ/kg TM]</b>	<b>SES</b>	<b>RES</b>	<b>Erbsen <i>Pisum sativum</i></b>	<b>Acker- bohnen <i>Vicia faba</i></b>	<b>Sojabohne <i>Glycine max</i></b>	<b>Süßlupinen <i>Lupinus angustifolius</i></b>
ME Schwein	14,1	10,9	15,2	13,8	18,1	15,2
ME Geflügel	10,2	7,8	12,6	11,9	16,1	8,7
ME Rind	13,4	11,9	13,4	13,6	16,1	14,1
NEL Rind	8,3	7,2	8,5	8,6	10,1	8,7

ME, Umsetzbare Energie; NEL, Nettoenergie Laktation; RES, Rapsextraktionsschrot; SES, Sojaextraktionsschrot; TM, Trockenmasse

### 2.2.3 Sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe

Sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe stellen als „Biopestizide“ einen natürlichen Schutzmechanismus der Pflanzen dar (HUISMAN & JANSMAN, 1991). Sie schützen das Korn und die, für die Keimung und Wachstum des Keimlings notwendige Stärke, Speicherproteine sowie proteinhaltige Substanzen vor Angriffen durch Schadinsekten oder pathogene Mikroorganismen, wie Pilze, Bakterien und Viren (BIRK, 1987; GUILLAMÓN et al., 2008). Körnerleguminosen enthalten eine Vielzahl von Stoffen die antinutritiv wirken und negative Effekte auf die Verdauung sowie das Wachstum von Nutztieren haben können (BELLOF & WEINDL, 2016). Das Vorkommen dieser Verbindungen ist arten- und sortenabhängig. Schweine und Geflügel aber auch Fische (AYADI & ROSENTRATER, 2012; BUREL et al., 2000; MURRAY et al., 2010) besitzen im Vergleich zu den Wiederkäuern, bei welchen aufgrund der mikrobiellen Aktivität im Pansen diese Stoffe abgebaut und somit unschädlich gemacht werden können (RINNE et al., 2016), im Verdauungstrakt kaum Möglichkeiten zum Abbau der antinutritiven Stoffe (JEROCH, 2016). Zu den bedeutendsten sekundären Inhaltsstoffen zählen Bitterstoffe (Alkaloide wie Chinolizindialkaloide), phenolische Substanzen (Tannine, Phenolsäuren und Flavonoide), Lectine, Saponine (z.B. Triterpenoidsaponine), Glycopyranoside (Pyrimidinglycoside wie Vicin und Convicin) und Enzyminhibitoren (Proteaseinhibitoren wie Trypsininhibitoren). Behandlungsverfahren wie Schälen (BELLOF et al., 2016; EGOUNLETY & AWORH, 2003; LUO & XIE, 2013; SHARMA & SEHGAL, 1992), Einweichen (ALONSO et al., 1998; ALONSO et al., 2000; VIDAL-VALVERDE et al., 1997), Kochen (BEAL & MEHTA, 1985;

EGOUNLETY & AWORH, 2003; SHARMA & SEHGAL, 1992), Keimung (BEAL & MEHTA, 1985; EL-ADAWY et al., 2003; SHARMA & SEHGAL, 1992; SOKRAB et al., 2012), Silierung (EGOUNLETY & AWORH, 2003; GEFROM, 2012; MARTENS et al., 2013; SHIMELIS & RAKSHIT, 2008) und thermische Aufbereitungsformen (ALONSO et al., 2000; Bellof et al., 2016; DVOŘÁK et al., 2005; SHIMELIS & RAKSHIT, 2008; VIDAL-VALVERDE et al., 1997) reduzieren den Gehalt antinutritiver Inhaltsstoffe. Auch züchterische Maßnahmen führen in Erbsen und Ackerbohnen zu reduzierten Gehalten (BELLOF & WEINDL, 2016; KICZOROWSKA, 2016; ZUBER & RODEHUTSCORD, 2017). Je höher die Konzentrationen an antinutritiven Inhaltsstoffen in einem Futtermittel sind, desto höher sind die Einsatzrestriktionen in der Fütterung, insbesondere beim Monogaster (BELLOF & WEINDEL, 2016).

Aus ernährungsphysiologischer Sicht sind die proteinbezogenen sekundären Inhaltsstoffe (ROY et al., 2010) Vicin und Convicin sowie die Proteaseinhibitoren am Beispiel des Trypsininhibitors von Bedeutung. Vicin und Convicin (Glycopyranoside) sind hauptsächlich in Ackerbohnen und Wicken zu finden (KHAZAEI et al., 2015; RITTHAUSEN & PREUSS, 1899; PITZ et al., 1980). Sie stellen den Hauptgrund für die Limitierung von Ackerbohnen in der Humanernährung (Favismus; ARESE, 1982; ARESE & DE FLORA, 1990; CAPPELLINI & FIORELLI, 2008; CRÉPON et al. 2010; KHAMASSI et al., 2013; MAGER et al., 1965; WHARTON & DUESSELMANN, 1947) sowie in der Fütterung landwirtschaftlicher Nutztiere (insbesondere bei Monogastern; CRÉPON et al. 2010; DÄNNER, 2003; DUC et al. 1989; OLABORO et al., 1981a; OLABORO et al., 1981b) dar. Vicin und Convicin führen, u.a. durch Störungen des Fettstoffwechsels, zu einer verminderten Fruchtbarkeit und Laktation bei Sauen sowie zu einer verminderten Legeleistung, Ei- und Schlupfqualität bei Legehennen. Daraus ergeben sich Einsatzrestriktionen (LESSIRE et al., 2017; OLABORO et al., 1981a). Bis zu 30 % unbehandelte Ackerbohnen mit einem Vicin-Convicingehalt unter 7 g/kg TM können im Alleinfutter von Legehennen ohne negative Effekte auf die Leistung und Eiqualität eingesetzt werden (DÄNNER, 2003). Die Menge an Vicin und Convicin steigt während der Samenentwicklung an, erreicht sein Maximum zur Samenreife und fällt mit zunehmender Lagerungsdauer wieder ab (ARESE & DE FLORA, 1990; CARDADOR-MARTINEZ et al., 2012). Der Gehalt an Vicin und Convicin bei Ackerbohnen ist sortenabhängig und das Verhältnis von Vicin zu Convicin liegt meist bei 3 zu 1 (CRÉPON, 2007). Vicin- und convicinarme Sorten weisen kaum Pyrimidinglycoside auf (Vicin + Convicin: < 1 g/kg TM; MOSENTHIN et al., 2007; OLSEN & ANDERSEN, 1978; SOSULSKI & MCCURDY, 1987; VILARIÑO et al., 2009). Pyrimidinglycosidreiche Sorten können bis zu 10 g Vicin/kg TM und bis zu 5 g Convicin/kg TM enthalten (CRÉPON, 2007; VILARIÑO et al., 2009; WANG & UEBERSCHÄR, 1990). Die höchsten Konzentrationen sind in den grünen Keimblättern

(NTATSI et al., 2018) und in grünreifen Bohnen lokalisiert (PITZ et al., 1980). Vicin und Convicin werden durch eigene Glycosidasen der Bohnen als auch aus dem Magen-Darm-Trakt zu den Aglyconen Divicin (2,6-Diamino-4,5-dihydroxypyrimidin) und Isouramil (6-Amino-2,4,5-trihydroxypyrimidin) hydrolysiert (LUZZATTO & ARESE, 2018). Beide hochreaktiven Stoffe dienen als Schutzmechanismus gegen Pilze (PAVLIK et al., 2002) und Schadinsekten (DESROCHES et al., 1995). Die Reduzierung beider Glucoside ist Bestandteil weltweiter Züchtungsprogramme (z.B. vicinarne Sorten „Divine“ und „Tiffany“; KHAZAEI et al., 2019; BLE-Projekt „Abo-Vici“, 2815EPS065, Universität Göttingen). Körnerleguminosen enthalten weiterhin verschiedene Enzyminhibitoren. Diese hemmen Proteasen, Amylasen, Lipasen, Glycosidasen und Phosphatasen (SINGH & BASU, 2012). Proteaseinhibitoren (PI) haben in den Samen der Körnerleguminosen physiologische Funktionen (Regulierung Proteinase-Niveaus (USSUF et al., 2001). Weiterhin ermöglichen sie einen Proteinschutz vor vorzeitiger Hydrolyse (POERIO et al., 1989) v.a. bei Insekten und mikrobiellen Befall (HOWARD et al., 1996; USSUF et al., 2001; GUILLAMÓN et al., 2008) und tragen zur Wundheilung bei (USSUF et al., 2001). Sie bestehen aus Proteinen oder Polypeptiden und gehen mit proteolytischen Enzymen stabile Komplexe ein (DVOŘÁK et al., 2005). Der Gehalt dieser Inhibitoren reduziert sich während der Keimung und ermöglicht dann die Hydrolyse für den Keimprozess (USSUF et al., 2001). In den Samen der Hülsenfrüchte finden sich vor allem die Proteasen der Familie „Bowman-Birk“ (BIRK, 1984; BOWMAN, 1944; FERRASSON et al., 1997; LAJOLO & GENOVESE, 2002). Erbsen können drei (DOMONEY et al., 1995) bis sieben (FERRASSON et al., 1997) verschiedene Proteaseinhibitoren enthalten, wobei die Trypsininhibitoren die Bedeutendsten sind (HICKLING, 2003; MIHAILOVIĆ et al., 2005). Sojabohnen enthalten weiterhin Proteasen der Familie „Kunitz“ (LAJOLO & GENOVESE, 2002). Proteaseinhibitoren hemmen irreversibel die Wirkung von tierischen Verdauungsenzymen (CHAVAN et al., 1989; GUILLAMÓN et al., 2008; GRIFFITHS, 1984; USSUF et al., 2001; ZUBER & RODEHUTSCORD, 2017) und werden selbst nicht durch tierische Verdauungsenzyme deaktiviert (YAVELow et al., 1983). Trypsininhibitoren binden sich irreversibel an die Endopeptidase Trypsin, bilden einen inaktiven Proteinkomplex und hemmen somit die Aktivität der Pankreas-Serin-Proteasen wie z.B. Trypsin (CHAVAN et al., 1989; GUILLAMÓN et al., 2008; ZUBER & RODEHUTSCORD, 2017). Trypsininhibitoren sind sehr aktiv gegen das Trypsin von Rindern, Schweinen und dem Kabeljau. Der Trypsininhibitor bindet z.B. Rindertrypsin 1:1 (MITTAL et al., 2014; POERIO et al., 1989). Nach GRIFFITHS (1984) wird v.a. die Verfügbarkeit der schwefelhaltigen Aminosäuren Methionin und Cystein verringert. Die Trypsininhibitoraktivität („trypsin inhibitor activity“, TIA [mg/g TM],) ist dabei ein Parameter zur Beschreibung der Menge an gehemmtem Trypsin bezogen auf den

Rohproteingehalt. Die TIA kann auch in Trypsininhibitoreinheiten („trypsin inhibitor units“, TIU [mg]) ausgedrückt werden. Während Lupinen kaum Trypsininhibitoren aufweisen (< 1 mg TIU/g TM; MOSENTHIN et al., 2007; VALDEBOUZE et al., 1980) liegt die TIA bei der Sojabohne mit 40 - 80 mg TIU/ g TM am höchsten (GUILLAMÓN et al., 2008; PISULEWSKA & PISULEWSKI, 2000; SCHÄFFLER et al., 2015). Aus der Literatur werden TIA bei Erbsen und Ackerbohnen mit bis zu 15 mg TIU/g TM angegeben (GRIFFITHS, 1984; GROSJEAN et al., 2000; GUILLAMÓN et al., 2008; LETERME et al., 1990; LUO & XIE, 2013; MOSENTHIN et al., 2007; SHIMELIS & RAKSHIT, 2008; VALDEBOUZE et al., 1980; WANG et al., 2003; WANG & DAUN, 2004; ZUBER & RODEHUTSCORD, 2017). MIKIĆ et al. (2009) klassifizierten Körnerleguminosen in die TIA-Aktivitätsgruppen: sehr geringe Aktivität (2 - 4 TIU/g TM), geringe Aktivität (4 - 7 TIU/g TM), mittlere Aktivität (7 - 10 TIU/g TM) und hohe Aktivität (10 - 13 TIU/mg TM). Der Genotyp (MIKIĆ et al., 2009) sowie die Wachstumsbedingungen (LETERME et al., 1990) der Körnerleguminosen sind die entscheidenden Faktoren für die Ausprägung der Trypsininhibitoren. Neben den sortenbedingten Unterschieden (LUO & XIE, 2013; MAKKAR et al., 1997; MIKIĆ et al., 2009; WISEMAN et al., 2003; ZUBER & RODEHUTSCORD, 2017) können auch umweltbedingte Stresssituationen, wie Dürreperioden (USSUF et al., 2001; PIERGIOVANNI & PIGNONE, 2003) und damit verbundene Dehydration (USSUF et al., 2001), aber auch übermäßige Niederschläge (HOWARD et al., 1996) während des vegetativen Wachstumes die Bildung von Trypsininhibitoren begünstigen. HOWARD et al. (1996) beschrieben diese Steigerung der Proteaseinhibitoren als eine Strategie der Pflanze, den Schutz der Samen mit deren Speicherprodukten zu intensivieren. WELHAM et al. (1998) wiesen hierzu in den generativen Pflanzenteilen, v.a. in den Samenkeimblättern (LUO & XIE, 2013) das höchste Vorkommen an Trypsininhibitoren nach.

### **2.3 Aufbereitungsverfahren für Erbsen und Ackerbohnen**

Die Aufbereitung von Körnerleguminosen dient der Erhöhung des Futterwertes. Neben chemischen (z.B. Formaldehyd; FREITAG et al., 2007) und biologischen Behandlungsmethoden, wie z.B. der Keimung (BEAL & MEHTA, 1985; EL-ADAWY et al., 2003; SHARMA & SEHGAL, 1992; SOKRAB et al., 2012) und der Silierung (BAIK & HWA HAN, 2012; GEFROM, 2012; GEFROM et al., 2013; HERNANDEZ et al., 2017; THAYSEN, 2009; ZEYNER et al., 2015) führen physikalische Aufbereitungsverfahren wie z.B. Schälen (BELLOF et al., 2016; EGOUNLETY & AWORH, 2003; SHARMA & SEHGAL, 1992) v.a. zur Steigerung des Protein- und Stärkegehaltes (SALDANHA DO CARMO et al., 2020). Die thermische Behandlung erreicht eine Erhöhung der ruminalen Proteinbeständigkeit (ALONSO et al., 2000; AUFRÈRE et al., 2001; BELLOF &

WEINDL, 2016; DEACON et al., 1988; DVOŘÁK et al., 2005; GOELEMA et al., 1999; GRIFFITHS, 1984; MATEOS et al., 1999; MASOERO et al., 2005; PUVÁČA et al., 2012; THOMASON, 1987; VAN DER POEL, 1990) sowie eine Reduzierung antinutritiver Inhaltsstoffe (GOELEMA et al., 1999). In den nachfolgenden Abschnitten wird die Silierung sowie praxisrelevante Wärmebehandlungsverfahren für Erbsen und Ackerbohnen beschrieben und deren Effekt auf ausgewählte Parameter der Protein- und Stärkequalität sowie auf den Gehalt an antinutritiven Inhaltsstoffen aufgezeigt.

### **2.3.1 Silierung**

Ziel der Futtermittelkonservierung ist es, die Futtermittel über einen definierten Zeitraum vor dem Verderb zu schützen, ihre positiven Futterwerteigenschaften zu erhalten, die pflanzeigenen Enzyme zu inaktivieren sowie den aeroben oder anaeroben mikrobiellen Stoffabbau während der Konservierung zu unterdrücken (STEINHÖFEL et al., 2017). Die Fermentation ist ein kostengünstiges Konservierungsverfahren und wird für die Futtermittel- sowie Lebensmittelproduktion zur Qualitätserhaltung angewandt (GEFROM, 2012). Jährlich werden weltweit rund 200 Mio. Tonnen TM mit Kosten von > 20 Mrd. € (90 - 130 €/Tonne TM inkl. Fläche, Anbau, Ernte, Silo, Siliermittel) zur Futtermittelproduktion siliert (WEINBERG & ASHBELL, 2003). Zu den bedeutendsten Siliergütern gehören Mais, Luzerne und verschiedene Gräser sowie Weizenganzpflanzen, Hirse aber auch Hülsenfrüchte (WEINBERG & ASHBELL, 2003). Die Silierung ist ein Konservierungsverfahren für feuchtes Erntegut (WEINBERG et al., 2001), bei der durch anaerobe Bedingungen ein schnelles Absinken des pH-Wertes auf 4 erreicht werden sollte (SATTLER & BABEL, 1986). Dabei wandeln epiphytische Milchsäurebakterien wasserlösliche Kohlenhydrate in organische Säuren, hauptsächlich Milchsäure, um (ROOKE & HATFIELD, 2003; WEINBERG et al., 2001). Eine Verdichtung und luftdichte Abdeckung des Pflanzenmaterials sowie biologische und chemische Siliermittel sind dabei für eine intensive Milchsäuregärung entscheidend (SATTLER & BABEL, 1986). Unter günstigen Bedingungen, wie einer schnellen Fermentationsrate, geringen Pufferkapazität und eine ausreichende Menge an wasserlöslichen Kohlenhydraten und schnell fermentierbaren Zuckern (Monosaccharide und kleine Oligosaccharide) sowie ausreichend Wasser (GEFROM, 2012; ROOKE & HATFIELD, 2003), produzieren diese weiter Milchsäure bis ein pH-Wert erreicht ist, bei dem das Wachstum der Milchsäurebakterien unterdrückt wird (ROOKE & HATFIELD, 2003). Damit ist die Silage lagerstabil (Lagerungsphase). Bei der Silierung von Grasprodukten können durch Proteolyse (Spaltung der Peptidbrücken durch pflanzeigene im Zellsaft vorkommende Proteasen) 250 - 750 g/kg an Futterproteinen in Aminosäuren und Peptide



umgewandelt werden (ROOKE & HATFIELD, 2003). Bei einer langsamen Fermentationsrate, einer hohen Pufferkapazität, Lufteinschlüsse u.a. vermehren sich Verderbnis-Mikroorganismen wie Enterobakterien und Clostridien (WOOLFORD, 1990). Diese desaminieren Aminosäuren zu Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und decarboxylieren diese zu Aminen (ROOKE & HATFIELD, 2003). Enterobakterien bilden zudem Lactat, Acetat, Ethanol, Formiat und Kohlenstoffverbindungen wie Aceton und Butanediol. Clostridien produzieren Buttersäure, Acetat, Ethanol, Propionat und Butanol (ROOKE & HATFIELD, 2003). Bei der Öffnung und Entnahme der Silage entsteht ein aerobes Milieu und ein mikrobielles Wachstum beginnt. Hefen bilden durch die Decarboxylierung von Pyruvat zu Acetaldehyd und anschließende Reduktion hauptsächlich Ethanol, aber auch Acetat, Lactat, Propionat, Propanol und Butanol (ROOKE & HATFIELD, 2003).

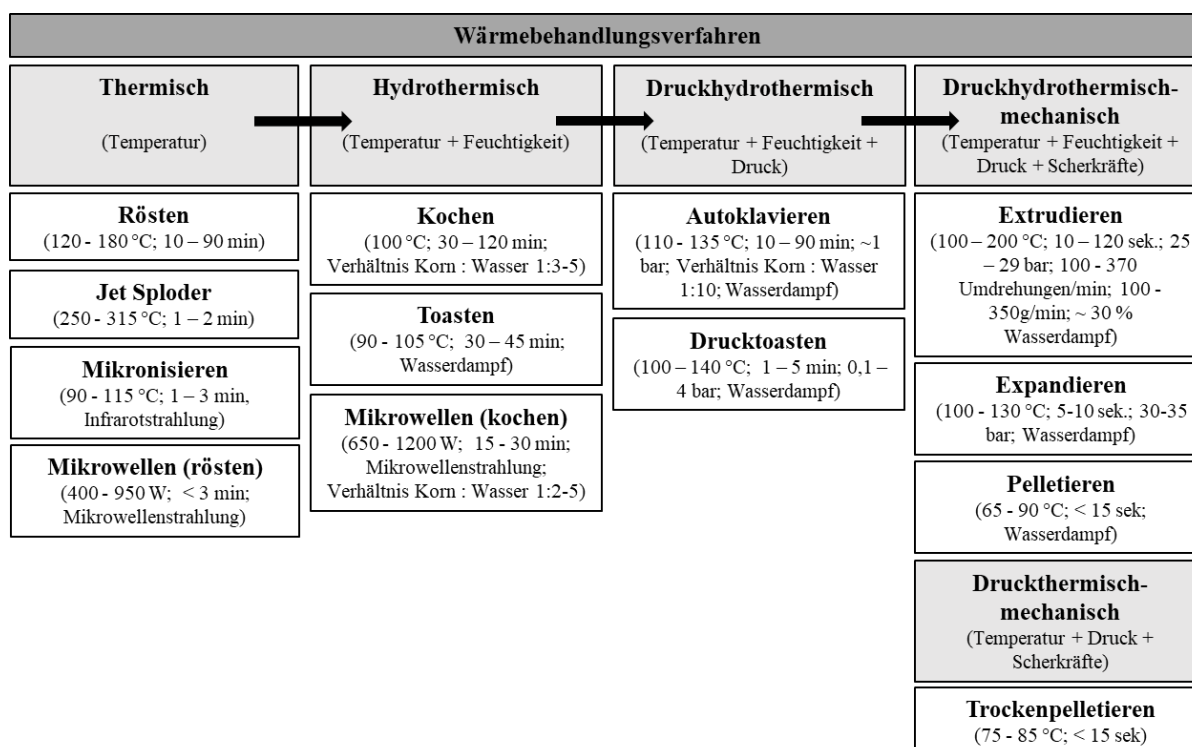
Körnerleguminosen sind eiweißreiche Pflanzen mit einem geringen Zuckerangebot sowie einer hohen Pufferkapazität und gelten somit als schwer silierbare Futtermittel (GEFROM, 2012; SATTLER & BABEL, 1986).

Die Silierung von Erbsen und Ackerbohnen ist als Ganzpflanze (BORREANI et al., 2009; FAULKNER, 1985; FRASER et al., 2001; MUSTAFA & SEGUIN, 2003) bzw. Teilpflanze (Schröpfungsschnitt; BACHMANN et al., 2022b), im Gemenge u.a. mit Weizen (SALAWU et al., 2001; SEPPÄLÄ et al., 2019) und als feuchtes Korn ( $< 70\%$  TM; DEWITTE et al., 2008; GEFROM, 2012; GEFROM et al., 2013; THAYSEN, 2009) möglich. Bei der Konservierung von feuchten Erbsen und Ackerbohnen hat sich die Folienschlauchsilierung bewährt (THAYSEN, 2009). Durch den hohen Protein- und geringen Zuckergehalt ist die Pufferkapazität (PK) von Erbsen und Ackerbohnen mit 35 - 60 g Milchsäure/kg TM hoch. Mit einem Zucker/Pufferkapazität-Quotient (Z/PK-Quotient)  $< 1,4$  sind Körnerleguminosen, wie bereits erwähnt, schwer silierbar (GEFROM, 2012). Ein Z/PK-Quotient von  $> 2$  ermöglicht nach WEIBBACH et al. (1974) erst optimale Silierbedingungen. Silierversuche von GEFROM (2012) mit feuchten Erbsen und Ackerbohnen ( $\sim 65\%$  TM, siliert in Rostocker Modellsilagen „ROMOS“ nach HOEDTKE & ZEYNER, 2011), ergaben Milchsäuregehalte von 3,9 - 4,7 % TM und pH-Werte von 4,3 - 4,7 mit (Milchsäurebakterien, MSB) und auch ohne Siliermittel. Die Silagen mit MSB-Zugabe hatten zudem signifikant geringe Alkoholgehalte. Untersuchungen von DEWITTE et al. (2008) ergaben bei der Silierung von Erbsen (80 % TM), Ackerbohnen (65 % TM) und Lupinen (70 % TM) pH-Werte von 5,3, 4,2 und 5,0. Silagen mit TM  $> 70\%$  erreichten, unabhängig des Silierzusatzes, Milchsäuregehalte von  $< 0,6\%$  ohne eine nennenswerte Ansäuerung der Silagen (DEWITTE et al., 2008; GEFROM, 2012). Körnerschrotsilagen mit TM von 65 - 75 % sind aerob

stabil. Ackerbohnsilagen können unter aeroben Bedingungen > 7 Tage ohne Verderbanzeichen lagerstabil sein (GEFROM, 2012). Aerob instabile Silagen zeigten Erwärmungen (als Folge von Milchsäureabbau durch Mikroorganismen) sowie die Bildung von Schimmel nach 7 Tagen (GEFROM, 2012).

### **2.3.2 Wärmebehandlungsverfahren**

Die thermischen Aufbereitungsverfahren werden im Wesentlichen durch die Temperatur (Hoch-, Niedrigtemperatur), die Behandlungsdauer (Kurz-, Langzeitverfahren), den Feuchtigkeitsgehalt (trockenthermisch, hydrothermisch) sowie durch den Druck (atmosphärisch, Überdruck) definiert. Rein thermische Verfahren nutzen trockene Wärme in Form von Heißluft (Gasbrenner, Elektroheizer), Infrarot- oder Mikrowellenstrahlung. Hierzu zählen Röster (Flachbetröster, Trommelröster, Kaskadenröster) und „Jet Sploder“. Hydrothermische Verfahren nutzen Wasser, meist in Form von heißem Wasserdampf. Hierzu gehört u.a. das Toasten. Wird zusätzlich noch ein Überdruck während der Behandlung erzeugt, nennt man diese Verfahren im Allgemeinen druckhydrothermisch, wie z.B. das Autoklavieren, Expandieren und Extrudieren. Eine Verfahrensbeschreibung befindet sich im Anhang (Tabelle Anhang 6). Nach VAN DER POEL (1990) werden Wärmebehandlungsverfahren als Hochtemperatur-Kurzzeitverfahren (HTST, „high temperature/short time“) mit Temperaturen > 210 °C und einer Behandlungszeit von 20 Sekunden – 5 Minuten oder als Niedrigtemperatur-Langzeitverfahren (LTLT, „low temperature/long time“) mit Temperaturen um 105 °C bei 10 - 45 Minuten eingeordnet. Die nachfolgende Abbildung 1 gibt einen Überblick über die in der Literatur beschriebenen Wärmebehandlungsverfahren.



**Abbildung 1:** Ausgewählte Wärmebehandlungsverfahren zur Aufbereitung von Körnerleguminosen (ADAMIDOU et al., 2011; ALONSO et al., 1998; ANDERSON-HAFERMANN et al., 1992; ANJOS et al., 2016; BISSINGER et al., 2004; CAMPBELL et al., 2006; CANIBE & EGGUM, 1997; DEACON et al., 1987; DIVEKAR et al., 2017; D'SOUZA, 2013; GOELEMA et al., 1998; GOELEMA et al., 1999; KHATTAB & ARNTFIELD, 2009; KRATZER et al., 1990; HEJDYSZ et al., 2016; IGBASAN & GUENTER, 1996; IVARSSON & WALL, 2017; JAYALAXMI et al., 2016; JIANG et al., 2016; KUMAR et al., 2016; LEONTOWICZ et al., 2001; LJØKJEL et al., 2003; LUND et al., 2004; MA et al., 2017; MASOERO et al., 2005; MATEOS et al., 1999; O'DOHERTY & KEADY, 2001; PUVAČA et al., 2012; SHI et al., 2017; STEIN & BOHLKE, 2007; STEINER & BELLOF, 2009; TRUGO et al., 1990; VAGA et al., 2017; VAN DER POEL, 1990; WANG et al., 2003; YU et al., 1998; YU et al., 1999; YU et al., 2001; YU et al., 2002a)

### 2.3.2.1 Rösten

Das Rösten ist ein thermisches Verfahren, bei der Wärme durch indirekte Strahlung (z.B. Infrarot- (Mikroniesierer) oder Mikrowellenstrahlung (Mikrowellenbehandlung) sowie direkter Erwärmung durch Gasbrenner oder elektrische Heizanlagen (Rösten, „Jet Sploder“) erzeugt wird (MATEOS et al., 1999; YU et al., 1999; YU et al., 2002a). Zu den herkömmlichen Röstsystemen gehören Rösttrommeln, Flachbettröster, Kaskadenröster und der „Jet Sploder“. Die Verarbeitungstemperatur kann, bei einer Verweilzeit von bis zu mehreren Stunden, bis zu 200 °C betragen (YU et al., 2002a). Damit lässt sich das Rösten mit seiner Verfahrensvielfalt nicht in das klassische HTST oder LTLT von VAN DER POEL (1990) einordnen. Der „Jet Sploder“ muss hingegen unter den Röstsystemen gesondert betrachtet werden, da er mit einer

höheren Temperatur  $> 200\text{ °C}$  und kürzeren Behandlungszeit ( $< 60\text{ sek.}$ ) arbeitet. Der „Jet Sploder“ ist nach VAN DER POEL (1990) ein HTST-Verfahren. Das Verfahren hat seine größte Bedeutung in der Röstung von Kaffeebohnen (CASTELLANOS-ONORIO et al., 2011; NAGARAJU & BHATTACHARYA, 2010; PUTRA et al., 2019) um v.a. die Bitterkeit der rohen Bohnen zu reduzieren. Die Qualität des späteren Kaffees wird von der Temperatur sowie dem Röstgrad der behandelten Bohnen beeinflusst (CHINDAPAN et al., 2019). Für Sojabohnen gilt das Rösten, neben dem Extrudieren als vorherrschende Wärmebehandlungsmethode (LIN & KUNG, 1999). Das Rösten erhöht bei höheren Temperaturen die Proteinbeständigkeit sowie den Futterwert z.B. von Ackerbohnen, indem durch die Wärmebehandlung mehr pansenstabilen Protein in den Dünndarm gelangt und so die Einsatzwürdigkeit an hochleistenden Milchkühen erhöht (Yu et al., 1998).

### **2.3.2.2 Toasten**

Das Toasten ist ein hydrothermisches Verfahren (Dampferhitzung bei ca.  $100\text{ °C}$ ; VAN DER POEL, 1990). VAN DER POEL (1990) unterscheidet hierbei zwischen einem konventionellen Toasten ( $90 - 105\text{ °C}$ ;  $30 - 45\text{ min}$ ) und einem Hochdrucktoasten ( $100 - 140\text{ °C}$ ;  $1 - 5\text{ min}$ ; bis  $4\text{ bar}$ ). Das Hochdrucktoasten ist wiederum ein druckhydrothermisches Verfahren und mit dem Autoklavieren, ausgenommen der Behandlungsdauer und des Behandlungsdruckes, annähernd gleichzusetzen. Der Begriff „Toasten“, als hydrothermisches Verfahren, wird in der Literatur oft mit dem Begriff „Rösten“, als trockene Wärmebehandlung, gleichgesetzt (CANIBE & EGGUM, 1997; CANIBE & KNUDSEN, 1997; IVARSSON & WALL, 2017; KRIČKA et al., 2009; LUND et al., 2004; MASOERO et al., 2005). Allerdings ist eine klare Abgrenzung beider Verfahren notwendig. Im Anhang (Abbildung Anhang 7) ist schematisch ein Toasters der Firma Agrel GmbH mit entsprechender Verfahrensbeschreibung (Tabelle Anhang 6) dargestellt.

### **2.3.2.3 Expansion**

Die Expansion ist ein druckhydrothermisches Verfahren. Mit ihrem einfachen und kostengünstigen Aufbau werden Expander in Produktionsprozesse eingesetzt, in denen große Mengendurchsätze von  $10 - 70\text{ t/h}$  bei relativ geringen Energieaufwendungen von  $5 - 20\text{ kWh/t}$  verarbeitet werden sollen (ELSTNER, 1997). Beim Expandieren wird Wasserdampf über einen dem Expander vorgeschaltetem Vormischer (PRESTLØKKEN, 1999a; STEINER & BELLOF, 2009) oder direkt in das Expandersystem hinzugegeben. Wird Wasserdampf über einen Vormischer vor dem Expander eingesetzt, entspricht dies einem Toasten als Vorkonditionierung. Das angefeuchtete Material wird anschließend in einen druckthermisch arbeitenden Expander weitergeleitet. In der Literatur gibt es bisher noch keine Hinweise darauf, welchen Effekt die

Wasserdampfzugabe vor der Expansion (als Vorkonditionierung) auf das Futtermittel hat (PRESTLØKKEN, 1999a). In einem Einwellen-Expander (siehe Abbildung Anhang 8) befindet sich ein einfaches Schneckensystem mit Paddelelementen, die das zu behandelnde Futter zusammendrücken und durch Reibung letztlich Wärme entsteht. Dabei wirken Scherkräfte auf das Futtermittel ein. Durch die Verwendung eines Überdruckes während des Wärmebehandlungsprozesses lässt sich die Behandlungsdauer gegenüber einem rein hydrothermischen Prozess, z.B. dem Toasten, verkürzen und es kann eine höhere Durchsatzleistung gefahren werden (GRAF VON REICHENBACH, 2016). Während beim Extruder fertig geformte Endprodukte (Extrudat-Pellets) entstehen, produzieren Expander ungleichmäßige Klumpen- und Krümelaggregate (Expandat). Expander können auch als intensiv wirkende Vorkonditionierer vor einer Pelletpresse installiert werden (GOELEMA et al., 1999; GRAF VON REICHENBACH, 2016). Die Behandlungstemperatur beim Expandieren variiert von 80 °C bis 140 °C mit einer Behandlungsdauer von 5 - 15 Sekunden (BOROOJENI et al., 2016; GOELEMA et al., 1999; YU et al., 2002a). Damit ist die Expanderbehandlung zumindest bei Temperaturen > 100 °C ein HTST-Verfahren. Der Expander wird als druckhydrothermisches Verfahren mit dem Autoklavieren gleichgestellt. Allerdings wirken beim Expandieren zusätzlich noch mechanische Scherkräfte, die eine Verformung des Materials provozieren. Expander sind in der Mischfutterindustrie weit verbreitet und erhöhen z.B. bei Gerste (*in vivo*; PRESTLØKKEN & HARSTAD, 2001) sowie Hafer, Weizen, Roggen, Sojabohnen, Raps, Sonnenblumen und Erbsen (*in situ*; Lund et al., 1999; PRESTLØKKEN, 1999b) das UDP.

#### **2.3.2.4 Extrusion**

Die Extrusion ist ein druckhydrothermisch-mechanisches Verfahren mit Scherwirkung. Sie entspricht im Funktionsprinzip der Expansion (GRAF VON REICHENBACH, 2016; YU et al., 2002a) ist aber hinsichtlich der Behandlungstemperatur und -dauer sowie der mechanischen Drücke und des Dampfdruckes intensiver (BOROOJENI et al., 2016). Ein einfaches Unterscheidungsmerkmal besteht darin, dass der Extruder keine Stopfbolzen aufweist, die durch das Gehäuse in die Schneckenelemente (Paddel) eingreifen. Extruder werden eingesetzt, wenn hohe Energieeinträge von 50 - 100 kWh/t oder die Fließeigenschaften (z.B. zu trocken, zu feucht oder zu fett) für Expander ungeeignet sind (ELSTNER, 1997). GRUHN et al. (1979) definieren das Extrudieren im Allgemeinen als einen Prozess, bei dem ein formloses Material eine geforderte Querschnittsform durch ein kontinuierliches Pressen über ein Formwerkzeug (Matrize) erhält. Extruder haben im Vergleich zum Expander zusätzlich noch eine Formgebungsaufgabe (GRUHN et al., 1979), bei der die Futtermittel durch eine formgebende

Matrize gepresst werden (YU et al., 2002a). Damit entfällt eine Nachkonditionierung (z.B. Pelletieren). Die Verarbeitungszeit in Extrudern variiert bei Temperaturen von 80 °C bis 200 °C zwischen 30 und 50 Sekunden (BOROOJENI et al., 2016; YU et al., 2002a). Damit kann die Extrusion, zumindest bei Temperaturen > 100 °C, als HTST-Verfahren eigeordnet werden. Der Feuchtigkeitsgehalt während des Prozesses liegt meist bei rund 25 % - 30 % (ALONSO et al., 2000; BOROOJENI et al., 2016; CHEFTEL, 1985). Die Extrusion ist ein komplexes thermisch-mechanisches Multifunktionsverfahren (CHEFTEL, 1985), das ein Mahlen, Homogenisieren, Dispergieren, Komprimieren, Wärmebehandeln, Inaktivieren von antinutritiven Inhaltsstoffen, Expandieren, Binden von Partikeln, Bildung von Formen und teilweise Dehydratisieren und Sterilisieren ermöglicht (PUVAČA et al., 2012). Die Art und Intensität der induzierten Energie bestimmt, in Bezug auf die Behandlungszeit und zu behandelnde Menge, die Effektivität des Verfahrens (PUVAČA et al., 2012). Die Extrusion bietet die Möglichkeit, eine Vielzahl verschiedener Rohstoffe wie z.B. Ölsaaten (Sojabohnen, Sonnenblumen, Raps), Getreide (Weizen, Mais, Gerste, Reis, Hafer), Hülsenfrüchte (Ackerbohnen, Erbsen, Lupinen), Rohstoffe mit einem hohen Feuchtigkeitsgehalt (frisches Obst und Gemüse, Tier-, Fisch- und Milchproteine), Produkte und Abfälle aus der Lebensmittelindustrie (z.B. Fleisch- und Knochenmehl, Abfälle aus der fischverarbeitenden Industrie, Nebenprodukte der Milchindustrie, Brauereien, Zuckerraffinerien) zu verwenden und daraus komplette Tierfuttermischungen (ausgewogene Futtermittel für Ferkel, Kälber, Geflügel, Milchkühe, Pferde, Fischfutter, Heimtiere) in ausgewählten Extrudatformen (Pellets, verschiedenste Leckerlieformen, Flocken bei Fischfutter) herzustellen (PUVAČA et al., 2012). Im Anhang (Abbildung Anhang 9) ist der Grundaufbau eines Einwellen-Extruders dargestellt.

## **2.4 Effekte der Aufbereitung**

### **2.4.1 Proteinqualität**

Die Effektivität der Wärmebehandlung wird durch die Temperatur, den Feuchtigkeitsgehalt, die Behandlungsdauer sowie durch mechanische Scherkräfte (PRESTLØKKEN, 1999a) und Umgebungsdrücke (VAN DER POEL, 1990) beeinflusst. Wärmebehandlungsverfahren werden seit Jahrzehnten in der Futtermittelindustrie zur Verbesserung der Stärkeverdaulichkeit (AUFRÈRE et al., 2001; MASOERO et al., 2005; PUVAČA et al., 2012), für die Reduzierung der ruminalen Löslichkeit des Rohproteins (AUFRÈRE et al., 2001; BELLOF & WEINDL, 2016; DEACON et al., 1988; GOELEMA et al., 1999; MATEOS et al., 1999; MASOERO et al., 2005; THOMASON, 1987) sowie zur Auflösung antinutritiver Inhaltsstoffe (ALONSO et al., 2000; DVOŘÁK et al., 2005; GRIFFITHS, 1984; PUVAČA et al., 2012; VAN DER POEL, 1990) genutzt.

Auch der Gehalt an essentiellen Aminosäuren (z.B. Lysin) kann sich in Folge einer Strukturveränderung mit erhöhter Zugänglichkeit und Freisetzung von Aminosäuren während der Wärmebehandlung erhöhen (MA et al., 2017a). Sie verbessert die sensorischen Eigenschaften sowie die mikrobielle Qualität des Endproduktes (PUVAČA et al., 2012). Die Kombination mit einer dampfinduzierten Feuchtigkeitszunahme beschleunigt und erhöht die Gelanitisierung der Stärke (MASOERO et al., 2005). Übermäßige Hitzeeinwirkungen schädigen das Aminosäureprofil (BELLOF & WEINDL, 2016; MA et al., 2017a). Hierbei sei v.a. die Bildung von Maillardprodukten erwähnt (BOROOJENI et al., 2016; CHEFTEL, 1985; HOFMANN, 2021). Die Hauptfaktoren für die Denaturierung und Änderung der Verdaulichkeit von Proteinen sind neben der Temperatur (siehe Tabelle 5; YU et al., 2002a) die auf das Produkt wirkenden Scherkräfte, der Druck und die verwendete Prozessfeuchtigkeit (BOROOJENI et al., 2016).

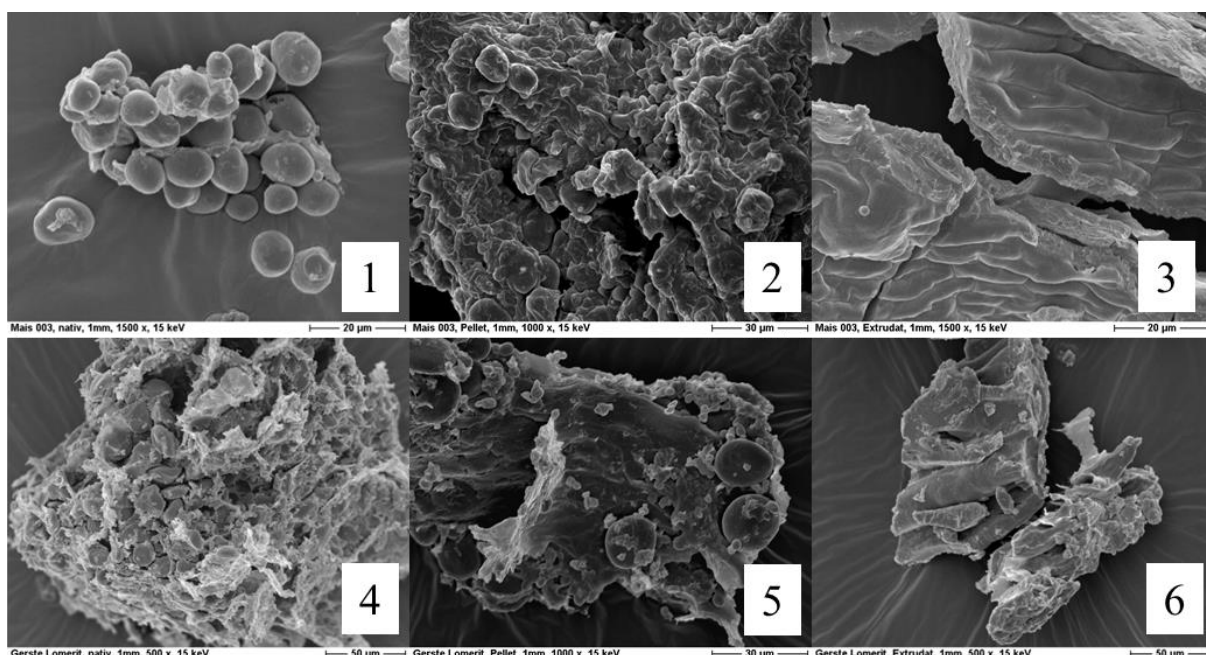
**Tabelle 5:** Effekte der Wärmebehandlung auf die Proteinqualität (modifiziert nach YU et al., 2002a)

Temperatur (°C)	Proteineffekt
50	Erhöhte Hydratation, beginnender Verlust der kristallinen Struktur
70 - 80	Disulfidspaltung, Verlust der Tertiärstruktur
80 - 90	Verlust von Sekundärstrukturdisulfiden
90 - 100	Bildung intermolekularer Disulfide
100 - 150	Lysin- und Serinverlust, Isopeptidbildung
150 - 200	Peptidisierung, weitere Isopeptidbildung
200 - 250	Pyrolyse (Spaltung) aller Aminosäurereste

Jeder Temperatureinfluss kann zur Veränderung der Proteinstruktur führen. Extreme Bedingungen können die Primärstruktur der Proteine zerstören und zu einer Degradation des Proteins führen. Der erste Schritt der Denaturierung, der Bruch von Wasserstoff- und Vander-Waal-Bindungen, ist reversibel. Die Bildung kovalenter Bindungen ist hingegen irreversibel (BOROOJENI et al., 2016).

## 2.4.2 Stärkequalität

Wärmebehandlungen reduzieren die Beständigkeit der Stärke von Körnerleguminosen (BISHNOI & KHETARPAUL, 1993; HAN et al., 2008). Aufbereitungsverfahren wie Kochen (APARNA et al., 2000; CHAU & CHEUNG, 1997; FLEMING, 1982; KUTOŠ et al., 2003; PIECYK et al., 2012; RAO, 1969; REHMAN & SHAH, 2005), Autoklavieren (BISHNOI & KHETARPAUL, 1993; CHAU & CHEUNG, 1997; PIECYK et al., 2012) oder Extrudieren (ALONSO et al., 2000; BOROOJENI et al., 2016; HEJDYSZ et al., 2016; MASOERO et al., 2005; SHARMA et al., 2015), aber auch ein Einweichen (BRAVO et al., 1998; CHAU & CHEUNG, 1997; JOOD et al., 1988; KUTOŠ et al., 2003) erhöhen die Stärkeverdaulichkeit (PLATEL & SHURPALEKAR, 1994). Diese Aufbereitungsverfahren reduzieren nicht nur den Gehalt antinutritiver Substanzen (CHAU & CHEUNG, 1997; REHMAN & SHAH, 2005), sondern führen u.a. auch durch Schwellung und Gelatinisierung sowie durch Scherkräfte und Reibung zu einer Oberflächenruptur der Stärkegranula und damit zur Erhöhung der Stärkehydrolyse. Die nachfolgenden elektronenmikroskopischen Bilder (Abbildung 2) verdeutlichen den Effekt der mechanischen Einwirkung beim Pelletieren und Extrudieren von stärkehaltigen Futtermitteln (z.B. Mais und Gerste).



**Abbildung 2:** Veränderung der Stärkegranula von vorvermahlten (2 mm) Mais und Gerste nach einer druckthermischen Behandlung (1= Mais, nativ (1500 x), 2 = Mais, pelletiert (55 °C, 10 % Wasserzusatz, 48 kg/h Durchsatz, 5 mm Lochgröße; 1000 x); 3 = Mais, extrudiert (173 °C, 5 % Wasserzugabe, 120 kg/h Durchsatz, 4 mm Lochgröße; 1500 x); 4 = Gerste, nativ (500 x); 5 = Gerste, pelletiert (55 °C, 10 % Wasserzusatz, 48 kg/h Durchsatz, 5 mm Lochgröße; 1000 x); 6 = Gerste extrudiert (145 °C, 7 % Wasserzugabe, 112 kg/h Durchsatz, 4 mm Lochgröße); modifiziert nach BOCHNIA, 2013)



Die druckthermische Behandlung stärkereicher Futtermittel (z.B. Abbildung 2) führt zu einer Veränderung der Stärkestruktur. Durch das Extrudieren, weniger durch das Pelletieren, kommt es zu einer Verformung und Verschmelzung der Stärkegranula. Dieser Prozess wird als Gelanitisierung beschrieben (BOCHNIA, 2013; LUND & LORENZ, 1984; MASOERO et al., 2005). Laut LUND & LORENZ (1984) ist ein Wasser-Stärke-Verhältnis von 0,3 zu 1 erforderlich, um den Beginn der Gelanitisierung zu ermöglichen, während eine vollständige Gelanitisierung ein Verhältnis von 1,5 zu 1 erfordert. Während des Stärkegelatinisierungsprozess induzieren Wasser und Wärme den Abbau der intermolekularen Bindungen von Stärkemolekülen, wodurch die Wasserstoffbindungsstellen mehr Wasser binden können, welches schließlich zur Quellung und zu einem Verlust der Kristallinität führt. Die Änderung der Stärkestruktur wird ab einem bestimmten Temperaturpunkt irreversibel (BOROOJENI et al., 2016). Untersuchungen von MISHRA et al. (2008) an gekochten Kartoffeln oder an gekochten Bohnen (FABBRI et al., 2016) zeigten nach einer entsprechenden Abkühlphase allerdings eine Umkehrung in der Stärkeverdaulichkeit sowie dem Gehalt an beständiger Stärke. Dieser Prozess wird dann als Retrogradierung der Stärke beschrieben (FABBRI et al., 2016; FREI et al., 2003; MISHRA et al., 2008).

## **2.5 Einsatzmengen von Erbsen und Ackerbohnen in der Fütterung landwirtschaftlicher Nutztiere**

Körnerleguminosen werden in erster Linie als regionale Proteinquelle in der Fütterung landwirtschaftlicher Nutztiere eingesetzt, können aber auf Grund ihres Stärkegehaltes ebenso Getreide in den Rationen ersetzen (LOBÓN et al., 2020; LOSAND et al., 2003). In Abhängigkeit der Tierart sind die Gehalte an abbaubaren Rohprotein, schwefelhaltigen Aminosäuren und antinutritiven Inhaltsstoffen zu berücksichtigen. Die Proteinqualität bezieht sich beim Monogaster auf die Ausstattung der essenziellen Aminosäuren Lysin, Methionin + Cystin, Threonin und Tryptophan sowie deren Verhältnis zueinander (BELLOF & WEINDL, 2016). Für die Wiederkäuerfütterung ist der Anteil an UDP und dem nRP entscheidend (BELLOF & WEINDL, 2016).

### **2.5.1 Wiederkäuer**

Erbsen und Ackerbohnen eignen sich durch ihren hohen Rohproteingehalt (230 - 300 g/kg TM) und einer Energiedichte von rund 8,5 MJ NEL/kg TM zum Austausch von u.a. SES, Mais und Gerste in der Ration (VANDER POL et al., 2008). Allerdings ist der Einsatz von unbehandelten Körnerleguminosen auf Grund der hohen Abbaubarkeit von Protein und Stärke im Pansen begrenzt und ineffizient. Sie eignen sich im Hinblick auf die Proteinausstattung zur

Grundversorgung (BAUMGÄRTEL et al., 2013; LOSAND et al., 2003). Hohe Aufnahmen pansenlöslicher Stärke birgen das Risiko einer Pansenazidose, reduzierter Futteraufnahme, Laminitis und weiteren Stoffwechselproblemen (NOCEK, 1997). Erbsen und Ackerbohnen können unter Berücksichtigung des hohen Anteils leicht löslicher Stärke (JILG, 2003) und des Proteins mit 4 - 5 kg TM/Tier\*d (ANDERSON et al., 2007; HOFFMANN & STEINHÖFEL, 2010; LOBÓN et al., 2020; VAN DER POL et al., 2008) ohne negative Auswirkungen auf die Leistung (Milch, Mast) sowie Qualität (Fleisch, Milchinhaltsstoffe) bei Milchrindern eingesetzt werden (TUFARELLI et al., 2012). Die aus der Literatur angegebenen Einsatzempfehlungen für ausgewählte Wiederkäuer befinden sich in Tabelle Anhang 7.

### **2.5.2 Monogaster**

Ackerbohnen und Erbsen gelten als eine reichhaltige Proteinquelle und können aufgrund hoher Lysingehalte sowie einer guten Verdaulichkeit als Ergänzung von getreidelastigen Rationen eingesetzt werden (CANIBE & EGGUM, 1997). Für die Proteinversorgung von Monogastern ist die Aminosäurezusammensetzung (insbesondere von Lysin, Methionin + Cystein, Threonin und Tryptophan) sowie deren Verdaulichkeit entscheidend (LOSAND et al., 2003). Die in der Literatur angegebenen Einsatzempfehlungen nativer Erbsen und Ackerbohnen sind im Anhang für Geflügel (Tabelle Anhang 8) und anderer Monogaster (Tabelle Anhang 9) dargestellt. Erbsen und Ackerbohnen haben einen geringen Anteil schwefelhaltiger Aminosäuren (CANIBE & EGGUM, 1997; CRÉPON, 2007; LOSAND et al., 2003). Das Verhältnis von Methionin und Cystein zu Lysin liegt bei Ackerbohne und Erbse bei rund 0,3 (Süßlupine: 0,4; Sojabohne: 0,5; siehe Tabelle 2) und erreicht damit nicht die Empfehlungen von 0,6 für Schweine oder 0,7 für Geflügel (LOSAND et al., 2003). Das Nährstoffpotential sowie die Gehalte an antinutritiven Inhaltsstoffen (z.B. TIA, Vicin und Convicin) von Erbsen und Ackerbohnen reduzieren dabei die Einsatzmöglichkeiten in der Fütterung (CANIBE & EGGUM, 1997; HOFFMANN & STEINHÖFEL, 2010; JEROCH, 2016b). Die Einsatzwürdigkeit kann hierbei nur mittels einer thermischen Behandlung gesteigert werden (CANIBE & EGGUM, 1997). Weißblühende Ackerbohnen zeichnen sich durch einen geringeren Tanningehalt aus und besitzen dadurch eine höhere Proteinverdaulichkeit. Diese eignen sich, unter Berücksichtigung des Methionin- und Cystingehaltes (ca. 4,5 g/kg TM Schwefel), für die Monogasterfütterung (BONSELS & GRÜNEWALD, 2015). In der Geflügelernährung wird der Einsatz nativer Ackerbohnen durch den Gehalt an Tanninen, Vicin und Convicin auf 5 % - 20 % der Futtermischung begrenzt. Überschreitungen haben Leistungsdepressionen (Lege- und Mastleistung) sowie Störungen der Darmfunktionen zur Folge (HOFFMANN & STEINHÖFEL, 2010; JEROCH, 2016b). NÜLKEN et al.

(2015) bestätigten mit der Untersuchung wachsender Bio-Broiler den in der Literatur angegebenen Leguminosenanteil von 20 %. Puten zeichnen sich durch einen altersabhängig hohen Proteinbedarf sowie einen speziellen Bedarf an Aminosäuren aus. In den Rationen sollte dabei das Verhältnis von Arginin zu Lysin  $> 1$  sein. Um den preisintensiven Einsatz von synthetischen Arginin zu umgehen, kann der Einsatz von Ackerbohnen (Arginin : Lysin = 1,4; Erbsen = 1,2; Süßlupinen = 2,2; siehe Tabelle 2) in der Futtermischung eine Alternative darstellen (JANKOWSKI & MIKULSKI, 2016). Bei dem Einsatz ackerbohnenhaltiger Alleinfuttermittel in der Schweinefütterung sollte auf Grund des reduzierten Rohproteingehaltes und defizitären Gehalten an Methionin und Cystein mit Methionin, Lysin und Tryptophan bedarfsgerecht ergänzt werden. Es eignen sich weißblühende (tanninarme) Sorten mit geringen Anteilen an Proteaseinhibitoren (CRÉPON, 2007; GRELA, 2016). Die Einsatzempfehlungen sind auf 10 - 15 % im Alleinfutter beschränkt (GRELA, 2016; HOFFMANN & STEINHÖFEL, 2010). Erbsen sollten hinsichtlich ihrer Blühfarbe in der Fütterung unterschieden werden, wobei die buntblühenden Sorten höhere Rohprotein- und geringere Stärkegehalte aufweisen (FREITAG, 2006) aber meist reicher an sekundären Pflanzeninhaltsstoffen wie z.B. TIA sind (CRÉPON, 2007). Insbesondere ist dabei auf den Gehalt an leicht fermentierbaren Kohlenhydraten wie z.B. unbeständige Stärke (Stärkegehalt abzüglich beständiger Stärke) und Zucker in der Gesamtration (maximal 250 g/kg TM) zu achten (FREITAG, 2006). Nach Untersuchungen von DUNKEL et al. (2016) ließen sich in der Fütterung von Mastschweinen mit Erbsenanteilen von 10 % bis 20 % der Ration bei angepasster Rapsschrotzulage annähernd 60 % SES bei gleichwertigen Tageszunahmen und gleichen Schlachtwarmgewichten erreichen. Nach Angaben von CRÉPON (2007) können weißblühende Erbsen sogar bis zu 40 % im Futter Anwendung finden und damit vollständig im Austausch zu SES in der Fütterung von Mastschweinen eingesetzt werden. Allerdings sollten diese hohen Einsatzmengen nicht zu euphorisch betrachtet werden, da bei Untersuchungen von DUNKEL et al. (2016) bereits bei 30 % Verzehrdepressionen verbunden mit reduzierten Masttagszunahmen bei Schweinen beobachtet wurden. Buntblühende Ackerbohnen können unter Berücksichtigung antinutritiver Inhaltsstoffe (Vicin/Convicin, Tannine) mit bis zu 35 % im Futter bei Schweinen und bis zu 25 % bei Masthähnchen eingesetzt werden (CRÉPON, 2007).

### 3 Aufgaben und Zielstellung

Das Ziel des Vorhabens lag in der Steigerung des Futterwertes von Erbsen und Ackerbohnen.

A: Der Erntetermin sollte dabei soweit vorgezogen werden, dass a) eine vollständige Nährstoffeinlagerung gewährleistet und b) geringere Ertragsausfälle und phytosanitäre Belastungen zu erwarten sind. Folgende Aufgabenfelder wurden dabei betrachtet:

- 1) Entwicklung der Nährstoffqualität unter Berücksichtigung der Proteinfractionen nach LICITRA et al. (1996) während der Kornreife
- 2) Untersuchungen zum natürlich vorkommenden Mikrobiom sowie zur phytosanitären Belastung des Korns während der Kornreife

B: Die Silierung der feuchten Körner sollte so gesteuert werden, dass a) desmolytische und proteolytische Prozesse minimiert und b) die ruminale Beständigkeit ausgewählter Nährstofffraktionen unverändert bleibt. Folgende Aufgabenfelder wurden dabei betrachtet:

- 1) Bestimmung des Siliererfolges bei der Silierung von Körnern zur Teigreife (70 % TM) und Trockenreife (> 80 % TM, rückbefeuchtet auf 70 % TM)
- 2) Auswirkungen des Silierzusatzes von homofermentativen Milchsäurebakterien auf den Siliererfolg
- 3) Ermittlung sensorischer Befunde und aerobe Stabilität der hergestellten Silagen sowie nasschemische Analysen (Rohnährstoffe, Proteinqualität, Proteinfractionen, Gärsäuren/Alkohole, pH-Wert) im Hinblick auf die Verbesserungen des Futterwertes
- 4) Elektronenmikroskopische Untersuchungen zum Einfluss der Silierung auf die Morphologie der Stärke

C: Durch die Steuerung des nachfolgenden Toastprozesses sollte möglichst a) der Gehalt antinutritiver Inhaltsstoffe auf ein Minimum reduziert, b) die ruminale Protein- und Stärkebeständigkeit erhöht und c) eine Schädigung der Nährstoffe durch eine zu hohe Behandlungsintensität verhindert werden. Folgende Aufgabenfelder wurden dabei betrachtet:

- 1) Variation von Temperatur, Behandlungsdauer und Menge zur Einschätzung der optimalen Einstellungen der Hitzebehandlung auf die ruminale Beständigkeit und den Toasterfolg durch nasschemische Analysen der Rohnährstoffe
- 2) Auswirkungen der Behandlung auf den Gehalt ausgewählter antinutritiver Inhaltsstoffe
- 3) Elektronenmikroskopische Untersuchungen zum Einfluss der thermischen Behandlung auf die Morphologie der Stärkegranula

- 4) Auswirkungen der kombinierten Behandlung bei Erbsen auf den Fütterungserfolg beim Einsatz hochleistender Milchrinder (Futtermittelaufnahme, Milchleistung und –inhaltsstoffe) sowie Verdaulichkeitsbestimmung an adulten Hammeln

Folgende **Arbeitshypothesen** ergeben sich aus der Literaturrecherche und wurden durch experimentelle Untersuchung geprüft:

1. Es ergeben sich keine Ertragsverluste von Stärke und Protein bei einer frühzeitigen Ernte teigreifer Körner (70 % TM) von Erbsen und Ackerbohnen gegenüber der herkömmlichen Ernte zur Trockenreife.
2. Bei der Silierung von teigreifen Erbsen und Ackerbohnen sind:
  - a. proteolytische und desmolytische Prozesse herabgesetzt und
  - b. die Bildung konservierungswirksamer Milchsäure reduziert.
3. Durch das Toasten siliierter Erbsen und Ackerbohnen wird:
  - a. die ruminale Protein- und Stärkebeständigkeit erhöht und
  - b. der Gehalt antinutritiver Inhaltsstoffe reduziert.
4. Siliert und getoastete Erbsen können ohne negative Auswirkungen auf die Milchleistung sowie -qualität als Proteinquelle, in den Rationen von Milchrindern, Rapsextraktionsschrot ersetzen.

## 4 Experimentelle Untersuchungen zur Verbesserung des Futterwertes von Erbsen- und Ackerbohnenkörnern durch Silieren und Toasten

In der vorliegenden Arbeit wurden regional verfügbare Erbsen- und Ackerbohnsensorten in konventioneller sowie ökologischer Form angebaut und hinsichtlich ihrer Blühfarbe (Erbsen) und des Tanningehaltes (Ackerbohne) unterschieden. Die Untersuchungen wurden zunächst im Labormaßstab durchgeführt und die hergestellten Proben sensorisch sowie nasschemisch auf bedeutende Futterwertparameter analysiert. Die daraus abgeleitet erfolgsversprechendsten Varianten wurden anschließend in gleicher Weise großtechnisch hergestellt und deren Fütterungstauglichkeit an hochleistenden Milchrindern überprüft.

### 4.1 Material und Methoden

#### 4.1.1 Ausgangsmaterial

Das für die Untersuchungen notwendige Probenmaterial wurde durch ausgewählte Betriebe des Demonstrationsnetzwerk Erbse/Bohne entsprechend den gewünschten Anforderungen (ökologisch vs. konventionell; ausgewählte Reifestadien und Trockenmassen; Sortenunterschiede) zur Verfügung gestellt (Tabelle 6).

**Tabelle 6:** Anbaubeschreibung des Probenmaterials der Erbsen und Ackerbohnen

Art	Sorte	Demobetrieb	Anbaubedingungen
1 E	Alvesta	LVG Köllitsch	2016, keine Angaben
2 E	Alvesta	LVG Köllitsch	2017, 11 ha, 75 kK/m <sup>2</sup> , Auenboden aus Lehm inklusive Sandstreifen, Ø 525 (163 mm)
3 E	Astronaute	Budissa AG Plotzen	2017, 10 ha, 45 dt/ha, 80 kK/m <sup>2</sup> , AZ 50/Parabraunerde (Lösslehm), WG, Ø 640 mm (235 mm)
4 E	Astronaute	LVG Köllitsch	2018, 15 ha, 35 dt/ha, 90 kK/m <sup>2</sup> , AZ 71/Auenboden aus Lehm inklusive Sandstreifen, SM, Ø 325 mm (120 mm)
5 WE	E.F.B. 33*	Vorwerk Podemus	2016, ökologisch im Gemenge mit WT (Benetto), 200 kg kK/ha (50/50), 16 ha, 37 dt/ha, AZ 60/ schluffiger Lehm; Kartoffeln; Ø 680 mm
6 AB	Fanfare	Agrarproduktion „Elsteraue“	2016, 13 ha, 25,5 dt/ha, 40 kK/m <sup>2</sup> , AZ 70/ toniger Lehm, WW, Ø 590 mm
7 AB	Taifun**	GmbH & Co KG	2016, AZ 70/ toniger Lehm, WW, Ø 590 mm
8 AB	Taifun**	Budissa AG Plotzen	2017, 5 ha, 56 dt/ha, 35 kK/m <sup>2</sup> , AZ 50/Parabraunerde (Lösslehm), WG, Ø 640 mm (418 mm)

\*buntblühend, \*\*tanninarm; Anbaubedingungen: Anbaujahr, Fläche, Ertrag, Saatstärke, Ackerzahl, AZ/Boden, Vorfrucht, Jahresniederschlagsmenge (Erbsen: März - Juli, Ackerbohne: März – August; Ø Jahresniederschlag); AB, Ackerbohne; E, Erbsen; WE, Wintererbsen; E.F.B.33, Sortenname; kK, keimfähige Körner; LfULG, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; LVG, Lehr- und Versuchsgut; SM, Silomais; WG, Wintergerste; WW, Winterweizen; WT, Wintertritikale

Alle in der Tabelle 6 dargestellten Sorten (Pobenmaterial) wurden für die Laboruntersuchungen verwendet und für die großtechnischen Umsetzungen (z.B. Probenmaterial 2) ausgewählt. Die dargestellten Ackerbohnsorten unterscheiden sich hinsichtlich ihres Tanningehaltes, wobei die Sorte „Taifun“ zu den tanninarmen/-freien Varietäten zählt. Der überwiegende Anteil der Anbauflächen wurde konventionell bewirtschaftet. Eine Ausnahme hiervon ist die buntblühende Wintererbse „E.F.B.33“, welche im Gemenge mit Triticale (50 zu 50) ökologisch bewirtschaftet und im Anschluss der Ernte von der Beimengung technisch bereinigt wurde. Das Probenmaterial 5, 6 und 7 wurden durch das Netzwerk Erbse/Bohne als trockene Körner bereitgestellt. Über den Abreifezeitraum wurden das Probenmaterial 2, 3, 4 und 8, beginnend mit der Fruchtentwicklung, wöchentlich morphologisch bonitiert. Die Probennahme erfolgte an 10 repräsentativen Stellen im linearen Abstand von 5 m in der Fläche. Randbereiche (15 m bis Feldkante) wurden ausgeschlossen. Je Boniturstelle wurden 10 Pflanzen zur weiteren Bearbeitung gesammelt. Der entstandene Pflanzenpool wurde gedrittelt und morphologisch beurteilt. Das Entwicklungsstadium der Pflanzen wurde in Anlehnung des BBCH-Codes (FERELL et al, 1995; MEIER, 2001; WEBER & BLEIHOLDER, 1990) bestimmt sowie die Hülsen (Anzahl/Pflanze, Hülsenlänge und -breite, Homogenität der Hülsenentwicklung) und das Korn (Anzahl/Hülse, Korndurchmesser, Farbe und Homogenität der Kornentwicklung) eingeschätzt. Zusätzlich wurde der TM-Gehalt der Ganzpflanze, der Pflanze ohne Frucht, der Hülse, der Hülse ohne Korn und des Korns bei 105°C über 24 h bestimmt. In Anlehnung dieser Ergebnisse wurde der bekannte BBCH-Code mit den gewonnenen Ergebnissen erweitert (Tabelle Anhang 14 und Tabelle Anhang 15)

#### **4.1.2 Probengewinnung und Aufbereitung**

Für die Laboruntersuchungen wurde das Probenmaterial nach Blühfarbe (weißblühend, buntblühend), dem Tanningehalt (tanninreich, tanninarm) und der Korn-TM (> 80 % TM, „trockenreif“; 70 % TM, „teigreif“) unterschieden. Die Körnerleguminosen wurden vor der Silierung mit einer Walzenmühle (Murska 220 SM) auf rund 5 mm gequetscht und in Abhängigkeit der TM (> 80 % TM) mit destilliertem Wasser auf die gewünschte Silier-TM von 70 % zurückbefeuchtet. Die Modellsilagen wurden in den Varianten ohne (Kontrolle, KON) oder mit Zugabe von homo- bzw. heterofermentativen Milchsäurebakterien, jeweils ohne (MSB) oder mit amylolytischer Aktivität (MSB<sup>A</sup>) für mindestens 60 Tage siliert. Die Varianten wurden dabei in dreifacher Wiederholung hergestellt.

**Tabelle 7:** Hergestellte Silagevarianten von Erbsen und Ackerbohnen

Probenmaterial		TM-Korn [%]	Varianten	TM-Silierung [%]	Silierdauer [d]
Erbse	Alvesta (1)	85	KON, 12 MSB	55, 66	60
Erbse	Alvesta (1)	85		71	62
Wintererbse	E.F.B. 33 (5)	89		70	61
Ackerbohne	Taifun (7)	89	KON, MSB <sup>A</sup> ,	70	61
Ackerbohne	Fanfare (6)	89	MSB	71	58
Ackerbohne	Taifun (8)	77		76, 69	129
Erbse	Astronaut (3)	84		68	75
Erbse	Astronaut (4)	73		74	76
Erbse*	Alvesta (2)	78	MSB	77	270

\*größtechnische Untersuchung; KON, Kontrolle ohne Silierzusatz; MSB<sup>A</sup>, mit Zugabe von *L.plantarum* mit amylolytischer Aktivität (LMG 18053; 6x10<sup>6</sup> KBE/g FM); MSB, mit Zugabe von *L.plantarum* ohne amylolytische Aktivität (Josilac classic, LSI NCIMB 30083 1k20736; 6x10<sup>6</sup> KBE/g FM)

Das Probenmaterial 1, 3, 5, 6 und 7 wurde zur Trockenreife und das Probenmaterial 2, 4 und 8 zur Teigreife großtechnisch geerntet. Auf Grund witterungsbedingter Einflüsse und technischer Probleme beim Drusch wurde die geplante TM von 70 % überschritten. Für die großtechnische Silierung wurden rund 18 t Erbsen der Sorte „Alvesta“ (Probenmaterial 2) mit einer Feuchtkornquetsche (Murska 2000 S 2x2) gequetscht und anschließend in einen Folienschlauch (Ø 1,65 m x 8 m Länge) unter Zugabe von MSB (120 g MSB/200 l H<sub>2</sub>O; „Josilac classic“; *L. plantarum*; 6,2 x 10<sup>11</sup> KBE/t FM) verbracht.

### 4.1.3 Methodik

#### 4.1.3.1 Silierung

Zu den gequetschten Körnern wurden bei den MSB-Varianten als Silierzusatz homofermentative Milchsäurebakterien (MSB) im Vergleich ohne Zusatz (Kontrolle, KON) eingesetzt. Die MSB-Präparate unterschieden sich laut Herstellerangaben hinsichtlich ihrer amylolytischen Aktivität, die durch Voruntersuchungen (siehe Abbildung Anhang 30) bestätigt wurden. Die Varianten **MSB<sup>A</sup>** wurden mit einem amylolytisch wirksamen *L. plantarum* Stamm (LMG 18053) beimpft. Die Varianten **MSB** erhielten ein nicht amylolytisch wirksames MSB-Präparat („Josilac®classic“; *Lactobacillus plantarum*, LSI NCIMB 30083 1k20736 und L256 NCIMB 30084 1k20737 sowie *Pediococcus acidilactici* P11 DSM 23689 1k1011 und P6 DSM 23688 1k1010; Josera GmbH & Co. KG, Kleinheubach). Die MSB-Präparate wurden zuvor in 1000 µl Boullion für 24 h bei 35 °C im Inkubator angesetzt und vermehrt. In Vorbereitung der Silierung wurden 100 µl der MSB-Boullion erneut für 24 h bei 35 °C inkubiert und in einer Konzentration von 1ml/g FM mit einer 50 ml Sprühflasche dem Material direkt, bei Varianten ohne Rückbefeuchtung oder dem *aqua dest.* bei Rückbefeuchtung zugesetzt. Die Impfdichte



über alle Silagevarianten lag bei  $2 - 9 \times 10^6$  KBE/g FM. Ein Überblick der verwendeten MSB-Präparate wird im Anhang (Tabelle Anhang 10) vorgestellt. Die gequetschten Körner wurden nach dem Rostocker Modell von HOEDTKE & ZEYNER (2011) in Vakuumbuteln (Polyethylentüten RS-Vac: 20 cm x 30 cm Innenbeutel, 30 cm x 50 cm Außenbeutel; 160  $\mu$  Materialstärke; Firma LA.VA; Germany) und der Verwendung eines Vakuumiergerätes (V.400® Premium mit dreifach Schweißnaht; Firma LA.VA; Germany) unter standardisierten Bedingungen (konstant klimatisiert, 22 - 25 °C; abgedunkelten Raum) für mindestens 60 Tage gelagert. Das Anstechen des Innenbeutels verhinderte einen Druckaufbau durch entstehende Gärgase. Um anaerobe Silierbedingungen zu schaffen, wurden die Silagen mit einem Außenbeutel vakuumiert. Die Raumtemperaturen während der Silierung wurden mit Temperaturdatenloggern (Tinytag TRANSIT 2) erfasst. Für die Ermittlung des TM-Verlustes wurde der TM-Gehalt des zu silierenden Materials sowie die Einwaage des Materials und das Gesamtgewicht der Modellsilage (Material, Innen- und Außenbeutel, Paketklebeband) gemessen.

#### **4.1.3.2 Wärmebehandlung**

Alle hergestellten Silagen und das native Ausgangsmaterial wurden hydrothermisch behandelt. Das angewandte Wärmebehandlungsverfahren wird unter den verwendeten Bedingungen (Behandlungstemperatur 100 - 200 °C, Behandlungsdauer 30 - 60 min; atmosphärischer Druck; Nutzung von Wasserdampf) als „Toasten“ definiert. Das zu behandelnde Material wurde in einem Trockenschrank (Reinraum-Trockenschrank UF1060; Temperatursensor 1 Pt100 DIN-Klasse A; Einstellungsgenauigkeit der Temperatur ab 100 °C = 0,5 °C; Firma Memmert) getoastet. Die Silagen wurden aufgelockert auf herkömmliche Aluschalen bzw. -assietten gelegt, mit einer perforierten Aluassiette abgedeckt und wärmebehandelt. Die Behandlungsdauer (10, 20, 30, 60 min), -temperatur (120, 140, 160, 180, 200 °C) und zu toastende Menge (500, 1000 g) wurde dabei variiert. Die Temperatur der Silagen betrug vor dem Toasten 20 - 25 °C. Im Anschluss der Behandlung wurden die Silagen für ca. 15 min bei Raumtemperatur abgekühlt und für die weitere Analyse durch die Landwirtschaftliche Kommunikations- und Servicegesellschaft (LKS) mbH Lichtenwalde eingefroren. Die Luftturbine sowie die Abluftdrosselklappe des Trockenschrankes wurden während der Wärmebehandlung auf ein Minimum (10 %) reduziert, um den entstehenden Wasserdampf im Wärmeprozess zu erhalten. Wasser oder Wasserdampf wurde nicht extern dazu gegeben, sondern entstand durch die verdunstende Feuchtigkeit im Material.

Die großtechnisch hergestellte Erbsensilage (Erbsen „Alvesta“; Probenmaterial 2, Tabelle 6) wurde im Anschluss der Silierung mit einem mobilen Toaster (Sonderanfertigung im Rahmen des SilaToast<sup>BLE</sup>-Projektes; ECO-Toast 100; max. Durchsatz 100 kg/h; Beheizungsvariante elektrisch; max. 18 kW; Firma Agrel GmbH; Österreich) bei einem Durchsatz von 50 – 100 kg FM/h und Einblastemperaturen von 120 - 200 °C getoastet. Das Material gelangte aus einem Vorratsbehälter (Nylonsack; ca. 1 m<sup>3</sup>) durch sein Eigengewicht in vertikaler Richtung in eine Toastkammer und wurde mit elektrisch produzierter Heißluft (Heizplatten) umströmt. Eingebaute Winkeleisen in der Toastkammer sorgten für eine entsprechende Durchmischung des nach unten rutschenden Materials. Durch elektrisch steuerbare Auslaufklappen, die sich zeitintervallsmäßig öffneten, wurde der gewünschte Durchsatz realisiert. Die getoasteten Erbsen wurden nach dem Verlassen des Toasters über ein Schneckensystem auf einem Haufen abgelagert.

#### **4.1.3.3 *in vitro*-Untersuchungen**

Die dargestellten *in vitro*-Untersuchungen wurden durch die Professur für Tierernährung am Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg durchgeführt. Dabei wurden folgende Varianten untersucht:

1. Erbsen „Alvesta“ (Probenmaterial 1; nativ, siliert, siliert + getoastet (160 °C, 30 min), nativ getoastet (160 °C, 30 min); Labormaßstab)
2. Erbsen „Alvesta“ (Probenmaterial 1; nativ, siliert, siliert + getoastet (120 – 200 °C, 30 min), siliert + getoastet (160 °C, 10 - 30 min); Labormaßstab)
3. Erbsen „Alvesta“ (Probenmaterial 1; nativ, siliert + getoastet; großtechnisch)
4. Ackerbohnen „Taifun“ (Probenmaterial 7; nativ, siliert, siliert + getoastet (160 °C, 30 min), nativ getoastet (160 °C, 30 min); Labormaßstab)

#### **4.1.3.3.1 UDP-Bestimmung**

Die Bestimmung des UDP erfolgte unter der Verwendung eines *Streptomyces griseus* Proteasetestes nach der Methode von LICITRA et al. (1998). In vier aufeinanderfolgenden Durchläufen wurden je zwei Messzeiten (8 und 24 h) erfasst. Die Proteaselösung wurde nach LICITRA et al. (1999), für die unspezifische *S. griseus* Protease (Typ XIV; Sigma-Aldrich Chemie GmbH, München; > 3,5 U/mg) verwendet, mit einer Aktivität von 0,58 U/ml hergestellt. 500 g TM des zu untersuchenden Materials wurden in 136 ml Glasgefäße eingewogen und mit 40 ml Borat-Phosphat-Puffer (12,2 g/l NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O + 8,91 g/l Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O; pH 6,7) versetzt. Anschließend wurde die Probe für eine Stunde bei 39 °C in einem Wasserbad geschüttelt (80 r/min). Im Anschluss daran wurde die Proteaselösung

hinzugegeben. Die entsprechende Menge berechnete sich auf der Basis des Reinproteingehaltes (TP) jedes Substrates relativ zu einem Sojabohnenstandard (49,3 % TP = RP – Nicht-Protein-Stickstoff, NPN) bei dem 10 ml der Lösung erforderlich waren (LICITRA et al., 1998). Nach 8 und 24 Stunden wurde die Inkubation gestoppt, die Probe filtriert (Whatman #41 Filter) und mit 250 ml destilliertem Wasser gespült. Die Filter wurden anschließend luftgetrocknet und der Stickstoffgehalt in dem Filtrerrückstand ermittelt (FOSS 2300 Kjeltac Analyseeinrichtung; Foss GmbH, Rellingen). Der UDP-Gehalt wurde im Anschluss wie folgt kalkuliert (unter Berücksichtigung eines Probengewichtes von 500 mg je Behandlung):

$$\text{UDP [g/kg TM]} = \frac{(N_{\text{rück}} - N_{\text{blank}}) \times 6,25 \times 10}{0,5 \times \text{TM}_{\text{Futter}}} \times 10$$

$N_{\text{rück}}$  = Stickstoff gemessen am Filtrerrückstand [mg]

$N_{\text{blank}}$  = Stickstoff gemessen in den Blindfiltern [mg]

$\text{TM}_{\text{Futter}}$  = Trockenmasse des Futters [%]

#### 4.1.3.3.2 nRP-Bestimmung

Für die Bestimmung des nRP wurde das ANKOM RF-Inkubationssystem (ANKOM Technologie, Macedon NY, USA) verwendet. Das zu analysierende Material (ein Fermentationsgefäß pro Substrat und Messzeit, drei Blindproben (Stärke-, Cellulose und Hefestandards) pro Messzeit) wurde in sechs aufeinanderfolgenden Durchführungen mit Pansensaft fermentiert. Die Messzeiten jeder Durchführung waren nach 8 und 24 h. Die Durchführung erfolgte nach den Vorgaben von MENKE et al. (1979), MENKE & STEINGASS (1988) sowie dem Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA, 2012; Methode 25.1). Der für die *in vitro*-Untersuchungen verwendete Pansensaft wurde von vier pansenfistulierten Schafen (Sufflok und Rauhwolliges Pommersches Landschaf) des Forschungszentrums für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg in Merbitz (Sachsen-Anhalt; Zulassungsnummer: 203.k-42502-3-657MLUMerbitz) gewonnen. Die Tiere waren 6 Jahre alt und hatten freien Zugang zu Wasser und Heulage (807 g TM/kg OM; 54 g RP/kg TM; 630 g NDF/kg TM). Zusätzlich erhielten die Tiere noch 200 g/Tier\*d Kraftfutter (pelletiert, 3 mm; IBEKA® PANTO Schäferstolz, HL Hamburger Leistungsfutter GmbH, Hamburg; 897 g TM/kg OM, 177 g RP/kg TM) sowie 10 g/Tier\*d Mineralfutter (basu-kraft Top-Mineral, BASU Heimtierspezialitäten GmbH, Bad Sulza). Der Pansensaft wurde den Tieren unmittelbar vor der Fütterung und 1,5 Stunden vor jedem Versuch entnommen, filtriert (Leinentücher), mit

Ammoniumhydrogencarbonat ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ; 2 g/l) versetzt sowie mit Natriumhydrogencarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ; 2 g/l; EDMUNDS et al., 2012) reduziert und in einer Thermoflasche ins Labor transportiert. Der Pansensaft hatte einen pH-Wert von 6,8, ein Redoxpotential von -327 mV und eine Temperatur von 30 °C. Insgesamt wurden 200 mg Material (gemahlen; Retsch MM 400, Retsch GmbH, Haan) in die Fermenter (Glasflaschen mit Gasdruckmessmodul im Deckel; 136 ml Volumen) eingewogen und mit 30 ml Inolukum (Pansensaft + Puffer; Verhältnis 1:2) versetzt. Die Flaschen wurden zufällig auf zwei identische Schüttelwasserbäder (80 U/min; 39 °C) aufgeteilt. Mit Hilfe von Argon wurde der in den Flaschen übrige Sauerstoff ausgespült. Der entstandene Gasdruck wurde in regelmäßigen Abständen automatisch erfasst. Nach 8 und 24 h wurden die Gefäße zur  $\text{NH}_3\text{-N}$ -Analyse dem System entnommen und in Eiswasser (0 °C) gegeben, um die mikrobielle Aktivität zu stoppen. Anschließend wurde die Probe zweimalig mit je 30 ml destillierten Wasser ausgespült und unmittelbar vor der  $\text{NH}_3\text{-N}$ -Analyse mit 4 ml Natriumhydroxid ( $\text{NaOH}$ ; 1 mol/l) versetzt. Die  $\text{NH}_3\text{-N}$ -Destillation und -Titration erfolgte unter Verwendung einer FOSS 2300 Kjeltac Analyseeinrichtung (Foss GmbH, Rellingen) ohne weitere Zugabe von Wasser oder Laugen. Anschließend wurde das nRP wie folgt berechnet (unter Berücksichtigung eines Probengewichtes von 200 mg je Behandlung):

$$\text{nRP [g/kg TM]} = \frac{(\text{NH}_3\text{N}_{\text{blank}} + \text{N}_{\text{Futter}} - \text{NH}_3\text{N}_{\text{Probe}}) \times 6,25 \times 100.000}{200 \text{ [mg]} \times \text{TM}_{\text{Futter}}}$$

$\text{NH}_3\text{-N}_{\text{blank}}$  =  $\text{NH}_3\text{-N}$  gemessen in den Rohlösungen [mg]

$\text{N}_{\text{Futter}}$  = Menge an Stickstoff gemessen in 200 g Probe (Futter)

$\text{NH}_3\text{-N}_{\text{Probe}}$  =  $\text{NH}_3\text{-N}$  gemessen in der Probenlösung (enthält Futter-N sowie Mikroben-N) nach 8 und 24 h Inkubation [mg]

$\text{TM}_{\text{Futter}}$  = TM-Gehalt des Futters [%]

#### 4.1.3.4 Verdaulichkeitsbestimmungen

Die Verdaulichkeitsbestimmungen wurden durch die Professur für Tierernährung am Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg mit der großtechnisch verarbeiteten Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 2; Tabelle 6) durchgeführt. Untersucht wurde dabei der Einfluss der großtechnischen Silierung (siehe Kapitel 4.1.3.1) und anschließender thermischer Aufbereitung (siehe Kapitel 4.1.3.2) auf die Verdaulichkeit ausgewählter Nährstoffe. Die silierten Erbsen wurden unter atmosphärischen Druck bei 180 – 190 °C Einblastemperatur und einem Durchsatz von 100 kg/h getoastet (ECO-Toast 100; max.

Durchsatz 100 kg/h; Firma Agrel GmbH; Österreich). Der Versuch wurde mit der Genehmigung der Bundesverwaltung Sachsen-Anhalt (Genehmigungsnummer 2-1524 MLU) durchgeführt.

### Tiere

Die für die Untersuchung verwendeten Schafe wurden am Forschungszentrum für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg in Merbitz (Sachsen-Anhalt) gehalten. Die acht adulten Modelltiere (Rauwolliges Pommersches Landschaf; kastriert;  $78 \pm 9,7$  kg LM) waren klinisch gesund und standen unter regelmäßiger tierärztlicher Kontrolle.

### Ration

Die verwendeten Rationen sind in Tabelle 8 angegeben. Das Futter wurde den Schafen zweimalig (je 500 g FM) am Tag angeboten. Trinkwasser stand den Tieren ad libitum zur Verfügung. Das Fütterungsniveau der Schafe entsprach dabei dem Energieerhaltungsniveau. Der empfohlene Rohproteingehalt im Futter für Verdaulichkeitsbestimmungen an Schafen beträgt 120 g RP/ kg TM (GfE, 1991) und konnte mit den verwendeten Rationen eingehalten werden.

**Tabelle 8:** Verwendete Rationen mit entsprechenden Rationskomponenten sowie ausgewählte Nährstoffgehalte (modifiziert nach BACHMANN et al., 2019)

<b>Rationskomponente [g FM/d]</b>	<b>Grundration</b>	<b>Kontrolle (native Erbse)</b>	<b>Versuch (siliert + getoastete Erbse)</b>
Luzernetrockengrün <sup>1</sup>	450	225	225
Weizenstroh <sup>1</sup>	100	50	50
Gerste <sup>2</sup>	450	225	225
Erbse nativ <sup>2</sup>	0	500	0
Erbse siliert + getoastet <sup>2</sup>	0	0	500
Mineralfutter <sup>3</sup>	0	10	10
Futteraufnahme [g TM/Tier*d]	912	851	942
<b>Nährstoffgehalt [g/kg TM]</b>			
Rohprotein	122	152	155
Stärke	240	375	372
aNDFom	420	285	305
ADFom	259	176	166
GE [MJ/kg TM]	18,8	18,6	18,5

<sup>1</sup> gehäckselt, Ø 6 mm; <sup>2</sup> gequetscht, Ø 3,5 mm; <sup>3</sup> basu-kraft® Top-Mineral (BASU Heimtierspezialitäten GmbH, Bad Sulza); ADFom, saure Detergenzienfaser abzüglich Rohasche; GE, Gesamtenergie (Bruttoenergie); aNDFom, neutrale Detergenzienfaser abzüglich Rohasche und Amylase

## Durchführung

Der Verdaulichkeitsversuch wurde in zwei aufeinander folgenden Zeiträumen als Differenzversuch nach den Richtlinien der Gesellschaft für Ernährung (GfE, 1991) durchgeführt. Jeder Zeitraum bestand aus einer 14-tägigen Adaptationsphase und 6-tägiger Kot-Sammelperiode. Insgesamt erhielten sechs Schafe die Grundration, vier Schafe die nativen Erbsen (Kontrolle) sowie fünf Schafe die siliert + getoasteten Erbsen (Versuch). Während des Versuches wurden die Schafe einzeln in Stoffwechsellkäfigen gehalten. Der Kot wurde mit einem Kot-Sammel-Geschirr aufgefangen und täglich vor der ersten Fütterung entleert. Die Kotmenge sowie eventuelle Futterrückstände (Restfutter) im Käfig oder Trog wurden täglich erfasst. Der gesammelte Kot wurde bis zur Analyse gefroren (- 20 °C) gelagert. Die Methoden zur Analyse der ausgewählten Roh Nährstoffe im Futter sowie im Kot sind in Tabelle 9 dargestellt.

Zusätzlich wurden die ruminalen Abbaubarkeiten der Trockenmasse, des Rohproteins und der Stärke ausgewählter Behandlungen an der LKS mbH Lichtenwalde in Anlehnung der nach SÜDEKUM (2005) modifizierten Methode (in-house-method) von HIENDL (2010) mittels DAISY II-Inkubator® sowie referenzanalytischer Bestimmung der Inhaltsstoffe nach 8h Inkubation bestimmt. Der notwendige Pansensaft wurde täglich von der Veterinärmedizinischen Fakultät Leipzig (Klinik für Klauentiere) bezogen. Die fistulierten Spendertiere erhielten 9,5 kg FM Heu, 2 kg FM Stroh, 1 kg FM Milchleistungsfutter (Energienstufe 3, 18 – 20 % RP) und 100 g FM Mineralfutter.

### 4.1.3.5 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Für die grafische Darstellung der Morphologie von Erbsen- und Ackerbohnenstärkekörnern ausgewählter Behandlungen wurde ein Rasterelektronenmikroskop JSM 6300 (JOEL LTD., Tokyo, Japan) der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (Fachgebiet Bodenwissenschaften) verwendet. Das REM arbeitete mit einem Vakuum zwischen  $2,0 \times 10^2$  und  $1,5 \times 10^6$ . Der notwendige Elektrodenstrahl wurde dabei durch die Stimulation einer Wolframkathode erzeugt. Die verwendete Erregerspannung lag bei 15 keV. Die Proben wurden auf eine Größe von 1 mm vermahlen und geringe Mengen auf ein Klebeblättchen eines zylindrischen Objektträgers (1 cm Durchmesser; 0,5 cm Höhe; Edelstahl) gehaftet. Wichtig hierbei war die Vermeidung von Überlagerungen der einzelnen Partikel. Der präparierte Objektträger wurde anschließend mit Gold, zur Verbesserung der Leitfähigkeit, beplattert und in das REM verbracht. Für die morphologische Analyse wurden die Stärkekörner in

sogenannten „Sekundärelektronenbilder“ in den ausgewählten Vergrößerungen (500-, 1000-, 1500- und 3000-fach) dargestellt.

#### **4.1.3.6 Epiphytisches Mikrobiom**

Für die Darstellung der Vielfalt des epiphytischen Mikrobioms im Verlauf der Kornreife wurden die Körner der Erbse „Astronaute“ (Probenmaterial 4; Tabelle 6) zu fünf ausgewählten Reife- bzw. TM-Stadien (31, 39, 43, 55 und 74 % TM) händisch geerntet. Mit den nativen Erbsen wurden Rostocker Modell Silagen nach HOEDTKE & ZEYNER (2011) hergestellt. Die Silierdauer betrug unter standardisierten Bedingungen (25 °C, dunkel) 58 bis 62 Tage. Es wurden zwei Silagevarianten hergestellt (KON, ohne MSB-Zugabe; MSB, mit Zugabe des MSB-Präparates „Josilac®classic“, siehe Kapitel 4.1.3.1 Silierung) und mit der entsprechenden nativen Probe untersucht. Für Untersuchung des Mikrobioms wurden 5 g jeder Probe für 15 min mit 100 ml Lösung (0,58 g  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ , 2,5 g  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ , 4 g NaCl, 1 g tryptisches Pepton, 0,3 ml Tween® 80 in 1 l Wasser) in Anlehnung an die Vorgaben der VDLUFA (2012) versetzt. Die Proben wurden für 5 min bei 230 U/min (Seward Stomacher® 400 Paddelmischer, Seward LTD, Worthing, UK) homogenisiert und anschließend für 5 min bei  $18.000 \times g$  zentrifugiert. Dem Röhrchen wurden 2 ml entnommen und diese Menge erneut für 1 min bei  $10.000 \times g$  zentrifugiert. Die genomische DNA wurde mit Hilfe eines Quick-DNA™ Pilz/Bakterien-Miniprep Kit (Zymo Research Corp., Irvine, CA, USA) gemäß Herstellerangaben extrahiert und gereinigt. Die DNA-Konzentration wurde unter der Verwendung eines Invitro™ Qubit™ 3.0-Fluorometer (Fisher Scientific GmbH, Schwerte) bestimmt. Die extrahierte DNA wurde bei - 20 °C gelagert. Die Polymerase-Kettenreaktion (PCR, „polymerase chain reaction“) zur Vervielfältigung der DNA und Reinigung der PCR-Proben wurde gemäß den Anweisungen für das Illumina Miseq-System (Illumina 16S Metagenomics Sequencing Library Preparation Guide, 2020) durchgeführt. Verwendet wurden dabei die Regionen V3 - V4 der 16S rRNA (ribosomale Ribonukleinsäure) -Gene (Prokaryoten, z.B. Bakterien) sowie die Regionen V8 - V9 der 18S rRNA-Gene (Eukaryoten, z.B. Pilze). Die Sequenzierung erfolgte durch das Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig.

#### **4.1.3.7 Fütterungsversuch**

In einem 7-wöchigen Fütterungsversuch wurde 2018 der Einsatz von RES + Gerste (Kontrolle) vs. siliert und getoasteter Erbsen (Test) hinsichtlich der Effekte auf die Leistung, Gesundheit und Futter- bzw. Nährstoffeffizienz an hochleistenden Milchkühen (ca. 40 kg Milchleistung) am LVG/LfULG Köllitsch untersucht. Die Testgruppen (Kontrolle, Test) wurden mit je 30 Tieren hinsichtlich Laktation, Leistung und Körperkondition homogen zusammengestellt

(Tabelle Anhang 16). Für die Durchführung des Fütterungstestes wurde die Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 2, Tabelle 6) am Standort Köllitsch unter konventionellen Bedingungen auf ca. 11 ha angebaut. Die Erntemenge lag bei 2,4 t TM/ha bei einem bonitierten Ertragspotenzial von 3,3 t TM/ha. Für die großtechnische Silierung wurden die Erbsen frühzeitig geerntet (78 % TM), während des Zerkleinerungsprozesses rückbefeuchtet (76 % TM) und im Anschluss daran in einen Folienschlauch ( $\varnothing$  1,65 m x 8 m Länge; BAG Budissa Agroservice GmbH, Malschwitz) unter Zugabe von MSB (120 g MSB/200 l H<sub>2</sub>O; „Josilac®classic“, siehe Kapitel 4.1.3.1 Silierung;  $6,2 \times 10^{11}$  KBE/t FM) verbracht. Der Schlauch wurde nach 9 Monaten Silierdauer, unmittelbar vor Versuchsbeginn, geöffnet und der Siliererfolg anhand sensorischer und analytischer Befunde bestimmt. Die Erbsensilage roch frisch und erbsentypisch, mit einer aeroben Stabilität von > 7 Tagen und einem pH-Wert von 6,1 (pH-Wert vor Silierung = 7,1). Anschließend wurden die silierten Erbsen mit einem mobilen Toaster (ECO-Toast 100, Firma Agrel) bei 180 - 190 °C Einblastemperatur unter atmosphärischem Druck getoastet. Mit einem Durchsatz von 100 kg/h und einer Eingangstemperatur der Erbsen von 20 °C wurde eine Korntemperatur von 85 - 95 °C erreicht. Um den Effekt der siliert und getoasteten Erbsen auf den Futterwert und deren Fütterungseignung zu erfahren, wurden die protein- und energiereichen Kraftfutterkomponenten RES (2 kg) und Gerste (1 kg) durch ca. 3 kg siliert und getoastete Erbsen ersetzt (Tabelle Anhang 17). Um eine gruppenübergreifend homogene Nährstoffversorgung (Tabelle Anhang 18) zu gewährleisten wurde der Maissilageanteil der Versuchsration auf Grund des höheren Stärkegehaltes der Erbsen zu Gunsten des Grassilageanteiles signifikant reduziert.

#### **4.1.4 Analytik**

##### **4.1.4.1 Trockenmassebestimmung und Korrektur**

Als Trockenmasse (TM) wurde in der vorliegenden Untersuchung der Rückstand, der nach dem Trocknen der Probe im Trockenschrank bei 105 °C nach 24 h Trocknungsdauer zurückblieb, angenommen. Auf eine Vortrocknung (60 °C) wurde dabei verzichtet. Neben der Wasserverdampfung ist vor allem bei Silagen mit der Verflüchtigung von organischen Säuren und Alkoholen zu rechnen, sodass der Trocknungsrückstand nicht identisch mit der Summe der zum Zeitpunkt des Untersuchungsbeginns in einer Probe außer Wasser enthaltenen Stoffe, sondern ggf. geringer ausfällt (WEIßBACH & KUHLA, 1995). Nach WEIßBACH & KUHLA (1995) lassen sich Silagen in Abhängigkeit des pH-Wertes nachfolgenden Gleichungen korrigieren:



pH ≤ 4,0	$TM_k = TM_n + 0,94 \text{ FFS} + 0,08 \text{ MS} + A + 0,16 \text{ NH}_3$
pH bis 4,01 – 4,5	$TM_k = TM_n + 0,80 \text{ FFS} + 0,08 \text{ MS} + A + 0,32 \text{ NH}_3$
pH bis 4,51 – 5,0	$TM_k = TM_n + 0,68 \text{ FFS} + 0,08 \text{ MS} + A + 0,48 \text{ NH}_3$
pH bis 5,01 – 5,5	$TM_k = TM_n + 0,58 \text{ FFS} + 0,08 \text{ MS} + A + 0,64 \text{ NH}_3$
pH > 5,5	$TM_k = TM_n + 0,50 \text{ FFS} + 0,08 \text{ MS} + A + 0,80 \text{ NH}_3$

$TM_k$  = korrigierter TM-Gehalt,

$TM_n$  = nicht korrigierter TM-Gehalt,

FFS = Summe der Gehalte an flüchtigen Fettsäuren,

MS = Gehalt an Milchsäure,

A = Summe der Gehalte an einwertigen Alkoholen,

Angaben sind in % der Frischmasse (FM).

#### 4.1.4.1 Siliererfolg

Die hergestellten Modell-Silagen wurden zur Bestimmung des TM-Verlustes nach rund 60 Tagen Silierdauer zurückgewogen, geöffnet und hinsichtlich des Geruches (u.a. Gärsäuren), der Farbe und des Gefüges (u.a. fest, locker, schmierig) sowie Besonderheiten (Hefebesatz, Schimmel, etc.) sensorisch beurteilt. Weiterhin wurde der pH-Wert (10 g FM in 100 ml *aqua dest.*) sowie die TM in dreifacher Wiederholung je Probe bestimmt.

#### 4.1.4.2 Aerobe Stabilität

Die aerobe Stabilität wurde in Anlehnung an die Methode von HONIG (1990) durchgeführt. Hierbei dienten speziell präparierte, luftdurchlässige Kanalgrundrohre (KG-Rohre, Außendurchmesser 11 cm, Höhe 25 cm) umgeben von einer 6 cm dickwandigen Styroporhülle als thermoisoliertes Behältnis. Darin wurden 250 - 300 g FM aufgelockertes Silagematerial von Erbsen und Ackerbohnen für 7 Tage aerob in einem temperaturkonstanten (20 - 25 °C) und abgedunkelten Raum gelagert. Als Maß der aeroben Stabilität galt der Temperaturverlauf der Silagen unter Lufteinschluss, der in einem halbstündigen Intervall durch automatische Temperaturlogger (Tinytag TRANSIT 2) erfasst wurde. Die Silage galt dabei als aerob instabil, wenn eine Temperaturerhöhung von 3 °C über der Raumtemperatur entstand. Am Ende der aeroben Lagerung wurde die TM zur Bestimmung der Gewichtsverluste sowie der pH-Wert (10 g FM in 100 ml *aqua dest.*) erfasst. Weiterhin wurde eine visuelle Beurteilung von Schimmel- und Hefenbefall als Indikatoren der aeroben Stabilität bonitiert (siehe Tabelle Anhang 2).

#### 4.1.4.3 Rohnährstoffe

Die gewonnenen Proben wurden durch die LKS mbH Lichtenwalde nasschemisch untersucht. Die verwendeten Analysemethoden sind in der Tabelle 9 dargestellt. Die Proben wurden gefroren gelagert und für die Analyse bei 40 °C schonend getrocknet.

**Tabelle 9: Angewandte Analysemethoden**

Parameter	Methode (akkreditiert)
Alkohole	Hausmethode LKS FMUAA 181 (nicht akkred.)
Gärsäuren	Hausmethode LKS FMUAA 166
Neutrale Detergenzienfaser, NDF	VDLUFA Band III, Kap. 6.5.1
Proteinfraktionen (A, B1, B2, B3 & C)	LKS FMUAA 1402015-11 nach LICITRA et al., 1996
Proteinlöslichkeit	berechnet, A + B1 nach LICITRA et al., 1996
Pufferkapazität	Hausmethode LKS FMUAA 127a
Rohasche, RA	VDLUFA Band III, Kap. 8.1
Rohfaser, RFa	VDLUFA Band III, Kap. 6.1.1
Rohfett, RF	VDLUFA Band III, Kap. 5.1.1
Rohprotein, RP	VDLUFA Band III, Kap. 4.1.1
Saure Detergenzienfaser, ADF	VDLUFA Band III, Kap. 6.5.2
Saures Detergenzienlignin, ADL	VDLUFA Band III, Kap. 6.5.3
Stärke	VDLUFA Band III, Kap. 7.2.1, polarimetrisch
Trockenmasse, TM	VDLUFA Band III, Kap. 3.1
Zucker	VDLUFA Band III, Kap. 7.1.1
Gesamtenergie, GE	MLU, Bombencalorimetrie
ruminale Abbaubarkeit TM, RP, Stärke	Hausmethode LKS nach HIENDL (2010) und SÜDEKUM (2005)
nRP	eHFT

A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; B2, mäßig schnell abbaubares Reineiweiß; B3, langsam abbaubares Reineiweiß; C, unlösliches zellwandgebundenes Protein; eHFT, erweiterter Hohenheimer Futterwerttest; nRP, nutzbare Rohprotein am Duodenum; LKS, Landwirtschaftliche Kommunikations- und Servicegesellschaft mbH; MLU, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

#### 4.1.4.4 Antinutritive Inhaltsstoffe

Die Erbsen- und Ackerbohnenproben wurden durch die JenaBios GmbH (DKKS D-PL-19614-01-00; Labornummer 233; Jena) auf das Vorkommen ausgewählter Antinutritiver Inhaltsstoffe (ANF) untersucht. Das Glycopyranosid Vicin wurde nach der Methode von PULKKINEN et al. (2015) anhand von Extraktmessungen mittels HPLC und UV-Spektrometer (HPLC-UV) bestimmt. Die Bestimmung der Trypsininhibitoraktivität beruhte auf dem Vergleich der Trypsinaktivität des zu untersuchenden Substrates mit und ohne Trypsininhibitoren in Anlehnung an KAKADE et al. (1974). Der Nachweis der Inhibierung erfolgte photometrisch.

#### **4.1.5 Statistische Auswertung**

In Vorbereitung der statistischen Auswertung wurden alle Varianten (Erbse, Ackerbohne; nativ, siliert, siliert + getoastet, getoastet) mindestens in dreifacher Wiederholung hergestellt und analysiert.

##### **4.1.5.1 Roh Nährstoffe und Parameter des Fütterungserfolges**

Die gewonnenen Einzelwerte der ausgewählten Parameter wurden auf ihre Plausibilität geprüft und mit Literaturquellen verglichen. Die Datensätze wurden einer Homogenitätsprüfung unterzogen. Zufällig aufgetretene Ausreißer- und Extremwerte (Werte auffällig höher bzw. niedriger im Vergleich der übrigen Werte) wurden im Einzelfall auf natürliche Variabilität oder experimenteller Fehler kritisch geprüft und mögliche Auswirkungen auf das Varianzniveau und den Mittelwert in der Ergebnisdarstellung berücksichtigt. Nach Abschluss der Datenbeurteilung wurde die statistische Auswertung mit dem Statistikprogramm IBM SPSS Statistics 19 durchgeführt. Die gesammelten Daten wurden mittels ein- und mehrfaktorieller Varianzanalyse (ANOVA) sowie nachfolgendem mit einem Tukey-Test ausgewertet. Ein Signifikanzniveau von  $p < 0,05$  wurde angenommen. Die dargestellten Ergebnisse verstehen sich als Mittelwerte (MW) mit entsprechender Standardabweichung (SD)

##### **4.1.5.2 *in vitro*-Untersuchungen (nRP und UDP)**

Mit Hilfe von Boxplots wurden Ausreißer, die außerhalb der Box lagen ( $\pm 1,5$  Interquartielbereich), identifiziert und aus dem Datensatz entfernt. Die statistische Analyse wurde unter der Verwendung von SAS 9.4 (SAS Institut Inc., Cary, NC, USA) durchgeführt. Mit Hilfe des MIXED-Modells wurden die Mittelwerte der kleinsten Quadrate („least square means“, LSM) für das nRP und UDP ermittelt. Unterschiede der LSM waren signifikant, wenn  $p < 0,05$  galt (*t*-Test). Für die Auswertung des nRP wurden mindestens vier Wiederholungen pro Leguminosenart, Behandlung und Messzeit verwendet (10 Wiederholungen wurden entfernt). Bei der Auswertung des UDP wurden mindestens zwei Wiederholungen (16 Wiederholungen wurden entfernt) betrachtet. Heterogene Versuchsvarianzen sowie Restvarianzen wurden dabei berücksichtigt.

##### **4.1.5.3 Verdaulichkeitsbestimmung**

Die Verdaulichkeitskoeffizienten wurden als Differenz der Aufnahme und Kotabgabe geteilt durch die Futteraufnahmemenge jedes Tieres berechnet. Da die Futterreste  $< 2\%$  waren,

wurden diese in Anlehnung der Methodenvorschrift (GfE, 1991) für die Verdaulichkeitsberechnung nicht mitberücksichtigt. Die gemessene Gesamtenergie (GE) und die scheinbaren Verdaulichkeiten wurden anschließend zur Energieberechnung (GE, ME, NEL) herangezogen und gemäß GfE (2001) wie folgt berechnet:  $GE \text{ [MJ/kg TM]} = 0,0239 \times RP + 0,0398 \times RF + 0,0201 \times RFa + 0,0175 \times NfE$ ;  $ME \text{ [MJ/kg TM]} = 0,0312 \times \text{verdauliche RF} + 0,0136 \times \text{verdauliche RFa} + 0,0147 (\text{verdauliche OM} - \text{verdauliches RF} - \text{verdauliche RFa}) + 0,00234 \times RP$  und  $NEL \text{ [MJ/kg TM]} = 0,6 (1 + 0,004 (q - 57)) \times ME$ , wobei  $q = ME/GE \times 100$  entspricht. Die Statistische Analyse wurde unter der Verwendung von SAS 9.4 (SAS Institut Inc., Cary, NC, USA) durchgeführt. Mit Hilfe des *t*-Testes wurden die Verdaulichkeitskoeffizienten der Erbsen (nativ, siliert + getoastet) bei einem Signifikanzniveau von  $p < 0,05$  verglichen. Die Homogenität der Daten wurde mit dem F-Test bestätigt.

## 4.2 Ergebnisse und Diskussion

In der vorliegenden Untersuchung wurden die Erbsen und Ackerbohnen zu ausgewählten Reifezeitpunkten geerntet, um die Nährstoff- und Ertragsentwicklung sowie phytosanitäre Belastungen (u.a. Schadinsekten, Mikroorganismen, Pilze) im späten Reifeverlauf zu analysieren. Die Körner wurden mit einer TM von 70 % geerntet oder rückbefeuchtet, mit und ohne Zugabe von MSB siliert und anschließend mit unterschiedlichen Intensitäten der Behandlungstemperatur, -dauer und -menge wärmebehandelt. In dem nachfolgenden Abschnitt werden die Ergebnisse und die dazugehörigen Diskussionen in den Rubriken „**Früh ernten** von Erbsen und Ackerbohnen“, „**Silierung** teigreifer Erbsen und Ackerbohnen“, „**Wärmebehandlung** siliertes Erbsen und Ackerbohnen“ sowie „**Fütterungstauglichkeit** siliert getoasteter Erbsen und Ackerbohnen“ klassifiziert.

### 4.2.1 Früh ernten von Erbsen und Ackerbohnen

Die Reifebestimmung erfolgte über die Bonitur der Pflanzen in Anlehnung an die BBCH-Skala für Erbsen (Tabelle Anhang 14) und Ackerbohnen (Tabelle Anhang 15) sowie der TM-Bestimmung des Korns. Der Beobachtungszeitraum begann mit der „Kornbildung“ (15 % TM) und endete mit der „Trockenreife“ (> 85 % TM). In dieser Rubrik wurde die Nährstoffentwicklung (Proteinqualität, Kohlenhydratfraktionen), die Morphologie und das phytosanitäre Vorkommen (Mikrobiom, Ackerbohnenkäfer) während der Kornreife von Erbsen und Ackerbohnen dargestellt.

#### 4.2.1.1 Nährstoffentwicklung während der Kornreife

**Ergebnisse (Proteinqualität)** Die Einlagerung von Protein sowie die entsprechende Proteinqualität über den Zeitraum der Kornentwicklung der betrachteten Körnerleguminosen stellt sich nachfolgend (Tabelle 10, Erbsen; Tabelle 11, Ackerbohnen) dar.

**Tabelle 10:** Entwicklung des Proteingehaltes sowie der Proteinqualität während der Kornreife der Erbse „Astronaut“ (MW; n = 3)

[% d. RP]	Erbse „Astronaut“					p-Wert	SEM
	Korn- bildung	Beginn Grünreife	Grün- reife	Beginn Teigreife	Trocken- reife		
TM [g/kg OM]	166 <sup>c</sup>	264 <sup>d</sup>	282 <sup>c</sup>	507 <sup>b</sup>	835 <sup>a</sup>	< 0,001	1,870
Rohprotein [g/kg TM]	320 <sup>a</sup>	245 <sup>b</sup>	238 <sup>c</sup>	226 <sup>d</sup>	223 <sup>d</sup>	< 0,001	0,562
Proteinlöslichkeit	82,0 <sup>a</sup>	71,9 <sup>d</sup>	72,4 <sup>d</sup>	75,4 <sup>c</sup>	77,6 <sup>b</sup>	< 0,001	0,244
A	70,5 <sup>a</sup>	31,9 <sup>b</sup>	30,2 <sup>b</sup>	9,00 <sup>c</sup>	6,87 <sup>d</sup>	< 0,001	0,234
B1	10,3 <sup>d</sup>	40,4 <sup>c</sup>	42,1 <sup>c</sup>	66,3 <sup>b</sup>	70,7 <sup>a</sup>	< 0,001	0,252
B2	18,4 <sup>d</sup>	26,3 <sup>a</sup>	26,6 <sup>a</sup>	23,7 <sup>b</sup>	21,0 <sup>c</sup>	< 0,001	0,187
B3	0,60	1,20	0,40	0,30	0,80	n.s.	0,137
C	0,20 <sup>b</sup>	0,50 <sup>a</sup>	0,60 <sup>a</sup>	0,60 <sup>a</sup>	0,60 <sup>a</sup>	0,008	0,031

Erbse „Astronaut“, Probenmaterial 3 (Tabelle 6); A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; B2, mäßig schnell abbaubares Reineiweiß; B3, langsam abbaubares Reineiweiß; C, unlösliches zellwandgebundenes Protein; MW, Mittelwert; n.s., nicht signifikant; OM, Organische Masse; RP, Rohprotein; TM, Trockenmasse; PL, Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$

Der Rohproteingehalt lag zum Zeitpunkt der Kornbildung (15 % TM) bei rund 300 g/kg TM. Mit zunehmender Entwicklung sank der Rohproteingehalt und blieb zum Zeitpunkt der Teigreife (50 % TM) konstant bei rund 225 g/kg TM ( $p < 0,001$ ). Die Proteinlöslichkeit stieg mit Ausnahme zur Kornbildung (80 % des RP) von rund 72 % auf annähernd 78 % an ( $p < 0,001$ ). Der Anteil der Proteinfraction A (sofort löslicher Nicht-Protein-Stickstoff (NPN)) nahm mit zunehmender Abreife um rund 60 %-Punkte signifikant ab, zu Gunsten gleicher Anteile der Proteinfraction B1 (+ 60 %-Punkte; lösliches schnell abbaubares Reineiweiß). Der Anteil der B2-Proteinfraction (mäßig schnell abbaubares Reineiweiß) schwankte zwischen 20 % und 30 % des RP. Der Anteil der B3-Proteinfraction (langsam abbaubares Reineiweiß) blieb über den Abreifezeitraum annähernd konstant. Der Anteil unlöslicher Proteinfractionen lag unter einem Prozent. Bei der untersuchten Ackerbohne „Taifun“ (Tabelle 11) blieb der Rohproteingehalt über den Abreifezeitraum, mit Ausnahme zur Grünreife (- 30 g/kg TM; TM = 30 %), bei rund 330 g/kg TM annähernd konstant. Ebenso blieb die Proteinlöslichkeit bei rund 78 % des RP unverändert. Der Anteil der Proteinfraction A verringerte sich um 50 %-Punkte zu Gunsten steigender Anteile der Proteinfraction B1 um rund 40 %-Punkte. Die verbleibenden Proteinfractionen B2, B3 und C blieben unverändert.

**Tabelle 11:** Entwicklung des Proteingehaltes sowie der Proteinqualität während der Kornreife der Ackerbohne „Taifun“ (MW; n = 3)

[% d. RP]	Ackerbohne „Taifun“					p-Wert	SEM
	Korn- bildung	Grün- reife	Beginn Teigreife	Teig- reife	Beginn Trocken- reife		
TM [g/kg OM]	171 <sup>e</sup>	307 <sup>d</sup>	499 <sup>c</sup>	719 <sup>b</sup>	776 <sup>a</sup>	< 0,001	5,298
Rohprotein [g/kg TM]	322 <sup>ab</sup>	292 <sup>c</sup>	313 <sup>b</sup>	326 <sup>ab</sup>	335 <sup>a</sup>	< 0,001	1,638
Proteinlöslichkeit	77,9	77,4	79,4	78,2	78,3	n.s.	0,274
A	56,3 <sup>a</sup>	22,8 <sup>b</sup>	15,3 <sup>c</sup>	12,3 <sup>cd</sup>	13,1 <sup>d</sup>	< 0,001	0,287
B1	21,6 <sup>c</sup>	54,6 <sup>b</sup>	64,1 <sup>a</sup>	65,9 <sup>a</sup>	65,2 <sup>a</sup>	< 0,001	0,315
B2	21,3	21,4	19,3	19,6	19,6	n.s.	0,361
B3	0,20	0,50	0,43	1,40	1,50	n.s.	0,144
C	0,60	0,70	0,83	0,73	0,63	n.s.	0,045

Ackerbohne „Taifun“, Probenmaterial 8 (Tabelle 6); A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; B2, mäßig schnell abbaubares Reineiweiß; B3, langsam abbaubares Reineiweiß; C, unlösliches zellwandgebundenes Protein; MW, Mittelwert; n.s., nicht signifikant; OM, Organische Masse; RP, Rohprotein; TM, Trockenmasse; Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$

**Ergebnisse (Kohlenhydratfraktionen)** Die Veränderung der Kohlenhydratfraktionen der untersuchten Erbse „Astronaut“ (Probenmaterial 5; Tabelle 6) wird in der Tabelle 12 dargestellt.

**Tabelle 12:** Entwicklung der Kohlenhydratparameter während der Kornreife der Erbse „Astronaut“ (MW; n = 3)

[g/kg TM]	Erbse „Astronaut“					p-Wert	SEM
	Korn- bildung	Beginn Grünreife	Grün- reife	Beginn Teigreife	Trocken- reife		
Rohfaser	43,0 <sup>d</sup>	81,2 <sup>a</sup>	73,3 <sup>b</sup>	60,7 <sup>c</sup>	63,3 <sup>c</sup>	< 0,001	0,604
Stärke	195 <sup>d</sup>	446 <sup>c</sup>	464 <sup>b</sup>	532 <sup>a</sup>	526 <sup>a</sup>	< 0,001	0,825
Zucker	260 <sup>a</sup>	139 <sup>b</sup>	107 <sup>bc</sup>	63,3 <sup>c</sup>	53,0 <sup>c</sup>	< 0,001	6,132
NFC	545 <sup>e</sup>	596 <sup>d</sup>	617 <sup>c</sup>	631 <sup>b</sup>	644 <sup>a</sup>	< 0,001	1,194
aNDFom	73,0 <sup>c</sup>	108 <sup>a</sup>	95,0 <sup>ab</sup>	95,3 <sup>ab</sup>	87,7 <sup>bc</sup>	0,001	1,707
ADFom	56,0 <sup>c</sup>	92,7 <sup>a</sup>	92,3 <sup>a</sup>	77,3 <sup>ab</sup>	74,7 <sup>b</sup>	< 0,001	1,737

Erbse „Astronaut“, Probenmaterial 5 (Tabelle 6); Kornbildung, TM = 16,6 %; Beginn Grünreife, TM = 26,4 %; Grünreife, TM = 28,2 %; Beginn Teigreife, TM = 50,7 %; Trockenreife, TM = 83,5 %; ADFom, saure Detergenzienfaser („acid detergent fibre“) abzüglich Rohasche; aNDFom, Neutrale Detergenzienfaser („neutral detergent fibre“) behandelt mit einer hitzestabilen Amylase abzüglich Rohasche; MW, Mittelwert; NFC, Nicht-Faser-Kohlenhydrate; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$

Der Rohfasergehalt lag zu Beginn der Untersuchung (15 % TM) bei rund 40 g/kg TM, verdoppelte sich signifikant mit Beginn der Grünreife (30 % TM) und erreichte bereits zur Teigreife (50 % TM) einen konstanten Wert von rund 60 g/kg TM. In der frühen Phase der Kornbildung (15 % TM) befand sich der Stärkegehalt bei 200g/kg TM. Bereits zu Beginn der Grünreife stieg dieser auf 450 g/kg TM an. Zum Zeitpunkt der Teigreife hatten die untersuchten Erbsen einen Stärkegehalt von 530 g/kg TM ( $p < 0,001$ ). Der Zuckergehalt nahm mit

zunehmender Abreife um annähernd 200 g/kg TM ab ( $p < 0,001$ ). Der Gehalt an aNDFom und ADFom verhielt sich entsprechend der Entwicklung des Rohfasergehaltes. Die nachfolgende Tabelle 13 gibt die Entwicklung ausgewählter Parameter zur Beschreibung der Kohlenhydratbeschaffenheit bei der Ackerbohne „Taifun“ wieder.

**Tabelle 13:** Entwicklung der Kohlenhydratfraktionen während der Kornreife der Ackerbohne „Taifun“ (MW;  $n = 3$ )

[g/kg TM]	Ackerbohne „Taifun“					<i>p</i> -Wert	SEM
	Kornbildung	Grünreife	Beginn Teigreife	Teigreife	Beginn Trockenreife		
Rohfaser	119 <sup>a</sup>	107 <sup>b</sup>	80,7 <sup>c</sup>	73,3 <sup>d</sup>	73,7 <sup>d</sup>	< 0,001	0,313
Stärke	251 <sup>b</sup>	443 <sup>a</sup>	455 <sup>a</sup>	438 <sup>a</sup>	439 <sup>a</sup>	< 0,001	2,263
Zucker	163 <sup>a</sup>	58,7 <sup>b</sup>	47,0 <sup>bc</sup>	42,0 <sup>c</sup>	39,0 <sup>c</sup>	< 0,001	1,597
NFC	454 <sup>b</sup>	507 <sup>a</sup>	506 <sup>a</sup>	495 <sup>a</sup>	496 <sup>a</sup>	< 0,001	1,526
aNDFom	152 <sup>a</sup>	138 <sup>ab</sup>	124 <sup>bc</sup>	115 <sup>cd</sup>	105 <sup>d</sup>	< 0,001	1,424
ADFom	152 <sup>a</sup>	135 <sup>a</sup>	96,0 <sup>b</sup>	104 <sup>b</sup>	93,7 <sup>b</sup>	< 0,001	2,279

Ackerbohne „Taifun“, Probenmaterial 8 (Tabelle 6); Kornbildung, TM = 17,1 %; Grünreife, TM = 30,7 %; Beginn Teigreife, TM = 49,9 %; Teigreife, TM = 71,9 %; Beginn Trockenreife, TM = 77,6 %; ADFom, saure Detergentienfaser („acid detergent fibre“) abzüglich Rohasche; aNDFom, Neutrale Detergentienfaser („neutral detergent fibre“) behandelt mit einer hitzestabilen Amylase abzüglich Rohasche; MW, Mittelwert; NFC, Nicht-Faser-Kohlenhydrate; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$

Die untersuchte Ackerbohne „Taifun“ schloss bereits zur Grünreife (30 % TM) mit einem Stärkegehalt von rund 440 g/kg TM die Stärke- und NFC-einlagerung ab. Der Fasergehalt (RfA, aNDFom, ADFom) sank mit zunehmender Abreife um rund 50 g/kg TM ( $p < 0,001$ ).

**Diskussion** Der Rohproteingehalt der untersuchten Ackerbohnen stieg leicht über den Abreifeverlauf an. Bei den Erbsen reduzierte sich dieser um annähernd 100 g/kg TM signifikant. Die Proteinlöslichkeit blieb bei den Ackerbohnen und Erbsen über den betrachteten Abreifezeitraum annähernd konstant. Es entstand allerdings eine signifikante Reduzierung der Proteinfraktion A zu Gunsten steigender Anteile der Proteinfraktion B1. Native Erbsen und Ackerbohnen haben somit eine höhere Proteinlöslichkeit und damit höhere Anteile sofort (Proteinfraktion A) oder leichtlöslicher Proteine (Proteinfraktion B1) im Vergleich zu SES (~ 20 % des RP) und RES (~ 30 % des RP). Die deutliche und signifikante Reduzierung des Zuckergehaltes der Erbsen um rund 200 g/kg TM war durch die Bildung der Stärke als Ausgangssubstrat im Korn zu begründen. Vor allem Saccharose ist ein entscheidender Baustein zur Bildung der Stärke (FRIAS et al., 1996). Ackerbohnen enthielten zur „Kornbildung“ annähernd 100 g/kg TM weniger Zucker im Vergleich zu den betrachteten Erbsen. Diese Differenz lässt sich nach Angaben von FRIAS et al. (1996) bestätigen, die bei der Untersuchung ihrer Ackerbohnenkörner (auch Lupinen) in dieser frühen Phase lediglich 6 % Saccharose in der TM nachweisen konnten. Der Stärkegehalt erhöhte sich bei den Erbsen signifikant um rund



300 g/kg TM und führte zu einer Anteilsverschiebung der Rohnährstoffe sowie zu einer Reduzierung des Rohproteingehaltes im Verhältnis zur TM. Die Nährstoffeinlagerung, insbesondere an Stärke und Protein waren zu Beginn der „Teigreife“ bei einer Korn-TM von 50 % abgeschlossen. Mit zunehmender Abreife blieb der Nährstoffgehalt unverändert und war vergleichbar mit anderen ausgereiften Erbsensorten (> 80 % TM „Trockenreife“; Erbse: 240 g RP/kg TM, 490 g Stärke/kg TM; Ackerbohne: 300 g RP/kg TM, 415 g Stärke/kg TM; u.a. DLG-FUTTERWERTTABELLE, 1997; FREITAG, 2006; GEFROM, 2012; siehe Tabelle 1 und Tabelle 3; Tabelle 14, Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17).

#### 4.2.1.2 Morphologie während der Kornreife

**Ergebnisse (Morphologie)** Um Nährstoffveränderungen während der Abreife auch morphologisch nachweisen zu können, wurden Rasterelektronenmikroskopische (REM)-Bilder zu dem jeweiligen Entwicklungsstadium der Körner hergestellt. Die entstandenen Aufnahmen sind der Abbildung Anhang 13 (Erbse) und Abbildung Anhang 14 (Ackerbohne) zu entnehmen. Sowohl bei der Ackerbohne „Taifun“ (Probenmaterial 8) als auch bei der betrachteten Erbse „Astronaut“ (Probenmaterial 5) waren zum Zeitpunkt der Kornbildung (15 % TM) kaum Stärkegranulae darstellbar. Die wenigen sichtbaren Stärkegranulae waren mit 8 – 10 µm klein und wiesen noch nicht die typische nierenförmige und glatte Form auf. Weiterhin waren neben langen röhrenförmigen Bestandteilen, komplexe Strukturen erkennbar. Mit Beginn der Grünreife (30 % TM) erhöhte sich die Anzahl der Stärkegranulae sowie die Größe (12 – 30 µm) dieser. Im weiteren Abreifeverlauf blieben die faserigen Strukturen weniger ausgebildet und es waren keine Unterschiede in der Morphologie Erbsen und Ackerbohnen zu erkennen.

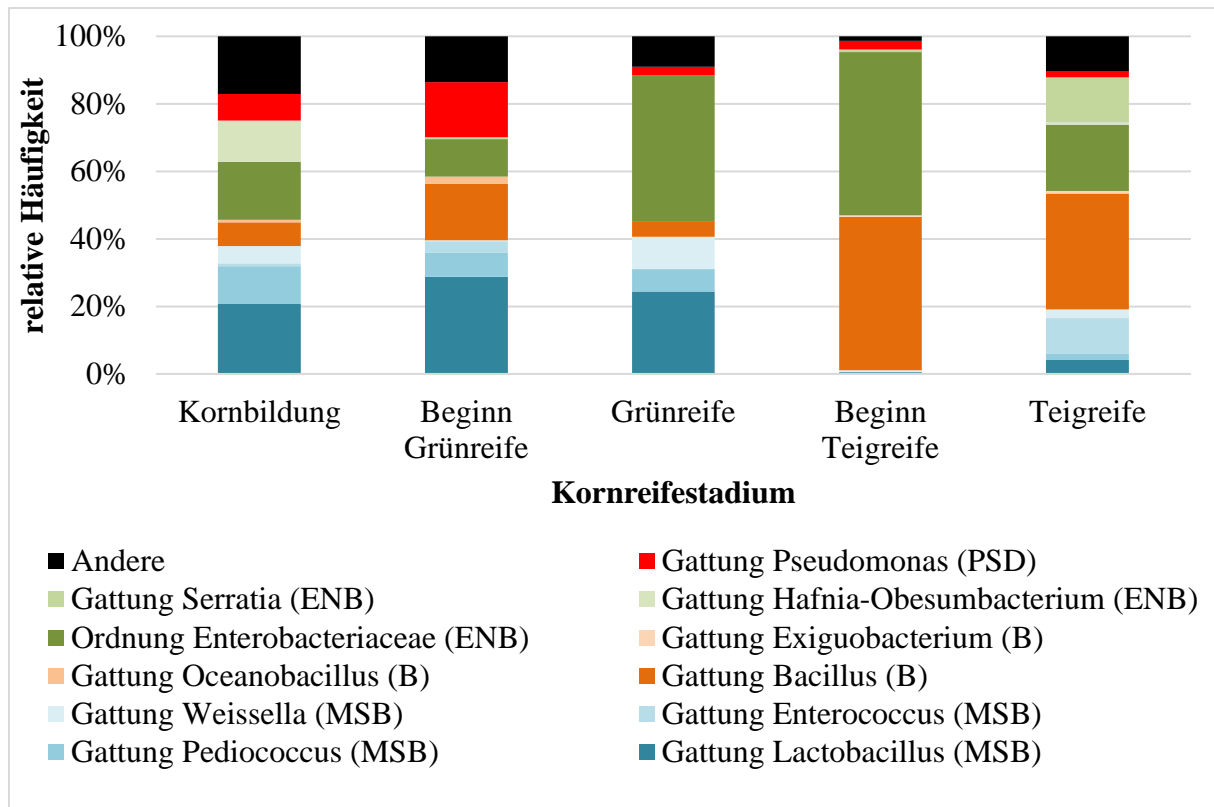
**Diskussion** Die elektronenmikroskopischen Aufnahmen der Erbsen- (Abbildung Anhang 13) und Ackerbohnenkörner (Abbildung Anhang 14) bestätigen die rasche Bildung von Stärke anhand „wachsender“ Stärkekörner bis zur Phase der „Teigreife“. In der frühen Kornentwicklung (15 % TM) waren kaum Stärkegranulae zu erkennen. Die sichtbaren röhrenförmigen Partikel waren auf Bestandteilen der Samenschale (Epidermis, Hypodermis, Chlorenchym) zurückzuführen (ROCHAT & BOUTIN, 1992; VAN DONGEN et al., 2003). Chlorenchym enthält eine Vielzahl an Chloroplasten, die vor allem in der frühen Phase der Kornentwicklung die Stärkebildung ermöglichen (ROCHAT & BOUTIN, 1992). Die Einlagerung der Stärkekörner findet in den Parenchymzellen statt (ROCHAT & BOUTIN, 1992), die in der vorliegenden Untersuchung als taschenähnliche Zellen, entweder geöffnet (Abbildung Anhang 11) bzw. zerstört (Abbildung Anhang 13), sichtbar wurden. Mit zunehmender Abreife und Entwicklung der Körner erhöhte sich die Häufigkeit und die Größe, was sich durch den

steigenden Stärkegehalt bestätigen ließ. Die Restrohstoffe, im Besonderen Rohprotein und Rohfaser, befanden sich überwiegend in den sichtbaren Bruchstücken der elektronenmikroskopischen Aufnahmen. Die Länge der nierenförmigen Stärkegranulae betrug am Beispiel der Sorte „Alvesta“ 25 - 35  $\mu\text{m}$ . Diese Maße decken sich mit den literarischen Angaben von 20 - 40  $\mu\text{m}$  (RATNAYAKE et al., 2002; MA et al. 2017; MA et al. 2017a). Die Stärkegranulae der untersuchten Ackerbohne „Taifun“ waren mit einer Länge von 15 - 30  $\mu\text{m}$  etwas kleiner im Vergleich zur Erbsengranula, aber vergleichbar mit Angaben von MA et al. (2017a) mit mittleren Längen von 18 - 27  $\mu\text{m}$ .

#### **4.2.1.3 Phytosanitäre Vorkommen während der Kornreife**

Ein Ziel der frühen Ernte (70 % TM) bestand darin, das Vorkommen phytosanitärer Belastungen auf dem Korn zu reduzieren. Aus diesem Grund wurden ausgewählte Sorten von Erbsen und Ackerbohnen auf ihr natürliches Mikrobiom (Bakterien und Pilze) sowie das Vorkommen von Insekten, am Beispiel des Ackerbohnenkäfers, während der Kornreife untersucht.

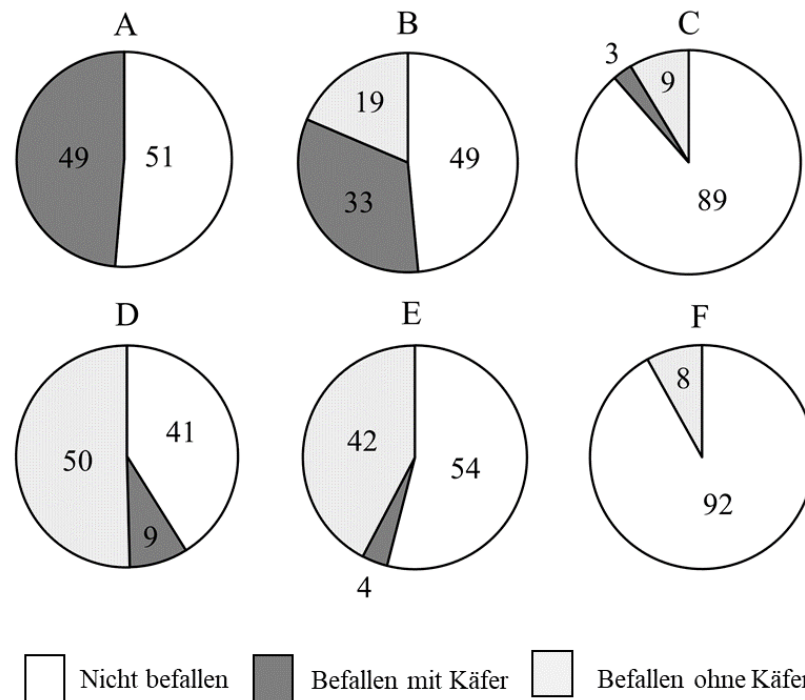
**Ergebnisse (Mikrobiom Kornreife)** Die genetischen Untersuchungen des Mikrobioms wurden an der Erbse „Astronaut“ (Probenmaterial 4) zu ausgewählten Phasen der Kornreife vorgenommen. Das natürliche Mikrobiom wurde nach Bakterien und Pilzen klassifiziert. Die Abbildung 3 verdeutlicht dabei die Anteile der vorkommenden Bakterien. Die biologische Vielfalt der Pilze auf dem Erbsenkorn wird dabei in der Abbildung Anhang 16 dargestellt. Teile dieser Ergebnisse wurden bereits in BACHMANN et al. (2022a) publiziert.



**Abbildung 3:** Mittlere relative Häufigkeit epiphytischer Bakterien im Verhältnis zur Gesamtbakterienanzahl der nativen Erbse „Astronaute“ (Probenmaterial 4) zu ausgewählten Kornreifestadien (n = 2; Kornbildung, TM = 31 %; Beginn Grünreife, TM = 39 %; Grünreife, TM = 43 %; Beginn Teigreife, TM = 55 %; Ende Teigreife, TM = 74 %; B, *Ordnung* Bacillales; ENB, *Ordnung* Enterobakterien; MSB, *Ordnung* Milchsäurebakterien; PSD, *Ordnung* Pseudomonadaceae)

Auf den untersuchten Erbsen wurden hauptsächlich Milchsäurebakterien (MSB, blau gefärbt), Enterobakterien (ENB, grün gefärbt) sowie Bacillales (B, orange gefärbt) nachgewiesen. Bis einschließlich der Grünreife (30 % TM) befanden sich mit einer relativen Häufigkeit von rund 40 % MSB, überwiegend der Gattung *Lactobacillus*, auf dem Erbsenkorn. Zur Phase der Teigreife (50 - 70 % TM) waren keine oder kaum MSB nachweisbar, während die relative Häufigkeit an Enterobakterien anstieg (30 % auf annähernd 50 %). Ebenso erhöhte sich die relative Häufigkeit der Bakterien der Gattung *Bacillus* auf 45 %.

**Ergebnisse (Ackerbohnenkäfer)** Für diese Erhebungen wurden ausgewählte Sorten von Ackerbohnen auf das Vorkommen des Ackerbohnenkäfers (siehe Abbildung Anhang 26) untersucht. Dabei wurden je Sorte 500 g Körner (FM) hinsichtlich ihres Befalls (ohne, befallen mit Käfer sowie befallen ohne Käfer) sortiert und die entsprechenden Anteile ausgewogen. Die dabei entstandenen Ergebnisse wurden bereits in BACHMANN et al. (2020b) publiziert. Die nachfolgende Abbildung 4 gibt dabei die Anteile befallener sowie nicht befallener Körner ausgewählter Ackerbohnen Sorten wieder.



**Abbildung 4:** Anteil befallener Körner (500 g FM) mit dem Ackerbohnenkäfer bei ausgewählten Ackerbohnen Sorten (A, „Fuego“ zur Teigreife mit 70 % TM; B, „Fuego“ zur Trockenreife mit 80 % TM; C, „Espresso“, > 80 % TM; D, Mischung „Fuego/Taifun“, > 80 % TM; E, „Taifun“, Probenmaterial 7, > 80 % TM; F, „Scheunenfund Kuhnitzsch“, > 80 % TM; modifiziert nach BACHMANN et al., 2020b)

Die Ackerbohne „Fuego“ (Bild A) zeigte zum Ende der Teigreife (70 % TM) einen Befall von rund 50 % der Körner. Zu diesem Zeitpunkt verweilten noch alle Ackerbohnenkäfer in den Körnern. Bereits 10 Tage später (77 % TM, Bild B) waren bei rund 30 % der befallenen Körner (von rund 50 % insgesamt befallener Körner), anhand der geöffneten Kutikula am Fraßloch, ein Ausflug einzelner Ackerbohnenkäfer erkennbar. Auch bei den untersuchten Ackerbohnen „Mischung“ (Bild D) und „Taifun“ (Bild E) waren rund 50 % der bonitierten Körner befallen und auf Grund der späten Reife (> 80 % TM) überwiegend leer. Die Sorte „Espresso“ (Bild C) war mit rund 90 % annähernd frei von einem Befall mit dem Ackerbohnenkäfer. Ebenso die Sorte „Scheunenfund Kuhnitzsch“ (Bild F), eine kleine (8 mm) schwarzgefärbte Bohne bei der die genaue Sortenbezeichnung auf Grund des hohen Alters (schätzungsweise > 50 Jahre) nicht identifizierbar war. Im Zuge der durchgeführten Bonituren wurde am Beispiel der Ackerbohne „Fuego“ ein Entwicklungszyklus für den Ackerbohnenkäfer (Abbildung Anhang 27) erstellt.

**Diskussion** Siliergüter tragen natürliche Mikroflora, oft unbekannter Größe und Zusammensetzung, die ebenso den Siliererfolg beeinflussen können (PAHLOW et al., 2003). Die Vielfalt des untersuchten Mikrobioms sank mit zunehmender Abreife des Korns. Vor allem die dargestellten MSB (v.a. *Lactobacillus*) gingen in ihrem Verhältnis zu anderen Mikroben in der

frühen Reifephase (15 % TM) bis zur Phase der „Teigreife“ (70 % TM) deutlich zurück (- 40 %-Punkte). Das Vorkommen von Bacillus-Bakterien wie *Bacillus* sowie Enterobakterien (v.a. *Enterobacteriaceae*) stieg entsprechend. Der natürliche Besatz an „Silierschädlingen“ oder „unerwünschten Mikroorganismen“ wie es v.a. Enterobakterien und Bacillus-Bakterien darstellen, lag bei der Korn-TM von rund 70 % dreifach über dem natürlichen Vorkommen von MSB. Enterobakterien sind fakultativ anaerob und meist nicht pathogen, gelten dennoch bei der Silierung als unerwünscht, da sie mit den MSB um den verfügbaren Zucker konkurrieren und vorhandene Proteine abbauen können (ELFERINK et al., 2000). Milchsäurebildende Bakterien wirken mit ihrer hohen Säuretoleranz antagonistisch und verhindern ein Ausbreiten dieser Silierschädlinge. Da Körnerleguminosen eine schlechte Siliereignung aufweisen (u.a. GEFROM et al., 2012; eigene Ergebnisse), bekräftigt das geringe Vorkommen natürlich vorhandener MSB die Zugabe von MSB als Siliermittel bei früh geernteten Erbsen und Ackerbohnen.

Der Ackerbohnenkäfer war in allen untersuchten Proben nachweisbar (Abbildung 4). Die Körner der Sorten „Fuego“ und „Taifun“ waren zu einem großen Anteil durch Fraßlöcher der Ackerbohnenkäfer gekennzeichnet. Das sehr alte Probenmaterial („Scheunenfund Kuhnitzsch“) sowie die Sorte „Espresso“ waren hingegen kaum belastet. Die Gründe hierfür können einerseits im hohen Tanningehalt, als natürlicher Eigenschutz der Pflanzen, oder in einer erfolgreichen Insektizidbehandlung (v.a. bei der Sorte „Espresso“) vermutet werden. Der Fraß des Ackerbohnenkäfers führt durch einen entsprechenden Qualitätsabzug für die Nutzung als Saatgut (Keimfähigkeit), Nahrungsmittel (Ästhetik) und auch Futtermittel zu wirtschaftlichen Einbußen, wobei letzteres auf Grund der unveränderten Nährstoffqualität nach Befall (BACHMANN et al., 2020a) unbegründet scheint. Die frühe Ernte, z.B. der Ganzpflanze (40 % Korn-TM) oder der teigreifen Körner (max. 70 % TM) mit anschließender Silierung, verhindert den Ausflug des Ackerbohnenkäfers aus dem Korn und damit die Ausbreitung sowie die Bildung einer neuen Generation im Folgeanbaujahr. Die Zerkleinerung (Quetschen) und anschließende Silierung der Körner führte durch die mechanischen Kräfte und zeitnahen anaeroben Bedingungen zum Absterben der in den Körnern befindlichen Käfer (siehe Abbildung Anhang 27). Daher kann auf den Einsatz meist kostenintensiver Insektizide im Anbau der Ackerbohnen verzichtet werden.

#### 4.2.1.4 Nährstoffgehalt teigreifer Erbsen und Ackerbohnen

Die vorgelagerte Ernte von Erbsen und Ackerbohnen kann ohne Verluste an Nährstoffen und Ertrag ab 50 % TM durchgeführt werden. Allerdings gestaltet sich die großtechnische Ernte (Drusch) auf Grund technischer Widrigkeiten (u.a. Verstopfungsgefahr des Dreschers, langsame Fahrgeschwindigkeit, Ertragsverlust durch unvollständiges Auslösen der Körner, Verschmieren der Dreschsiebe) schwierig. Eigene Vegetationsbonituren bestätigen bei einer Korn-TM von 50 % einen niedrigen TM-Gehalt der Hülse (30 % TM) sowie der Restpflanze (Blätter, Stängel, Hülse) von nur 20 % TM bei Erbsen (siehe Abbildung Anhang 31) und Ackerbohnen (siehe Abbildung Anhang 32). Bei einer Korn-TM von 70 % erhöhte sich zumindest die TM der Hülsen auf 55 %, sodass diese in der Druschkammer leichter brechen und ein schonendes Auslösen der Körner möglich ist. Um die Grenzen der Silierbarkeit von Körnerleguminosen über einer TM von 65 % (z.B. GEFROM, 2012) festzustellen sowie aus der genannten Praxisrelevanz heraus, wurden die Erbsen und Ackerbohnen zur Phase der Teigreife mit rund 70 % geerntet und untersucht.

**Ergebnisse (Proteinqualität)** Die Proteinqualität wurde in der nachfolgenden Darstellung anhand des Rohproteingehaltes sowie die Löslichkeit des Proteins (Proteinlöslichkeit) anhand einzelner Proteinfractionen beschrieben. Die Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse der im Versuch eingesetzten Erbsensorten.

**Tabelle 14:** Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Proteinqualität der verwendeten Erbsensorten (MW; n = 3)

[% d. RP]	Erbsen				p-Wert	SEM
	Alvesta	Astronauten	Astronauten*	E.F.B.33		
TM [g/kg OM]	889 <sup>a</sup>	844 <sup>b</sup>	735 <sup>c</sup>	908 <sup>a</sup>	< 0,001	2,623
Rohprotein [g/kg TM]	200 <sup>b</sup>	229 <sup>a</sup>	227 <sup>a</sup>	220 <sup>a</sup>	< 0,001	1,083
Reineiweiß [g/kg TM]	174 <sup>c</sup>	210 <sup>a</sup>	210 <sup>a</sup>	195 <sup>b</sup>	< 0,001	0,583
Proteinlöslichkeit <sup>1</sup>	74,8 <sup>b</sup>	82,0 <sup>a</sup>	75,1 <sup>b</sup>	68,8 <sup>c</sup>	< 0,001	0,533
A	7,43	8,37	7,13	8,70	n.s.	0,210
B1	67,4 <sup>b</sup>	73,6 <sup>a</sup>	68,0 <sup>b</sup>	60,1 <sup>c</sup>	< 0,001	0,523
B2	23,6 <sup>ab</sup>	n.a.	22,9 <sup>b</sup>	28,2 <sup>a</sup>	0,037	0,676
B3	1,03	n.a.	1,50	1,83	n.s.	0,301
C	0,63 <sup>b</sup>	n.a.	0,47 <sup>b</sup>	1,13 <sup>a</sup>	0,004	0,051

<sup>1</sup> Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1; „Alvesta“, Probenmaterial 1; „Astronauten“, Probenmaterial 3; „Astronauten\*“, Probenmaterial 4; „E.F.B. 33“, Probenmaterial 5 (Tabelle 6); A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; B2, mäßig schnell abbaubares Reineiweiß; B3, langsam abbaubares Reineiweiß; C, unlösliches zellwandgebundenes Protein; E.F.B.33, Sortenname Wintererbsen; MW, Mittelwert; n.a., nicht analysiert; n.s., nicht signifikant; RP, Rohprotein; TM, Trockenmasse; OM, Organische Masse; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$

Der Rohproteingehalt lag bei rund 225 g/kg TM und der Reineiweißgehalt bei rund 200 g/kg TM. Eine Ausnahme stellte dabei die Sorte „Alvesta“ dar, die im Rohproteingehalt und entsprechend auch im Reinproteingehalt rund 20 g/kg niedriger lag. Die trockenreif geerntete Sorte „Astronaut“ (Probenmaterial 3) hatte mit 82 % die höchste Proteinlöslichkeit. In der früheren Reifephase der Erbse „Astronaut“ (70 % TM) lag die Proteinlöslichkeit noch bei 73 %. Die niedrigste Proteinlöslichkeit erreichte die Wintererbse „E.F.B.33“ mit einem mittleren Wert von 69 %. Die Proteinfraction A lag sortenübergreifend bei rund 7 %. Der Anteil der Proteinfraction B1 unterschied sich in einem Bereich von 60 % (Wintererbse) bis 74 % („Astronaut“, Probenmaterial 3) des RP. Der Anteil der Proteinfraction B2 lag mit Sortendifferenzen (5 %- Punkte) bei rund 25 % des RP. Die Summe der Proteinfraction B3 und C lag sortenübergreifend unter 3 % des RP. Die nachfolgende Tabelle 15 gibt die Parameter der Proteinqualität der verwendeten Ackerbohnen wieder.

**Tabelle 15:** Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Proteinqualität der verwendeten Ackerbohnsorten (MW; n = 3)

[% d. RP]	Ackerbohne			p-Wert	SEM
	Fanfare	Taifun	Taifun*		
TM [g/kg OM]	905 <sup>a</sup>	912 <sup>a</sup>	765 <sup>b</sup>	< 0,001	3,379
Rohprotein [g/kg TM]	264 <sup>c</sup>	288 <sup>b</sup>	325 <sup>a</sup>	< 0,001	2,650
Reineiweiß [g/kg TM]	237 <sup>b</sup>	235 <sup>b</sup>	285 <sup>a</sup>	< 0,001	1,474
Proteinlöslichkeit <sup>1</sup>	58,6 <sup>b</sup>	72,5 <sup>a</sup>	75,8 <sup>a</sup>	0,006	1,441
A	11,8	15,1	12,3	n.s.	0,663
B1	46,9 <sup>b</sup>	57,4 <sup>ab</sup>	63,5 <sup>a</sup>	0,022	1,745
B2	35,9 <sup>a</sup>	25,6 <sup>b</sup>	n.a.	0,038	1,687
B3	4,33	1,20	n.a.	n.s.	0,748
C	1,10 <sup>a</sup>	0,80 <sup>b</sup>	n.a.	0,021	0,041

<sup>1</sup> Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1; „Fanfare“ Probenmaterial 6; „Taifun“, Probenmaterial 7; „Taifun\*“, Probenmaterial 8 (Tabelle 6); A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; B2, mäßig schnell abbaubares Reineiweiß; B3, langsam abbaubares Reineiweiß; C, unlösliches zellwandgebundenes Protein; MW, Mittelwert; n.a., nicht analysiert; n.s., nicht signifikant; OM, Organische Masse; RP, Rohprotein; TM, Trockenmasse; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$

Der Rohproteingehalt schwankte von 260 g/kg TM bis rund 330 g/kg TM im Vergleich der Sorten ( $p < 0,001$ ). Die teigreif geerntete Sorte „Taifun“ (Probenmaterial 8) hatte mit rund 290 g/kg TM den höchsten Reineiweißgehalt ( $p < 0,001$ ). Während die Proteinlöslichkeit beider Taifunvarianten bei ca. 74 % lagen, wies das Protein der Sorte „Fanfare“ eine höhere Proteinbeständigkeit in Folge einer um annähernd 15 %-Punkte geringeren Proteinlöslichkeit auf. Die höhere Beständigkeit war auf den um rund 10 %-Punkte geringeren Anteil der B1-Proteinfraction sowie des um 10 %-Punkte höheren Anteils der B2-Fraktion zurückzuführen. Die verbleibenden Proteinfractionen A und B3 waren annähernd sortenübergreifend gleich. Die

Ackerbohne „Fanfare“ wies einen höheren Anteil der Proteinfraction C, im Vergleich zur Ackerbohne „Taifun“ auf. Für das Probenmaterial 8 (Ackerbohne „Taifun“) war auf Grund eingeschränkter Projektmittel die Analyse lediglich auf die Proteinfractionen A und B1 zur Bestimmung der Proteinlöslichkeit beschränkt.

**Ergebnisse (Kohlenhydratfraktionen)** Für die nachfolgende Darstellung wurden neben dem Rohfasergehalt ausgewählte Parameter der Kohlenhydratbeschaffenheit zusammenfassend dargestellt. In der Tabelle 16 sind die berechneten Mittelwerte der Parameter für die in der Untersuchung verwendeten Erbsen dargestellt.

**Tabelle 16:** Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Kohlenhydratfraktionen der verwendeten Erbsensorten (MW; n = 3)

[g/kg TM]	Erbsen				p-Wert	SEM
	Alvesta	Astronauten	Astronauten*	E.F.B.33		
Rohfaser	66,3 <sup>a</sup>	45,7 <sup>b</sup>	63,0 <sup>a</sup>	53,3 <sup>ab</sup>	0,011	1,744
Stärke	522 <sup>ab</sup>	536 <sup>a</sup>	522 <sup>ab</sup>	504 <sup>b</sup>	0,005	2,062
NFC	627	641	627	616	n.s.	5,471
aNDFom	136 <sup>a</sup>	84,3 <sup>b</sup>	110 <sup>ab</sup>	115 <sup>ab</sup>	0,042	5,091
ADFom	83,7 <sup>a</sup>	60,7 <sup>b</sup>	79,7 <sup>a</sup>	76,0 <sup>ab</sup>	0,019	2,051
ADL	5,33	3,67	4,33	10,7	n.s.	1,014
Hemicellulose	52,5	23,8	30,9	39,0	n.s.	4,072
Cellulose	78,3 <sup>a</sup>	56,8 <sup>b</sup>	75,4 <sup>a</sup>	65,5 <sup>ab</sup>	0,012	1,845

„Alvesta“, Probenmaterial 1; „Astronauten“, Probenmaterial 3; „Astronauten\*“, Probenmaterial 4; „E.F.B. 33“, Probenmaterial 5 (Tabelle 6); ADFom, saure Detergentienfaser („acid detergent fibre“) abzüglich Rohasche; aNDFom, Neutrale Detergentienfaser („neutral detergent fibre“) behandelt mit einer hitzestabilen Amylase abzüglich Rohasche; Cellulose = ADFom – ADL (Saures Detergentienlignin, „acid detergent lignin“); E.F.B.33, Sortenname Wintererbse; Hemicellulose = aNDFom – ADFom; MW, Mittelwert; NFC, Nicht-Faser-Kohlenhydrate; n.s., nicht signifikant; TM, Trockenmasse; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$

Der Rohfasergehalt lag, mit Ausnahme der Sorte „Astronauten“ (Probenmaterial 3), bei rund 60 g/kg TM. Die Wintererbse „E.F.B.33“ hatte mit rund 500 g/kg TM den geringsten Stärkegehalt ( $p = 0,005$ ). Der Gehalt der NFC lag bei rund 630 g/kg TM, wobei der aNDFom-Gehalt von 80 g/kg TM bis rund 140 g/kg TM differierte ( $p = 0,042$ ). Im Mittel betrug der ADFom-Gehalt, mit Ausnahme der teigreif geernteten Sorte „Astronauten“ (Probenmaterial 4), rund 80 g/kg TM. Der ADL-Gehalt lag sortenübergreifend unter 10 g/kg TM. Hemicellulose-Gehalte rangierten bei den betrachteten Erbsen zwischen 24 und 53 g/kg TM. Die Sorte „Astronauten“ (Probenmaterial 3) zeigte in dieser Betrachtung den niedrigsten Rohfaser-, aNDFom- und ADFom-Gehalt, hatte aber den höchsten Stärkegehalt. Der Kohlenhydratgehalt der betrachteten nativen Ackerbohnen ist in der nachfolgenden Tabelle 17 dargestellt.



**Tabelle 17:** Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Kohlenhydratfraktionen der verwendeten Ackerbohnsorten (MW; n = 3)

[g/kg TM]	Ackerbohne			p-Wert	SEM
	Fanfare	Taifun	Taifun*		
Rohfaser	99,7 <sup>a</sup>	68,3 <sup>b</sup>	85,0 <sup>ab</sup>	0,007	2,551
Stärke	403	447	423	n.s.	6,622
NFC	532 <sup>a</sup>	540 <sup>a</sup>	500 <sup>b</sup>	0,002	2,589
aNDFom	155 <sup>a</sup>	115 <sup>b</sup>	123 <sup>b</sup>	0,008	3,533
ADFom	132 <sup>a</sup>	90,0 <sup>b</sup>	112 <sup>a</sup>	0,002	2,771
ADL	7,00	7,00	12,00	n.s.	1,139
Hemicellulose	22,9	25,2	11,1	n.s.	3,080
Cellulose	125 <sup>a</sup>	82,7 <sup>b</sup>	100 <sup>b</sup>	0,005	3,192

„Fanfare“, Probenmaterial 6; „Taifun“, Probenmaterial 7; „Taifun\*“, Probenmaterial 8 (Tabelle 6); aNDFom, Neutrale Detergentienfaser („neutral detergent fibre“) behandelt mit einer hitzestabilen Amylase abzüglich Rohasche; ADFom, saure Detergentienfaser („acid detergent fibre“) abzüglich Rohasche; Hemicellulose = aNDFom – ADFom; Cellulose = ADFom – ADL (Saures Detergentienlignin, „acid detergent lignin“); MW, Mittelwert; NFC, Nicht-Faser-Kohlenhydrate; n.s., nicht signifikant; TM, Trockenmasse; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$

Die Ackerbohnsorten „Taifun“ wiesen mittlere Rohfasergehalte von rund 70 - 85 g/kg TM auf. Mit annähernd 100 g/kg TM enthielt die Ackerbohnsorte „Fanfare“ den höchsten Rohfasergehalt ( $p = 0,007$ ). Der Stärkegehalt lag sortenübergreifend bei rund 430 g/kg TM. Der NFC-Gehalt schwankte von 500 g/kg TM (Sorte „Taifun“, Probenmaterial 8) bis 540 g/kg TM (Sorte „Taifun“, Probenmaterial 7;  $p = 0,002$ ). Die Sorte „Fanfare“ unterschied sich mit einem aNDFom- sowie im ADFom-Gehalt von 155 g/kg TM und 130 g/kg TM zur Sorte „Taifun“ mit rund 120 g/kg TM bzw. 100 g/kg TM ( $p = 0,008$ ;  $p = 0,002$ ). Der Cellulosegehalt lag bei der Sorte „Fanfare“ mit 125 g/kg TM höher im Vergleich zur Sorte „Taifun“ (trockenreif, Probenmaterial 7: 83 g/kg TM; teigreif, Probenmaterial 8: 100 g/kg TM).

**Diskussion** Das verwendete Ausgangsmaterial bestand aus trockenreifen ( $> 80$  % TM) Körnern, die rückbefeuchtet wurden, um eine Vergleichbarkeit zu bisherigen Ergebnissen herstellen zu können sowie aus teigreifen Körnern mit 70 % TM. Bei den Erbsen wurden die Sorten „Alvesta“, „Astronaut“ und die Wintererbse „E.F.B.33“ auf Grund ihrer landwirtschaftlichen Bedeutung ausgewählt. Die Sorten „Alvesta“ und „Astronaut“ waren weißblühend und zählten zu den verbreitetsten Futtererbsen (Bundessortenamt, 2019) im konventionellen Anbau. Die Wintererbse „E.F.B.33“ war hingegen buntblühend und durch eine deutlich geringere Korngröße sowie Ertragspotential gekennzeichnet. Sie ist häufig im ökologischen Pflanzenbau in Kombination mit ausgewählten Getreidepflanzen (Winterweichweizen, Wintergerste) im Gemengeanbau zu finden. Die Sorte „Astronaut“ hatte den signifikant höchsten Rohprotein- und Reinproteingehalt (Tabelle 14). Bei der Sorte „Alvesta“ bestätigte sich der von KARALUS (2018) beschriebene sortenbedingt geringere

Rohproteingehalt (- 20 g/kg TM) als signifikant. Die Wintererbse „E.F.B.33“ hatte die geringste Proteinlöslichkeit auf Grund eines signifikant höheren Anteils der Proteinfraction B1. Damit stellt die Wintererbse „E.F.B.33“ durch ihre hohe Proteinstabilität im unbehandelten Zustand (rechnerisch 68 g/kg TM langsamlösliches Protein im Vergleich zur „Astronaut“ mit nur 41 g/kg TM) eine interessante Proteinquelle in der Wiederkäuerernährung dar, welche allerdings durch den geringen Ertrag (< 20 dt/ha) an Attraktivität im Anbau verliert. Die Sorte „Astronaut“ hatte zwar den höchsten Proteingehalt und zeichnet sich durch ein hohes Ertragspotential aus, ist allerdings im Hinblick auf die Wiederkäuerernährung durch die hohe Proteinlöslichkeit unbehandelt nur eingeschränkt einsetzbar. Die signifikanten Differenzen im Anteil der unlöslichen Proteinfraction C sollte auf Grund des geringen Niveaus nicht überbewertet werden. Bei den untersuchten Ackerbohnen ergaben sich sortenbedingte Unterschiede im Rohproteingehalt. Die tanninhaltige Sorte „Fanfare“ hatte eine deutlich geringere Proteinlöslichkeit von rund 15 %-Punkten im Vergleich zur tanninfreien Sorte „Taifun“. Tannine hemmen, als natürlicher Schutzmechanismus der Bohnen, den Proteinabbau. Sie sind vermutlich ebenso für eine geringere Löslichkeit in KOH bei der Analyse einzelner Proteinfractionen verantwortlich und bedingen so eine höhere Proteinbeständigkeit. Die Untersuchungen ergaben einen 10 %-Punkte höheren Anteil der Proteinfraction B2 sowie einen 3 %-Punkte höheren Anteil der Proteinfraction B3 der tanninhaltigen Sorte „Fanfare“. Bei den betrachteten Ackerbohnen bestätigte sich der eingangs beschriebene höhere Rohprotein- ( $\bar{X}_{\text{Ackerbohne}}$  292 g/kg TM;  $\bar{X}_{\text{Erbsen}}$  219 g/kg TM) und Reineiweißgehalt ( $\bar{X}_{\text{Ackerbohne}}$  252 g/kg TM;  $\bar{X}_{\text{Erbsen}}$  197 g/kg TM) im Vergleich zu Erbsen. Auch sortenbedingte Unterschiede in der Proteinqualität konnten mit statistischer Sicherheit nachgewiesen werden. Die Proteinlöslichkeit der betrachteten Erbsen und Ackerbohnen lag, mit Ausnahme der Erbsensorte „Astronaut“ (Probenmaterial 3) und der Ackerbohne „Fanfare“ bei annähernd 70 - 75 % des RP ( $\bar{X}_{\text{Ackerbohne}}$  69 % d. RP;  $\bar{X}_{\text{Erbsen}}$  75 % d. RP). Damit ergibt sich rechnerisch eine Menge an löslichem Protein bei den betrachteten Ackerbohnen von 201 g/kg TM und für die untersuchten Erbsen von 164 g/kg TM. Die theoretische Menge an beständigem Protein ist für Ackerbohnen mit rund 91 g/kg TM höher im Vergleich der betrachteten Erbsen mit 55 g/kg TM. Daraus abgeleitet sind Ackerbohnen im Hinblick auf die Bereitstellung ruminal beständiger Proteine in der Wiederkäuerfütterung von höherer Bedeutung.

Der Stärkegehalt der ausgewählten Erbsen variierte sortenbedingt signifikant zwischen 500 g/kg TM („E.F.B.33“) und 540 g/kg TM („Astronaut“, 70 % TM;  $p = 0,005$ ). Erbsen enthalten mit durchschnittlich rund 100 g/kg TM deutlich mehr Stärke im Vergleich zu den untersuchten Ackerbohnen. Diese Differenz begründet sich in dem bereits erwähnten höheren mittleren

Rohprotein- (+ 73 g/kg TM) und Rohfasergehalt (+ 31 g/kg TM) der untersuchten Ackerbohnen bezogen auf 1000 g TM. Die Nährstoffgehalte und entsprechenden Nährstoffunterschiede (Stärke- Rohprotein- und Rohfasergehalt) zwischen beiden Körnerleguminosen werden durch die eingangs dargestellten Ergebnisse aus der Literaturrecherche bestätigt (Tabelle 1 und Tabelle 3). Die sortenbedingten Unterschiede in dem mittleren Stärke- und Rohproteingehalt, wie z.B. der signifikant niedrigere Gehalt beider Nährstoffe der Ackerbohne „Fanfare“ im Vergleich zu den beiden Ackerbohnen „Taifun“, begründet entsprechend den signifikant höheren Rohfasergehalt. Die Korngröße und damit der Anteil der rohfaserreichen Samenschale, witterungsbedingt schlechte Nährstoffeinlagerung (z.B. durch Trockenheit), das genetische Potential für Menge der Nährstoffeinlagerung sowie die Pflanzenrückstände bei unvollständiger Reinigung der Körner wirken sich auf den analysierten Gehalt an Rohfaser und korrespondieren auf den Gehalt an Cellulose der untersuchten Proben aus. Ein direkter Sortenvergleich in den untersuchten Nährstoffen ist daher nicht zielführend. Für die vorliegende Untersuchung werden vielmehr mögliche Effekte der jeweiligen Behandlungen auf die Sorten priorisiert.

#### 4.2.1.5 Silierbarkeit teigreifer Erbsen und Ackerbohnen

Für die Untersuchung des Siliererfolges sowie der Einfluss der Silierung auf die Protein- und Stärkequalität wurden die eingangs beschriebenen Erbsen entweder rückbefeuchtet oder direkt (bei teigreifer Ernte, 70 % TM) siliert. Die nachfolgende Tabelle 18 beschreibt die Silierbarkeit der verwendeten nativen Erbsen.

**Tabelle 18:** Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Silierbarkeit der verwendeten Erbsensorten (MW; n = 3)

[g/kg TM]	Erbsen				p-Wert	SEM
	Alvesta	Astronauten	Astronauten*	E.F.B.33		
TM [g/kg OM]	889 <sup>a</sup>	844 <sup>b</sup>	735 <sup>c</sup>	908 <sup>a</sup>	< 0,001	2,623
pH-Wert	6,6	6,5	6,4	6,4	n.s.	0,001
Pufferkapazität [g MS/kg TM]	36,0	35,7	36,0	36,9	n.s.	0,386
Zucker	38,0	58,0	53,0	38,3	n.s.	3,022
Z/PK-Quotient	1,05	1,61	1,47	1,04	n.s.	0,082

„Alvesta“, Probenmaterial 1; „Astronauten“, Probenmaterial 3; „Astronauten\*“, Probenmaterial 4; „E.F.B.33“, Probenmaterial 5 (Tabelle 6); MW, Mittelwert; MS, Milchsäure; TM, Trockenmasse; OM, organische Masse; PK, Pufferkapazität; Z, Zucker; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$

Die trockenreif geernteten Erbsen der Sorte „Alvesta“ und „E.F.B.33“ hatten einen TM-Gehalt von rund 90 % und waren somit lagerstabil. Die Sorte „Astronauten“ (Probenmaterial 3) sollte ebenfalls zur Teigreife mit ca. 70 % TM geerntet werden, trocknete aber witterungsbedingt

innerhalb eines Tages auf 84 % TM. Die Sorte „Astronaut“ (Probenmaterial 4) wurde zur Teigreife mit einer TM von 74 % geerntet ( $p < 0,001$ ). Der pH-Wert der nativen Erbsen war  $> 6,0$ . Bei einer sortenübergreifenden Pufferkapazität von rund 36 g MS/kg TM und einem Zuckergehalt in einem Bereich von 38 - 58 g/kg TM ergab sich ein Z/PK-Quotient von 1,1 - 1,6.

Die Silierbarkeiten der in der Untersuchung verwendeten Ackerbohnsorten werden nachfolgend in der Tabelle 19 dargestellt.

**Tabelle 19:** Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Silierbarkeit der verwendeten Ackerbohnsorten (MW;  $n = 3$ )

[g/kg TM]	Ackerbohne			<i>p</i> -Wert	SEM
	Fanfare	Taifun	Taifun*		
TM [g/kg OM]	905 <sup>a</sup>	912 <sup>a</sup>	765 <sup>b</sup>	$< 0,001$	3,379
pH-Wert	6,42 <sup>a</sup>	6,29 <sup>c</sup>	6,32 <sup>b</sup>	$< 0,001$	0,003
Pufferkapazität [g MS/kg TM]	40,4 <sup>c</sup>	44,8 <sup>a</sup>	42,0 <sup>b</sup>	$< 0,001$	0,193
Zucker	18,3 <sup>b</sup>	19,3 <sup>b</sup>	31,7 <sup>a</sup>	0,008	1,247
Z/PK-Quotient	0,45 <sup>b</sup>	0,43 <sup>b</sup>	0,76 <sup>a</sup>	0,006	0,028

„Fanfare“, Probenmaterial 6; „Taifun“, Probenmaterial 7; „Taifun\*“, Probenmaterial 8 (Tabelle 6); MW, Mittelwert; MS, Milchsäure; TM, Trockenmasse; OM, organische Masse; PK, Pufferkapazität; Z, Zucker; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$

Die TM der trockenreif geernteten Ackerbohnsorten „Taifun“ und „Fanfare“ lagen bei rund 90 %. Die zur Teigreife geerntete Ackerbohne „Taifun“ (Probenmaterial 8) hatte eine TM von 76 % ( $p < 0,001$ ). Die gemessenen pH-Werte lagen im Mittel bei 6,3. Die verwendeten Ackerbohnen hatten eine Pufferkapazität von 40 – 45 g MS/kg TM. Die Sorte „Taifun“ (teigreif, Probenmaterial 8) wies mit über 30 g/kg TM den höchsten Zuckergehalt ( $p = 0,008$ ) und entsprechend den höchsten Z/PK-Quotient mit 0,8 auf ( $p = 0,006$ ).

**Diskussion** Körnerleguminosen sind eiweißreiche Pflanzen mit einem geringen Zuckerangebot sowie einer hohen Pufferkapazität und gelten somit als schwer silierbare Futtermittel (GEFROM, 2012; SATTLER & BABEL, 1986). Vor allem der Feuchtigkeitsgehalt und der Gehalt an leichtlöslichen Zuckern mit entsprechend geringer Pufferkapazität sind dabei entscheidende Faktoren (PAHLOW et al., 2003; ZEYNER et al., 2015). Diese fördern, neben einer streng anaeroben Umgebung, die Umwandlung von Pflanzenzucker in Milchsäure durch MSB, die damit die Aktivität von Pflanzenenzymen und unerwünschten Mikroorganismen durch niedrige pH-Werte hemmen (PAHLOW et al., 2003). Die untersuchten Ackerbohnen und Erbsen hatten ein ähnliches pH-Wert-Niveau ( $\bar{\varnothing}_{\text{Ackerbohne}} 6,3$ ;  $\bar{\varnothing}_{\text{Erbsen}} 6,5$ ). Die Pufferkapazität der Ackerbohnen fiel höher ( $\bar{\varnothing}_{\text{Ackerbohne}} 42$  g MS/kg TM;  $\bar{\varnothing}_{\text{Erbsen}} 36$  g MS/kg TM) und der Zuckergehalt niedriger

( $\emptyset_{\text{Ackerbohne}}$  23 g/kg TM;  $\emptyset_{\text{Erbsen}}$  47 g MS/kg TM) aus im Vergleich zu den Erbsen. Es ergab sich ein niedriger Z/PK-Quotient für die untersuchten Ackerbohnen ( $\emptyset_{\text{Ackerbohne}}$  0,5;  $\emptyset_{\text{Erbsen}}$  1,3). Die vorliegenden Ergebnisse werden mit den Angaben von GEFROM (2012) bestätigt. Nach WEIBBACH et al. (1974) ermöglicht erst ein Z/PK-Quotient von über 2, zumindest bei Grünfütterpflanzen, optimale Silierbedingungen (pH-Wert<sub>Silage</sub> < 4,5; Milchsäuregehalte > 3 %; NH<sub>3</sub> < 10 % des Gesamt-N). Diese wurden bei den untersuchten Erbsen und Ackerbohnen deutlich unterschritten, sodass eine schlechte Siliereignung dieser Körnerleguminosen bestätigt werden kann. Für die Milchsäurebildung und entsprechend niedrige pH-Werte während der Silierung eignen sich Ackerbohnen, unberücksichtigt der Trockenmasse, durch ihren geringeren Z/PK-Quotient und zusätzlich höheren Rohproteingehalt schlechter im Vergleich zu den untersuchten Erbsen. Untersuchungen von ZEYNER et al. (2015) bestätigten vergleichbare Pufferkapazitäten bei Erbsen (39 - 47 g MS/kg TM). Bei erhöhter Pufferkapazität muss, neben einer notwendigen Menge an wasserlöslichen Zuckern (HERRMANN et al., 2010), auch die Feuchtigkeit im Siliergut für die MSB ausreichend hoch sein. So zeigten die Untersuchungen von DEWITTE et al. (2008) und GEFROM (2012), dass bei der Silierung von Körnerleguminosen mit einer TM von 65 %, pH-Werte von rund 4,5 erreicht werden können. Bei 70 % TM bestätigten DEWITTE et al. (2008) eine geringere Absenkung des pH-Wertes auf lediglich 5,0. Bei der Silierung annähernd trockener Ackerbohnen (80 % TM) blieb der pH-Wert unverändert im Vergleich zum Ausgangsmaterial. Silagen mit TM > 70 % erreichten, unabhängig vom Silierzusatz, lediglich Milchsäuregehalte von < 0,6 % (DEWITTE et al., 2008; GEFROM, 2012). Im Falle der Körnerleguminosen hemmt der geringe Gehalt schnell fermentierbarer Zucker sowie der geringe Feuchtegehalt des Siliergutes entscheidend die Bildung von Milchsäure. Die Zugabe von MSB kann auch in höheren TM-Bereichen die Bildung von Milchsäure noch fördern, allerdings ist ab einer TM von 70 % im Siliergut die Stoffwechselaktivität und Wachstumsrate der zugesetzten MSB aufgrund der reduzierten Wasseraktivität und vorherrschenden Osmolalität so eingeschränkt, dass keine konservierungswirksame Milchsäure mehr gebildet wird (GEFROM et al., 2012). Dies konnte in der vorliegenden Untersuchung allerdings erst ab einer TM von 75 % bestätigt werden und wird nachfolgend näher diskutiert.

## 4.2.2 Silierung teigreifer Erbsen und Ackerbohnen

In dem nachfolgenden Abschnitt soll der Siliererfolg sowie der mögliche Einfluss der Silierung auf die Protein- und Stärkequalität der eingangs dargestellten Erbsen und Ackerbohnen in Variation der Sorte, TM und dem Silierzusatz dargestellt werden.

### 4.2.2.1 Einfluss ausgewählter MSB-Präparate

**Ergebnisse (Siliererfolg)** Um den Einfluss der ausgewählten MSB-Präparate (siehe Tabelle Anhang 10) auf den Siliererfolg nicht negativ, nach Angaben von GEFROM (2012), auf Grund erhöhter TM zu beeinflussen, wurden die Untersuchungen bei TM-Gehalten von 55 und 65 % TM im Siliergut vorgenommen. In den Tabelle 20 und Tabelle 21 sind ausgewählte Parameter des Siliererfolges beider TM-Stufen in Abhängigkeit der verwendeten MSB dargestellt. Die nativen Erbsen hatten einen pH-Wert von 6,3 und eine Pufferkapazität von 36,0 g MS/kg TM. Die Silierdauer betrug 60 Tage. Die TM konnten entsprechend der geplanten Vorgaben von 55 % und 65 % durch Rückbefeuchtung der Erbsen mit destilliertem Wasser erreicht werden. Die Zugabe von MSB führte zu geringeren pH-Werten im Vergleich zu den KON-Silagen. Die MSB<sub>55</sub>-Silagen erreichten pH-Werte von 4,0 - 4,4 (Ø 4,2;  $p < 0,001$ ). Die pH-Werte der MSB<sub>65</sub>-Silagen variierten von 4,2 bis 5,1 (Ø 4,6;  $p < 0,001$ ). Die KON-Silagen hatten in beiden TM-Stufen signifikant höhere pH-Werte im Vergleich zu den MSB-Silagen. Die Varianten mit MSB<sub>55</sub>6, MSB<sub>55</sub>9, MSB<sub>55</sub>12 versetzt, erreichten pH-Werte von rund 4,5 und lagen damit über den restlichen MSB<sub>55</sub>-Silagen von annähernd 4,0 ( $p < 0,001$ ). In den trockneren Silagen wiesen die MSB<sub>65</sub>9 und MSB<sub>65</sub>12 mit rund 5,0 ebenfalls die höchsten pH-Werte ( $p < 0,001$ ). Die MSB5 erreichte in beiden TM-Stufen den niedrigsten pH-Wert. Die Silagen<sub>55</sub> erreichten Milchsäuregehalte von 2,3 bis 3,6 % der TM (Ø 3,3). Die trockneren Silagen<sub>65</sub> (MSB und KON) wiesen geringere Milchsäuregehalte (Ø 2,8) auf. Während die Silagen KON<sub>65</sub> kaum Milchsäure (< 1 % der TM) enthielten, ergaben sich bei den feuchteren Silagen ohne MSB-Zugabe (KON<sub>55</sub>) Milchsäuregehalte vergleichbar mit den MSB<sub>65</sub>-Varianten sowie den Varianten der MSB<sub>55</sub>6 und MSB<sub>55</sub>12-Silagen. Die MSB-Silagen mit der Zugabe von MSB6 hatten in beiden TM-Stufen (55 % und 65 % TM) mit rund 2,5 % TM die geringsten Milchsäuregehalte ( $p < 0,001$ ), die geringste pH-Wertreduzierung ( $p < 0,001$ ) sowie die mit > 1 % der TM höchsten Essigsäuregehalte ( $p < 0,001$ ). Die Essigsäuregehalte der anderen Varianten beider TM-Stufen lagen hingegen unter 0,8 % der TM ( $p < 0,001$ ). Die Ethanolgehalte schwankten unabhängig von der TM-Stufe von 0,4 - 2 % der TM. Die mittleren Gehalte der MSB-Silagen lagen bei rund 1,0 % der TM. Die höchsten Ethanolgehalte erreichten in beiden TM-Stufen die Silagen mit MSB6-Zugabe.

Weiterhin wurden in der vorliegenden Untersuchung mögliche Effekte der amylolytischen Aktivität zweier MSB-Präparate (nicht amylolytisch wirksame MSB, MSB vs. amylolytisch wirksame MSB, MSB<sup>A</sup>) an drei ausgewählten Erbsensorten („Alvesta“, Probenmaterial 1; „E.F.B.33“, Probenmaterial 5; „Astronaute“, Probenmaterial 3) untersucht. Das Probenmaterial hatte eine TM zum Zeitpunkt der Silierung von rund 70 %. Die Ergebnisse des Siliererfolges sind in der Tabelle Anhang 13 dargestellt. Die beiden MSB-Präparate bzw. deren differenzierte amylolytische Aktivität hatten auf die Bildung von Milchsäure keinen Einfluss. Silagen mit MSB<sup>A</sup> zeigten in Abhängigkeit der Sorte niedrigere Essigsäuregehalte und mit Ausnahme der Sorte „E.F.B.33“ höhere Ethanolgehalte ( $p < 0,001$ ). Wenn auch die Differenzen als marginal eingeschätzt werden können. Lediglich die Sorte hatte einen Effekt auf alle ausgewählten Parameter, was ebenso mit den Differenzen im TM-Gehalt (68 % TM, „Astronaute“, Probenmaterial 3 vs. 70 % TM, „E.F.B.33“, Probenmaterial 5;  $p < 0,001$ ) begründet werden kann. Alle hergestellten Silagen waren für 7 Tage aerob stabil und zeigten sortenübergreifend keine Änderungen des pH-Wertes in diesem Zeitraum.

**Tabelle 20:** Siliererfolg bei Zugabe ausgewählter Milchsäurebakterien zu rückbefeuchteten Erbsen „Alvesta“ (Probenmaterial 1; 55 % TM; MW; n = 3)

[% d. TM]	KON	MSB												<i>p</i> -Wert	SEM
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
TM [g/kg FM]	544 <sup>bc</sup>	542 <sup>c</sup>	552 <sup>abc</sup>	557 <sup>a</sup>	553 <sup>abc</sup>	554 <sup>abc</sup>	550 <sup>abc</sup>	556 <sup>ab</sup>	551 <sup>abc</sup>	553 <sup>abc</sup>	552 <sup>abc</sup>	552 <sup>abc</sup>	547 <sup>abc</sup>	0,007	0,688
pH-Wert	4,62 <sup>a</sup>	4,12 <sup>c</sup>	4,13 <sup>c</sup>	4,10 <sup>c</sup>	4,13 <sup>c</sup>	4,01 <sup>c</sup>	4,40 <sup>b</sup>	4,15 <sup>c</sup>	4,15 <sup>c</sup>	4,38 <sup>b</sup>	4,15 <sup>c</sup>	4,15 <sup>c</sup>	4,35 <sup>b</sup>	< 0,001	0,010
Milchsäure	2,30 <sup>c</sup>	3,50 <sup>a</sup>	3,52 <sup>a</sup>	3,54 <sup>a</sup>	3,58 <sup>a</sup>	3,63 <sup>a</sup>	2,43 <sup>bc</sup>	3,46 <sup>a</sup>	3,28 <sup>a</sup>	2,67 <sup>b</sup>	3,47 <sup>a</sup>	3,42 <sup>a</sup>	2,63 <sup>bc</sup>	< 0,001	0,020
Essigsäure	0,50 <sup>bc</sup>	0,38 <sup>bc</sup>	0,46 <sup>bc</sup>	0,45 <sup>bc</sup>	0,57 <sup>b</sup>	0,33 <sup>bc</sup>	1,52 <sup>a</sup>	0,51 <sup>bc</sup>	0,47 <sup>bc</sup>	0,26 <sup>c</sup>	0,50 <sup>bc</sup>	0,55 <sup>b</sup>	0,47 <sup>bc</sup>	< 0,001	0,015
Ethanol	1,79 <sup>a</sup>	0,89 <sup>d</sup>	0,91 <sup>d</sup>	0,74 <sup>d</sup>	0,77 <sup>d</sup>	0,80 <sup>d</sup>	1,26 <sup>bc</sup>	1,04 <sup>cd</sup>	0,96 <sup>cd</sup>	1,00 <sup>cd</sup>	0,86 <sup>d</sup>	0,76 <sup>d</sup>	1,37 <sup>b</sup>	< 0,001	0,017

KON, Kontrolle ohne MSB; MW, Mittelwert; MSB, Zugabe von Milchsäurebakterien (1 – 12, Tabelle Anhang 10); TM, Trockenmasse; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$

**Tabelle 21:** Siliererfolg bei Zugabe ausgewählter Milchsäurebakterien zu rückbefeuchteten Erbsen „Alvesta“ (Probenmaterial 1; 65 % TM; MW; n = 3)

[% d. TM]	KON	MSB												<i>p</i> -Wert	SEM
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
TM [g/kg FM]	625 <sup>c</sup>	634 <sup>bc</sup>	654 <sup>abc</sup>	648 <sup>abc</sup>	648 <sup>abc</sup>	667 <sup>a</sup>	667 <sup>a</sup>	657 <sup>ab</sup>	644 <sup>abc</sup>	634 <sup>bc</sup>	637 <sup>abc</sup>	640 <sup>abc</sup>	630 <sup>bc</sup>	< 0,001	1,636
pH-Wert	5,48 <sup>a</sup>	4,57 <sup>d</sup>	4,53 <sup>d</sup>	4,50 <sup>d</sup>	4,53 <sup>d</sup>	4,23 <sup>e</sup>	4,58 <sup>d</sup>	4,67 <sup>cd</sup>	4,56 <sup>d</sup>	4,83 <sup>c</sup>	4,53 <sup>d</sup>	4,57 <sup>d</sup>	5,07 <sup>b</sup>	< 0,001	0,010
Milchsäure	0,79 <sup>e</sup>	2,68 <sup>bc</sup>	2,81 <sup>abc</sup>	2,92 <sup>ab</sup>	3,05 <sup>ab</sup>	3,34 <sup>a</sup>	2,84 <sup>abc</sup>	2,88 <sup>ab</sup>	2,94 <sup>ab</sup>	2,31 <sup>cd</sup>	3,11 <sup>ab</sup>	3,00 <sup>ab</sup>	2,02 <sup>d</sup>	< 0,001	0,030
Essigsäure	0,75 <sup>abc</sup>	0,86 <sup>ab</sup>	0,70 <sup>bc</sup>	0,61 <sup>bc</sup>	0,50 <sup>cd</sup>	0,22 <sup>d</sup>	1,03 <sup>a</sup>	0,57 <sup>bc</sup>	0,53 <sup>c</sup>	0,50 <sup>cd</sup>	0,60 <sup>bc</sup>	0,56 <sup>c</sup>	0,77 <sup>abc</sup>	< 0,001	0,016
Ethanol	2,04 <sup>a</sup>	0,77 <sup>cd</sup>	0,89 <sup>bcd</sup>	0,81 <sup>bcd</sup>	0,80 <sup>bcd</sup>	0,69 <sup>d</sup>	1,10 <sup>bc</sup>	1,11 <sup>b</sup>	0,91 <sup>bcd</sup>	0,80 <sup>bcd</sup>	0,75 <sup>d</sup>	0,74 <sup>d</sup>	1,00 <sup>bcd</sup>	< 0,001	0,018

KON, Kontrolle ohne MSB; MW, Mittelwert; MSB, Zugabe von Milchsäurebakterien (1 – 12, Tabelle Anhang 10); TM, Trockenmasse; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$



**Diskussion** Die Untersuchungen von GEFROM et al. (2012) an Erbsen, Ackerbohnen und Lupinen ergaben bei Zugabe von MSB eine schnellere Säuerung mit pH-Werten von rund 4,1 und einer Milchsäureproduktion von rund 5 % d. TM. DEWITTE et al. (2008) silierten Erbsen mit 82 % TM, Lupinen mit 70 % TM und Ackerbohnen mit 65 % TM ohne und mit Zugabe eines chemischen Siliermittels (50 % Ameisensäure und 50 % Propionsäure; 6 ml/kg FM). Bei den silierten Erbsen ergab sich ein kaum reduzierter pH-Wert von 5,4. Die Lupinen erreichten einen pH-Wert von ca. 5,0. Lediglich die feuchteren Ackerbohnen erreichten einen pH-Wert von 4,2, entsprechend den Ergebnissen von GEFROM et al. (2012). Die Zugabe des chemischen Siliermittels brachte dabei keine nennenswerten Unterschiede. DEWITTE et al. (2008) und GEFROM et al. (2012) empfehlen die Silierung von Körnerleguminosen mit einer Trockenmasse kleiner 65 %. In Anlehnung daran wurde in einer Voruntersuchung die Erbse „Alvesta“ mit 55 % TM und 65 % TM mit und ohne Zugabe von ausgewählten MSB für 60 Tage siliert. Die MSB<sub>55</sub>-Silagen erreichten niedrigere mittlere pH-Werte von durchschnittlich 4,2 (Ø 4,6) und entsprechend höheren mittleren Milchsäuregehalten von 3,3 % d. TM (Ø 2,8 d. TM) im Vergleich zu den Silagen mit 65 % TM. Die erhöhte Trockenmasse von 10 %-Punkten führte zu einer Minimierung der Mikrobenaktivität und bestätigt die Angaben von DEWITTE et al. (2008) und GEFROM et al. (2012). Auch die enthaltenen MSB in den verwendeten Silierzusätzen reagierten in Abhängigkeit der TM-Stufen in unterschiedlicher Ausprägung ihrer Stoffwechselaktivität. Das Präparat MSB 5 (*P. pentosaceus* & *L. paracasei*) konnte unter den Bedingungen von 65 % TM am meisten Milchsäure bilden und mit den niedrigsten pH-Wert im Vergleich zu den anderen MSB erreichen. Damit eigneten sich die gewählten Stämme von *P. pentosaceus* & *L. paracasei* als Zugabe zum Siliergut in erhöhten TM-Bereichen (ab 65 % TM) scheinbar besser. Diese beiden fakultativ heterofermentativen MSB produzieren hauptsächlich Milchsäure aus Hexosen, sind aber zusätzlich in der Lage einige Pentosen zu nutzen (DRIEHUIS & ELFRINK, 2000) und können damit scheinbar den geringen Gehalt an leichtlöslichen Zuckern in Erbsen und Ackerbohnen optimaler verwerten. Auch andere MSB (4, 10, 11) mit *L. plantarum* erzielten ähnlich gute Siliererfolge und eignen sich ebenso als Silierzusatz für Körnerleguminosen.

**Ergebnisse (Nährstoffveränderung)** Die nachfolgende Tabelle 22 und Tabelle 23 geben die Veränderungen der ruminalen Proteinlöslichkeit rückbefeuchteter und siliertes Erbsen der Sorte „Alvesta“ (Probenmaterial 1) wieder. Der Rohproteingehalt der unbehandelten Erbse „Alvesta“ lag bei rund 200 g/kg TM. In Folge der Silierung stieg der Rohproteingehalt bei den KON-Silagen, MSB<sub>55</sub>-Silagen sowie bei allen MSB<sub>65</sub>-Silagen an. Die Silierung hatte, mit Ausnahme der Varianten MSB<sub>55</sub>7 und MSB<sub>55</sub>9 in der 55 % TM-Stufe, keinen Einfluss auf die

Proteinlöslichkeit. Bei der 65 % TM-Stufe führte die Silierung in allen Varianten zu einer Verringerung der Proteinlöslichkeit um bis zu 17 %-Punkte ( $p < 0,001$ ). Als Folge der Silierung reduzierte sich in beiden TM-Stufen der Anteil der Proteinfraktion B1 zu Gunsten steigender Anteile der Proteinfraktion A sowie der Proteinfraktion B2 um rund je 10 %-Punkte ( $p < 0,001$ ). Die Anteile der Proteinfraktion B3 sanken bei den MSB-Varianten der 55 % TM-Stufe ( $p = 0,042$ ), wohingegen in der 65 % TM-Stufe die Anteile der B3 in den MSB-Silagen tendenziell stiegen ( $p = 0,020$ ). Die Proteinfraktion C blieb durch die Silierung in beiden TM-Stufen und unabhängig vom Silierzusatz unbeeinflusst. Welchen Einfluss die amylytische Aktivität der MSB (MSB vs. MSB<sup>A</sup>) auf die Protein- und Stärkequalität bei ausgewählten Sorten von Erbsen und Ackerbohnen hatte wird in der Tabelle Anhang 1 vorgestellt. Die silierten Erbsen und Ackerbohnen unterschieden sich, unabhängig des Silierzusatzes in allen untersuchten Parametern ( $p < 0,001$ ). Die amylytische Aktivität der eingesetzten (MSB vs. MSB<sup>A</sup>) ergab keine Unterschiede im Gehalt des Rohproteins und der Proteinqualität. Ebenso gab es keinen Einfluss auf der Rohfasergehalt sowie auf den Gehalt an Cellulose und Hemicellulose. Auch der Stärkegehalt blieb von der amylytischen Aktivität der eingesetzten MSB unbeeinflusst. Lediglich der Zuckergehalt lag bei den Silagen mit MSB<sup>A</sup> niedriger (Erbsen: 47 g/kg TM vs. 39 g/kg TM; Ackerbohne: 15 g/kg TM vs. 8 g/kg TM;  $p = 0,006$ ).

**Tabelle 22:** Veränderungen der Proteinqualität bei Zugabe ausgewählter MSB zu rückbefeuchteten Erbsen „Alvesta“ (55 % TM; Probenmaterial 1; MW; n = 3)

[% d. RP]	AM	KON	MSB												p-Wert	SEM
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Rohprotein [g/kg TM]	205 <sup>bc</sup>	223 <sup>a</sup>	211 <sup>b</sup>	214 <sup>ab</sup>	205 <sup>bc</sup>	202 <sup>c</sup>	208 <sup>bc</sup>	205 <sup>bc</sup>	206 <sup>bc</sup>	211 <sup>b</sup>	207 <sup>bc</sup>	209 <sup>bc</sup>	209 <sup>bc</sup>	212 <sup>b</sup>	< 0,001	0,466
PL	67,5 <sup>a</sup>	66,4 <sup>a</sup>	63,5 <sup>ab</sup>	65,3 <sup>ab</sup>	63,5 <sup>ab</sup>	65,8 <sup>ab</sup>	64,3 <sup>ab</sup>	66,2 <sup>a</sup>	60,8 <sup>b</sup>	62,4 <sup>ab</sup>	60,8 <sup>b</sup>	62,4 <sup>ab</sup>	63,7 <sup>ab</sup>	67,0 <sup>a</sup>	< 0,001	0,271
A	12,6 <sup>c</sup>	22,6 <sup>b</sup>	29,3 <sup>ab</sup>	28,9 <sup>ab</sup>	28,8 <sup>ab</sup>	28,5 <sup>ab</sup>	29,2 <sup>ab</sup>	30,9 <sup>a</sup>	29,5 <sup>ab</sup>	29,5 <sup>ab</sup>	30,1 <sup>a</sup>	28,8 <sup>ab</sup>	26,9 <sup>ab</sup>	27,6 <sup>ab</sup>	< 0,001	0,383
B1	54,9 <sup>a</sup>	43,8 <sup>b</sup>	34,3 <sup>bc</sup>	36,3 <sup>bc</sup>	34,7 <sup>bc</sup>	37,3 <sup>bc</sup>	35,0 <sup>bc</sup>	35,3 <sup>bc</sup>	31,2 <sup>c</sup>	32,9 <sup>c</sup>	30,7 <sup>c</sup>	33,6 <sup>c</sup>	36,8 <sup>bc</sup>	38,2 <sup>bc</sup>	< 0,001	0,497
B2	28,4 <sup>d</sup>	30,9 <sup>cd</sup>	34,4 <sup>abc</sup>	32,8 <sup>abcd</sup>	34,3 <sup>abc</sup>	32,2 <sup>abcd</sup>	33,9 <sup>abc</sup>	31,9 <sup>bcd</sup>	37,3 <sup>ab</sup>	35,9 <sup>abc</sup>	37,6 <sup>a</sup>	35,2 <sup>abc</sup>	34,1 <sup>abc</sup>	32,1 <sup>abcd</sup>	< 0,001	0,282
B3	3,40 <sup>a</sup>	2,07 <sup>ab</sup>	1,67 <sup>ab</sup>	1,57 <sup>ab</sup>	1,30 <sup>b</sup>	1,30 <sup>b</sup>	1,20 <sup>b</sup>	1,20 <sup>b</sup>	1,33 <sup>b</sup>	1,20 <sup>b</sup>	1,00 <sup>b</sup>	1,77 <sup>ab</sup>	1,53 <sup>b</sup>	1,60 <sup>ab</sup>	0,042	0,095
C	0,75	0,60	0,43	0,37	0,90	0,67	0,67	0,60	0,57	0,50	0,60	0,53	0,73	0,50	n.s.	0,028

AM, Ausgangsmaterial (n = 2); KON, Kontrolle ohne MSB; MW, Mittelwert; MSB, Zugabe von Milchsäurebakterien (1 – 12, Tabelle Anhang 10); A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; B2, mäßig schnell abbaubares Reineiweiß; B3, langsam abbaubares Reineiweiß; C, unlösliches zellwandgebundenes Protein; n.s., nicht signifikant; RP, Rohprotein; PL, Proteinlöslichkeit (A + B1); <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit p < 0,05

**Tabelle 23:** Veränderungen der Proteinqualität bei Zugabe ausgewählter MSB zu rückbefeuchteten Erbsen „Alvesta“ (65 % TM; Probenmaterial 1; MW; n = 3)

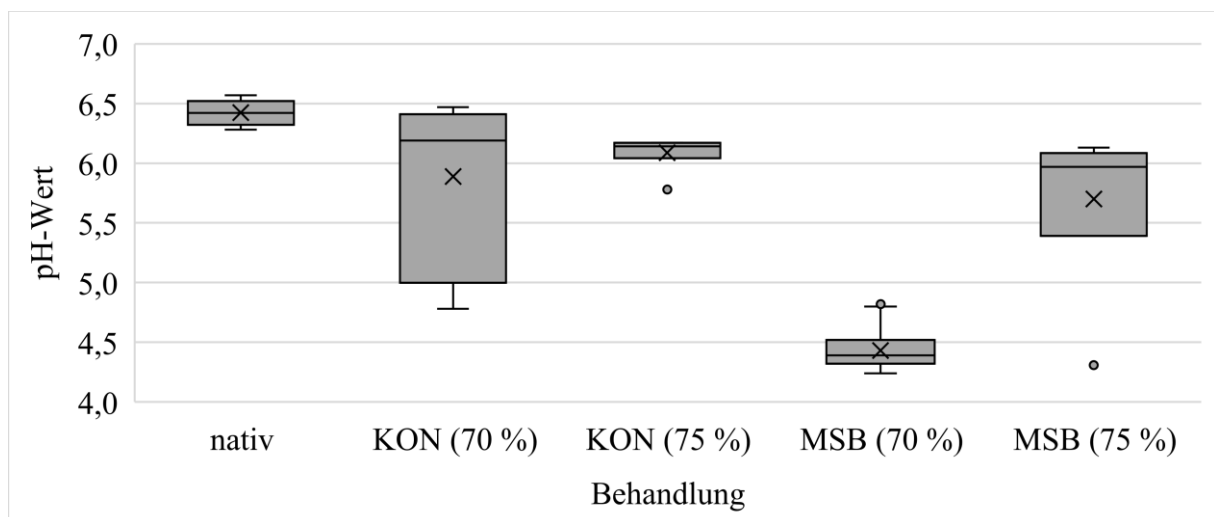
[% d. RP]	AM	KON	MSB												p-Wert	SEM
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Rohprotein [g/kg TM]	202 <sup>f</sup>	220 <sup>a</sup>	217 <sup>abc</sup>	212 <sup>cde</sup>	213 <sup>cde</sup>	213 <sup>cde</sup>	209 <sup>e</sup>	212 <sup>ed</sup>	218 <sup>ab</sup>	217 <sup>abc</sup>	214 <sup>bcde</sup>	212 <sup>cde</sup>	214 <sup>bcd</sup>	215 <sup>bcd</sup>	< 0,001	0,234
PL	69,6 <sup>a</sup>	57,8 <sup>bc</sup>	55,3 <sup>cd</sup>	56,7 <sup>bcd</sup>	56,2 <sup>bcd</sup>	56,4 <sup>bcd</sup>	52,7 <sup>d</sup>	54,9 <sup>cd</sup>	58,6 <sup>bc</sup>	56,3 <sup>bcd</sup>	59,7 <sup>b</sup>	56,4 <sup>bcd</sup>	57,6 <sup>bcd</sup>	59,8 <sup>b</sup>	< 0,001	0,219
A	11,8 <sup>c</sup>	23,5 <sup>ab</sup>	21,4 <sup>b</sup>	23,3 <sup>ab</sup>	23,8 <sup>ab</sup>	23,3 <sup>ab</sup>	21,8 <sup>b</sup>	21,9 <sup>b</sup>	21,4 <sup>b</sup>	22,3 <sup>ab</sup>	25,3 <sup>a</sup>	23,2 <sup>ab</sup>	24,4 <sup>ab</sup>	23,6 <sup>ab</sup>	< 0,001	0,172
B1	57,8 <sup>a</sup>	34,3 <sup>bcd</sup>	34,0 <sup>bcd</sup>	33,3 <sup>cd</sup>	32,4 <sup>cd</sup>	33,1 <sup>cd</sup>	30,9 <sup>d</sup>	33,0 <sup>cd</sup>	37,2 <sup>b</sup>	34,0 <sup>bcd</sup>	34,4 <sup>bcd</sup>	33,2 <sup>cd</sup>	33,2 <sup>cd</sup>	36,2 <sup>bc</sup>	< 0,001	0,197
B2	28,1 <sup>e</sup>	37,6 <sup>bcd</sup>	39,0 <sup>abcd</sup>	39,5 <sup>abc</sup>	40,7 <sup>ab</sup>	39,7 <sup>abc</sup>	42,4 <sup>a</sup>	40,2 <sup>ab</sup>	38,1 <sup>bcd</sup>	40,2 <sup>ab</sup>	35,9 <sup>cd</sup>	40,2 <sup>ab</sup>	38,5 <sup>bcd</sup>	35,2 <sup>d</sup>	< 0,001	0,194
B3	1,55 <sup>b</sup>	3,97 <sup>ab</sup>	4,90 <sup>a</sup>	3,30 <sup>ab</sup>	2,27 <sup>ab</sup>	2,93 <sup>ab</sup>	4,33 <sup>ab</sup>	4,37 <sup>ab</sup>	2,83 <sup>ab</sup>	2,83 <sup>ab</sup>	3,70 <sup>ab</sup>	2,73 <sup>ab</sup>	3,47 <sup>ab</sup>	3,63 <sup>ab</sup>	0,020	0,145
C	0,75	0,60	0,77	0,50	0,80	0,67	0,63	0,53	0,47	0,70	0,63	0,60	0,47	1,07	n.s.	0,038

AM, Ausgangsmaterial (n = 2); KON, Kontrolle ohne MSB; MW, Mittelwert; MSB, Zugabe von Milchsäurebakterien (1 – 12, Tabelle Anhang 10); A, Proteinfraction A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; B2, mäßig schnell abbaubares Reineiweiß; B3, langsam abbaubares Reineiweiß; C, unlösliches zellwandgebundenes Protein; n.s., nicht signifikant; RP, Rohprotein; PL, Proteinlöslichkeit (A + B1); <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit p < 0,05

**Diskussion** In beiden TM-Stufen stieg der RP-Gehalt in Folge der Silierung an. Grund hierfür könnte in der Anteilsverschiebung der Nährstoffe auf Grund der Verstoffwechslung von z.B. Zucker durch die MSB begründet sein. Die Proteinlöslichkeit sank durch die Silierung in beiden TM-Stufen. Während bei dem feuchteren Siliergut (55 % TM) die Proteinlöslichkeit annähernd unabhängig von der Zugabe und Art der MSB beeinflusst wurde, reduzierte sich die Proteinlöslichkeit bei den trockneren Silagen (65 % TM) deutlich um bis zu 17 % d. RP (MSB 5; *P. pentosaceus* & *L. paracasei*). Auffällig hierbei ist der starke Abfall der Proteinfraction B1 (- 30 %-Punkte) zu Gunsten steigender Anteile der Proteinfraction A (+ 10 %-Punkte) und B2 (+ 20 %-Punkte). Dass während der Silierung durch proteolytische und desmolytische Prozesse Proteinfractionen aufgespalten werden und daraus schnelllösliche Proteine und NPN-Verbindungen (= Proteinfraction A) entstehen, ist hinreichend bekannt. Eine Proteinstabilisierung bzw. die Entstehung von ruminal langsamer löslichen Proteinen (Proteinfraction B2) während des Silierprozesses ist hingegen eher unbekannt. Die Bildung von Maillardprodukten kann ein Grund für die Proteinstabilisierung darstellen. Auf diesen Zusammenhang wird im späteren Verlauf näher eingegangen.

#### 4.2.2.2 Siliererfolg

In der nachfolgenden Abbildung 5 werden die pH-Werte über alle hergestellten Modellsilagen von Erbsen („Alvesta“, „Astronaut“, „E.F.B.33“) und Ackerbohnen („Fanfare“, „Taifun“) dargestellt. Dabei wurde zwischen dem Silierzusatz (KON vs. MSB) sowie der TM des Siliergutes (70 % vs. 75 %) unterschieden.



**Abbildung 5:** Veränderung des pH-Wertes über alle hergestellten Modellsilagen von Erbse („Alvesta“, „Astronaut“, „E.F.B. 33“) und Ackerbohne („Fanfare“, „Taifun“) nach Silierung ohne (KON) und mit (MSB + MSB<sup>A</sup>) Milchsäurebakterien als Silierzusatz bei 70 % und 75 % TM im Siliergut;  $n_{\text{nativ}} = 21$ ;  $n_{\text{KON (70\%)}} = 18$ ;  $n_{\text{KON (75\%)}} = 6$ ;  $n_{\text{MSB (70\%)}} = 33$ ;  $n_{\text{MSB (75\%)}} = 6$

Die nativen Erbsen und Ackerbohnen hatten einen mittleren pH-Wert von 6,3. In Folge der Silierung erreichten die Silagen mit 70 % TM und MSB-Zugabe einen mittleren pH-Wert von 4,4. Der mittlere pH-Wert der KON-Silagen veränderte sich durch die Silierung kaum. Allerdings erreichten einzelne KON-Silagen mit 70 % TM durchaus auch niedrigere pH-Werte von bis zu 4,8. Die trockneren Silagen (75 % TM) mit MSB-Zugabe säuerten mit einem mittleren pH-Wert von rund 5,7 schlechter im Vergleich der 70 % TM-MSB-Silagen. Die Tabelle 24 und Tabelle 25 geben den Siliererfolg von silierten Erbsen sowie Ackerbohnen ohne (KON, Kontrolle) und mit Zugabe von MSB wieder. Die silierten Erbsen und Ackerbohnen hatten eine TM von < 70 % bis 75 %. Für den überwiegenden Teil der analysierten Parameter ergab sich bei den Erbsen als auch bei den Ackerbohnen ein Sorteneffekt ( $p < 0,001$ ). Der mittlere pH-Wert der KON-Silagen blieb annähernd unverändert mit rund 6 im Vergleich zum Ausgangsmaterial (siehe Tabelle 18 und Tabelle 19). Die MSB-Silagen mit einer TM von 70 % und weniger erreichten hingegen pH-Werte niedrigere pH-Werte ( $\bar{\text{MSB}}_{\text{Ackerbohne}} 4,3$ ;  $\bar{\text{MSB}}_{\text{Erbsen}} 4,4$ ;  $p < 0,001$ ) mit höheren mittleren Milchsäuregehalten von 2,0 im Vergleich zu den KON-Silagen ( $\text{KON}_{\text{Ackerbohne, Erbsen}}$  rund 1,0 % d. TM,  $p < 0,001$ ) und unabhängig der Leguminosenart. Die trockneren MSB-Silagen (75 % TM-Stufe) säuerten kaum und waren mit dem pH-Werten der KON-Silagen vergleichbar. Der Silierzusatz von MSB führte, unabhängig der Leguminosenart, zu einer Reduzierung des Ethanolgehaltes ( $\bar{\text{KON}}_{\text{Ackerbohne, Erbsen}} 1,0$  % d. TM vs.  $\bar{\text{MSB}}_{\text{Ackerbohne, Erbsen}} 0,3$  % d. TM) in den Silagen. Die Gehalte an Essigsäure blieben bei den Erbsensilagen unbeeinflusst von der Zugabe eines Silierzusatzes ( $\bar{\text{Erbsen}} 0,2$  % d. TM), während bei den Ackerbohnsilagen durch die Zugabe der MSB geringere Gehalte ermittelt wurden ( $\bar{\text{KON}}_{\text{Ackerbohne}} 1,0$  % d. TM;  $\bar{\text{MSB}}_{\text{Ackerbohne}} 0,2$  % d. TM;  $p = 0,001$ ). Die Gehalte an Propionsäure, Iso- und n-Buttersäure, Iso- und n-Valeriansäure, 1- und 1,2-Propandiol lagen unterhalb der Nachweisgrenze und werden daher in der vorliegenden Arbeit nicht dargestellt. Die Erbsensilagen hatten unabhängig des Silierzusatzes einen TM-Verlust von unter 3 %. Bei den Ackerbohnsilagen führte die MSB-Zugabe zu einem geringeren TM-Verlust ( $\bar{\text{KON}}_{\text{Ackerbohne}} 3,4$  %;  $\bar{\text{MSB}}_{\text{Ackerbohne}} 2,0$  %;  $p = 0,001$ ). Während der 7-tägigen aeroben Lagerung veränderte sich bei den Erbsen- und Ackerbohnsilagen der pH-Wert nicht und die untersuchten Ackerbohnsilagen waren für mindestens sieben Tage aerob stabil. Bei den Erbsensilagen betrug die aerobe Stabilität der KON-Silagen maximal 122 h. Die aerobe Stabilität der MSB-Silagen lag, mit Ausnahme der 75 % TM Silage, bis zum Ende der Testzeit bei 168 h. Die Erbsensilagen der 75 % TM-Stufe waren mit nur 87 h (KON) und 67 (MSB) weniger aerob stabil ( $p < 0,001$ ).

**Tabelle 24:** Siliererfolg rückbefeuchteter und teigreif geernteter Erbsen (MW; n = 3)

[% d. TM]	Erbsen, siliert								p-Wert			SEM
	Alvesta		Astronaute		Astronaute*		E.F.B.33		S	Z	S*Z	
	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON	MSB	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>				
TM [g/kg FM]	707 <sup>b</sup>	706 <sup>b</sup>	681 <sup>c</sup>	683 <sup>c</sup>	744 <sup>a</sup>	745 <sup>a</sup>	697 <sup>b</sup>	702 <sup>b</sup>	< 0,001	n.s.	n.s.	0,962
pH-Wert	6,5 <sup>a</sup>	4,6 <sup>c</sup>	5,0 <sup>d</sup>	4,3 <sup>f</sup>	6,1 <sup>b</sup>	5,9 <sup>c</sup>	6,3 <sup>b</sup>	4,4 <sup>f</sup>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,012
Milchsäure	0,72 <sup>cd</sup>	1,76 <sup>b</sup>	1,63 <sup>b</sup>	3,57 <sup>a</sup>	0,37 <sup>d</sup>	1,48 <sup>bc</sup>	1,24 <sup>bc</sup>	1,72 <sup>b</sup>	< 0,001	< 0,001	0,008	0,058
Essigsäure	0,17 <sup>b</sup>	0,14 <sup>b</sup>	0,34 <sup>a</sup>	0,33 <sup>a</sup>	0,18 <sup>b</sup>	0,14 <sup>b</sup>	0,15 <sup>b</sup>	0,11 <sup>b</sup>	< 0,001	n.s.	n.s.	0,009
Ethanol	0,84 <sup>b</sup>	0,24 <sup>c</sup>	1,36 <sup>a</sup>	0,89 <sup>b</sup>	0,27 <sup>c</sup>	0,35 <sup>c</sup>	0,93 <sup>b</sup>	0,30 <sup>c</sup>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,025
TM-Verlust [%]	1,1	2,6	2,8	2,5	1,5	2,4	3,4	1,1	n.s.	n.s.	0,012	0,187
aerobe Stabilität <sup>+</sup> [h]	168 <sup>a</sup>	168 <sup>a</sup>	104 <sup>bc</sup>	168 <sup>a</sup>	87,0 <sup>cd</sup>	67,0 <sup>cd</sup>	122 <sup>b</sup>	168 <sup>a</sup>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	2,128

„Alvesta“, Probenmaterial 1; „Astronaute“, Probenmaterial 3; „Astronaute\*“, Probenmaterial 4; „E.F.B.33“, Probenmaterial 5 (Tabelle 6); + Zeitpunkt, bei dem sich die Silage  $\geq 3$  °C der Außentemperatur erwärmt; KON<sub>rück</sub>, Kontrolle ohne MSB-Zugabe (rückbefeuchtet); MW, Mittelwert; MSB<sub>rück</sub>, Milchsäurebakterien als Zugabe (MSB; rückbefeuchtet); n.s., nicht signifikant; S, Sorte; TM, Trockenmasse; Z, Zugabe; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede über alle Varianten mit  $p < 0,05$

**Tabelle 25:** Siliererfolg rückbefeuchteter und teigreif geernteter Ackerbohnen (MW; n = 3)

[% d. TM]	Ackerbohne, siliert								p-Wert			SEM
	Fanfare		Taifun		Taifun*		S	Z	S*Z			
	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON	MSB				KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	
TM [g/kg FM]	702 <sup>bc</sup>	715 <sup>b</sup>	692 <sup>cd</sup>	703 <sup>bc</sup>	754 <sup>a</sup>	755 <sup>a</sup>	684 <sup>d</sup>	686 <sup>d</sup>	< 0,001	0,007	n.s.	1,091
pH-Wert	6,4 <sup>a</sup>	4,4 <sup>cd</sup>	6,1 <sup>ab</sup>	4,3 <sup>d</sup>	6,0 <sup>ab</sup>	5,5 <sup>abc</sup>	5,1 <sup>bcd</sup>	4,3 <sup>d</sup>	0,002	< 0,001	0,018	0,085
Milchsäure	1,05 <sup>c</sup>	1,82 <sup>b</sup>	1,30 <sup>bc</sup>	1,36 <sup>bc</sup>	0,06 <sup>d</sup>	0,07 <sup>d</sup>	1,43 <sup>bc</sup>	2,82 <sup>a</sup>	< 0,001	< 0,001	0,001	0,055
Essigsäure	0,42 <sup>a</sup>	0,17 <sup>b</sup>	0,50 <sup>a</sup>	0,21 <sup>b</sup>	0,04 <sup>b</sup>	0,04 <sup>b</sup>	0,12 <sup>b</sup>	0,22 <sup>b</sup>	< 0,001	0,001	< 0,001	0,014
Ethanol	0,94 <sup>ab</sup>	0,19 <sup>b</sup>	1,10 <sup>a</sup>	0,18 <sup>b</sup>	0,67 <sup>ab</sup>	0,31 <sup>b</sup>	1,29 <sup>a</sup>	0,54 <sup>ab</sup>	n.s.	< 0,001	n.s.	0,057
TM-Verlust [%]	2,9 <sup>ab</sup>	2,2 <sup>bc</sup>	3,0 <sup>ab</sup>	0,3 <sup>c</sup>	2,9 <sup>ab</sup>	2,5 <sup>abc</sup>	4,6 <sup>a</sup>	3,0 <sup>ab</sup>	0,003	0,001	n.s.	0,165
aerobe Stabilität <sup>+</sup> [h]	168	168	168	168	168	168	168	168	.	.	.	0,000

„Fanfare“, Probenmaterial 6; „Taifun“, Probenmaterial 7; „Taifun\*“, Probenmaterial 8 (Tabelle 6); + Zeitpunkt, bei dem sich die Silage  $\geq 3$  °C der Außentemperatur erwärmt; KON<sub>rück</sub>, Kontrolle ohne MSB-Zugabe (rückbefeuchtet); MW, Mittelwert; MSB<sub>rück</sub>, Milchsäurebakterien als Zugabe (MSB; rückbefeuchtet); n.s., nicht signifikant; S, Sorte; TM, Trockenmasse; Z, Zugabe; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede über alle Varianten mit  $p < 0,05$

**Diskussion** Für die Untersuchung des Siliererfolges wurden Erbsen („Alvesta“, „Astronaute“ und Wintererbse „E.F.B.33“) und Ackerbohnen („Fanfare“ und „Taifun“) mit Trockenmassen von 70 - 75 % ohne (= KON) und mit Zugabe von MSB (= MSB) siliert. Dabei zeigte sich in allen untersuchten Parametern ein Sorteneffekt, der auf die Differenzen in der Trockenmasse sowie dem Nährstoffgehalt und der damit korrespondierend verfügbaren Menge an Ausgangssubstrat zur mikrobiellen Verstoffwechslung (z.B. Milchsäurebildung) zurückzuführen ist. Die Zugabe von MSB führte bei den Erbsen und Ackerbohnen unabhängig der Trockenmasse zu signifikant niedrigeren pH-Werten sowie zu annähernd doppelt so hohen Milchsäuregehalten. Die Trockenmasse bestimmte, wie bereits eingangs bewiesen, lediglich das Niveau der Milchsäuregehalte und pH-Werte. Die Essigsäure- und Ethanolgehalte waren unabhängig vom Silierzusatz auf einem sehr niedrigen Niveau. Ebenso kann der TM-Verlust während der Silierung über allen untersuchten Varianten mit unter 3 % als niedrig eingeschätzt werden. Mit der überwiegend hohen aeroben Stabilität der Silagen und der geringen Bildung von Essigsäure und Ethanol ist die Silierung der Körnerleguminosen mit einer TM von 70 % ohne nennenswerte Verluste möglich. Eine „klassische“ Silierung mit einer entsprechenden Ansäuerung findet hauptsächlich wegen der ungünstigen Silierbedingungen (hohen TM, geringer Z/PK-Quotient) nicht statt, sodass der Begriff „Konservierung“ treffender scheint. Diese Konservierung teigreifer Erbsen und Ackerbohnen ohne nennenswerte Säuerung und einer herabgesetzten Proteolyse, auf die im nachfolgenden näher eingegangen wird, ermöglicht das Vorhabenziel der annähernd verlustfreien (Rohprotein und Stärke) Lagerung und der Erhöhung der Proteinbeständigkeit.

#### 4.2.2.3 Proteinqualität

**Ergebnisse (Proteinqualität nach Silierung)** Die nachfolgenden Tabellen (Tabelle 26, Tabelle 27) beschreiben an ausgewählten Parametern mögliche Effekte der Silierung auf die Proteinqualität. Der Rohproteingehalt schwankte sortenbedingt bei den silierten Erbsen von 200 - 230 g/kg TM ( $p < 0,001$ ). Ebenso variierte der Reineiweißgehalt im Bereich von 180 - 200 g/kg TM sortenabhängig ( $p < 0,001$ ). Die silierten Ackerbohnen enthielten 270 - 340 g/kg TM Rohprotein sowie 220 - 280 g/kg TM Reinweiß ( $p < 0,001$ ). Die Zugabe von MSB hatte während der Silierung bei Erbsen und Ackerbohnen keinen Einfluss auf den Gehalt an Rohprotein und Reineiweiß. Die Proteinlöslichkeit der silierten Erbsen und Ackerbohnen schwankte, mit Ausnahme der 75 % TM silierten Erbsen, von 53 - 70 % d. Rohproteins ( $p < 0,001$ ). Die MSB-Zugabe führte zumindest bei den Erbsen zu geringeren Proteinlöslichkeiten ( $\emptyset_{\text{MSB Ackerbohne}} 64 \% \text{ d. RP vs. } \emptyset_{\text{KON Ackerbohne}} 68 \% \text{ d. RP}$ ;  $\emptyset_{\text{MSB Erbse}} 60 \% \text{ d. RP vs. } \emptyset_{\text{KON Erbse}} 68 \% \text{ d. RP}$ ,  $p = 0,001$ ). Die Erbse „Astronaute“ (Probenmaterial 4) hatte mit 40 %

d. RP, unabhängig der MSB Zugabe, die geringste Proteinlöslichkeit. Der mittlere Anteil an NPN-Verbindungen (Proteinfraktion A) lag unabhängig der Zugabe den silierten Erbsen und Ackerbohnen bei rund 15 % d. RP; Ergebnisse nicht dargestellt). Ebenso unbeeinflusst dieser Bedingungen ergab sich ein Anteil der Proteinfraktion B1 von 44 - 53 % d. RP. Bei ausgewählten Silagevarianten der Erbsen und Ackerbohnen wurden zusätzlich noch die Proteinfraktionen B2, B3 und C analysiert. Die Ergebnisse sind im Anhang (Tabelle Anhang 11, Tabelle Anhang 12) dargestellt. Der Anteil der Proteinfraktion B2 schwankte bei den untersuchten Erbsen sortenbedingt von 30 – 55 % d. RP ( $p = 0,002$ ). Die silierten Ackerbohnen wiesen einen Anteil der Proteinfraktion B2 von rund 30 % d. RP auf. Der Anteil der B3-Proteinfraktion lag bei den untersuchten Erbsen und Ackerbohnen bei rund 3 % bzw. 1,5 % d. RP, wohingegen der Anteil der unlöslichen Proteinfraktion C bei allen untersuchten Silagen bei rund 1 % d. RP lag. In Folge der Silierung wurden nur geringe Mengen an Ammoniak gebildet. Die Gehalte lagen sowohl bei den silierten Erbsen, als auch bei den Ackerbohnen  $< 1$  % d. Gesamt-N.



**Tabelle 26:** Effekte der Silierung auf die Proteinqualität von Erbsen (MW; n = 3)

[% d. TM]	Erbsen, siliert								p-Wert			SEM
	Alvesta		Astronauta		Astronauta*		E.F.B.33		S	Z	S*Z	
	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON	MSB	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>				
Rohprotein	206 <sup>c</sup>	207 <sup>c</sup>	236 <sup>a</sup>	236 <sup>a</sup>	230 <sup>bc</sup>	228 <sup>bc</sup>	226 <sup>b</sup>	223 <sup>b</sup>	< 0,001	n.s.	n.s.	0,693
Reineiweiß	174 <sup>d</sup>	177 <sup>d</sup>	193 <sup>bc</sup>	195 <sup>b</sup>	206 <sup>a</sup>	206 <sup>a</sup>	193 <sup>bc</sup>	188 <sup>c</sup>	< 0,001	n.s.	0,018	0,437
Proteinlöslichkeit [% d. RP]	69,9 <sup>ab</sup>	63,4 <sup>ab</sup>	70,8 <sup>a</sup>	63,8 <sup>ab</sup>	40,4 <sup>d</sup>	44,6 <sup>d</sup>	62,9 <sup>b</sup>	52,7 <sup>c</sup>	< 0,001	0,001	0,002	0,567
A [% d. RP]	14,8 <sup>c</sup>	11,9 <sup>d</sup>	18,3 <sup>a</sup>	17,2 <sup>ab</sup>	10,5 <sup>e</sup>	9,80 <sup>e</sup>	14,6 <sup>c</sup>	16,1 <sup>bc</sup>	< 0,001	0,006	< 0,001	0,123
B1 [% d. RP]	55,1 <sup>a</sup>	51,5 <sup>ab</sup>	52,5 <sup>ab</sup>	46,6 <sup>b</sup>	29,9 <sup>c</sup>	34,8 <sup>c</sup>	48,3 <sup>ab</sup>	36,6 <sup>c</sup>	< 0,001	0,004	0,002	0,614
NH <sub>3</sub> [% d. Gesamt-N]	0,69 <sup>ab</sup>	0,77 <sup>a</sup>	0,25 <sup>ab</sup>	0,13 <sup>b</sup>	0,35 <sup>ab</sup>	0,35 <sup>ab</sup>	0,60 <sup>ab</sup>	0,43 <sup>ab</sup>	0,002	n.s.	n.s.	0,042

„Alvesta“, Probenmaterial 1; „Astronauta“, Probenmaterial 3; „Astronauta\*“, Probenmaterial 4; „E.F.B.33“, Probenmaterial 5 (Tabelle 6); A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; E.F.B.33, Sortenname Wintererbse; KON<sub>rück</sub>, Kontrolle ohne MSB-Zugabe (MSB; rückbefeuchtet); MW, Mittelwert; MSB<sub>rück</sub>, Milchsäurebakterien als Zugabe (rückbefeuchtet); n.s., nicht signifikant; Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1; RP, Rohprotein; S, Sorte; TM, Trockenmasse; Z, Zugabe; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede über alle Varianten mit p < 0,05

**Tabelle 27:** Effekte der Silierung auf die Proteinqualität von Ackerbohnen (MW; n = 3)

[% d. TM]	Ackerbohne, siliert								p-Wert			SEM
	Fanfare		Taifun		Taifun*				S	Z	S*Z	
	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON	MSB	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>				
Rohprotein	269 <sup>b</sup>	275 <sup>b</sup>	287 <sup>b</sup>	283 <sup>b</sup>	335 <sup>a</sup>	332 <sup>a</sup>	343 <sup>a</sup>	329 <sup>a</sup>	< 0,001	n.s.	n.s.	1,687
Reineiweiß	222 <sup>b</sup>	233 <sup>b</sup>	226 <sup>b</sup>	232 <sup>b</sup>	279 <sup>a</sup>	280 <sup>a</sup>	272 <sup>a</sup>	269 <sup>a</sup>	< 0,001	n.s.	n.s.	1,345
Proteinlöslichkeit [% d. RP]	67,0 <sup>ab</sup>	55,6 <sup>c</sup>	70,3 <sup>a</sup>	69,8 <sup>a</sup>	67,0 <sup>ab</sup>	65,9 <sup>ab</sup>	67,8 <sup>ab</sup>	65,5 <sup>ab</sup>	0,030	0,056	n.s.	0,926
A [% d. RP]	17,6 <sup>ab</sup>	11,4 <sup>b</sup>	21,0 <sup>a</sup>	16,4 <sup>ab</sup>	16,9 <sup>ab</sup>	15,7 <sup>ab</sup>	20,5 <sup>a</sup>	18,2 <sup>a</sup>	0,010	0,002	n.s.	0,480
B1 [% d. RP]	49,4	44,1	49,3	53,5	50,1	50,2	47,3	47,3	n.s.	n.s.	n.s.	0,877
NH <sub>3</sub> [% d. Gesamt-N]	0,85	0,54	0,84	0,71	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.s.	n.s.	n.s.	0,077

„Fanfare“, Probenmaterial 6; „Taifun“, Probenmaterial 7; „Taifun\*“, Probenmaterial 8 (Tabelle 6); A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; KON<sub>rück</sub>, Kontrolle ohne MSB-Zugabe (rückbefeuchtet); MW, Mittelwert; MSB<sub>rück</sub>, Milchsäurebakterien als Zugabe (MSB; rückbefeuchtet); n.a., nicht analysiert; n.s., nicht signifikant; Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1; RP, Rohprotein; S, Sorte; TM, Trockenmasse; Z, Zugabe; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede über alle Varianten mit p < 0,05

**Diskussion** Der Ammoniak-Stickstoff ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) -Gehalt ermöglicht eine Aussage über den Proteinabbau und sollte bei „klassischen“ Silagen unter 10 % am Gesamtstickstoff betragen (GEFROM, 2012). In der vorliegenden Untersuchung lag der  $\text{NH}_3\text{-N}$ -Gehalt der Erbsen und Ackerbohnsilagen unabhängig vom Silierzusatz mit  $< 1$  % des Gesamt-N auf einem niedrigen Niveau und bestätigte damit den annähernd ausgebliebenen Proteinabbau während der Silierung. Untersuchungen von GEFROM (2012) ermittelten einen leicht höheren Anteil an  $\text{NH}_3\text{-N}$  am Gesamt-N-Gehalt von rund 2 % mit einer TM von 65 % im Siliergut. Die Zugabe von MSB reduzierte dabei signifikant den Gehalt an  $\text{NH}_3\text{-N}$ , was in der vorliegenden Arbeit teilweise bestätigt wurde, wobei der Unterschied in diesem geringen Bereich nicht überbewertet werden sollte. Die Proteingehalte wurden bei der Silierung von Körnerleguminosen mit 70 % TM nicht nennenswert verändert und entsprechend den bisherigen Untersuchungen (BAIK & HWA HAN, 2012; GEFROM, 2012). Allerdings ergaben Untersuchungen von BAIK & HWA HAN (2012) bereits bei einer 24-stündigen Fermentation von Erbsen (*Pisum sativum* cv. Joel) in Plastikbeuteln unter der Zugabe von *R. oligosporus* (10 mL, 500.000 Sporen/mL) eine signifikante Reduzierung der Proteinlöslichkeit (1 g in destillierten Wasser, 1 h, 23 °C) um annähernd 10 % im Vergleich zum nativen Material. Die Proteinverdaulichkeit wurde ebenfalls signifikant um 6 % reduziert. Dieses Ergebnis ließ sich sowohl in den Voruntersuchungen (55 % TM, 65 % TM), als auch in den Modellstudien (70 % TM) bestätigen. Grund hierfür ist die Bildung von Maillardprodukten (HOFMANN, 2021; KUHNITZSCH et al., 2019), die bereits ab einer Temperatur von 50 °C sowie unter einem sauren Milieu (RAMÍRES-JIMÉNEZ et al., 2001) gebildet werden und die Verfügbarkeit ausgewählter Aminosäuren (v.a. Lysin und Arginin; HOFMANN, 2021; KUHNITZSCH et al., 2019) reduzieren.

#### 4.2.2.4 Kohlenhydratfraktionen

**Ergebnisse (Kohlenhydratfraktionen nach Silierung)** Die nachfolgenden Tabellen (Tabelle 28 und Tabelle 29) beschreiben mögliche Effekte der Silierung auf die Kohlenhydratfraktionen von silierten Erbsen und Ackerbohnen. Der Rohfasergehalt änderte sich in Folge der Silierung nicht und blieb auf dem Niveau des Ausgangsmaterials. Auch die MSB-Zugabe hatte keinen signifikanten Einfluss auf den Rohfasergehalt der Erbsen- und Ackerbohnsilagen. In den silierten Erbsen wurden sortenbedingt mittlere Stärkegehalte von 500 - 560 g/kg TM ( $p = 0,025$ ) nachgewiesen. Die silierten Ackerbohnen hatten ebenfalls sortenbedingt Stärkegehalte von 420 - 450 g/kg TM ( $p < 0,001$ ). Die Stärkegehalte blieben im Vergleich zum Ausgangsmaterial durch die Silierung unbeeinflusst. Auch die Zugabe von MSB hatte keinen Einfluss auf den Stärkegehalt der silierten Erbsen und Ackerbohnen. Der Zuckergehalt fiel sowohl bei den

Erbsen ( $p = 0,002$ ), als auch bei den Ackerbohnen, mit Ausnahme der 75 % TM Silagen ( $p < 0,001$ ), in den Kontrollsilagen ( $\emptyset\text{KON}_{\text{Ackerbohne}} 0 \text{ g/kg TM}$ ;  $\emptyset\text{KON}_{\text{Erbsen}} 36 \text{ g/kg TM}$ ) geringer im Vergleich zu den MSB-Silagen ( $\emptyset\text{MSB}_{\text{Ackerbohne}} 17 \text{ g/kg TM}$ ;  $\emptyset\text{MSB}_{\text{Erbsen}} 47 \text{ g/kg TM}$ ) aus. Die Silagen der 75 % TM-Stufe der Erbsen und Ackerbohnen hatten mit rund 60 g/kg TM und 38 g/kg TM den höchsten Zuckergehalt. Bei der Analyse des aNDFom- und ADFom-Gehalt ergaben sich sortenbedingte Unterschiede. Der aNDFom-Gehalt der silierten Erbsen lag bei 100 - 140 g/kg TM, der von silierten Ackerbohnen bei 130 - 160 g/kg TM. In den silierten Ackerbohnen lag der ADFom-Gehalt höher im Vergleich zu den silierten Erbsen (Ackerbohnen: 110 - 150 g/kg TM; Erbsen: 75 - 100 g/kg TM). Der mittlere ADL-Gehalt lag sortenübergreifend und unabhängig von der MSB-Zugabe bei den silierten Erbsen niedriger im Vergleich zu den Ackerbohnen (Erbsen: 3 - 7 g/kg TM; Ackerbohnen: 5 - 17 g/kg TM). Auch der Gehalt an Hemicellulose (= aNDFom – ADFom) und Cellulose (= ADFom – ADL) variierte bei den Erbsen (20 - 40 g Hemicellulose/kg TM) und auch Ackerbohnen (15 - 30 g Hemicellulose/kg TM) unabhängig des Silierzusatzes. Die Summe der NFC lag bei den silierten Erbsen variantenübergreifend bei rund 600 g/kg TM. Bei den silierten Ackerbohnen ergaben sich, mit Ausnahme der Sorte „Fanfare“, geringere NFC-Gehalte für die KON-Silagen ( $\emptyset\text{KON}_{\text{Ackerbohne}} 489 \text{ g/kg TM}$  v.s.  $\emptyset\text{MSB}_{\text{Ackerbohne}} 501 \text{ g/kg TM}$ ). Diese Ergebnisse werden im Anhang Tabelle Anhang 11, Tabelle Anhang 12) dargestellt.

**Tabelle 28:** Effekte der Silierung auf die Kohlenhydratfraktionen von Erbsen (MW; n = 3)

[g/kg TM]	Erbsen, siliert								p-Wert			SEM
	Alvesta		Astronaut* <sup>*</sup>		Astronaut** <sup>**</sup>		E.F.B.33		S	Z	S*Z	
	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON	MSB	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>				
Rohfaser	60,3 <sup>b</sup>	57,0 <sup>b</sup>	55,3 <sup>b</sup>	65,3 <sup>ab</sup>	63,0 <sup>ab</sup>	68,7 <sup>ab</sup>	67,3 <sup>ab</sup>	78,7 <sup>a</sup>	0,002	0,020	0,144	1,150
Stärke	503 <sup>b</sup>	557 <sup>a</sup>	529 <sup>ab</sup>	530 <sup>ab</sup>	527 <sup>ab</sup>	523 <sup>ab</sup>	519 <sup>b</sup>	495 <sup>b</sup>	0,025	0,242	0,001	2,707
Zucker	40,7 <sup>bc</sup>	47,3 <sup>abc</sup>	41,7 <sup>bc</sup>	43,0 <sup>bc</sup>	59,3 <sup>ab</sup>	62,7 <sup>a</sup>	4,00 <sup>d</sup>	35,3 <sup>c</sup>	< 0,001	0,002	0,006	1,418
aNDFom	124 <sup>bc</sup>	101 <sup>d</sup>	99,0 <sup>d</sup>	107 <sup>d</sup>	103 <sup>d</sup>	113 <sup>cd</sup>	131 <sup>ab</sup>	141 <sup>a</sup>	< 0,001	0,634	< 0,001	1,200
ADFom	84,0 <sup>b</sup>	74,0 <sup>b</sup>	76,7 <sup>b</sup>	80,0 <sup>b</sup>	77,3 <sup>b</sup>	84,3 <sup>b</sup>	98,3 <sup>a</sup>	105 <sup>a</sup>	< 0,001	0,418	0,028	1,002

„Alvesta“, Sorte 1; „Astronaut\*“, Sorte 3; „Astronaut\*\*“, Sorte 4; „E.F.B. 33“, Sorte 5 (Tabelle 6); ADFom, saure Detergentienfaser („acid detergent fibre“) reduziert um die Rohasche; aNDFom, Neutrale Detergentienfaser („neutral detergent fibre“) behandelt mit einer hitzestabilen Amylase reduziert um die Rohasche; KON<sub>rück</sub>, Kontrolle ohne MSB-Zugabe (rückbefeuchtet); MW, Mittelwert; MSB<sub>rück</sub>, Milchsäurebakterien als Zugabe (MSB; rückbefeuchtet); S, Sorte; TM, Trockenmasse; Z, Zugabe; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit p < 0,05

**Tabelle 29:** Effekte der Silierung auf die Kohlenhydratfraktionen von Ackerbohnen (MW; n = 3)

[% d. TM]	Ackerbohne, siliert								p-Wert			SEM
	Fanfare		Taifun* <sup>*</sup>		Taifun** <sup>**</sup>		S	Z	S*Z			
	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON	MSB				KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	
Rohfaser	103	101	91,7	84,3	91,0	85,3	85,7	89,7	0,005	0,359	0,514	1,412
Stärke	436 <sup>ab</sup>	445 <sup>ab</sup>	445 <sup>ab</sup>	449 <sup>a</sup>	422 <sup>b</sup>	426 <sup>ab</sup>	427 <sup>ab</sup>	424 <sup>b</sup>	< 0,001	0,340	0,665	1,695
Zucker	0,00 <sup>d</sup>	12,3 <sup>c</sup>	0,00 <sup>d</sup>	18,0 <sup>b</sup>	38,7 <sup>a</sup>	38,0 <sup>a</sup>	0,00 <sup>d</sup>	0,00 <sup>d</sup>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,286
aNDFom	165 <sup>a</sup>	163 <sup>a</sup>	142 <sup>ab</sup>	126 <sup>b</sup>	143 <sup>ab</sup>	133 <sup>ab</sup>	135 <sup>ab</sup>	130 <sup>b</sup>	0,001	0,092	0,721	2,368
ADFom	148 <sup>a</sup>	139 <sup>ab</sup>	124 <sup>abc</sup>	111 <sup>bc</sup>	117 <sup>bc</sup>	109 <sup>c</sup>	115 <sup>bc</sup>	113 <sup>bc</sup>	< 0,001	0,082	0,831	2,131

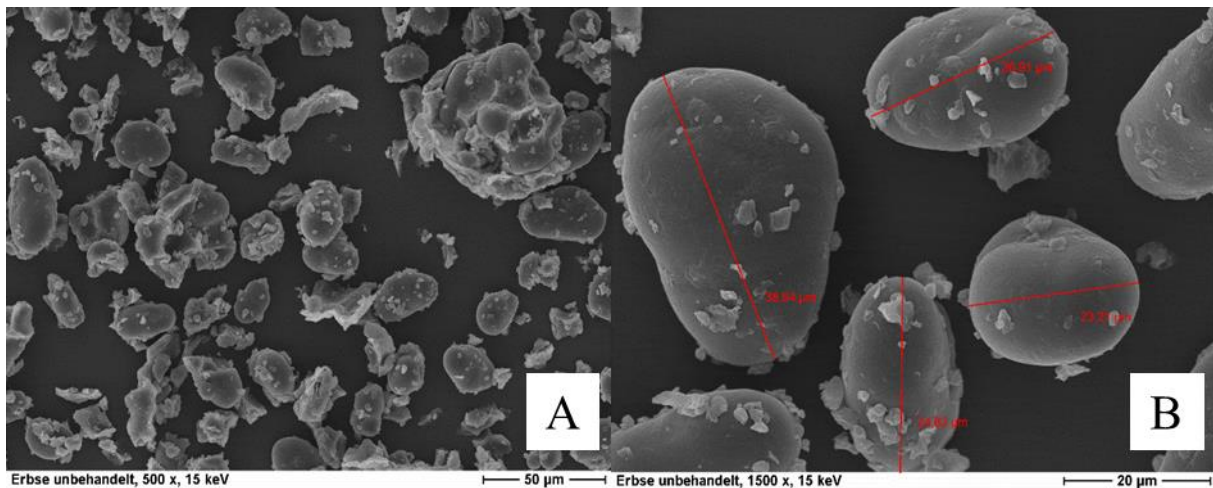
„Fanfare“, Sorte 6; „Taifun\*“, Sorte 7; „Taifun\*\*“, Sorte 8 (Tabelle 6); ADFom, saure Detergentienfaser („acid detergent fibre“) reduziert um die Rohasche; aNDFom, Neutrale Detergentienfaser („neutral detergent fibre“) behandelt mit einer hitzestabilen Amylase reduziert um die Rohasche; KON<sub>rück</sub>, Kontrolle ohne MSB-Zugabe (rückbefeuchtet); MW, Mittelwert; MSB<sub>rück</sub>, Milchsäurebakterien als Zugabe (MSB; rückbefeuchtet); S, Sorte; TM, Trockenmasse; Z, Zugabe; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit p < 0,05

**Diskussion** CZARNECKA et al. (1998) untersuchten den Einfluss der Silierung (Zugabe von  $10^8$  KBE *L. plantarum*/200 g) ebenfalls an rückbefeuchteten (40, 45, 50, 55 und 60 % TM) Erbsen und Ackerbohnen. Im Laufe der Silierung wurde bereits nach 12 h der Gehalt an Monosacchariden sowie die Gehalte der Oligosaccharide Stachyose (1x Glucose, 1x Fruktose, 2x Galaktose) und Verbascose (1x Glucose, 1x Fruktose, 3x Galaktose) um > 85 % signifikant reduziert. In der vorliegenden Untersuchung führte die Silierung der Erbsen kaum zu Veränderungen des Zuckergehaltes im Vergleich zu den in der Tabelle 18 dargestellten Werten des Ausgangsmaterials. Die Zugabe von MSB hatte keinen signifikanten Einfluss auf den Zuckergehalt im Vergleich zu den Kontrollsilagen. Bei den KON-Silagen der Ackerbohnen reduzierte sich zum überwiegenden Teil der Zuckergehalt deutlich im Vergleich zum Ausgangsmaterial (Tabelle 19) und war signifikant geringer zu den MSB-Silagen. Der Zucker wurde dabei teilweise vollständig abgebaut. Die Reduzierung des Zuckers in den Kontrollsilagen war demnach nicht auf die Stoffwechselaktivität der MSB zurückzuführen, sondern auf andere Mikroben wie z.B. *Staphylococcus*, *Bacillus* und „Andere“, die in diesen Silagen mit einer relativen Häufigkeit von rund 50 % mit den MSB konkurrierten (siehe Abbildung 11). Auf Grund der fehlenden MSB-Zugabe vor der Silierung, schafften es die natürlich vorkommenden MSB nicht, sich durch ihre Milchsäureproduktion gegen diese säureempfindlichen Silierschädlinge durchzusetzen und sie in ihrer Stoffwechselaktivität auf ein Minimum zu reduzieren. Das erhöhte Vorkommen dieser unerwünschten Mikroben war für die höheren pH-Werte sowie die teilweise signifikant erhöhten Essigsäure- und Ethanolgehalte in den Kontrollsilagen verantwortlich und bedingten letztlich eine verschlechterte aerobe Stabilität. Der Stärkegehalt der untersuchten Erbsen veränderte sich kaum (Tabelle 28) im Vergleich zum Ausgangsmaterial (Tabelle 18). Ebenso hatte die Zugabe von MSB keinen signifikanten Einfluss. Untersuchungen von GEFROM (2012) zeigten bei der Silierung von Erbsen und Ackerbohnen mit einer TM von 65 % hingegen einen hohen Verlust an Stärke von bis zu 55 %. Die Autorin führte diesen Stärkeabbau auf mikrobielle Stoffwechselaktivitäten zur Milchsäureproduktion zurück. Bei Silagen mit TM-Gehalten von 75 % blieb der Stärkegehalt auf Grund einer reduzierten mikrobiellen Aktivität unverändert (GEFROM, 2012). Die reduzierte Aktivität lässt sich anhand der vorliegenden Untersuchung bereits bei einer TM von 70 % bestätigen. Eine mögliche Verbindung der amylolytischen Aktivität von MSB und einem damit verbundenen Stärkeabbau in Folge der Silierung, wurde durch die vorliegende Untersuchung nicht bestätigt (MSB vs. MSB<sup>A</sup>; Tabelle Anhang 1). Allerdings konnte eine amylolytische Aktivität auf verschiedenen Stärke-Agarplatten nach Bebrütung nachgewiesen werden (siehe Abbildung Anhang 30). Dies ist durch optimalere Bedingungen für die Stoffwechselaktivität

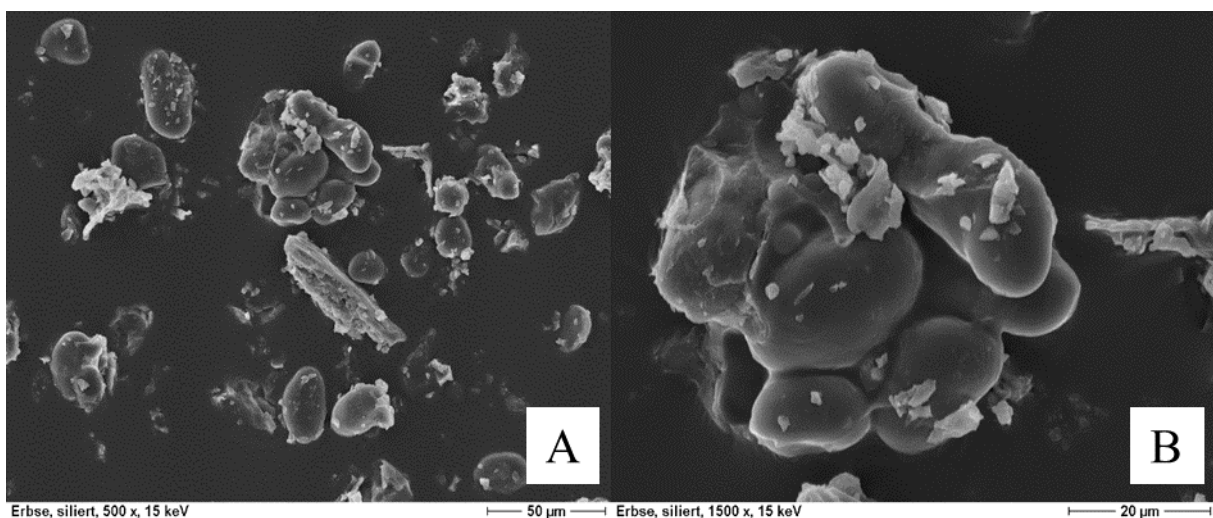
der Mikroben (u.a. ausgewählter Nährboden, Temperaturen 35 °C, höherer Feuchtigkeitsgehalt, mehlförmige Stärkesubstrate) im Vergleich zum gequetschten Erbsen- und Ackerbohnschrot zu begründen. Die Stärkeverdaulichkeit *in vitro* blieb zumindest am Beispiel der großtechnisch silierten Erbse „Alvesta“ (siehe Abbildung 22) ebenfalls unverändert.

#### 4.2.2.5 Morphologie

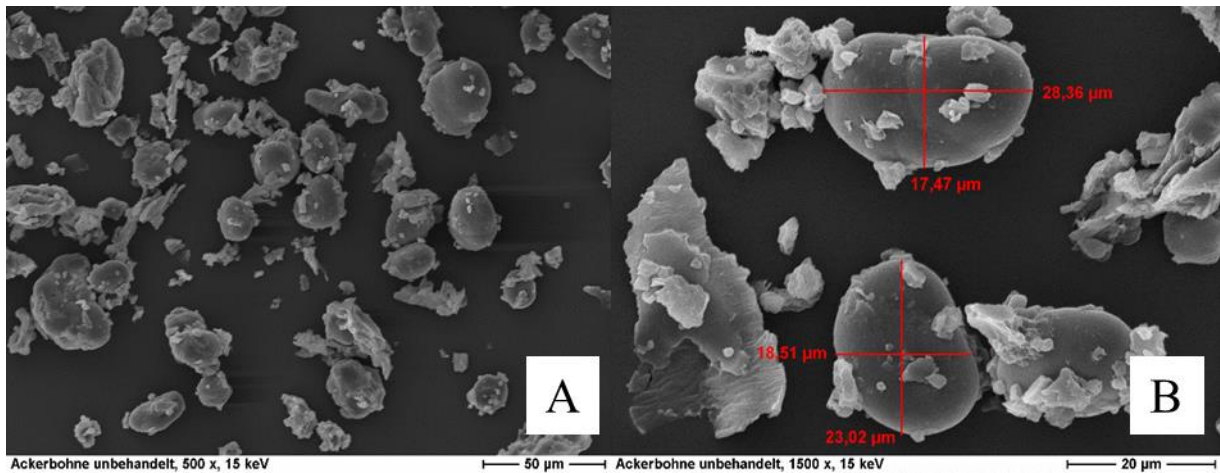
**Ergebnisse (Morphologie nach Silierung)** Für diese Untersuchung wurden native und silierte (KON, ohne Zugabe von MSB) Erbsen (Abbildung 6 und Abbildung 7) sowie Ackerbohnen (Abbildung 8 und Abbildung 9) elektronenmikroskopisch untersucht. Die Stärkegranulae werden jeweils in 500-facher (A) und 1500-facher (B) Vergrößerung dargestellt. In der Abbildung 9 sind die einzelnen Bestandteile kenntlich gemacht.



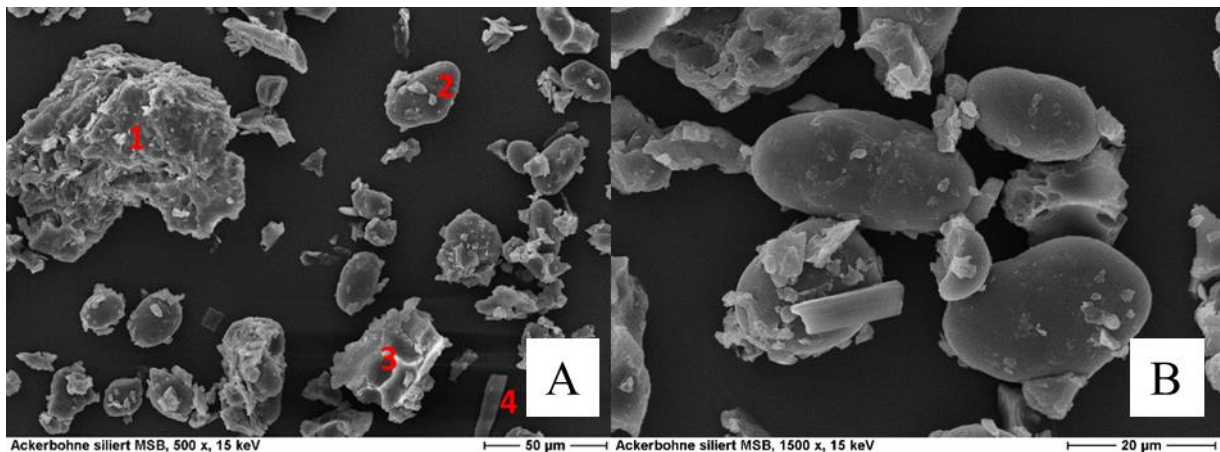
**Abbildung 6:** Stärkestruktur der Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 1; nativ; Vergrößerung: A = 500-fach, B = 1500-fach)



**Abbildung 7:** Stärkestruktur der Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 1; rückbefeuchtet, siliert, KON; Vergrößerung: A = 500-fach, B = 1500-fach)



**Abbildung 8:** Stärkestruktur der Ackerbohne „Taifun“ (Probenmaterial 7; nativ, Vergrößerung: A = 500-fach, B = 1500-fach )



**Abbildung 9:** Stärkestruktur der Ackerbohne „Taifun“ (Probenmaterial 7; rückbefeuchtet, siliert mit MSB; 1 = Stärke-Protein-Lipid-Komplex, 2 = Stärkegranul, 3 = Proteinreste mit Negativabdrücken der ausgelösten Stärkegranula, 4 = Faserbestandteil; Vergrößerung: A = 500-fach, B = 1500-fach)

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen gaben einen Überblick über die Beschaffenheit des gemahlene (1 mm) Korns. Gut sichtbar waren die bohnen- bzw. nierenförmigen Stärkegranula. Die Oberfläche der Stärkegranula erschien eben und glatt. Die Stärkegranula waren in einem Komplex aus Proteinen und Lipiden gebunden oder wurden in Folge der Zerkleinerung ausgelöst. Letzteres ließ sich an den bohnenförmigen Negativabdrücken (Abbildung 9, Foto A, Beschreibung 3) erkennen. Die Erbsenstärkegranulae der Sorte „Alvesta“ hatten beispielsweise eine Länge von 25 - 35 µm. Die Stärkegranulae der verwendeten Ackerbohne „Taifun“ waren mit 15 - 30 µm vergleichsweise kleiner aber im Vergleich z.B. zu Maisstärke (5 - 20 µm; siehe Abbildung Anhang 12) größer. Die Rückbefeuchtung und Silierung zeigten in Abbildung 7 eine Veränderung der Struktur. Einzelne Stärkegranula waren weiterhin klar differenzierbar, allerdings schienen sie mit dem

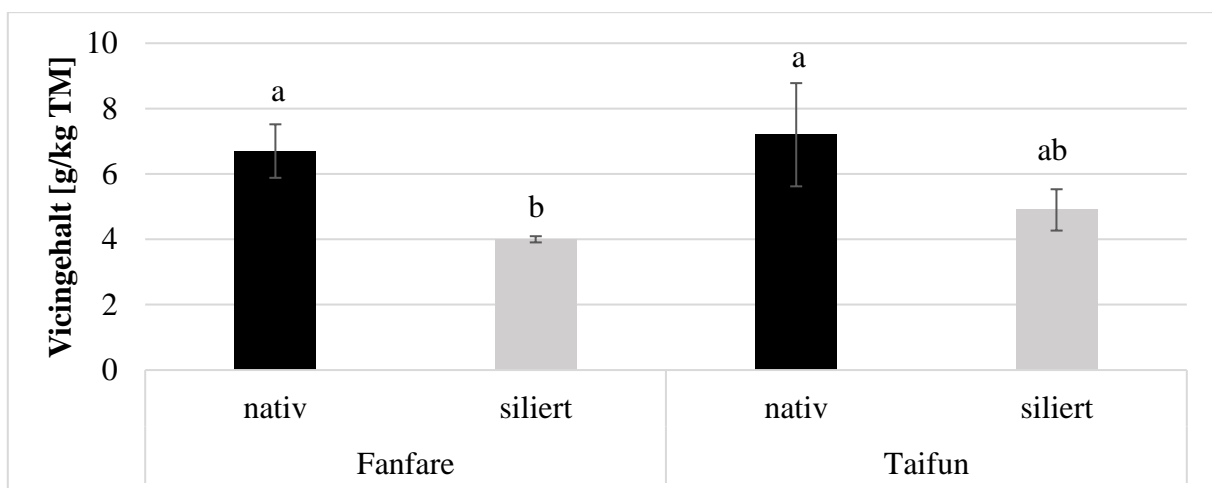


Stärke-Protein-Komplex zu verschmelzen und waren weniger klar abgrenzbar. Diese Auffälligkeit konnte allerdings bei der Silierung mit MSB (MSB) sowohl bei der Erbse „Alvesta“, als auch bei der Ackerbohne „Taifun“ (siehe Abbildung Anhang 10) nicht beobachtet werden.

**Diskussion** Die elektronenmikroskopischen Aufnahmen der Stärkegranulae, siliertes Erbsen und Ackerbohnen (Abbildung 7, Abbildung 9) gaben keinen Hinweis auf mögliche Veränderung der Oberfläche oder Struktur der Stärkegranulae durch die Silierung. Die Zugabe von MSB (Abbildung 9) hatte ebenfalls keinen Einfluss auf die Oberfläche der Stärkekörner. Eine ersichtliche Schädigung der Stärkegranulae (Löcher) durch mikrobielle Enzyme wie z.B. nachgewiesen bei Stärkegranulae aus dem Verdauungstrakt (u.a. WENDERLEIN et al., 2022) blieben durch die zugesetzten MSB, unabhängig der amylytischen Aktivität (MSB vs. MSB<sup>A</sup>, Ergebnisse nicht dargestellt) aus und bestätigen die bereits dargestellten Unauffälligkeiten der Stärkequalität in Folge der Silierung.

#### 4.2.2.6 Antinutritive Inhaltsstoffe

**Ergebnisse (Vicingehalt nach Silierung)** Für die nachfolgende Untersuchung wurden zwei Sorten Ackerbohnen („Fanfare“ und „Taifun“) ausgewählt und auf dessen Vicingehalt im nativen und silierten (mit MSB-Zugabe) Zustand untersucht. Die Ergebnisse werden in der Abbildung 10 dargestellt.



**Abbildung 10:** Auswirkungen der Silierung (Zugabe MSB) von Ackerbohnen „Fanfare“ (Probenmaterial 6) und „Taifun“ (Probenmaterial 7; Tabelle 6) auf den Vicingehalt ( $n = 3$ ; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede über alle Varianten mit  $p < 0,05$ ; MW, SD)

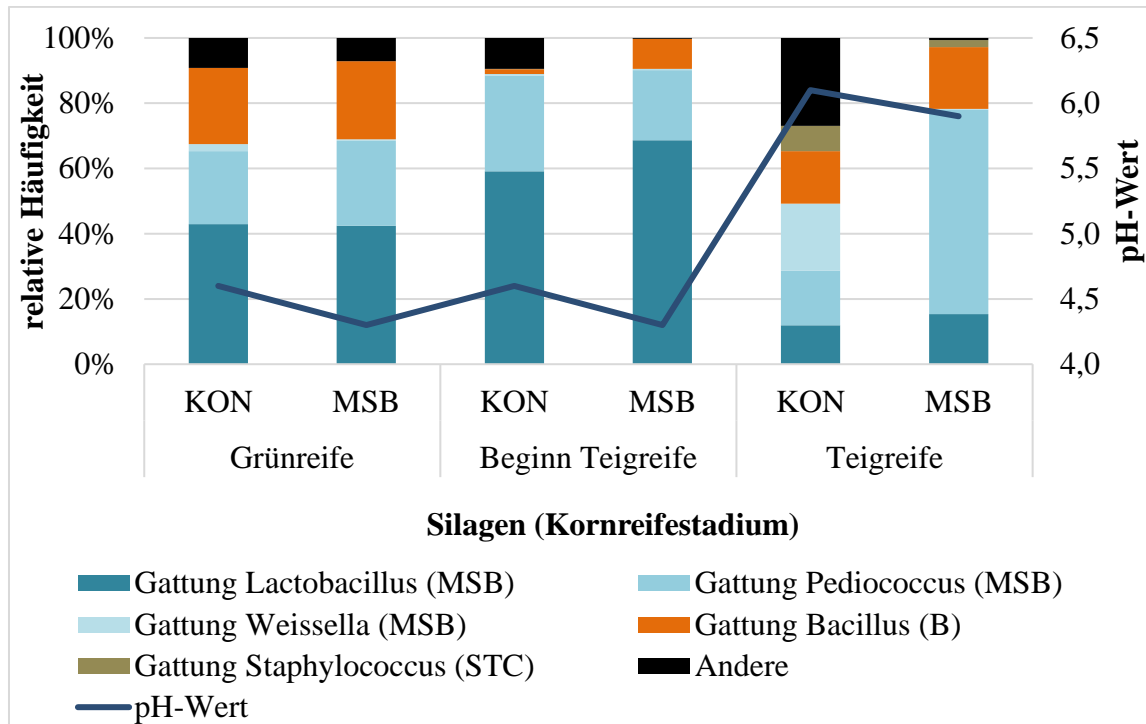


Der Vicin Gehalt der verwendeten Ackerbohnen lag im unbehandelten Material bei rund 7 g/kg TM. In Folge der Silierung reduzierte sich dieser bei der Ackerbohne „Fanfare“ auf 4 g/kg TM und bei der Ackerbohne „Taifun“, zumindest tendenziell, auf rund 5 g/kg TM.

**Diskussion** Ein Kriterium für die verhaltene Attraktivität für Erbsen und Ackerbohnen in der Fütterung landwirtschaftlicher Nutztiere sind darin enthaltene antinutritive Substanzen. So führen sie z.B. zu einer Reduzierung der Nährstoffabsorption und Proteinverdaulichkeit sowie zu einer reduzierten Futteraufnahme (DUNKEL et al., 2016). Mit rund 7 g Vicin/kg TM gelten die verwendeten Ackerbohnen als pyrimidinglycosidreich. In der vorliegenden Untersuchung konnte eine deutliche Reduzierung des Vicin Gehaltes von bis zu 40 % durch die Silierung erreicht werden. Grund hierfür sind mikrobiell erzeugte Enzyme der zugesetzten MSB, insbesondere *L. plantarum* (CODA et al., 2015; MCKAY, 1992) die in der Lage sind, Vicin und auch Convicin zu unschädlichen Verbindungen zu spalten (MEIJER & MUUSE, 1988; MCKAY, 1992; CODA et al., 2015; RINNE et al., 2020; RIZZELLO et al., 2016). Vicin und Convicin sind im Sameninneren lokalisiert und daher relativ hitzebeständig (KHAMASSI et al., 2013). Weder eine physikalische noch eine thermische Aufbereitung reduzieren nennenswert deren Gehalt (BELLOF et al., 2016; CARDADOR-MARTÍNEZ et al., 2012; DÄNNER, 2003), sodass die Silierung von Ackerbohnen einen entscheidenden Beitrag zur Reduzierung von Vicin leisten kann.

#### 4.2.2.7 Mikrobiom

**Ergebnisse (Mikrobiom)** Die Abbildung 11 gibt einen Überblick über den bakteriellen Besatz siliierter Erbsenkörner („Astronaut“, Probenmaterial 4) nach rund 60 d Silierung bei vorherrschendem pH-Wert.



**Abbildung 11:** Relative Häufigkeit epiphytischer Bakterien im Verhältnis zur Gesamtbakterienanzahl in silierten Erbsenkörnern („Astronaut“, Probenmaterial 4) zu ausgewählten Kornreifestadien ohne (KON) oder mit Zugabe von Milchsäurebakterien (MSB) sowie die entsprechenden pH-Werte (Silierdauer 59 - 62 d; Grünreife,  $TM_{KON} = 42\%$  ( $n = 1$ ),  $TM_{MSB} = 40\%$  ( $n = 2$ ); Beginn Teigreife,  $TM_{KON} = 53\%$  ( $n = 3$ ),  $TM_{MSB} = 52\%$  ( $n = 3$ ); Teigreife,  $TM_{KON} = 73\%$  ( $n = 3$ ),  $TM_{MSB} = 74\%$  ( $n = 4$ ); MW)

In den untersuchten Silagen waren, mit Ausnahme der KON-Silagen zur Teigreife, mit einer relativen Häufigkeit von > 60 bis 80 % MSB (blau gefärbt) nachweisbar. Während zu den Stadien der Grünreife und Beginn Teigreife vorwiegend MSB der Gattung *Lactobacillus* vorkamen und kein Einfluss der MSB-Zugabe als Siliermittel erkennbar war, enthielten die MSB-Silagen zum Stadium der Teigreife (~ 70 % TM) überwiegend MSB der Gattung *Pediococcus* und die KON-Silagen MSB der Gattung *Weissella*. In diesem Stadium war auch ein Einfluss der MSB-Zugabe anhand der höheren relativen Häufigkeit an MSB im Vergleich zu den KON-Silagen erkennbar. Die MSB der Gattungen *Lactobacillus* sowie *Pediococcus* wurden durch das Siliermittel Josilac®classic den MSB-Silagen zugesetzt und anhand dieser Untersuchung mehrheitlich nachgewiesen. Bei dieser Untersuchung wurden ebenso die relative Häufigkeit epiphytischer Eukarionten bestimmt. Die Ergebnisse werden in der Abbildung Anhang 18 dargestellt. Nach Abschluss der Silierung zu den ausgewählten Reifestadien wurden

überwiegend Eukarionten aus dem Reich Fungi (20 – 40 % rel. Häufigkeit) und der Gattung *Pichia* (20 – 40 % rel. Häufigkeit) nachgewiesen. Zum Zeitpunkt der Teigreife waren mit einer rel. Häufigkeit von rund 40 % überwiegend Eukarionten aus dem Reich Fungi vertreten. Einen Einfluss der Zugabe von MSB war nicht erkennbar.

**Diskussion** Die Silierung führte in jedem dargestellten Reifestadium zu einem deutlichen Anstieg der relativen Häufigkeit von MSB im Vergleich zum Ausgangsmaterial (siehe Abbildung 3). Die relative Häufigkeit der ausgewählten MSB lag zum Zeitpunkt der Grünreife auf einem hohen Niveau. Das Vorkommen von Bakterien der Gattung *Bacillus* hingegen auf einem Niedrigen. Die feuchten Korn-Silagen (50 % TM) hatten ein deutlich ausgeprägtes Vorkommen an MSB (v.a. *Lactobacillus*) unabhängig der MSB Zugabe. Dies bestätigten auch die mittleren pH-Werte, die auf einem ähnlich niedrigen Niveau lagen. Mit steigender TM im Siliergut (70 % TM) sank die relative Häufigkeit der MSB v.a. in den Silagen ohne MSB-Zugabe (KON), die der MSB-Silagen blieb hingegen auf einem hohen Niveau. Hierbei ging der Anteil der MSB der Gattung *Lactobacillus* (~ 10 % rel. Häufigkeit) zu Gunsten eines erhöhten Vorfindens von MSB der Gattung *Pediococcus* deutlich zurück. Die sinkende relative Häufigkeit von *Lactobacillus* ging mit einer geringeren Reduzierung des pH-Wertes und vermutlich mit einer geringeren Milchsäurebildung einher. Die geringere relative Häufigkeit von *Lactobacillus* deutete auf eine geringere Osmotoleranz ab 70 % TM im Siliergut hin, wohingegen MSB der Gattung *Pediococcus*, wie es bereits in den Voruntersuchungen bestätigt und diskutiert wurde (55 % TM und 65 % TM), auch in diesem TM-Bereich (70 % TM) sich besser entwickeln können.

#### 4.2.2.8 Aerobe Stabilität

**Ergebnisse (Aerobe Stabilität)** Die Beurteilung der aeroben Stabilität wurde standardmäßig für alle hergestellten Silagen vorgenommen. Silagen, die bis einschließlich zum 7. Tag keine Erwärmung zeigten, galten dabei als aerob stabil. Das Vorkommen von Schimmel und Hefen wurde im Anschluss der aeroben Lagerung objektiv bonitiert (siehe Tabelle Anhang 2). Die nachfolgende Tabelle 30 beschreibt die aerobe Stabilität von rückbefeuchteten (70 % TM) und silierten Erbsen in Abhängigkeit des Silierzusatzes.

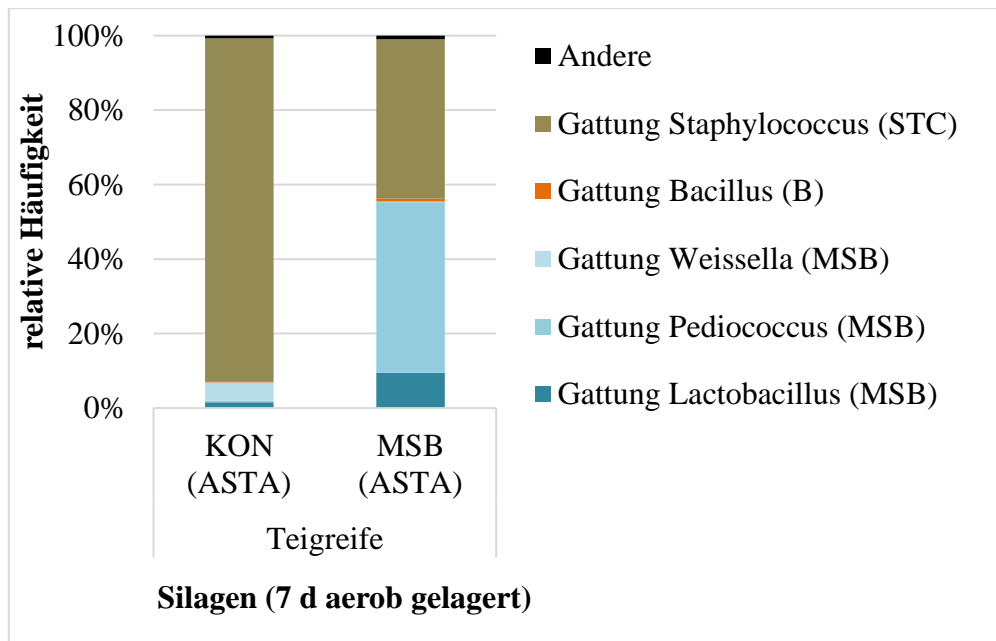
**Tabelle 30:** Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der aeroben Stabilität silierter Erbsen mit und ohne Zugabe von Milchsäurebakterien nach 7 Tagen aerober Lagerung (MW; n = 3)

	Erbsen, siliert, 7 d aerob gelagert						p-Wert	SEM
	Alvesta			E.F.B.33				
	KON	MSB	MSB <sup>A</sup>	KON	MSB	MSB <sup>A</sup>		
aerobe Stabilität <sup>+</sup> [h]	168 <sup>a</sup>	168 <sup>a</sup>	168 <sup>a</sup>	122 <sup>b</sup>	168 <sup>a</sup>	168 <sup>a</sup>	0,002	2,750
pH-Wert	6,4 <sup>a</sup>	4,6 <sup>b</sup>	4,8 <sup>b</sup>	6,2 <sup>a</sup>	4,4 <sup>b</sup>	4,4 <sup>b</sup>	< 0,001	0,069
TM <sub>k</sub> -Verlust <sub>ASTA</sub> [%]	2,3	0	0	2,5	2,4	2,8	n.s.	0,463
Schimmel*	1	0	0	4	0	0		
Hefen*	0,5	2	1	2	0	0		

„Alvesta“, Probenmaterial 1; „E.F.B.33“, Probenmaterial 5 (Tabelle 6); <sup>+</sup> Zeitpunkt, bei dem sich die Silage  $\geq 3$  °C der Außentemperatur erwärmt; \* Bonitur nach Tabelle Anhang 2; E.F.B.33, Sortenname Wintererbse; KON, Kontrolle ohne MSB-Zugabe; MW, Mittelwert; MSB<sup>A</sup>, amylolytisch aktive Milchsäurebakterien als Zugabe, *L. plantarum* Stamm (LMG 18053); MSB, nicht amylolytisch aktive Milchsäurebakterien, „Josilac®classic“, *Lactobacillus plantarum*, LSI NCIMB 30083 1k20736 und L256 NCIMB 30084 1k20737 sowie *Pediococcus acidilactici* P11 DSM 23689 1k1011 und P6 DSM 23688 1k1010; Josera GmbH & Co. KG, Kleinheubach); n.s., nicht signifikant; TM<sub>k</sub>-Verlust<sub>ASTA</sub>, Rückgang der korrigierten Trockenmasse nach 7 Tagen aerober Lagerung; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede über alle Varianten mit  $p < 0,05$

Die Ergebnisse der untersuchten Ackerbohnsilagen sind in der Tabelle Anhang 3 dargestellt. Die aerob gelagerten Silagen ausgewählter Erbsen und Ackerbohnen hatten, mit Ausnahme zweier KON-Silagen (Erbsen „E.F.B.33“ für 5 Tage, Ackerbohne „Taifun“ für 6 Tage), eine mittlere aerobe Stabilität von mindestens 7 Tagen. Die mittleren pH-Werte der Silagen blieben unter aeroben Bedingungen nahezu unverändert im Vergleich zur frischen Erbsen- und Ackerbohnsilagen (siehe Vergleich Tabelle 24 und Tabelle 25). Die TM<sub>k</sub>-Verluste der Silagen lagen über den 7-tägigen Zeitraum unabhängig des Silierzusatzes unter 5 %. Eine Schimmelbildung blieb bei den Ackerbohnsilagen sowie in den Erbsensilagen mit MSB-Zugabe aus. Lediglich in den KON-Silagen der Erbsen bildeten sich vereinzelte (Erbsen „Alvesta“) bis sehr große (Wintererbse „E.F.B.33“) Schimmelnester. Hefen bildeten sich während der aeroben Lagerung in den meisten Ackerbohnen- und Erbsensilagen vereinzelt (~ 10 % des Siliergutes). Bei drei Silagevarianten (2 x KON, 1 x MSB) waren durchgehend im Material Hefen zu erkennen. Die nachfolgende Abbildung 12 soll das Vorkommen (relative

Häufigkeit) ausgewählter Mikroben nach 7 Tagen aerober Lagerung auf Erbsensilagen darstellen.



**Abbildung 12:** Relative Häufigkeit epiphytischer Bakterien im Verhältnis zur Gesamtbakterienanzahl in silierten Erbsenkörnern („Astronaute“, Probenmaterial 4) nach 7 Tagen aerober Lagerung (MW)

Die Abbildung verdeutlicht einen Rückgang an MSB bei den KON-Silagen im Zuge der aeroben Lagerung zu Gunsten eines gestiegenen Anteils an Staphylococcus auf annähernd 95 % rel. Häufigkeit. Bei den aerob gelagerten MSB-Silagen lag die rel. Häufigkeit der ausgewiesenen MSB noch bei annähernd 60 %. Das Vorkommen epiphytischer Eukarionten nach 7 tägiger aerober Lagerung der Erbsensilagen wird in der Abbildung Anhang 19 dargestellt. Nach diesem Zeitraum reduzierte sich die relative Häufigkeit der Fungi unmittelbar nach Silierung (siehe Abbildung Anhang 18) zu Gunsten steigender Anteile von Eukarionten der Gattung Picia, Penicillium sowie Eukarionten der Familie Saccharomycetaceae. Die Silagen mit Zugabe von MSB zeigten eine höhere Vielzahl an untersuchten Eukarionten im Vergleich zu den KON-Silagen bei denen sich lediglich Eukarionten im Reich der Fungi (20 % rel. Häufigkeit), der Gattung Pichia (~ 40 % rel. Häufigkeit), Penicillium (~ 15 % rel. Häufigkeit) sowie Eukarionten der Familie Saccharomycetaceae (~ 25 % rel. Häufigkeit) nachweisbar waren.

**Diskussion** Die aerobe Stabilität der untersuchten Kornsilagen war überwiegend hoch. Der pH-Wert veränderte sich in allen untersuchten Silagen unter den aeroben Bedingungen nicht nennenswert. Die hergestellten Silagen erwärmten sich kaum. Der signifikant geringere pH-Wert sowie höhere Säuregehalt der MSB-Silagen führt zu einem geringeren Vorkommen von Silierschädlingen, was die eingangs vorgestellten Untersuchungen des Mikrobioms bereits

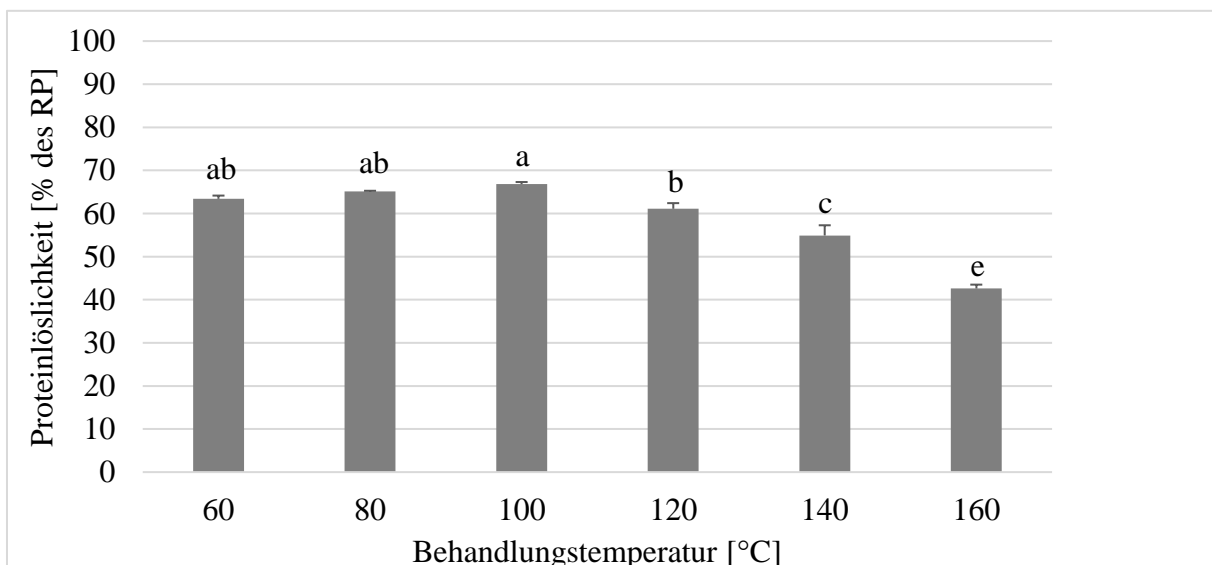
bestätigten. Nach siebentägiger aerober Lagerung (siehe Abbildung Anhang 34) zeigte sich bei den KON-Silagen der Erbsen eine Reduzierung des MSB-Vorkommen um annähernd 50 %-Punkte. Im Gegensatz dazu wiesen die MSB-Silagen noch ein Vorkommen an MSB von 60 % rel. Häufigkeit auf und erschwerten dadurch die Ausbreitung silierschädlicher Mikroben. Die untersuchten KON-Silagen enthielten wenig Milchsäure (siehe Tabelle 24), was auf das geringere Vorkommen von MSB zur Silierung zurückzuführen war und die Entwicklung weniger säuretoleranter Mikroben sowie eventuelle Silierschädlinge weniger einschränkte. Damit lässt sich das hohe Vorkommen von *Staphylococcus* erklären sowie die etwas geringere aerobe Stabilität der KON-Silagen von Erbsen und Ackerbohnen inklusive eines erhöhten Vorkommens an Hefen. Die Hefenbildung hatte allerdings keinen Einfluss auf den pH-Wert v.a. der MSB-Silagen, sodass davon auszugehen ist, dass die Stoffwechselfvorgänge der Hefen herabgesetzt waren. Hefen bauen organische Säuren (v.a. Milchsäure) ab. Neben den hohen TM der Silagen, die die Stoffwechselaktivität der Hefen zusätzlich erschwert hat, ist besonders der geringe Gehalt an organischen Säuren in den aerob gelagerten Silagen als Ausgangssubstrat der Hefenaktivität und -bildung für das moderate Aufkommen verantwortlich. Die Bildung von Schimmelpilzen und aeroben Mikroben, in der vorliegenden Untersuchung v.a. der Gattung *Staphylococcus* (siehe Abbildung 12), wird in einem sauren Milieu unterdrückt. Daher waren diese auch in den gelagerten MSB-Silagen weniger aufzufinden. Die KON-Silagen waren auf Grund ihres vergleichsweise hohen pH-Wert anfälliger für die Bildung dieser, sodass die Zugabe von MSB vor Silierung auch im Hinblick auf die Lagerstabilität sinnvoll ist. Dass die Silagequalität der hergestellten MSB-Silagen gegen die Erwartungen (Milchsäureabbau durch Hefen, Nacherwärmung, pH-Wertanstieg und Bildung von Schimmelpilzen) nach aerober Lager nahezu unverändert bleibt, ist auf den hohen TM-Gehalt (70 %) und der damit verbundene geringe Gehalt organischer Säuren (v.a. Milchsäure, < 3 % d. TM) der Silagen zurückzuführen. Der erwartete pH-Wertanstieg und die vermutete Nacherwärmung unter aeroben Bedingungen findet bei Erbsen- und Ackerbohnenkornsilagen mit TM von 70 % nicht statt.

### 4.2.3 Wärmebehandlung siliierter Erbsen und Ackerbohnen

In den nachfolgenden Untersuchungen wurde der Einfluss ausgewählter Parameter (Temperatur, Dauer, Menge, Feuchtigkeit, Siliermittelzusatz) während des Toastprozesses auf die Änderung der Proteinqualität betrachtet. Das Ziel bestand darin, möglichst durch Variation der Behandlungsintensität die Proteinbeständigkeit der Erbsen und Ackerbohnen so zu steigern, ohne dabei eine Schädigung der Proteine und Aminosäuren zu provozieren.

#### 4.2.3.1 Einfluss der Behandlungsintensität

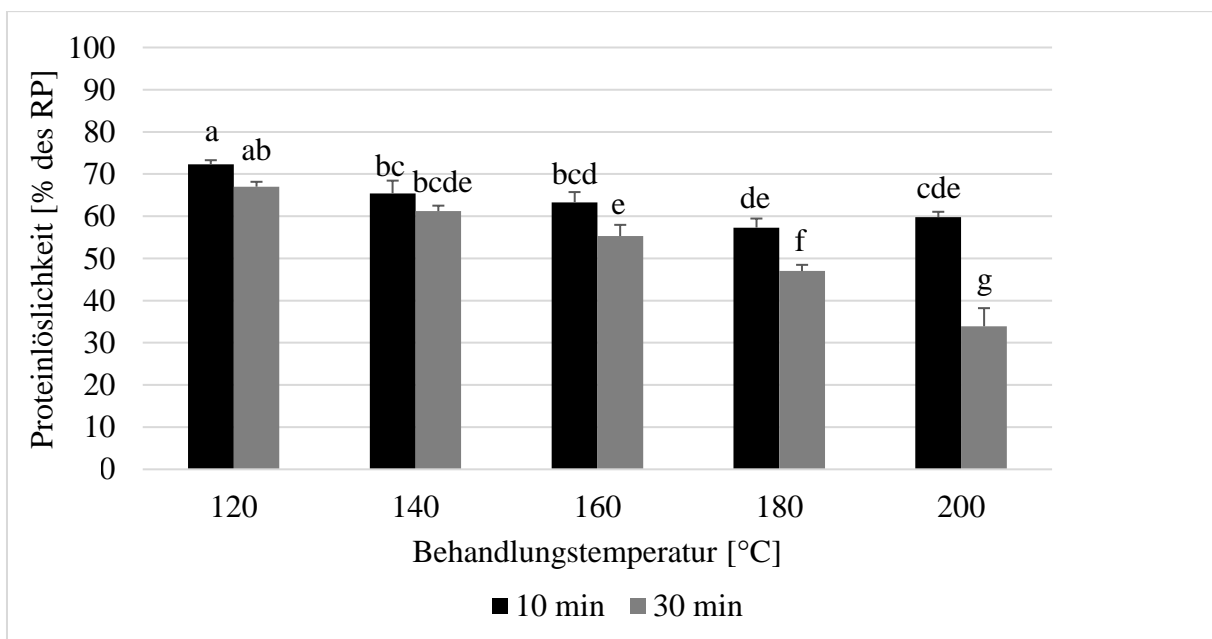
**Ergebnisse (Behandlungstemperatur und –dauer)** Um einen möglichen Effekt der Behandlungstemperatur sowie Behandlungsdauer darzustellen, wurden in Vorbereitung Erbsen der Sorte „Alvesta“ (Probenmaterial 1 und 2) auf rund 70 % TM rückbefeuchtet und siliert (ROMOS; Zugabe MSB2). Im Anschluss der Silierung wurden die Erbsen in Aluschalen zu je 500 g FM in einem Trockenschrank bei Temperaturen von 60 °C bis 160 °C für 20 Minuten thermisch behandelt (Abbildung 13). In einem weiterführenden Versuch wurden die Menge verdoppelt (1000 g FM) und die Behandlungsintensität erhöht (120 °C - 200 °C Lufttemperatur für 10 und 30 Minuten; Abbildung 14). Die Lüftung des Trockenschrankes wurde dabei deaktiviert um den entstehenden Wasserdampf im System (Trockenschrank) zu erhalten.



**Abbildung 13:** Veränderung der Proteinlöslichkeit siliierter + getoasteter Erbsen („Alvesta“, Probenmaterial 1; rückbefeuchtet auf 70 % TM) in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur (500 g FM, Trockenschrank; Proteinlöslichkeit native Erbse: 74 % des RP; Proteinlöslichkeit: silierte Erbsen: 64 % des RP); RP, Rohprotein; n = 3; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$

Die TM der nativen Erbse „Alvesta“ lag bei rund 88 %. Durch die Rückbefeuchtung (*aqua dest.*) wurde die angestrebte TM von 70 % erreicht. Die Wärmebehandlungen führten zu einer kontinuierlichen Erhöhung der TM von 72 % (60 °C, 20 min) auf rund 92 % TM (160 °C, 20

min;  $p < 0,001$ ). Die unbehandelte Erbse „Alvesta“ hatte eine Proteinlöslichkeit von 74 % des RP. In Folge der Silierung reduzierte sich bereits die Proteinlöslichkeit um 10 %-Punkte (Ergebnisse nicht dargestellt), entsprechend der bisher vorgestellten Ergebnisse. Die Behandlungsintensität von 60 °C bis einschließlich 120 °C Lufttemperatur für 20 Minuten hatte keinen nennenswerten Einfluss auf die Proteinlöslichkeit (67 % - 61 % des RP) im Vergleich zur Silage. Erst mit Temperaturen ab 140 °C reduzierte sich die Proteinlöslichkeit um annähernd 10 %-Punkte. Die Steigerung der Behandlungstemperatur auf 160 °C führte zu einer weiteren Herabsetzung der Proteinlöslichkeit auf 42 % d. RP. Damit wurde in Folge der Silierung und anschließend höchsten Behandlungsintensität (160 °C, 20 min) eine Minimierung der Proteinlöslichkeit von mehr als 30 %-Punkten erreicht. Die weiterführende Untersuchung des Gehaltes an pepsinunlöslichen Rohproteins (puRP), als ein möglicher Indikator der Proteinschädigung, ergab eine Erhöhung des puRP von 3,7 % des RP (nativ) über 4,2 - 5,2 % des RP (Wärmebehandlungen 60 °C - 140 °C) auf 6,4 % des RP bei der höchsten Behandlungsstufe (Ergebnisse nicht dargestellt). Darauf aufbauend wurden erneut silierte Erbsen („Alvesta“, Probenmaterial 2) zu ausgewählten Temperaturen (120 °C - 200 °C) für 10 und 30 Minuten intensiver wärmebehandelt (Abbildung 14).



**Abbildung 14:** Veränderung der Proteinlöslichkeit siliertes + getoasteter Erbsen („Alvesta“, Probenmaterial 2; rückbefeuchtet auf 68 % TM) in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur und –dauer (1000 g FM, Trockenschrank; Proteinlöslichkeit native Erbse: 82 % des RP; Proteinlöslichkeit: silierte Erbsen: 76 % des RP); RP, Rohprotein;  $n = 3$ ; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$



Die Proteinlöslichkeit der nativen Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 2) lag bei rund 82 % des RP und reduzierte sich in Folge der Silierung auf rund 76 % ( $p = 0,008$ ; Ergebnisse nicht dargestellt). Während bei der kurzen Behandlungsdauer (10 min) sich in den Temperaturbereichen von 140 °C bis 200 °C keine Effekte auf die Proteinlöslichkeit (65 % - 57 % des RP) zeigten, sank bei 30ig-minütiger Behandlungsdauer mit steigender Intensität die Proteinlöslichkeit von 67 % des RP (120 °C, 30 min) auf 34 % des RP (200 °C, 30 min). Es bestand dabei ein korrelativer Zusammenhang zwischen der Proteinlöslichkeit und der Behandlungstemperatur ( $y = 77 - 8x$  mit  $y$ , Proteinlöslichkeit;  $x$ , Behandlungstemperatur;  $R^2 = 0,9659$ ). Die Veränderungen der einzelnen Proteinfractionen sind dem Anhang in der Tabelle (Tabelle Anhang 19) zu entnehmen. Die Anteile der Proteinfraction B1 sanken bei 30-minütiger Behandlung zu Gunsten steigender Anteile der Proteinfraction B2 (B1: von 57 % auf 23 % des RP; B2: von 29 % auf 56 % des RP;  $p < 0,001$ ) im höheren Maße im Vergleich zur 10-minütigen Behandlung (B1: von 62 % auf 50 % des RP; B2: von 26 % auf 39 % des RP;  $p < 0,001$ ). Der Anteil der unlöslichen Proteinfraction C lag annähernd konstant bei rund 0,6 % des RP. Inwieweit die kombinierte Behandlung die ruminale Abbaubarkeit beeinflusste, soll die nachfolgende Tabelle 31 darstellen. Dabei wurden die ruminalen Abbaubarkeiten für die TM, des RP sowie der Stärke der eingangs dargestellten Proben der Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 2) *in vitro* untersucht.

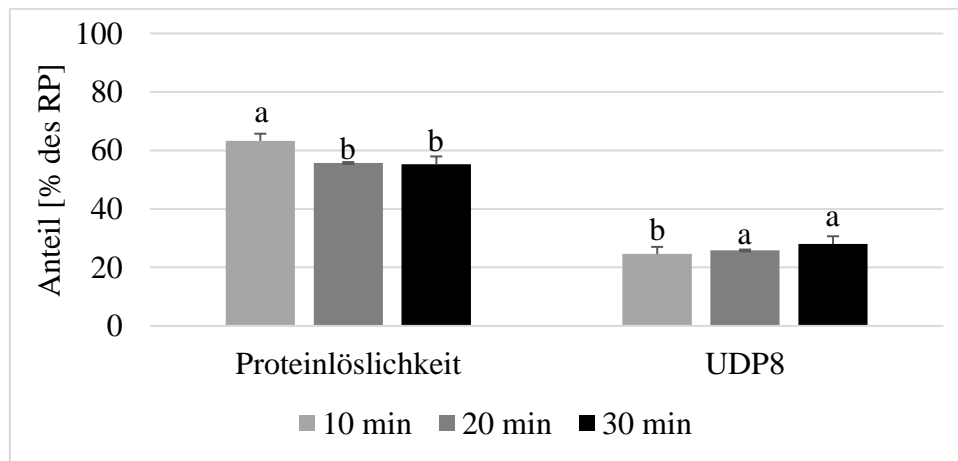
**Tabelle 31:** Veränderung der ruminalen Abbaubarkeit (*in vitro*) ausgewählter Rohnährstoffe der Erbse „Alvesta“ in Folge der Silierung sowie der anschließenden thermischen Aufbereitung (MW,  $n = 3$ )

[%]	Erbse „Alvesta“							
	nativ	siliert	siliert + getoastet					
			10 min			30 min		
		120 °C	160 °C	200 °C	120 °C	160 °C	200 °C	
Trockenmasse	53,2 <sup>c</sup>	55,4 <sup>abc</sup>	61,5 <sup>a</sup>	60,2 <sup>ab</sup>	50,6 <sup>c</sup>	56,4 <sup>abc</sup>	54,8 <sup>bc</sup>	37,4 <sup>d</sup>
Rohprotein	51,8 <sup>b</sup>	64,7 <sup>a</sup>	66,7 <sup>a</sup>	65,6 <sup>a</sup>	59,3 <sup>ab</sup>	56,8 <sup>ab</sup>	64,0 <sup>a</sup>	52,5 <sup>b</sup>
Stärke	92,4	92,3	90,0	90,5	89,4	87,8	89,4	90,8

Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 2); MW, Mittelwert;  $n = 3$ ; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$

Die ruminale Stärkeabbaubarkeit lag über alle Behandlungsstufen bei rund 90 %. Die ruminale Abbaubarkeit des Rohproteins erhöhte sich in Folge der Silierung signifikant von rund 52 % auf 65 %. Die anschließende Wärmebehandlung führte lediglich bei der höchsten Behandlungsstufe (200 °C, 30 min) zu einer signifikanten Reduzierung der silierten Erbsen auf das Niveau vor der Silierung. Die ruminale Abbaubarkeit der TM blieb durch den Prozess der Silierung mit rund 55 % annähernd unverändert. Die anschließende kurzzeitige Wärmebehandlung (10 min) erreichte bei niedrigen Temperaturen (120 °C und 160 °C) eine

marginale Steigerung der ruminalen TM-Abbaubarkeit. Nur die intensive Wärmebehandlung (200 °C, 30 min) führte mit rund 37 % zu einer Reduzierung der ruminalen TM-Abbaubarkeit im Vergleich zu allen anderen Varianten. Neben den bereits dargestellten Ergebnissen wurde *in vitro* der UDP8-Gehalt ausgewählter Proben bestimmt. Die entsprechenden Ergebnisse werden im Anhang in der Tabelle Anhang 19 vorgestellt und wurden bereits veröffentlicht (BACHMANN et al., 2020a). Dabei ergab sich bei 30-minütiger Wärmebehandlung ein kontinuierlicher Anstieg mit zunehmender Temperatur des UDP-Gehaltes von 44 g/kg TM (=16 % des RP; 120 °C, 30 min) auf 88 g/kg TM (= 42 % des RP; 200 °C, 30 min). In der nachfolgenden Abbildung 15 soll ergänzend die Veränderung der Proteinbeständigkeit bei 160 °C zu drei ausgewählten Behandlungsdauern dargestellt werden.



**Abbildung 15:** Veränderung der Proteinbeständigkeit siliert + getoasteter Erbsen „Alvesta“ (Probenmaterial 2) bei einer Behandlungstemperatur von 160 °C zu drei Behandlungsdauern (10, 20 und 30 min; 1000 g FM; n = 3; UDP8, unabbaubares Futterrohprotein bei einer Passagerate von 8 %/h, *in vitro*-Bestimmung, veröffentlicht in BACHMANN et al., 2020a; RP, Rohprotein; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied mit  $p < 0,05$ )

Die Proteinlöslichkeit sankt und der UDP8-Gehalt stieg signifikant mit zunehmender Behandlungsdauer. Allerdings führte die Differenzierung zwischen 20 min und 30 min zu keinem signifikantem Unterschied der ruminalen Proteinbeständigkeit.

**Ergebnisse (Behandlungsmenge)** Um einen möglichen Effekt der Behandlungsmenge auf die Reduzierung der Proteinlöslichkeit zu erfahren, wurden 500 g und 1000 g FM der silierten Erbsen der Sorte „Alvesta“ (Probenmaterial 1) im Labormaßstab (Trockenschrank) bei 120 °C, 140 °C und 160 °C für 10 Minuten thermisch behandelt. Die Ergebnisse werden in der Tabelle 32 dargestellt.

**Tabelle 32:** Veränderung der Proteinqualität siliierter Erbsen („Alvesta“, Probenmaterial 1) in Abhängigkeit der Behandlungsmenge und –temperatur (Behandlungsdauer 10 min; MW; n = 3)

	Erbse „Alvesta“, siliert + getoastet (10 min)						<i>p</i> -Wert			SEM
	500 g FM			1000 g FM						
	[°C]	120	140	160	120	140	160	<i>M</i>	<i>T</i>	
TM [% der OM]	746 <sup>c</sup>	771 <sup>b</sup>	805 <sup>a</sup>	710 <sup>e</sup>	721 <sup>de</sup>	731 <sup>cd</sup>	< 0,001	0,001	1,542	
Proteinlöslichkeit [% des RP]	64,3 <sup>b</sup>	54,3 <sup>c</sup>	49,6 <sup>c</sup>	72,3 <sup>a</sup>	65,4 <sup>b</sup>	63,3 <sup>b</sup>	< 0,001	0,116	0,503	
puRP [% des RP]	4,57	4,93	5,11	4,70	4,70	4,80	0,158	0,042	0,151	0,045

FM, Frischmasse; TM, Trockenmasse; OM, Organische Masse; MW, Mittelwert; RP, Rohprotein; puRP, pepsinunlösliche Rohprotein; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$ ; *M*, Menge; *T*, Temperatur; *M\*T*, Menge\*Temperatur

Die Temperaturerhöhung führte bei den 500 g FM Proben zu Herabsetzung der Proteinlöslichkeit von 64 % des RP (120 °C) auf rund 50 % des RP (160 °C,  $p < 0,001$ ). Mit der Verdopplung der zu behandelnden Menge (1000 g FM) lagen die Proteinlöslichkeiten rund 10 %-Punkte höher ( $p < 0,001$ ). Der Gehalt puRP blieb über alle Behandlungsstufen bei rund 5 % des RP unverändert. In einer weiterführenden Untersuchung wurde die Kornsilage der Erbse „Alvesta“ zu je 500 g FM und 1000 g FM für 30 Minuten bei 160 °C im Trockenschrank wärmebehandelt (Tabelle 33).

**Tabelle 33:** Effekte der zu wärmebehandelnden Menge (500 g FM und 1000 g FM) auf die Proteinqualität siliierter Erbsen („Alvesta“, Probenmaterial 1) nach einer thermischen Behandlung (160 °C, 30 min) in einem Trockenschrank (MW; n = 9)

	Erbse, siliert + getoastet		<i>p</i> -Wert	SEM
	500 g FM	1000 g FM		
TM [g/kg OM]	867	744	< 0,001	2,590
Rohprotein [g/kg TM]	213	204	< 0,001	0,987
Proteinlöslichkeit [% des RP]	32,5	58,5	< 0,001	1,079
Reinprotein [g/kg TM]	186	178	0,001	0,754
nRP2 [g/kg TM]	137	129	n.s.	2,667
nRP5 [g/kg TM]	176	168	n.s.	1,799
nRP8 [g/kg TM]	196	189	n.s.	1,764

Erbse „Alvesta“, Probenmaterial 1; FM, Frischmasse; MW, Mittelwert; nRP, nutzbares Rohprotein bei 2, 5 und 8 %/h Passagerate, ermittelt über erweiterten Hohenheimer Futterwerttest (eHFT); n.s., nicht signifikant; OM, Organische Masse; RP, Rohprotein; TM, Trockenmasse; Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1

Diese Behandlung wurde adäquat für die Ackerbohnenkornsilagen der Sorte „Fanfare“ (Probenmaterial 6) und „Taifun“ (Probenmaterial 7) durchgeführt (Tabelle 34). Die Kornsilagen hatten nach Rückbefeuchtung eine TM von rund 70 %.

**Tabelle 34:** Effekte der zu wärmebehandelnden Menge (500 g FM und 1000 g FM) auf die Proteinqualität siliierter Ackerbohnen nach einer thermischen Behandlung (160 °C, 30 min) in einem Trockenschrank (MW; n = 6)

	Ackerbohne, siliert + getoastet				<i>S</i>	<i>p</i> -Wert		<i>S</i> * <i>M</i>	SEM
	[g FM]	Fanfare		Taifun		<i>M</i>			
TM [g/kg OM]		500	1000	500	1000	0,015	< 0,001	n.s.	1,458
Rohprotein [g/kg TM]		500	1000	500	1000	< 0,001	< 0,001	n.s.	1,298
Proteinlöslichkeit [% des RP]		500	1000	500	1000	0,008	< 0,001	n.s.	1,382
Reinprotein [g/kg TM]		500	1000	500	1000	n.s.	0,015	n.s.	1,044

Ackerbohne „Fanfare“, Probenmaterial 6; „Taifun“, Probenmaterial 7 (Tabelle 6); FM, Frischmasse; MW, Mittelwert; n.s., nicht signifikant; OM, Organische Masse; RP, Rohprotein; TM, Trockenmasse; Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$ ; *S*, Sorte *M*, Menge

Sowohl bei den thermisch behandelten Erbsen als auch bei den Ackerbohnen bewirkte der Faktor „Behandlungsmenge“ einen Einfluss auf den TM-Gehalt aus. Während die 1000 g FM Proben eine TM von rund 73 % nach der Wärmebehandlung erreichten, verdunstete bei den 500 g FM Proben mehr Wasser, sodass TM von rund 85 % erreicht wurden ( $p < 0,001$ ). Der mittlere Rohproteingehalt der siliert und getoasteten Erbsen und Ackerbohnen lag bei den 500 g FM Proben mit rund 10 g/kg TM höher im Vergleich zu den 1000 g FM Proben ( $p < 0,001$ ). Beim Stärkegehalt ergaben sich zwischen beiden Behandlungsstufen keine Unterschiede (Ergebnisse nicht dargestellt). Während die 1000 g FM Proben, sowohl bei den Erbsen als auch bei den Ackerbohnen, eine Proteinlöslichkeit von rund 60 % erreichten, sank die Proteinlöslichkeit der 500 g FM Proben auf ein Niveau von rund 30 % ( $p < 0,001$ ). Damit lag auch der Gehalt an Reinprotein, zumindest bei der Erbse „Alvesta“ sowie der Ackerbohne „Taifun“, mit rund 10 g/kg TM höher im Vergleich zu den 1000 g FM Proben ( $p = 0,001$  für Erbsen;  $p = 0,015$  für Ackerbohnen). Bei der Erbse „Alvesta“ wurde zusätzlich noch der Gehalt an nRP (*in vitro* über erweiterter Hohenheimer Futterwerttest, eHFT) bei unterstellter Passagerate von 2, 5 und 8 %/h gemessen (Tabelle 33). Der nRP-Gehalt lag, wenn auch nur tendenziell, bei den 500 g FM Proben rund 10 g/kg TM (bei allen Passageraten) höher im Vergleich zu den 1000 g FM Proben. In einer weiterführenden Untersuchung wurden ebenfalls im Labormaßstab (Trockenschrank) diesmal allerdings nicht silierte, sondern unbehandelte (native) Erbsen der Sorte „Astronaut“ (Probenmaterial 3, Tabelle 6) mit einer definierten Menge (500 g FM und 1000 g FM) bei 160 °C für 30 und 60 Minuten thermisch behandelt. Zusätzliches Wasser wurde dem System nicht zugeführt. Die Ergebnisse werden in der Tabelle 35 dargestellt.

**Tabelle 35:** Veränderung der Proteinqualität nativ getoasteter Erbsen („Astronaut“, Probenmaterial 3) in Abhängigkeit der Behandlungsmenge und -dauer bei einer Temperatur von 160 °C (MW; n = 3)

	Erbsen „Astronaut“, getoastet (160 °C)			<i>p</i> -Wert		SEM	
	[min]	500 g FM	1000 g FM		<i>M</i>		<i>Z</i>
		30	30	60			
TM [g/kg OM]		960 <sup>a</sup>	822 <sup>c</sup>	890 <sup>b</sup>	< 0,001	< 0,001	3,435
Rohprotein [g/kg TM]		233	230	235	n.s.	n.s.	1,181
Proteinlöslichkeit [% des RP]		45,3 <sup>b</sup>	63,5 <sup>a</sup>	62,1 <sup>a</sup>	< 0,001	n.s.	0,645
puRP [% des RP]		4,07	4,13	3,80	n.s.	n.s.	0,050
nRP2 [g/kg TM]		130 <sup>b</sup>	145 <sup>a</sup>	142 <sup>a</sup>	< 0,001	n.s.	0,567
nRP5 [g/kg TM]		186 <sup>a</sup>	181 <sup>b</sup>	180 <sup>b</sup>	0,008	n.s.	0,556
nRP8 [g/kg TM]		215 <sup>a</sup>	200 <sup>b</sup>	200 <sup>b</sup>	< 0,001	n.s.	0,667

Erbsen „Astronaut“, Probenmaterial 3 (Tabelle 6); FM, Frischmasse; MW, Mittelwert; nRP, nutzbares Rohprotein bei 2, 5 und 8 %/h Passagerate, ermittelt über erweiterten Hohenheimer Futterwerttest (eHFT); n.s., nicht signifikant, OM, Organische Masse; puRP, pepsinunlösliches Rohprotein; RP, Rohprotein; TM, Trockenmasse; Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit  $p < 0,05$ ; *M*, Menge; *Z*, Zeit

Die Veränderung der TM war abhängig von der zu behandelnden Menge und der Behandlungszeit. Die höchste TM (960 g/kg OM) wurde bei der geringsten Menge und Behandlungsdauer (500 g FM, 30 min) erreicht ( $p < 0,001$ ). Der Rohproteingehalt lag über alle Varianten bei rund 230 g/kg TM. Die 500 g FM Proben hatten die niedrigste Proteinlöslichkeit (45 % vs. 62 % des RP;  $p < 0,001$ ), wobei der Faktor „Zeit“ keinen Einfluss aufwies ( $p = 0,158$ ). Ebenso führte die geringere Behandlungsmenge, mit Ausnahme des nRP bei einer angenommenen Passagerate von 2 %/h (130 g/kg TM vs. 145 g/kg TM;  $p < 0,001$ ), die höchsten Gehalte an nRP (215 g/kg TM vs. 200 g/kg TM bei einer Passagerate von 8 %/h;  $p < 0,001$ ). Ebenso wirkte sich die Behandlungsdauer nicht auf den Gehalt an nRP aus ( $p = 0,144$ ).

**Diskussion** In der vorliegenden Untersuchung sollte im Labormaßstab geprüft werden, welche Effekte die Behandlungstemperatur, -dauer und -menge des angewendeten hydrothermischen Wärmebehandlungsverfahren (Toasten) auf ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Proteinqualität hat. Dafür wurden silierten Erbsen und Ackerbohnen bei 60 °C bis 200 °C für 10 - 30 Minuten getoastet. Zusätzlich wurde die zu behandelnde Menge variiert (500 g FM vs. 1000 g FM) und nicht silierte Erbsen getoastet (160 °C, 30 und 60 min). Erst bei einer Behandlungstemperatur von 140 °C tritt eine signifikante Reduzierung der Proteinlöslichkeit auf, die mit steigender Temperatur und Behandlungsdauer weiter abnimmt. Hierbei ließ sich bereits anhand einer deutlichen Steigerung des puRP eine Proteinschädigung ableiten. Bei niedrigen Behandlungstemperaturen, bis einschließlich 140 °C treten kaum nennenswerte Effekte auf die Proteinlöslichkeit auf und die Differenzierung der Behandlungsdauer (z.B. 10

min vs. 30 min) zeigt keinen signifikanten Einfluss. Dies bestätigen auch die Untersuchungen von CANIBE & EGGUM (1997) und YU et al. (1998) die beim Rösten von Erbsen und Ackerbohnen (1 min - 45 min, u.a. Abbildung Anhang 29) keine signifikanten Veränderungen der Proteinverdaulichkeit in einem Temperaturbereich von 110 °C - 140 °C erhielten. Die geringen Effekte sind dabei auf eine zu geringe Wärmebehandlungsintensität zurückzuführen (FALDET et al., 1992). Erst ab 160 °C führte die längere Behandlungsdauer zu einer signifikant höheren Reduzierung der Proteinlöslichkeit. Dieses Ergebnis ließ sich ebenso bei der Betrachtung des UDP-Gehaltes feststellen. Auch die Untersuchungen von YU et al. (1998) ergaben erst bei einer Rösttemperatur von 150 °C (15 - 45 Minuten, Abbildung Anhang 29) eine nennenswerte Reduzierung der ruminalen Protein-Abbaubarkeit (34 %-Punkte) z.B. bei Ackerbohnen. Ein höherer Durchsatz, geringere Temperaturen sowie eine geringere Behandlungsdauer führen in der räumlich begrenzten Wärmekammer (Trockenschrank, Toaster) zu einer geringeren Wärmeeinwirkung auf das zu behandelnde Material. Damit erhöht sich der Bedarf an Wärmekapazität (= Wärmemenge, um die Masse um 1 K zu erwärmen). Zusätzlich wurde dem Material weniger Feuchtigkeit entzogen, was die niedrigeren TM bestätigen (86 % TM bei 160 °C, 30 min, 500 g FM vs. 74 % TM bei 160 °C, 30 min, 1000 g FM). Damit reduziert sich der Effekt des Feuchtigkeitsaustrittes und die Wärmeleitfähigkeit im Material. Dies gilt gleichermaßen auch bei der Erhöhung der Toastmenge, da in diesem Falle ebenso die Wirkung auf die Proteinlöslichkeit geringer ausfällt. FALDET et al. (1992) rösteten z.B. Sojabohnen bei 140 °C - 160 °C für 10 bis 120 min (Abbildung Anhang 28) und bestätigten eine Steigerung z.B. des UDP-Gehaltes in Abhängigkeit der Temperatur und Behandlungsdauer. Die Effektivität der Wärmebehandlung steigt durch die Verwendung von Feuchtigkeit und Druck im System (VAN DER POEL, 1990). Daher konnten GOELEMA et al. (1998) durch die Zugabe von Druck („Drucktoaster“) bereits bei 130 °C (3 min, ~ 4 bar) bei Erbsen, Ackerbohnen und Lupinen eine Steigerung des UDP-Gehaltes um das 1,8 (Erbsen) - 2,4-fache (Ackerbohnen) erreichen. Die Toastung nicht silierten Materials erreichte ebenso kaum Veränderungen in der Proteinqualität, selbst bei der Verdopplung der Behandlungsdauer (160 °C, von 30 min auf 60 min). Hier ist neben dem geringen Feuchtigkeitsgehalt auch die ausgebliebene Steigerung der Proteinbeständigkeit in Folge der Silierung als Begründung zu nennen. Lediglich eine hohe Behandlungsintensität, bedingt durch eine geringe Behandlungsmenge, erreicht eine signifikante Reduzierung der Proteinlöslichkeit im Vergleich zum unbehandelten Material. Die Diskrepanz, zu den in der Literatur beschriebenen Effekten der Wärmebehandlung nativer Erbsen und Ackerbohnen, ist demnach u.a. auf die Feuchtigkeitszugabe z.B. in Form von Wasserdampf (Extrudieren) zurückzuführen.

#### 4.2.4 Die kombinierte Behandlung (silieren + toasten) von Erbsen und Ackerbohnen

##### 4.2.4.1 Einfluss auf die Proteinqualität

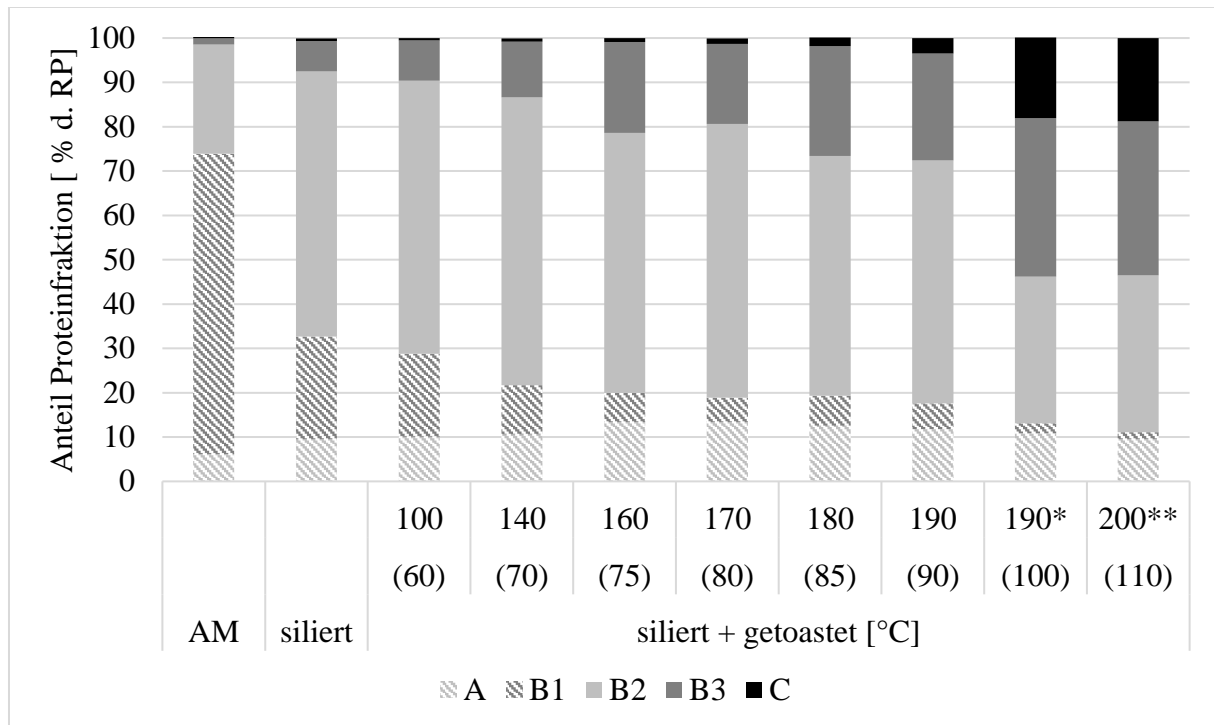
**Ergebnisse (Proteinlöslichkeit)** In der Abbildung 16 wird der Einfluss der Behandlung (silieren, silieren + toasten, toasten) auf die Proteinlöslichkeit über alle Sorten von Erbse („Alvesta“, „Astronaut“, „E.F.B. 33“) und Ackerbohne („Fanfare“, „Taifun“) aus den Modellstudien dargestellt. Die Körnerleguminosen wurden dabei ohne und mit Zugabe von Milchsäurebakterien (MSB, MSB<sup>A</sup>) mit einer TM von 70 % siliert. Die Wärmebehandlung erfolgte bei 160 °C für 30 Minuten im Trockenschrank.



**Abbildung 16:** Einfluss der Behandlung (silieren, silieren + toasten, toasten) auf die Proteinlöslichkeit ( $\Sigma$  Proteinfraction A + B1) betrachtet über alle Sorten von Erbsen („Alvesta“, „Astronaut“, „E.F.B. 33“) und Ackerbohnen („Fanfare“, „Taifun“) der Modellstudien;  $n_{\text{nativ}} = 15$ ;  $n_{\text{siliert}} = 42$  in den Varianten KON, MSB, MSB<sup>A</sup>, 70 % TM;  $n_{\text{siliert + getoastet}} = 79$ , bei 160 °C, 30 min;  $n_{\text{getoastet}} = 15$ , bei 160 °C, 30 min;  $x = \text{MW}$

Die verwendeten Erbsen und Ackerbohnen hatten im nativen Zustand eine mittlere Proteinlöslichkeit von 70 % des RP. In Folge der Silierung reduzierte sich dieser auf 59 % des RP mit einem Minimum bei 45 % des RP. Die anschließende Wärmebehandlung reduzierte die mittlere Proteinlöslichkeit weiter auf 41 % des RP mit Minimalwerten von bis zu 14 % des RP. Die Streuung der Werte nahm bei der kombinierten Behandlung zu. Die alleinige Wärmebehandlung, ohne vorherige Silierung, führte kaum zu Veränderungen der Proteinlöslichkeit (68 % d. RP) im Vergleich zum nativen Material.

**Ergebnisse (Proteinfraktionen)** In der nachfolgenden Abbildung 17 wurden die Anteile der Proteinfraktionen in Abhängigkeit der Behandlungsintensität dargestellt. Grundlage dieser Untersuchung waren die großtechnisch siliert und getoasteten Erbsen der Sorte „Alvesta“. In der Abbildung sind die entstandenen Korntemperaturen (= Temperatur der Körner am Auswurf des Toasters) angegeben. Die eingestellten Einblastemperaturen waren von 100 °C bis 190 °C (100 kg FM/h), 190 °C (70 kg FM/h) und 200 °C (50 kg FM/h).



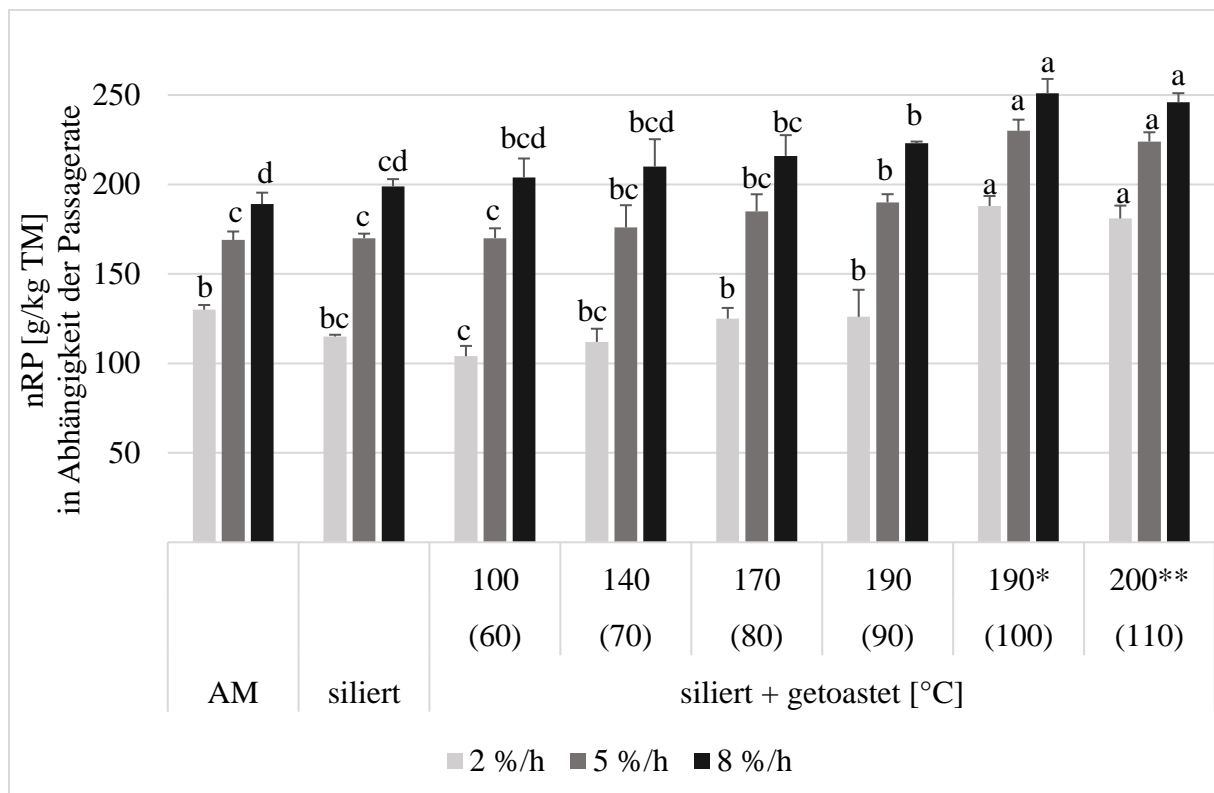
**Abbildung 17:** Veränderung des Anteils der Proteinfraktionen in Folge der großtechnischen Silierung und thermischen Behandlung der Kornsilagen mit ausgewählten Temperaturen (Werte in Klammern sind die gemessenen Temperaturen des Materials bei Austritt aus der Toastkammer = Korntemperaturen bei einem Durchsatz von 100 kg FM/h; \* Durchsatz von 70 kg/h; \*\* Durchsatz von 50 kg/h); n = 3; Signifikanzen sind der Tabelle Anhang 20 zu entnehmen)

Die Proteinlöslichkeit der nativen Erbse „Alvesta“ lag bei rund 73 % des RP (siehe Tabelle Anhang 20). In Folge der Silierung sank diese auf rund 33 % des RP. Dadurch erfolgte bereits eine Anteilsverschiebung der Proteinfraktion B1 von rund 68 % des RP (native Erbse) auf 23 % des RP (silierte Erbse) zu Gunsten steigender Anteile der Proteinfraktion B2 von rund 25 % des RP auf rund 60 % des RP. In Folge der thermischen Behandlung sanken v.a. die Anteile der Proteinfraktion B1 auf rund 2 % des RP und B2 auf rund 35 % des RP zu Gunsten steigender Anteile der Proteinfraktion B3 von 1,5 % des RP (native Erbse) auf rund 35 % des RP (110 °C Korntemperatur). Erst ab Korntemperaturen von 100 °C steigt der Anteil der Proteinfraktion C



von < 3 % des RP sprunghaft auf rund 18 % des RP. Ebenso erhöhte sich auch der Gehalt an puRP von rund 5 g/kg TM auf rund 25 g/kg TM (siehe Tabelle Anhang 20).

**Ergebnisse (nutzbares Rohprotein)** In der nachfolgenden Abbildung 18 wird der Effekt der kombinierten Behandlung auf den Gehalt an nutzbaren Rohprotein am Duodenum in Abhängigkeit der Passagerate von 2, 5 und 8 %/h dargestellt. Das nRP wurde unter Verwendung des erweiterten Hohenheimer Futterwerttestes (eHFT) *in vitro* (nRP = Gesamt N abzüglich NH<sub>3</sub>-N im HFT) bestimmt.



**Abbildung 18:** Veränderung des mittleren Gehaltes an nutzbaren Rohprotein (nRP) nach der nasschemischen Methode des erweiterten Hohenheimer Futterwerttestes (eHFT) und in Abhängigkeit der Passagerate der Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 2) in Folge der großtechnischen Silierung und thermischen Behandlung der Kornsilagen mit ausgewählten Temperaturen (Werte in Klammern sind die gemessenen Temperaturen des Materials bei Austritt aus der Toastkammer = Korntemperaturen bei einem Durchsatz von 100 kg FM/h; \* Durchsatz von 70 kg/h; \*\* Durchsatz von 50 kg/h); n = 3; *in vitro*; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungsstufen mit p < 0,05)

Die rohe Erbse „Alvesta“ hatte einen Gehalt an nRP von annähernd 190 g/kg TM bei einer unterstellten Passagerate von 8 %/h. Im Zuge der Silierung und anschließenden Toastung erhöhte sich der Gehalt auf bis zu 250 g nRP/kg TM. Die Silierung führte bereits zu einem Anstieg um 10 g nRP/kg TM. Die anschließende Wärmebehandlung führte zu einer weiteren

Erhöhung des nRP mit steigender Korntemperatur ( $y = 191 + 9,7x$ ;  $R^2 = 0,8841$ ). Der Gehalt an nRP ergab bei einer Korntemperatur von 80 °C mit 216 g nRP/kg TM einen signifikanten Unterschied zum Ausgangsmaterial. Ab einer Korntemperatur von 90 °C war der Unterschied mit 223 g/kg TM zur Kornsilage signifikant. Mit einer Korntemperatur von 100 °C und höher wurden die höchsten Gehalt mit rund 250 g/kg TM an nRP ermittelt ( $p < 0,001$ ).

**Diskussion** Die kombinierte Behandlung der vorliegenden Untersuchung beschreibt zwei Verfahren, die Silierung und anschließende Wärmebehandlung. Die Silierung hat bereits einen Einfluss auf die Proteinqualität, wenn auch in unterschiedlicher Intensität. Bei der Betrachtung aller hergestellten Silagen (siehe Abbildung 16) wurde im Mittel die Proteinlöslichkeit um 10 %-Punkte durch die Silierung reduziert. Bei der großtechnischen Silierung wurde die höhere Reduzierung der Proteinlöslichkeit von rund 40 % des RP in Folge steigender Anteile der Proteinfraction B2 (+ 35 %-Punkte) registriert, die durch in vitro-Untersuchungen des UDP8-Gehaltes (Passagerate von 8 %/h) von 16 % (native Erbse) auf rund 20 % durch die Silierung (BACHMANN et al., 2020a) ebenfalls bestätigt werden konnten. Die Silierung wirkt vorkonditionierend. Der Begriff „Vorkonditionierung“ wird in der Literatur verwendet, wenn Körnerleguminosen u.a. dem Quellen (Feuchtigkeitszugabe), der Keimung (Aktivität pflanzeigener Enzyme) oder dem Schälen (Reduzierung Rohfasergehalt) in Vorbereitung auf die Wärmebehandlung unterzogen wurden und dadurch bereits Veränderungen der Nährstoffqualität eintraten. Durch die anschließende Wärmebehandlung konnte in den Laboruntersuchungen die mittlere Proteinlöslichkeit um weitere 20 %-Punkte herabgesetzt werden. In der großtechnischen Wärmebehandlung sank mit steigender Behandlungstemperatur die Proteinlöslichkeit stärker, im Vergleich zu den Laborversuchen. Die höhere Effektivität der großtechnischen Toastanlage ist durch die zusätzliche Durchmischung des einfließenden Material und höheren Hitzeeinwirkung auf die einzelnen silierten Körner zurückzuführen. Zudem wurde bereits durch die großtechnische Silierung eine stärkere Vorkonditionierung (höhere Proteinbeständigkeit) im Vergleich zu den Laborsilagen erreicht. Ein möglicher Grund hierfür könnte in der größeren Menge (28.000 kg FM vs. 2 kg FM) sowie als Folge des Lagerungsortes (Schlauchsilierung im Außenbereich vs. Beutelsilierung im Laborgebäude) und der Lagerungsbedingungen (Witterung und hohe Temperaturschwankungen durch Sommer/Winter vs. standardisiertes Raumklima mit rund 20 °C) begründet sein. Vergleichbare Untersuchungen sind in der Literatur nicht zu finden. Die alleinige Toastung von Erbsen und Ackerbohnen hatte kaum Einfluss auf die Proteinlöslichkeit, da die vorkonditionierenden Effekte der Silierung (Reduzierung der Proteinlöslichkeit) fehlen. Der Anteil der Proteinfraction B1 wurde v.a. bei der großtechnischen Wärmebehandlung annähernd vollständig

verschoben (rund 2 % des RP bei 110 °C Korntemperatur) zu Gunsten signifikant steigender Anteile der Proteinfraction B2 und ab 80 °C Korntemperatur auch der B3-Fraktion auf rund 70 % des RP. Dabei stieg ab einer Korntemperatur von 100 °C (190 °C Einblastemperatur, 70 kg FM/h) der Anteil unlöslicher Proteine (Proteinfraction C) auf rund 20 % an. Auch der Gehalt an puRP stieg ab dieser Korntemperatur deutlich an (von 5 g/kg TM auf 25 g/kg), sodass damit eine Proteinschädigung eintrat. Dabei kommt es bereits ab 100 – 150 °C zu einem Lysin- und Serinverlust mit anschließender Peptidisierung (150 – 200 °C) und letztlich zu einer Pyrolyse (Spaltung) aller Aminosäurereste ab 200 °C (YU et al., 2002).

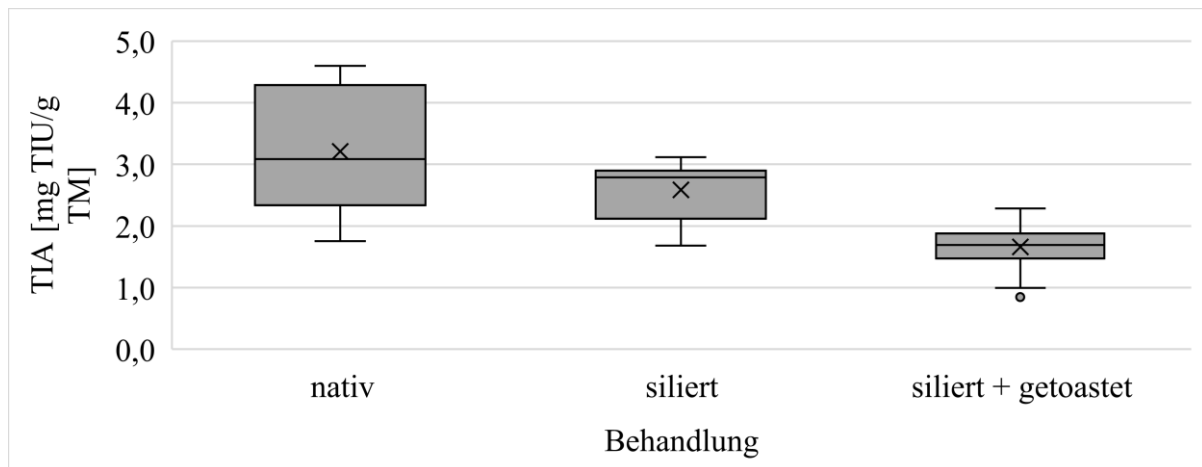
Auch der UDP-Gehalt erhöhte sich mit steigender Behandlungstemperatur auf bis 40 % d. RP (Laboruntersuchung, 200 °C, 30 min; Tabelle Anhang 19) bis 50 % d. RP (großtechnische Untersuchung,  $\geq 100$  °C Korntemperatur =  $> 190$  °C Einblastemperatur). Im Vergleich zum UDP-Gehalt nativer Erbsen und Ackerbohnen mit 3 % d. RP (BISSINGER et al., 2007) bis 20 % d. RP (siehe Tabelle 1 und Tabelle 37) konnte mit der kombinierten Behandlung eine deutliche Steigerung des UDP-Gehaltes erreicht werden. Damit steigt die Menge an Protein, welches dem Wiederkäuer im Dünndarm zur Verfügung steht und die gewünschte Steigerung an nRP wurde erreicht. MASOERO et al. (2005) erhielten einen UDP-Gehalt bei extrudierten Ackerbohnen von rund 50 % d. RP bereits bei 130 °C Einblastemperatur und bestätigt die höhere Effektivität der druck-hydrothermischen Verfahren (Extrusion) im Vergleich zu dem verwendeten hydrothermischen Verfahren (Toasten). Der Gehalt an nRP für Erbsen und Ackerbohnen liegt bei 160 g/kg TM – 200 g/kg TM (8 %/h Passagerate; siehe Tabelle 1; BISSINGER et al., 2007). In der vorliegenden Untersuchung wurde der Gehalt an nRP (eHFT) durch die großtechnische Wärmebehandlung in Abhängigkeit der Temperatur ( $R^2 = 0,8841$ ) um bis zu 60 g/kg TM; 8 %/h Passagerate, 100 °C Korntemperatur; Abbildung 18) erhöht und war damit adäquat dem von RES (243 g nRP/kg TM, siehe Tabelle 1). Vergleichende Untersuchungen von BISSINGER et al. (2007) ergaben beim Rösten von Erbsen (Jet Sploder-Verfahren; 250 °C Lufttemperatur, 1 - 2 Minuten; 160 °C Korntemperatur) eine Steigerung des nRP von lediglich 10 g/kg TM. Die Expanderbehandlung der Ackerbohnen (116 °C Lufttemperatur, 5 bar Druck, keine Angabe zur Behandlungsdauer) erreichte hingegen eine Steigerung von 20 g nRP/kg TM, der laut Angaben der Autoren auf mehr mikrobielles Protein, anhand höherer Gasproduktion *in vitro*, zurückzuführen war. In der vorliegenden Untersuchung konnte zwar ein deutlich höherer Gehalt an nRP erzielt werden, allerdings ist dabei die eintretende Proteinschädigung ab 100 °C Korntemperatur zu beachten. Bei 85 °C Korntemperatur erhöhte sich der Gehalt an nRP um rund 20 g/kg TM im Vergleich zum nativen Material. Dieser Effekt der kombinierten

Behandlung ist damit vergleichbar mit den Ergebnissen beim Extrudieren (BISSINGER et al., 2007).

#### 4.2.4.2 Einfluss auf den Gehalt Antinutritiver Inhaltsstoffe

Um den Effekt der kombinierten Behandlung aus Silierung und anschließender thermischer Aufbereitung auf den Gehalt Antinutritiver Inhaltsstoffe zu erfahren, wurde die Trypsininhibitoraktivität ausgewählter Erbsen und Ackerbohnen bestimmt.

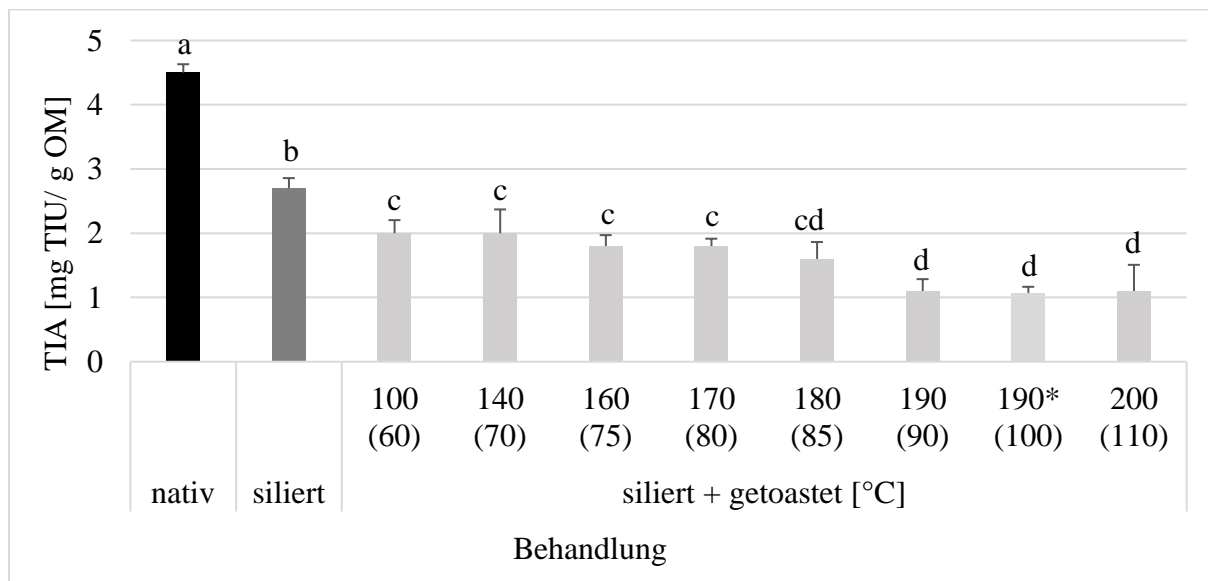
**Ergebnisse (Trypsininhibitoraktivität)** Für die nachfolgende Untersuchung wurden die ausgewählten Erbsen („Alvesta“, Probenmaterial 1; „E.F.B. 33“, Probenmaterial 5) und Ackerbohnen („Fanfare“, Probenmaterial 6; „Taifun“, Probenmaterial 7) im Labormaßstab siliert und anschließend in einem Trockenschrank wärmebehandelt (1000 g FM, 160 °C, 30 min). Die ausgewählten Erbsen unterschieden sich hinsichtlich ihrer Blühfarbe und Winterhärte („Alvesta“, weißblühend und Sommersorte; „E.F.B.33“, buntblühend und Wintersorte) und die ausgewählten Ackerbohnen in ihrem Tanningehalt („Taifun“, tanninarm; „Fanfare“, tanninreich). Die Abbildung 19 gibt die entstandenen Ergebnisse über alle Sorten wieder.



**Abbildung 19:** Effekt der Silierung (mit MSB-Zugabe) und anschließender thermischer Aufbereitung der Kornsilagen (160 °C, 30 Minuten) auf die mittlere Trypsininhibitoraktivität (TIA) bei ausgewählten Erbsen („Alvesta“, Probenmaterial 1; „E.F.B. 33“, Probenmaterial 5) und Ackerbohnen („Fanfare“, Probenmaterial 6; „Taifun“, Probenmaterial 7); n = 12; x = MW

Die untersuchten Erbsen hatten mit rund 4 mg TIU/g TM („Alvesta“) und 3,3 mg TIU/g TM („E.F.B.33“) eine höhere TIA im Vergleich zu den betrachteten Ackerbohnen (rund 2 mg TIU/g TM, Ergebnisse nicht dargestellt), was letztlich zu der hohen Grundgesamtheit in Abbildung 16 führte. Die Silierung führte über alle Sorten betrachtet zu einer Reduzierung der mittleren TIA von 3,2 mg TIU/g TM (nativ) auf 2,6 mg TIU/g TM (siliert). In Folge der Wärmebehandlung (160 °C, 30 min) konnte die TIA annähernd sortenübergreifend auf 1,7 mg

TIU/g TM reduziert werden. Um diese Effekte aus den Modellversuchen weiter zu untersuchen, wurde im großtechnischen Maßstab die Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 2) siliert und mit einem mobilen Toaster (ECO-Toast 100) zu ausgewählten Temperaturen (100 °C – 200 °C) wärmebehandelt (siehe Kapitel 4.1.3.7). Während der thermischen Behandlung wurde zwischen der Temperatur in der Toastkammer („Lufttemperatur“, Geräteeinstellung) und der mit entsprechenden dem Durchsatz (100 kg FM/h) entstandenen Temperatur des Materials (= „Korntemperatur“) unterschieden. Die entsprechenden Korntemperaturen wurden in der Abbildung 20 in Klammern dargestellt.



**Abbildung 20:** Veränderung der mittleren TIA der Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 2) in Folge der großtechnischen Silierung und thermischen Behandlung der Kornsilagen mit ausgewählten Temperaturen (Werte in Klammern sind die gemessenen Temperaturen des Materials in der Toastkammer = Korntemperaturen); \* Reduzierung des Durchsatzes von 100 kg FM/h auf 70 kg FM/h bei 190 °C Lufttemperatur; n = 3; FM, Frischmasse; TIA, Trypsininhibitoraktivität; OM, Organische Masse; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit p < 0,05

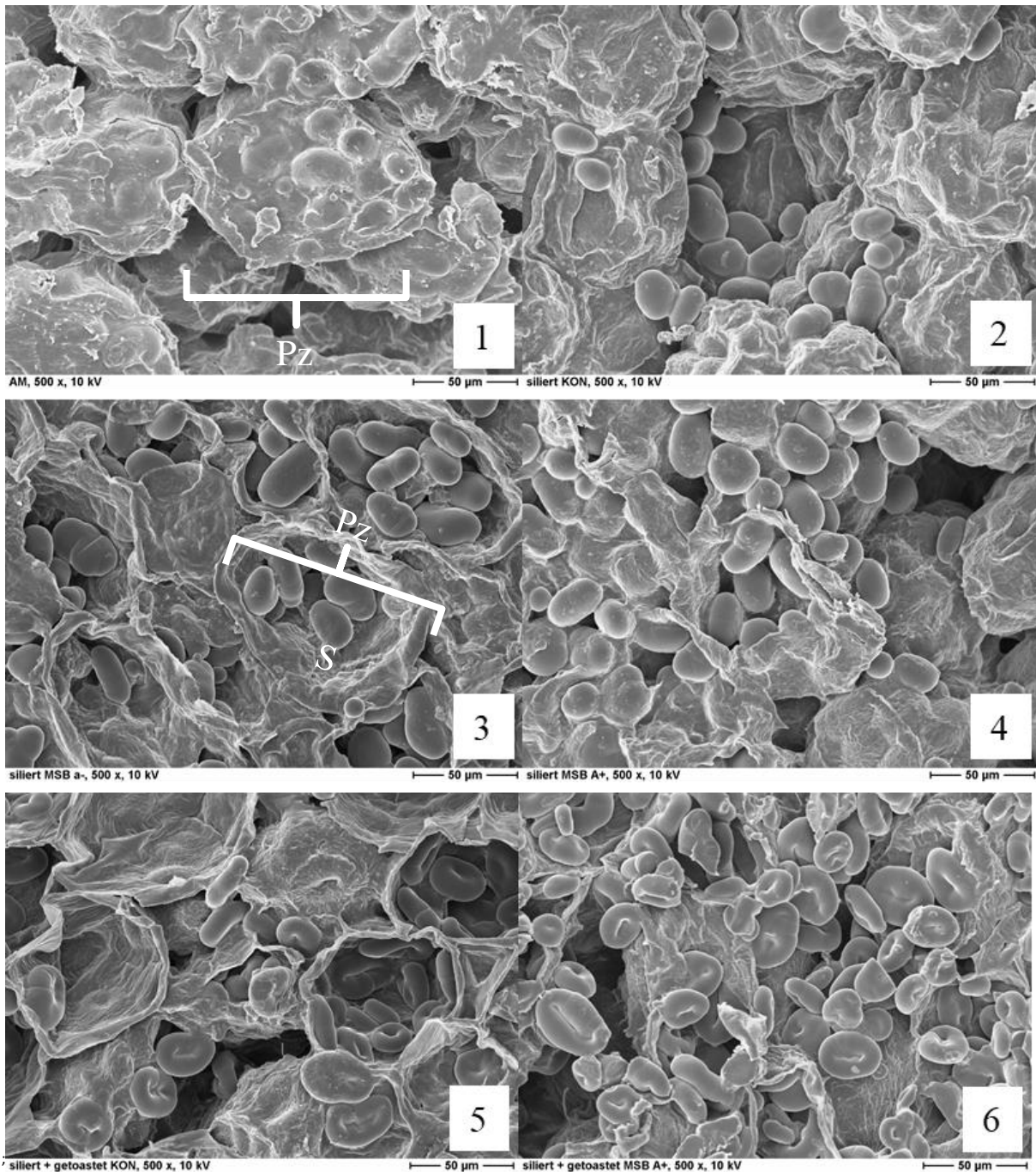
Die TIA der nativen Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 2) lag bei 4,5 mg TIU/g TM und reduzierte sich in Folge der großtechnischen Schlauchsilierung auf 2,7 mg TIU/g TM. Die anschließende Wärmebehandlung der Kornsilage führte zu einem weiteren Rückgang der TIA in Abhängigkeit der Behandlungsintensität. In dem Temperaturbereich von 100 °C – 180 °C und bis zu einer Korntemperatur von 85 °C, rangierten die mittleren TIA bei 2,0 – 1,6 mg TIU/g TM. Erst ab einer Temperatur von 190 °C, bzw. einer Korntemperatur von 90 °C konnte ein weiterer Rückgang der TIA auf rund 1,0 mg TIU/g TM nachgewiesen werden, die bis einschließlich 110 °C Korntemperatur auf diesem Niveau verblieb.

**Diskussion** Trypsininhibitoren führen v.a. bei Monogastern zu Störungen im Verdauungstrakt und damit zu Leistungseinbußen v.a. bei Jungtieren (GROSJEAN et al., 2000; HICKLING, 2003; ZUBER & RODEHUTSCORD, 2017). Neben der Hemmung der Trypsinaktivität verursachen sie eine Hypersekretion der Bauchspeicheldrüse an Trypsin sowie eine Hypertrophie dieser (NORTON, 1991; WISEMAN et al., 2003; MIKIĆ et al. 2009). Ackerbohnen haben eine TIA von 3 - 7 mg TIU/g TM (MAKKAR et al., 1997) und Erbsen von 2 - 12 mg TIU/g TM (WANG & DAUN, 2004; ZUBER & RODEHUTSCORD, 2017). In der vorliegenden Untersuchung lag die TIA der Erbsen auch signifikant höher im Vergleich zu den untersuchten Ackerbohnen und auf dem in der Literatur angegebenen Niveau. Sortenunterschiede sowie ein höherer TIA bei Wintersorten wie URBATZKA et al. (2003) beschreiben, wurden nicht festgestellt. Die Silierung wirkt auf den Gehalt Antinutritiver Inhaltsstoffe ebenso vorkonditionierend. Trypsininhibitoren sind nicht nur thermolabil, sondern können auch bereits durch die Silierung um bis zu 80 % reduziert werden (EGOUNLETY & AWORH, 2003; MARTENS et al., 2013; SHIMELIS & RAKSHIT, 2008). Grund hierfür ist die Fähigkeit der Mikroorganismen Trypsininhibitoren (ähnlich wie bei Vicin) zu metabolisieren und somit inaktivieren zu können (SHIMELIS & RAKSHIT, 2008). An dieser Stelle sei erwähnt, dass Pansenmikroben ebenfalls in der Lage sind, diese Inhibitoren vollständig abzubauen (DIXON & HOSKING, 1992), sodass diese ANF im Hinblick auf die Verdaulichkeit für Wiederkäuer als unproblematisch eingeschätzt werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde die TIA, zumindest in der großtechnischen Umsetzung, um annähernd 40 %-Punkte reduziert und damit niedriger, wie in der Literatur beschrieben (bis zu 80 %). Hierfür ist die gehemmte Mikrobenaktivität während der Silierung, durch den vergleichsweise hohen TM-Gehalt von 70 % des Siliergutes, verantwortlich. Da Trypsininhibitoren thermolabil sind, kann die thermische Behandlung bereits ab Temperaturen von 80 °C (40 - 60 min; DVOŘÁK et al., 2005) den Gehalt unabhängig vom Behandlungsverfahren (Rösten, Extrudieren, Kochen, Autoklavieren) minimieren und ab 130 °C (MASOERO et al., 2005) annähernd vollständig reduzieren (ALONSO et al., 2000; CANIBE & EGGUM, 1997; DVOŘÁK et al., 2005; FASOYIRO et al., 2005; GRIFFITHS, 1984; MA et al., 2017; RACKIS et al., 1986; TRUGO et al., 1990). Mit der thermischen Behandlung bereits silierter Erbsen, konnte die beschriebene Thermolabilität der TIA im Labormaßstab (160 °C, 30 min) als auch in der großtechnischen Umsetzung (ab 100 °C) bestätigt werden. Die TIA kann nach der Silierung um weitere 30 %-Punkte mit Temperaturen von 100 °C - 180 °C reduziert werden. Ab 190 °C (90 °C Korntemperatur) ist die TIA annähernd vollständig (1 mg TIU/g OM) minimiert. Dass bereits ab 130 °C (MASOERO et al., 2005) eine vollständige Reduzierung möglich ist, konnte nicht bestätigt werden. VAN DER POEL (1990) führen eine gesteigerte

Effektivität auf die Höhe des vorherrschenden Druckes im Wärmeprozess (z.B. beim Extrudieren) zurück. Da in der vorliegenden Untersuchung nur der atmosphärische Druck verwendet wurde, konnte dieser, auf die Reduzierung der TIA, begünstigende Effekt nicht genutzt werden und bedingte somit höhere Temperaturen.

#### **4.2.4.3 Einfluss auf die Stärkemorphologie**

**Ergebnisse (Stärkemorphologie)** Für diese Untersuchung wurde die Erbse „Astronaute“ (Probenmaterial 4) in einem frühen (30 % TM, Abbildung Anhang 11) und zur Teigreife mit 70 % TM (Abbildung 21) exemplarisch siliert (60 d) und/oder thermisch behandelt (160 °C, 30 min). Weitere elektronenmikroskopische Aufzeichnungen zu dieser Thematik befinden sich im Abbildung Anhang 12. Die teigreife Erbse wies unbehandelt eine kompakte und feste Struktur auf. Es war ein Komplex aus Stärkegranulae umgeben von festen Strukturen (Protein-Lipid-Komplex) erkennbar. In Folge der Silierung veränderte sich die Oberflächenstruktur nicht und bestätigt damit, die bereits vorgestellten Ergebnisse (Abbildung 7). Die Zugabe amylytischwirksamer MSB (MSB<sup>A</sup>) vor Silierung ergab keinen sichtbaren Unterschied. In der Abbildung 21 ist erkennbar, dass sich schätzungsweise 10 - 20 Stärkegranulae in den Parenchymzellen befanden. Das Erbsenkorn besteht aus zwei Hälften mit unzähligen Parenchymzellen, die über den Keimling miteinander verbunden und von einer dünnen Membran sowie abschließend mit einer Außenhaut inklusive Spaltöffnungen umschlossen werden (siehe hierzu Abbildung Anhang 12, Foto 7). Die thermische Behandlung der silierten Erbsenkörner führte zu einer Deformierung der Stärkegranula, die der Form von Blutplättchen ähnelt. Eine Veränderung der Parenchymzellen war nicht erkennbar. Die reine thermische Behandlung nativer Erbsenkörner (Abbildung Anhang 11) führte nicht zu Veränderungen des Parenchyms oder der Stärkeform, was den bereits beschriebenen geringen Erfolg rein thermisch behandelte Erbsen, im Hinblick auf die Steigerung der Proteinbeständigkeit, bekräftigt.



**Abbildung 21:** Elektronenmikroskopische Aufnahmen der teigreifen Erbse „Astronaute“ (Probenmaterial 4; 70 % TM) zu ausgewählten Behandlungen (500-fache Vergrößerung; 1 = nativ, 70 % TM; 2 = siliert, KON; 3 = siliert, MSB; 4 = siliert, MSB<sup>A</sup>; 5 = siliert + getoastet, KON; 6 = siliert + getoastet, MSB<sup>A</sup>; Pz, Parenchymzelle geschlossen/geöffnet; S, Stärke)

**Diskussion** Die Effektivität der Wärmebehandlung auf die Stärkequalität wird durch die Temperatur, den Feuchtigkeitsgehalt, die Behandlungsdauer sowie durch mechanische Scherkräfte (PRESTLØKKEN, 1999a) und Umgebungsdrücke (VAN DER POEL, 1990) beeinflusst. Scherkräfte und Umgebungsdrücke, die durch v.a. durch Förderschnecken und Auslassdüsen mit Matrizen z.B. beim Extrudieren provoziert werden, wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht verwendet. Daher entstanden kaum derartige Veränderungen der



Stärkemorphologie, wie die von BOCHNIA (2013) dargestellten Verformungen (Abbildung 2). Durch das Extrudieren beispielsweise, tritt eine starke Verformung und Verschmelzung der Stärkegranula auf und die Gelanitisierung findet statt (BOCHNIA, 2013; LUND & LORENZ, 1984; MASERO et al., 2005; WENDERLEIN et al., 2022). Dieser fehlende mechanische Einfluss während der Wärmebehandlung in der vorliegenden Untersuchung provoziert letztlich die nachfolgend dargestellte unveränderte Stärkeverdaulichkeit.

#### 4.2.4.4 Einfluss auf die Verdaulichkeit von Stärke und Protein

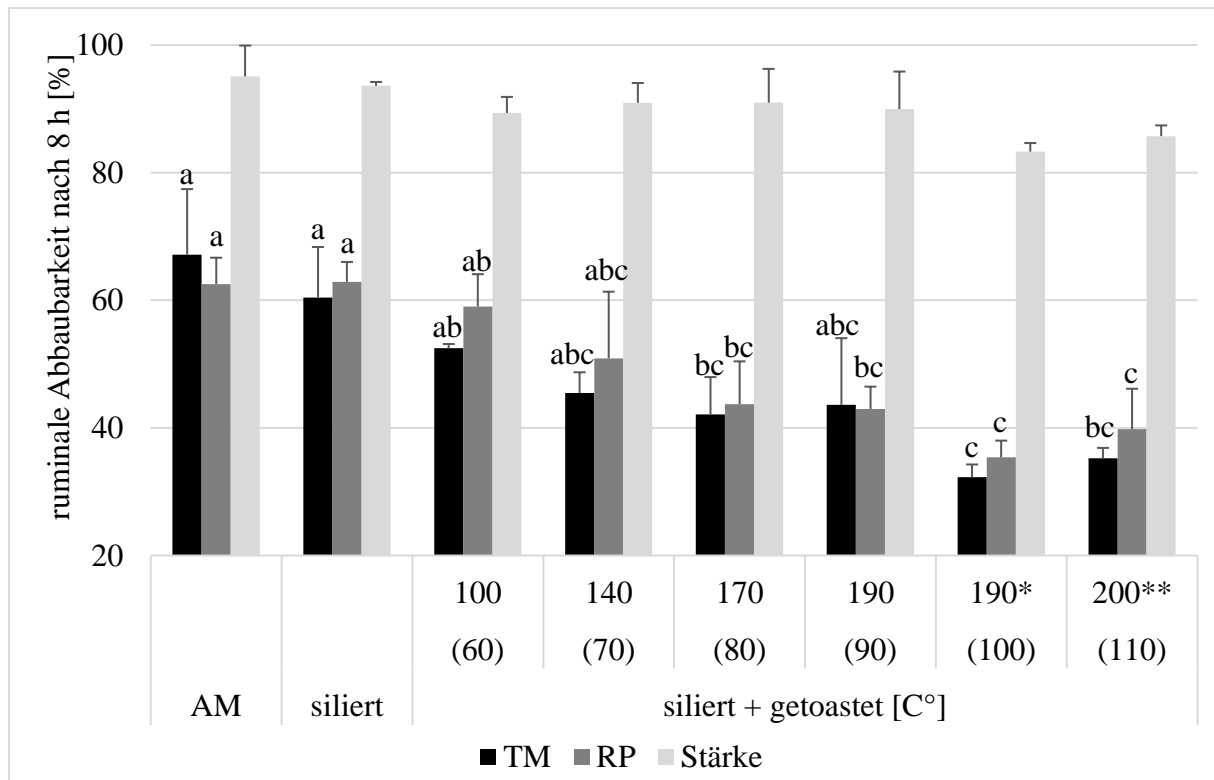
**Ergebnisse (Verdaulichkeit)** Die nachfolgenden Ergebnisse der Verdaulichkeitsuntersuchungen an Schafen wurden bereits veröffentlicht (BACHMANN et al., 2019). In der Tabelle 36 sind die Verdaulichkeiten ausgewählter Nährstoffe sowie der Gesamtenergie (GE) dargestellt.

**Tabelle 36:** Verdaulichkeit von Energie und ausgewählten Nährstoffen großtechnisch verarbeiteter Erbsen „Alvesta“ (Probenmaterial 2; MED (SD))

	Erbsen „Alvesta“	
	nativ	siliert + getoastet
Organische Masse	0,94 (0,019)	0,94 (0,026)
Rohprotein	0,90 (0,033)	0,89 (0,042)
Stärke	1,00 (0,0007)	1,00 (0,001)
NDF	0,69 (0,059) <sup>b</sup>	0,81 (0,055) <sup>a</sup>
GE	0,91 (0,022)	0,91 (0,027)
NEL [MJ/kg TM]	8,9	8,9

GE, Gesamtenergie (Bruttoenergie); MED, Median; NDF, neutrale Detergenzienfaser; NEL, Nettoenergie für Laktation; SD, Standardabweichung; n = 3; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede über alle Varianten mit  $p < 0,05$

Die kombinierte Behandlung hatte, mit Ausnahme der NDF, keinen Einfluss auf die Verdaulichkeit der ausgewählten Nährstoffe (Tabelle 36; Rohasche: ~ 0,38; Rohfaser: ~ 0,62; ADF: ~ 0,65; Zucker: ~1,0; Ergebnisse nicht dargestellt) sowie auf den Energiegehalt (NEL). Die Verdaulichkeiten für Rohprotein und Energie lagen bei rund 90 %, Stärke wurde vollständig abgebaut. Die Verdaulichkeit der NDF der nativen Erbse lag bei rund 70 % und wurde in Folge der Silierung und anschließenden Wärmebehandlung signifikant auf 80 % erhöht. Nachfolgend sind die Ergebnisse der *in vitro*-Untersuchungen der ruminalen Abbaubarkeit der TM, des RP und der Stärke der großtechnisch verarbeiteten Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 2) bei ausgewählten Wärmebehandlungsstufen dargestellt.



**Abbildung 22:** Veränderung der mittleren ruminalen Abbaubarkeit der Trockenmasse (TM), des Rohproteins (RP) sowie der Stärke nach 8 h Inkubation der Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 2) in Folge der großtechnischen Silierung und thermischen Behandlung der Kornsilagen mit ausgewählten Temperaturen (Werte in Klammern sind die gemessenen Temperaturen des Materials in der Toastkammer = Korntemperaturen bei einem Durchsatz von 100 kg FM/h; \* Durchsatz von 70 kg/h; \*\* Durchsatz von 50 kg/h); n = 3; *in vitro*; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungsstufen mit  $p < 0,05$ )

Die native Erbse „Alvesta“ hatte eine ruminale Stärkeabbaubarkeit von rund 95 %. In Folge der kombinierten Behandlung reduzierte sich diese, wenn auch nicht signifikant, auf minimal 83 % (siliert + getoastet bei 190 °C). Die ruminale Abbaubarkeit des RP lag bei der unbehandelten Erbse „Alvesta“ bei 63 % und reduzierte auf 35 % (siliert + getoastet bei 190 °C). Ebenso wurde die ruminale Abbaubarkeit der TM, in einem ähnlichen Maß, von 67 % auf 32 % reduziert. Sowohl bei der ruminalen Abbaubarkeit des RP als auch bei der TM ergab sich erst ab einer Behandlungstemperatur von 170 °C (Korntemperatur ~ 80 °C) eine signifikante Differenz zur nativen Erbse. Ab einer Behandlungstemperatur von 140 °C wurde durch die kontinuierliche Erhöhung der Temperatur keine weitere signifikante Reduzierung der ruminalen RP- und TM-Abbaubarkeit erzielt. Die Silierung hatte keinen Einfluss auf die ruminale Abbaubarkeit der TM, des RP sowie der Stärke.

**Diskussion (Proteinabbaubarkeit)** Die großtechnische Silierung hatte keinen Einfluss auf die ruminale Abbaubarkeit des RP, obwohl die eingangs genannten stark reduzierten Proteinlöslichkeiten dies vermuten ließen. Die ruminale Proteinabbaubarkeit sank allerdings signifikant mit steigender Behandlungsintensität um annähernd 50 % (100 °C Korntemperatur). Die ruminale Abbaubarkeit der TM reduzierte sich im gleichem Maße. Erst ab einer Korntemperatur von 80 °C ergab sich eine signifikante Differenz zur nativen Erbse. Die niedrige ruminale Proteinabbaubarkeit v.a. ab 100 °C Korntemperatur ist zwar wünschenswert, wird allerdings mit hohen Anteilen unlöslicher Proteine sowie hohen Mengen an Maillardprodukten, die letztlich die Lysinverfügbarkeit ab 100 °C Korntemperatur (KUHNTZSCH et al., 2019) um bis zu 50 % reduzieren (FALDET et al., 1992; HOFMANN, 2021; KUHNTZSCH et al., 2019) begleitet. Im Besonderen werden beim Toasten von Erbsen die Maillardprodukte Pyrralin, Carboxymethyllysin (CML) und Methylglyoxal-Hydroimidazolone (MG-H1) von bis zu 800 mg/kg TM (100 °C Korntemperatur) gebildet (HOFMANN, 2021; KUHNTZSCH et al., 2019). Für das Maillardprodukt Pyrralin ergab sich eine negative Korrelation mit  $y = 8,9 - 0,0075x$  ( $R^2 = 0,6449$ ) bei Lysin (Abbildung Anhang 24) und mit  $y = 7,3 - 0,0053x$  ( $R^2 = 0,8443$ ) für Arginin (Abbildung Anhang 25). Bei den Maillardprodukten CML und MG-H1 wurden diese negative Korrelationen auch bestätigt (Abbildung Anhang 20, Abbildung Anhang 21, Abbildung Anhang 22, Abbildung Anhang 23). Die hohen Temperaturen ( $> 180$  °C Einblastemperatur) sowie der Feuchtigkeitsgehalt ( $> 15$  %) begünstigen, neben Scherkräften welche in der vorliegenden Behandlung keine Anwendung fanden, die Bildung von Maillardprodukten und somit den Verlust von Lysin (CHEFTEL, 1985; MOUSSOU et al., 2017; RICHTER & SCHÜLER, 1959; siehe Abbildung Anhang 6). Da Maillardprodukte enzymatisch nicht abbaubar sind, reduziert sich die Verfügbarkeit von Proteinen und Aminosäuren (BOROOJENI et al., 2016; GONZÁLEZ-VEGA et al., 2011), was in der vorliegenden Untersuchung mit der Reduzierung der ruminale Abbaubarkeit bestätigt wurde. Das Maillardprodukt Furosin, gebildet nach saurer Hydrolyse aus dem Amadoriprodukt Fructoselysin, ist dabei ein Hauptqualitätsindikator bei thermischen Behandlungen (MOUSSOU et al., 2017) und wird ebenso beim Toasten von Erbsen gebildet (HOFMANN, 2021; KUHNTZSCH et al., 2019;  $y = -757 + 13,9x$ ;  $R^2 = 0,902$ ; siehe Abbildung Anhang 33). Das Amadoriprodukt Fructoselysin bildet sich auch bei der Silierung (+ 4 g/kg TM) und erreicht bereits ab 140 °C (70 °C Korntemperatur) Gehalte von 8 – 12 g/kg TM (HOFMANN, 2021; KUHNTZSCH et al., 2019; RUFÍAN-HENARES et al., 2009). Auf Grund seiner Hitzelabilität (HOFMANN, 2021) zerfällt Fructoselysin mit steigender Behandlungsintensität, die Schädigung bzw. Bindung der Aminosäure Lysin bleibt dennoch erhalten (KUHNTZSCH et al., 2019). Die Proteinlöslichkeit

(Proteinfraktion A + B1) wurde in der vorliegenden Untersuchung als Indikator der ruminalen Proteinabbaubarkeit verwendet. Die Proteine der Proteinfraktion B3 sind pansenstabiler und langsamer abbaubar im Vergleich zu den Proteinfraktionen A und B1, die als Summe die Proteinlöslichkeit darstellen, und bestimmt dadurch maßgeblich die Höhe der ruminalen Abbaubarkeit. Damit ließ sich die signifikante Reduzierung der ruminalen Proteinabbaubarkeit erst ab einer Korntemperatur von 80 °C erklären, da zu dieser Behandlungsintensität auch der Anteil der Proteinfraktion B3 deutlich anstieg. Hinzu kommen die steigenden Anteile der unlöslichen Proteine, die ebenso die ruminale Abbaubarkeit des RP bedingen. Die Silierung führte zwar zu einer Reduzierung der Proteinlöslichkeit, sie hatte allerdings keine Auswirkungen auf die ruminale Abbaubarkeit des RP. Daraus schlussfolgernd eignet sich die Proteinlöslichkeit als Indikator zur Beschreibung der Proteinbeständigkeit nur eingeschränkt, vielmehr ist der Anteil der Proteinfraktion B3 für eine Aussage zum Behandlungserfolg und zur Einschätzung der ruminalen Proteinbeständigkeit entscheidend. Zusätzlich ergab sich dabei, dass die Silierung zwar die Proteinqualität verändert aber im Hinblick auf die ruminale Proteinbeständigkeit keinen nennenswerten Einfluss hat, da nur sofort (Proteine der Proteinfraktion A) und schnelllösliche Proteine (Proteine der Proteinfraktion B1) nennenswert beeinflusst werden. Lediglich die Wärmebehandlung trägt nennenswert zur Steigerung der ruminalen Proteinbeständigkeit bei.

**Diskussion (Stärkeabbaubarkeit)** Die kombinierte Behandlung (silieren + toasten) hatte am Beispiel der Erbse „Alvesta“ sowohl im Labormaßstab (120 °C – 200 °C, 10 – 30 min) als auch in der großtechnischen Umsetzung (190 °C, 100 kg FM/h, 90 °C Korntemperatur) keinen Einfluss auf die ruminale Stärkeabbaubarkeit sowie auf die Stärkeverdaulichkeit. Die ruminale Stärkeverdaulichkeit betrug 90 % bis 100 % (BACHMANN et al. 2019; Tabelle 36) und ist damit höher als vergleichbare *in vitro*-Untersuchungen von unbehandelten Erbsen und Ackerbohnen bis 80 % (BISHNOI & KHETARPAUL, 1993; REHMAN & SHAH, 2005; YU et al., 2002a; ŻEBROWSKA et al., 1997). Nach Literaturangaben wurde bei druck-hydrothermischen Verfahren (z.B. Expandieren, Extrudieren) bereits ab 110 °C die ruminale Stärkeabbaubarkeit nennenswert gesteigert (+ 20 %-Punkte; LJØKJEL et al., 2003; MASERO et al., 2005). Bei rein thermischen Verfahren wurden erst ab 150 °C Effekte auf die ruminale Stärkebeständigkeit erzielt (FASOYIRO et al., 2005). Die ruminale Stärkeabbaubarkeit wird durch Scherkräfte und Umgebungsdrücke, welche die Stärkemorphologie verändern wesentlich beeinflusst (VAN DER POEL, 1990). Ebenso ist ein Feuchtigkeitsgehalt von mindestens 30 % (Wasserdampf oder Feuchtigkeitsgehalt des zu behandelnden Materials z.B. Kondensationswasser; ALONSO et al., 2000; BOROOJENI et al., 2016; CHEFTEL, 1985) sowie ein Wasser-Stärke-Verhältnis von 1,5:1,

notwendig um eine Gelanitisierung zu erreichen (LUND & LORENZ, 1984). Die Feuchtigkeit ermöglicht einen höheren Wärmedurchgangskoeffizienten und damit mehr Kondensationswärme im Korn und bietet v.a. bei hohen Temperaturen, einen Schutz vor Überhitzung mit einhergehenden Futterwertverlusten (VAN DER POEL, 1990). Diese genannten Voraussetzungen zur Reduzierung der ruminalen Stärkeabbaubarkeit wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht erreicht (u.a. Wasser: Stärke-Verhältnis 0,6:1) und bereits durch die unveränderte Stärkemorphologie bestätigt. Da keine externe Wasserzugabe über das Toastsystem erfolgte, reichte der Wassergehalt nicht aus, um die intermolekularen Bindungen der Stärkemoleküle abzubauen und eine Gelanitisierung der Stärke, auch ohne Scherkräfte, zu provozieren.

#### **4.2.5 Fütterungstauglichkeit**

Für die Untersuchung des Fütterungserfolges wurde am LVG/LfULG Köllitsch ein Exaktversuch an hochleistenden Milchkühen (40 kg Milch/Tier\*d) durchgeführt. Ziel der Untersuchung lag darin, mit hofeigen produzierten, siliert und getoasteten Erbsen stärke- und proteinreiche Rationskomponenten wie RES und Gerste in herkömmlichen Rationen nährstoffadäquat und wirtschaftlich sinnvoll zu ersetzen. Anhand der Erfahrungen und Ergebnisse aus den Laborversuchen wurden Erbsen („Alvesta“, Probenmaterial 2) frühzeitig geerntet (~ 75 % TM), siliert und anschließend thermisch behandelt (85 °C Korntemperatur, 180 - 190 °C Einblastemperatur, 100 kg/h). In der Testration wurden 2 kg RES sowie 1 kg Gerste durch 3 kg TM der siliert und getoasteten Erbsen nährstoffadäquat in der Ration ausgetauscht.

##### **4.2.5.1 Siliert und getoastete Erbsen als Rationskomponente**

**Ergebnisse (Rationskomponente siliert getoastete Erbsen)** Welchen Einfluss die großtechnisch durchgeführte kombinierte Behandlung auf den Futterwert insbesondere dabei die Protein- und Stärkequalität der Erbsen „Alvesta“ (Probenmaterial 2) hatte, wird in der nachfolgenden Tabelle 37 dargestellt.

**Tabelle 37:** Effekte der großtechnisch durchgeführten kombinierten Behandlung (Silieren + Toasten) auf ausgewählte Parameter der Protein- und Stärkequalität der Erbse „Alvesta“ (MW; n = 5)

	[g/kg TM]	Erbse „Alvesta“			p-Wert	SEM
		nativ	siliert	siliert + getoastet		
TM	[g/kg OM]	784 <sup>b</sup>	762 <sup>c</sup>	911 <sup>a</sup>	< 0,001	2,109
Rohprotein		189	189	189	n.s.	0,727
Stärke		558	559	574	n.s.	2,780
Proteinlöslichkeit [% d. RP]		74,7 <sup>a</sup>	40,7 <sup>b</sup>	16,3 <sup>c</sup>	< 0,001	1,127
A	[% d. RP]	6,90 <sup>b</sup>	9,12 <sup>a</sup>	9,04 <sup>a</sup>	0,021	0,312
B1	[% d. RP]	67,8 <sup>a</sup>	31,6 <sup>b</sup>	7,16 <sup>c</sup>	< 0,001	1,289
B2	[% d. RP]	23,4 <sup>b</sup>	52,7 <sup>a</sup>	56,7 <sup>a</sup>	< 0,001	1,360
B3	[% d. RP]	1,20 <sup>c</sup>	5,92 <sup>b</sup>	24,5 <sup>a</sup>	< 0,001	0,556
C	[% d. RP]	0,70 <sup>b</sup>	0,66 <sup>b</sup>	2,60 <sup>a</sup>	< 0,001	0,556
nRP		178 <sup>b</sup>	177 <sup>b</sup>	205 <sup>a</sup>	< 0,001	1,028
UDP*		38 <sup>b</sup>	-	115 <sup>a</sup>	< 0,001	-
NEL*	[MJ/kg TM]	8,9	-	8,9	n.s.	-

A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; B2, mäßig schnell abbaubares Reineiweiß; B3, langsam abbaubares Reineiweiß; C, unlösliches zellwandgebundenes Protein; OM, Organische Masse; RP, Rohprotein; TM, Trockenmasse; Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1; MW, Mittelwert; n.s., nicht signifikant; nRP, nutzbares Rohprotein; UDP, unabbaubares Futterrohprotein („undegradable feed protein“), *in vitro* bestimmt; NEL, Netto Energie Laktation („net energy lactation“), kalkuliert nach GfE (2001); \*nach Bachmann et al., 2019; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungsstufen mit  $p < 0,05$

Der Rohprotein- und Stärkegehalt der untersuchten Erbse „Alvesta“ blieb über alle Behandlungsstufen (siliert und siliert + getoastet) unverändert bei rund 190 g RP/kg TM ( $p = 0,975$ ) und rund 560 g Stärke/kg TM ( $p = 0,074$ ). Die thermische Aufbereitung führte zu einer Verringerung der TM auf rund 90 % ( $p < 0,001$ ). Infolge der Silierung und anschließenden Wärmebehandlung reduzierte sich die Proteinlöslichkeit (A + B1) um 58 %-Punkte ( $p < 0,001$ ), insbesondere durch die Anteilsreduzierung der Proteinfraktion B1 (- 60 %-Punkte;  $p < 0,001$ ) zu Gunsten steigender Anteile der Proteinfraktion B2 in Folge der Silierung (+ 33 %-Punkte;  $p < 0,001$ ) sowie der B3 (+ 23 %-Punkte;  $p < 0,001$ ) hervorgerufen durch die thermische Behandlung. Die Wärmebehandlung führte weiterhin zu erhöhten Anteilen der unlöslichen Proteinfraktion C um rund 2 % ( $p < 0,001$ ). Diese Erhöhung der Proteinbeständigkeit wurde durch einen höheren Gehalt an nRP (+ 27 g/kg TM;  $p < 0,001$ ) sowie einen gesteigerten, *in vitro* ermittelten, UDP-Gehalt (+ 77 g/kg TM;  $p < 0,001$ ) bestätigt. Der errechnete Energiegehalt blieb unverändert.

**Ergebnisse (Fütterungserfolg)** Die siliert und getoasteten Erbsen („Test“) wurden im Austausch zu RES und Gerste („Kontrolle“) über einen Zeitraum von 100 Tagen verfüttert. Die Rationen wurden hinsichtlich ihres Energie- und Nährstoffgehaltes ausgeglichen und die hergestellten Totalen-Misch-Rationen (TMR) kontinuierlich analysiert (siehe hierzu Tabelle

Anhang 18). Beide TMR hatten eine mittlere TM von 47 % mit einem Energiegehalt von 6,8 MJ NEL. Der Stärkegehalt lag bei rund 200 g/kg TM. Die Kontroll-TMR hatte einen mittleren Rohproteingehalt von rund 160 g/kg TM und damit 10 g RP/kg TM mehr im Vergleich zur Test-TMR (150 g/kg TM). Eine statistisch gesicherte Abweichung bestand dabei nicht ( $p = 0,108$ ). Beide TMR hatten einen Gehalt an nRP von rund 155 g/kg TM und einen Rohfasergehalt von 187 g/kg TM. Die dabei aufgenommenen Futtermengen und entsprechenden Nährstoff- und Energieaufnahmen sind als Herdendurchschnitt zu verstehen und werden in der Tabelle 38 angegeben. Weiterhin wurden in regelmäßigen Abständen Milch-, Kot- und Harnproben zur Analyse genommen.

**Tabelle 38:** Ausgewählte Parameter des Fütterungserfolges siliert und getoasteter Erbsen der Sorte „Alvesta“ (MW)

	Test	Kontrolle	<i>p</i> -Wert	SEM
<b>Aufnahme</b>	n = 35	n = 35		
Futter [kg TM/Tier*d]	23,0	23,1	n.s.	0,098
Rohprotein [g/Tier*d]	3540	3743	0,004	33,84
nRP [g/Tier*d]	3523	3613	0,040	21,22
Rohfaser [g/Tier*d]	4357	4312	n.s.	27,26
NDF [g/Tier*d]	8768	8845	n.s.	56,96
Stärke [g/Tier*]	4764	4452	0,027	69,22
NEL [MJ/Tier*d]	156	158	n.s.	0,852
<b>Milchleistung u. -inhaltsstoffe</b>	n = 93	n = 92		
Milchleistung [kg Milch/Tier*d]	40,2	40,9	n.s.	0,562
ECM [kg/Tier*d]	40,4	40,5	n.s.	0,574
Eiweiß [%]	3,41	3,58	< 0,001	0,020
Fett [%]	4,08	3,72	0,002	0,058
Harnstoff [mg/100 ml Milch]	176	212	< 0,001	2,805
<b>Ausscheidung</b>				
Nges Urin [g/l, n = 12]	8,58	13,3	0,002	0,660
Harnstoff Urin [g/l, n = 12]	8,98	14,3	0,003	0,774
Nges Kot [g/kg TM, n = 10]	31,4	34,8	0,025	0,691
Rohprotein Kot [g/kg TM, n = 10]	196	217	0,025	4,320
Rohfaser Kot [g/kg TM, n = 10]	176	213	0,005	5,741
NDF Kot [g/kg TM, n = 10]	409	469	0,008	9,943
Futtereffizienz*	1,76	1,75		

\*Futtereffizienz berechnet aus ECM/Futterraufnahme; ECM, Energie korrigierte Milchleistung („energy corrected milk yield“), n = 92; Milchleistung, Daten der Milchleistungsprüfung (MLP); Nges, Stickstoffgehalt; nRP, nutzbares Rohprotein; n.s., nicht signifikant; Kontrolle, Fütterungsgruppe mit 2 kg/Tier\*d RES + 1 kg/Tier\*d Gerste; Test, Fütterungsgruppe 3 kg TM/Tier\*d siliert + getoastete Erbsen „Alvesta“; Futterraufnahme, n = 35;

Die Futterraufnahme lag gruppenübergreifend bei 23 kg TM/Tier\*d. Die Testgruppe nahm über den betrachteten Versuchszeitraum annähernd 200 g/Tier\*d weniger Rohprotein und rund 100 g/Tier\*d weniger an nRP auf. Die Aufnahme an Stärke lag bei der Testgruppe mit rund 300 g/Tier\*d über der Kontrollgruppe. Beide Fütterungsgruppen hatten eine mittlere Energieaufnahme von 156 MJ/Tier\*d sowie eine adäquate Rohfaseraufnahme von rund 4,3

kg/Tier\*d und damit rund 8,8 kg aNDFom/Tier\*d. Die Milchleistung (ECM) lag gruppenübergreifend bei rund 40,5 kg Milch/Tier\*d. Der mittlere Milcheiweißgehalt lag in der Testgruppe mit rund 3,4 % unter dem der Kontrollgruppe ( $p < 0,001$ ). Der Milchfettgehalt der Testgruppe lag über dem der Kontrollgruppe (4,0 % vs. 3,7 %;  $p = 0,002$ ). Damit produzierte die Versuchsgruppe rund 90 g/Tier\*d weniger Milcheiweiß und rund 120 g/Tier\*d mehr Milchfett. Die Testgruppe hatte eine geringere mittlere N-Ausscheidung über Urin (4 g/l Urin,  $p = 0,002$ ) und Kot (3 g/kg TM;  $p = 0,025$ ) sowie die geringere Rohfaser- (rund 40 g/kg TM Kot;  $p = 0,005$ ) und NDF- (rund 60 g/kg TM Kot;  $p = 0,008$ ) Ausscheidung im Kot im Vergleich zur Kontrollgruppe. Die Futtereffizienz lag gruppenübergreifend bei circa 1,75.

**Diskussion** Durch den hohen Gehalt an ruminal schnell abbaubaren Proteinen (YU et al., 2002a) müssen native Erbsen und Ackerbohnen in der Leistungsfütterung mit pansenstabilen Proteinquellen wie z.B. RES ergänzt werden (LOSAND et al., 2003). Durch die kombinierte Behandlung konnte eine Steigerung des nRP von bis zu 30 g/kg TM im Vergleich zur nativen Erbse (siehe Tabelle 37) erreicht werden. Damit ist eine Konkurrenzfähigkeit zu RES auf Basis der Proteinqualität gegeben. Ziel war es v.a. dem Milchrind ausreichend nRP im Duodenum zur Verfügung zu stellen, um einerseits die  $\text{NH}_3$ -Bildung im Pansen und damit die Belastung der Leber bei der Verstoffwechslung von  $\text{NH}_3$  zu Harnstoff zu reduzieren und andererseits, möglichst viel Protein im Dünndarm zur Verstoffwechslung durch körpereigene Enzyme (Proteasen) zu ermöglichen. Bei gruppenübergreifend gleicher Futteraufnahme lag der Anteil der siliert und getoasteten Erbsen zur Gesamtration bei 13 %. Damit wurden die beschriebenen Einsatzrestriktionen (Tabelle Anhang 7) eingehalten. Die Testgruppe nahm weniger RP und damit auch weniger nRP auf, ob wohl die Rationen rechnerisch nährstoffadäquat hergestellt wurden. Die höhere Stärkeaufnahme der Testgruppe lässt sich dabei durch den höheren Stärkegehalt der Erbsen im Vergleich zu RES und Gerste erklären, die geringere Proteinaufnahme durch den geringeren Proteingehalt der Ration (150 g/kg TM vs. 160 g/kg TM, siehe Tabelle Anhang 18). Die Differenz des RP-Gehaltes der kalkulierten Ration und der tatsächlich vorgelegten Futtermischung ist durch Schwankungen der Nährstoffqualität einzelner Rationskomponenten (z.B. Grassilage) und eventuell durch Dosiererschwernisse des Futtermischwagens zu erklären. Die Testgruppe hatte bei gleicher Energieversorgung deutlich geringere Milcheiweiß- und Harnstoffgehalte sowie geringere Stickstoff- und Allantoingehalte (Abbauprodukt der Nukleinsäuren aus dem Stoffwechsel der Pansenmikroben) im Harn. Damit deutete sich eine geringere Bereitstellung an Mikrobensynthese relevanten Proteinen im Pansen an und weniger „überschüssige“ Mengen an  $\text{NH}_3$  werden aus dem Pansen heraus durch den Blutkreislauf über die Leber zu Harnstoff umgewandelt und letztlich über Milch, Harn und Kot



ausgeschieden. Geringere Rohfasergehalte im Kot der Testgruppe deuten zusätzlich auf eine bessere Faserverdauung und Energieverwertung hin, was den signifikant höheren Milchfettgehalt in Folge höherer Acetatgehalte aus dem mikrobiellen Celluloseabbau und  $\beta$ -Hydroxybutyrat erklären könnte. Vergleichende Untersuchungen bestätigen mit extrudierten Ackerbohnen (Opticon®-Verfahren, 8 % in der Gesamtration) im Austausch zu SES eine signifikant verbesserte Milchleistung sowie signifikant reduzierte Milchwahstoffgehalte (DUNKEL et al., 2016). Die kombinierte Behandlung steigerte zudem die theoretische Preiswürdigkeit (Tabelle Anhang 5) von Erbse und Ackerbohne im Austausch zu SES und Gerste beim Rind und Schwein auf Basis der NEL- und ME-Gehalte sowie Rohprotein- und Lysingehalte, sodass die innerbetriebliche Verwertung von kombiniert behandelten Körnerleguminosen im Austausch zu importierten Proteinquellen in den Rationen wirtschaftlich sinnvoll ist.

## 5 Schlussfolgerung

**1. Es kann bestätigt werden, dass sich keine Ertragsverluste von Stärke und Protein bei einer frühzeitigen Ernte teigreifer Körner (70 % TM) von Erbsen und Ackerbohnen gegenüber der herkömmlichen Ernte zur Trockenreife ergeben.** Die Nährstoffeinlagerung ist bei Ackerbohnen zur Grünreife (30 % Korn-TM) und bei Erbsen zur Teigreife (50 % Korn-TM) abgeschlossen und der maximale Stärke- und Proteinertrag erreicht. Der anfänglich hohe Gehalt an Zucker, v.a. der Erbsen, reduziert sich in Folge der Stärkebildung und führt zu einer Anteilsverschiebung der Rohnährstoffe sowie zu einer Reduzierung des Rohproteingehaltes im Verhältnis zur TM. Die Bildung von Stärke führte zum Wachstum des Kornes von der Phase der „Kornbildung“ (15 % TM) mit 3 - 14 mm bis zur Phase „Beginn der Teigreife“ (50 % TM) mit 10 - 17 mm Korndurchmesser. Die Epidermis und weitere Bestandteile der Samenschale (Hypodermis, Chlorenchym) waren in der frühen Entwicklungsphase elektronenmikroskopisch als röhrenförmige Gebilde zu erkennen. In den „taschenähnlichen“ Parenchymzellen, wurde die gebildete Stärke letztlich eingelagert. Die Stärkegranulae von Erbsen waren mit 25 - 35 µm größer im Vergleich der Stärkegranulae von Ackerbohnen. Die Proteinlöslichkeit lag bei den untersuchten Ackerbohnen und Erbsen über den betrachteten Abreifezeitraum annähernd konstant bei rund 78 % des RP. Die Proteinlöslichkeit von trockenreifen Sojavollbohnen und Lupinen, die ebenfalls ihre Nährstoffeinlagerung zu „Beginn der Teigreife“ abschließen und im weiteren Abreifeverlauf lediglich Feuchtigkeit verlieren (LE et al., 2007), liegt auf dem ähnlich hohen Niveau. Der ermittelte Proteinertrag von frühzeitig geernteten Ackerbohnen lag mit rund 10 dt/ha Rohprotein im Vergleich zu sächsischen Sojavollbohnen und Winterraps (je 8 dt/ha) am höchsten. Mit einem möglichen Ertrag an Stärke von rund 15 dt/ha bestätigen sich Erbsen und Ackerbohnen als regional verfügbare Protein- und Stärkequelle (im Vergleich Süßblupine, Sojabohne und Raps < 10 dt/ha Stärke und Protein; siehe hierzu Abbildung Anhang 3). Der bundesweite Ernteertrag von Erbsen und Ackerbohnen (2010 - 2020) liegt bei rund 35 dt/ha (siehe hierzu Abbildung Anhang 2). Bei der Ernte der Erbse „Alvesta“ im Rahmen der Fütterungsstudie schwankten die Erträge von 28 dt/ha - 35 dt/ha und entsprechend den mittleren Erträgen in ausgewählten sächsischen Regionen (Abbildung Anhang 5). Der mögliche Ertrag nach Handernnte ergab am Beispiel der Erbse „Astronaut“ (Probenmaterial 3) bei einer Korn-TM von 70 % rund 70 dt/ha und deckt sich mit dem mittleren Ertragspotential in Sachsen großtechnisch geernteter Erbsen (~ 55 dt/ha; KARALUS, 2018) mit entsprechendem Ernteverlust. Mit Einsetzen der „Trockenreife“ (> 70 % TM) verhielten sich allerdings die Erträge rückläufig, was durch witterungsbedingte (Niederschlag, Wind) Ausfallverluste zu

begründen war. Diese „Ertragslücke“ ergab einen geschätzten Verlust von rund 20 dt Stärke/ha und rund 9 dt Rohprotein/ha, sodass eine vorgezogene Ernte von Erbsen und Ackerbohnen sinnvoll ist. Allerdings ist eine Erntbarkeit auf Grund hoher Anteile grüner Pflanzenbestandteile erst mit rund 70 % TM großtechnisch umsetzbar und ökonomisch sinnvoll. Als positiver Nebeneffekt der frühzeitigen Ernte ist die gleichzeitig stattfindende Unterbrechung des Entwicklungszykluses der Ackerbohnenkäfer. Damit ist eine natürliche Insektizidbehandlung gegeben und die langen Anbaupausen von rund 6 Jahren, u.a. hervorgerufen durch den Ackerbohnenkäfer, können reduziert werden. Durch den Fraß des Schädigers entstanden keine nennenswerten Nährstoffverluste. Der Futterwert befallener Körner bleibt unverändert, sodass eine finanzielle Abstufung, zumindest bei der Futterqualität, unbegründet ist.

**2. Es kann bestätigt werden, dass bei der Silierung von teigreifen Erbsen und Ackerbohnen proteolytische und desmolytische Prozesse herabgesetzt sind. Weiterhin kann bestätigt werden, dass die Bildung konservierungswirksamer Milchsäure reduziert wird.** Die untersuchten Erbsen- und Ackerbohnsorten waren mit 230 g/kg TM (Erbsen) bzw. 300 g/kg TM (Ackerbohnen) eiweißreich und auf Grund des geringen Zuckerangebotes (20 - 50 g/kg TM) und zugleich hohen Pufferkapazität (40 g MS/kg TM) als schwer silierbar einzuschätzen. Die Vielfalt des natürlichen Mikrobioms sank mit zunehmender Abreife des Korns. Vor allem MSB gingen in ihrer relativen Häufigkeit deutlich zurück, zu Gunsten steigender Häufigkeiten von Bacillus- sowie Enterobakterien. Der natürliche Besatz dieser „Silierschädlinge“ lag bei der Korn-TM von rund 70 % dreifach über dem natürlichen Vorkommen von MSB. Daher empfiehlt sich bei der Silierung die Zugabe von MSB als biologisches Siliermittel um das Vorkommen der MSB im Siliergut zu erhöhen und eine schnelle pH-Wertabsenkung zu Beginn der Silierung zu erreichen. Im Besonderen eignen sich die MSB *P. pentosaceus* & *L. paracasei* in höheren TM-Bereichen, da sie hauptsächlich Milchsäure aus Hexosen und einigen Pentosen bilden und im Hinblick auf den allgemein geringen Gehalt an leichtlöslichen Zuckern in Erbsen und Ackerbohnen eine zusätzliche Zuckerquelle zur Verstoffwechslung nutzen können. Auch die Zugabe von *L. plantarum* ergab gute Siliererfolge (Milchsäurebildung, pH-Wertabsenkung) in dem hohen TM-Bereich des Siliergutes. Die höhere TM des Siliergutes von 70 % im Vergleich zu den Untersuchungen von GEFROM (2012) mit Kornsilagen < 65 % TM, fiel auf Grund der geringen Osmolalität die Stoffwechselaktivität der MSB weiter herab. Dennoch wurde während der Silierung noch Milchsäure gebildet und der pH-Wert in den Kornsilagen abgesenkt. Die entstandenen pH-Werte lagen in einem Bereich von 4,3 - 5. Die Zugabe von MSB begünstigte dabei die Reduzierung des pH-Wertes sowie die Bildung von Milchsäure, die mit < 2 % der TM auf

einem niedrigen Niveau im Vergleich zu den Untersuchungen von GEFROM (2012) lag. Allerdings wurde ab 75 % TM im Siliergut die Mikrobenaktivität der MSB derart eingeschränkt, dass es kaum zu Veränderungen des pH-Wertes und zur Bildung flüchtiger Fettsäuren in der Kornsilagen kam. Hierbei wurden das Siliergut lediglich konserviert. Die MSB-Zugabe führte, auf Grund einer höheren relativen Häufigkeit von MSB gegenüber Silierschädlingen, gegen die Erwartungen zu einer besseren aeroben Stabilität im Vergleich zu den Kontrollsilagen. Auf Grund der hohen TM blieb auch die Aktivität und der Milchsäureabbau aerober Mikroorganismen (z.B. Hefen) eingeschränkt. Die Zugabe von MSB ist nicht nur auf Grund des geringen natürlichen Vorkommens sinnvoll, sondern auch im Hinblick auf den Siliererfolg zu empfehlen. Die Silierung von Erbsen und Ackerbohnen war mit einer TM von 70 % ohne nennenswerte Silierverluste unter anaeroben Bedingungen möglich. Nährstoffveränderungen traten während der Silierung ebenfalls nicht auf. Es konnte lediglich eine Reduzierung der Proteinlöslichkeit festgestellt werden, die bei der anschließenden Wärmebehandlung vorkonditionierend positiv wirkte. Weiterhin ermöglichte die Silierung eine deutliche Reduzierung der antinutritiven Stoffe Vicin und TIA.

**3. Es kann bestätigt werden, dass durch das Toasten silierter Erbsen und Ackerbohnen die ruminale Proteinbeständigkeit erhöht wird und sich der Gehalt antinutritiver Inhaltsstoffe reduziert. Es kann nicht bestätigt werden, dass sich die ruminale Stärkebeständigkeit in Folge der kombinierten Behandlung erhöht.** In der vorliegenden Untersuchung konnte bestätigt werden, dass die Behandlungstemperatur, -dauer und -menge einen entscheidenden Einfluss auf die Erhöhung der ruminale Proteinbeständigkeit hat. Die Effektivität einer Wärmebehandlung steigt durch die Verwendung von Feuchtigkeit und Druck im System (VAN DER POEL, 1990), sodass hydrothermische und druckhydrothermische Verfahren höhere Effekte erzielen im Vergleich zu rein thermischen Wärmebehandlungen. Auch die Silierung wirkte bereits vorkonditionierend und reduzierte die Proteinlöslichkeit. Damit hat die kombinierte Behandlung eine höhere Effektivität gegenüber den in der Literatur vorgestellten Behandlungsverfahren. Während beim Rösten erst bei Temperaturen > 140 °C und einer langen Behandlungsdauer (max. 90 min) nennenswerte Effekte auf die Proteinqualität zu erwarten sind (FALDET et al., 1992), treten die gleichen Effekte bei (druck)-hydrothermischen Verfahren bereits bei unter 130 °C Behandlungstemperatur und einer deutlich geringeren Behandlungsdauer (3 min, 4 bar) auf (GOELEMA et al., 1998). Das in der vorliegenden Untersuchung verwendete Toastverfahren nimmt dabei eine Zwischenstellung ein. Hierbei konnten nennenswerte Effekte auf die Proteinbeständigkeit ab 140 °C, ähnlich dem Rösten, allerdings bei einer deutlich geringeren Behandlungsdauer (30 min) festgestellt werden.

Die kombinierte Behandlung hatte sowohl im Labormaßstab (120 °C - 200 °C, 10 - 30 min) als auch in der großtechnischen Umsetzung (190 °C, 100 kg FM/h, 90 °C Korntemperatur) keinen Einfluss auf die ruminale Stärkeabbaubarkeit sowie auf die Stärkeverdaulichkeit. Da das angewandte Behandlungsverfahren ohne Scherkräfte und Umgebungsdrücke arbeitet, die v.a. durch Förderschnecken und Auslassdüsen an Matrizen provoziert werden (z.B. beim Extrudieren), blieb eine Verformung der Stärke (= Gelanitisierung, BOCHNIA, 2013; LUND & LORENZ, 1984; MASERO et al., 2005) und Effekte auf die Stärkeverdaulichkeit aus. Die elektronenmikroskopischen Aufnahmen ergaben lediglich ein Zusammenfallen der Stärkegranulae in Folge des Wasseraustrittes, aber eben erwartungsgemäß keine Verschmelzung der Stärke. In der vorliegenden Untersuchung wurden silierte Erbsen und Ackerbohnen bei Behandlungstemperaturen von 60 °C bis 200 °C für 10 - 30 Minuten getoastet. Sowohl die Erhöhung der Behandlungsmenge (500 g FM vs. 1000 g FM) sowie die Reduzierung der Behandlungszeit (10 min vs. 30 min) führten zu geringeren Effekten auf die Proteinqualität (z.B. geringere Proteinlöslichkeit). Eine übermäßige Behandlungsintensität (> 160 °C) führte zu einer Proteinschädigung in Folge steigender Anteile unlöslicher Proteine sowie des Gehaltes an puRP. Dabei können UDP-Gehalte bei Erbsen von 16 % des RP (120 °C) bis 42 % des RP (200 °C) erreicht werden. Eine Verlängerung der Behandlungsdauer (10 min vs. 30 min) erhöht dabei den UDP-Gehalt ebenfalls. Mit steigender Wärmebehandlungsintensität wird der Anteil der Proteinfraction B1 annähernd vollständig reduziert (rund 2 % des RP bei 110 °C Korntemperatur) zu Gunsten signifikant steigender Anteile der Proteinfraction B2 und ab 80 °C Korntemperatur der B3-Fraktion auf rund 70 % des RP. Ab einer Korntemperatur von 100 °C (190 °C Einblastemperatur, 70 kg FM/h) stieg der Anteil unlöslicher Proteine (Proteinfraction C) sowie der Gehalt an puRP stark, sodass ab diesem Zeitpunkt eine Proteinschädigung auftritt.

Die Wärmebehandlung erreichte zudem eine deutliche Reduzierung der TIA, die ab einer Korntemperatur von 100 °C annähernd vollständig reduziert wurde. Der Gehalt an nRP wird bereits in Folge der Silierung, aber vielmehr durch die Wärmebehandlung deutlich erhöht. Die großtechnische Wärmebehandlung erreichte eine höhere Effizienz im Vergleich zu den Toastversuchen im Labormaßstab. Bei der höchsten Behandlungsintensität (200 °C) entstand eine Differenz von annähernd 20 %-Punkten an nRP. Die Silierung und die Wärmebehandlung führte mit steigender Behandlungsintensität zur Bildung von Maillardprodukten (Pyrralin, CML, MG-H1, Fructoselysin) und bedingte einen Rückgang der Aminosäuren Lysin und Argenin. Schlussfolgernd wird in Anbetracht aller Ergebnisse (Proteinqualität und -abbaubarkeit, Maillardprodukte, Antinutritive Substanzen) bei der Wärmebehandlung von

Erbsen und Ackerbohnen eine Korntemperatur von mindestens 70 °C empfohlen. Korntemperaturen  $\geq 100$  °C führen dabei zur Proteinschädigung (hohe Anteile unlöslicher Proteinfractionen, Maillardprodukte, Rückgang Lysingehalt). Optimale Proteinqualitäten bei noch moderraten Gehalten an Maillardprodukten wurden bei rund 85 °C Korntemperatur erreicht.

**4. Es kann bestätigt werden, dass siliert und getoastete Erbsen ohne negative Auswirkungen auf die Milchleistung sowie -qualität als Proteinquelle, in den Rationen von Milchrindern, Rapsextraktionsschrot ersetzen können.** In der vorliegenden Untersuchung wurden frühzeitig geerntete (70 % TM), siliert und getoastete (85 °C Korntemperatur) Erbsen mit 3 kg TM/Tier\*Tag (Testgruppe) in der Ration hochleistender Milchrinder nährstoffadäquat gegen 1,5 kg TM/Tier\*Tag RES und 1 kg TM/Tier\*Tag Gerste (Kontrollgruppe), ohne negative Auswirkungen auf die Futteraufnahme und Milchleistung, ausgetauscht. Bei gleicher Futteraufnahme nahm die Testgruppe weniger nRP und mehr Stärke im Vergleich zur Kontrollgruppe auf. Die Testgruppe hatte bei gleicher Energieversorgung (156 MJ NEL/Tier\*Tag) deutlich geringere Milcheiweiß- und Harnstoffgehalte sowie geringere Stickstoff- und Allantoingehalte (Abbauprodukt der Nukleinsäuren aus dem Stoffwechsel der Pansenmikroben) im Harn. Damit bestätigt sich eine geringere Bereitstellung schnelllöslicher Proteine zur  $\text{NH}_3$ -Bildung im Pansen und eine Stoffwechselentlastung der Leber ist wahrscheinlich. Geringere Rohfasergehalte im Kot der Testgruppe deuten zusätzlich auf eine bessere Faserverdauung und Energieverwertung hin, was den signifikant höheren Milchfettgehalte erklärt. Der Einsatz von rund 3 kg TM siliertes und getoasteter Erbsen ergab keine Einschränkungen in der Futteraufnahme und Milchleistung der untersuchten Tiere. Die kombinierte Behandlung von Erbsen und Ackerbohnen erhöhte den Futterwert derart, dass eine Konkurrenzfähigkeit zu importierten Proteinquellen geben und ein Austausch in der Ration von hochleistenden Milchrindern möglich ist.

## 6 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung lag in der Steigerung des Futterwertes von Erbsen und Ackerbohnen. Dabei stellte sich die Frage, zu welchem Reifestadium die Nährstoffeinlagerung abgeschlossen und damit der frühestmögliche Erntetermin definiert ist. Die Lagerung durch Silierung der teigreifen Körner sollte dabei ohne Nährstoffverluste erfolgen. Durch die Steuerung des anschließenden Toastprozesses wurde das Ziel verfolgt den Gehalt antinutritiver Substanzen auf ein Minimum zu reduzieren sowie die ruminale Protein- und Stärkebeständigkeit zu erhöhen. Die Nährstoffeinlagerung ist mit einer TM von 50 % abgeschlossen, eine Ernte aufgrund Grünanteils der Restpflanze aber erst mit einer TM von 70 % technisch realisierbar. Die Silierung dieser teigreifen Erbsen und Ackerbohnen ist ohne nennenswerte Silier- und Nährstoffverluste möglich. Die Zugabe von MSB brachte einen Zugewinn des Siliererfolges, anhand höherer Milchsäuregehalte, niedrigeren pH-Werten und einer höheren aeroben Stabilität von bis zu 7 Tagen. Die Bildung von flüchtigen Fettsäuren (v.a. Milchsäure) blieb im Allgemeinen mit maximal 5 g MS/kg TM moderat. Die Silierung und thermische Behandlung hatten keinen Einfluss auf den Protein- und Stärkegehalt. In Folge der Silierung wurde teilweise eine Proteinstabilisierung erreicht. Das anschließende Toasten reduzierte die Proteinlöslichkeit und steigerte die ruminale Proteinbeständigkeit. Die ruminale Stärkeabbaubarkeit wurde nicht beeinflusst. Die Behandlungsintensität (Temperatur, Menge, Dauer) bestimmt maßgeblich den Effekt auf die Proteinqualität der siliert und getoasteten Erbsen und Ackerbohnen. Mit steigender Behandlungstemperatur werden zunehmend Maillardreaktionen provoziert, die in der Entstehung eine Reduzierung der Aminosäureverfügbarkeit (v.a. Lysin) bedingen. Bei einer Korntemperatur von 85 °C wurde die ruminale Proteinbeständigkeit nennenswert erhöht, ohne dabei negative Effekte auf den Futterwert zu provozieren. Ab 100 °C Korntemperatur treten unerwünschte Proteinschädigungen auf. Die kombinierte Behandlung führt zu einer Steigerung des Futterwertes von Erbsen und Ackerbohnen und ermöglicht eine Wettbewerbsfähigkeit zu RES in einer leistungsorientierten und bedarfsgerechten Milchkuhration.

## 7 Danksagung

Frau Prof. Dr. Annette Zeyner danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit im Rahmen der Aufgabenfindung, Strukturierung der angefertigten Promotionsschrift sowie fachlichen Unterstützung der Ergebnisinterpretation. Ich danke Ihr für die Möglichkeit zur Durchführung der *in vitro*-Untersuchungen an der MLU. Ebenso schätze ich Ihr Engagement bei der Korrektur der im Rahmen dieser Arbeit angefertigten nationalen und internationalen Publikationen.

Herrn Prof. Dr. Olaf Steinhöfel danke ich für die Möglichkeit als Projektmitarbeiter das SilaToast-Projekt bearbeiten zu dürfen und damit die Grundlage der vorliegenden Arbeit zu schaffen. Sie haben mir die Worte Ihres Doktorvaters Herrn Prof. Dr. Manfred Hoffmann stets nahegelegt: „Fördern durch Fordern“. Dieser tiefgründige Satz begleitet mich seitdem und prägt mein Handeln, sich stets neuen Herausforderungen zu stellen, aus der „Komfortzone“ herauszutreten und so lebensprägende Erfahrungen zu erhalten. Danke dafür!

Frau Dr. Siriwan Martens danke ich für die fachliche Unterstützung bei der Planung und Durchführung der vielfältigen Aufgaben im Bereich der Silierung. Siriwan vielen Dank für deine Unterstützung bei den Silierversuchen und Heranführung an die Mikrobiologie sowie die konstruktive Diskussion bei den Ergebnissen.

Herrn Frank Püschel danke ich für die stetige Unterstützung bei der praktischen Durchführung der zahlreichen Labor- und großtechnischen Untersuchungen zur Anfertigung dieser Arbeit. Frank deine aufmunternden Sätze wie u.a. „Das musst du ganz entspannt sehen!“ fielen dir in den passenden Momenten immer leicht von den Lippen und sind doch so bedeutend, nicht nur für die vorliegende Arbeit, sondern auch in meinem Lebensalltag.

Herrn Dr. Martin Bachmann danke ich für die Unterstützung bei den wissenschaftlichen Untersuchungen an der MLU und bei der Anfertigung unsere Papers.

Ein großer Dank geht an meine Eltern, die mir in Kindheitstagen stets die Haltung verschiedener Nutztiere ermöglicht haben und so meinen beruflichen Weg prägten. Die Anfertigung dieser Promotionsschrift ist für mich ein bedeutendes Resultat eures Zuspruches!

Eine besondere Dankeswürdigung geht an meine Frau Janine. Liebe Janine, du musstest in den vergangenen Jahren oft auf meine Unterstützung verzichten und das Familienleben mit unseren Söhnen, neben dem Haushalt, managen. Zusätzlich hast du mir stets die notwendige Aufmunterung, den Zuspruch und das Durchhaltevermögen sowie den ein oder anderen Kaffee in den richtigen Momenten gegeben. Ich danke dir!



## 8 Literaturverzeichnis

Abbas, I.R., Scheerens, J.C. & Berry, J.W. (1987): Tepary bean starch Part III: in vitro digestibility. *Starch-Stärke*. 39(8): 280-284.

Adamidou, S., Nengas, I., Grigorakis, K., Nikolopoulou, D. & Jauncey, K. (2011): Chemical Composition and Antinutritional Factors of Field Peas (*Pisum sativum*), Chickpeas (*Cicer arietinum*), and Faba Beans (*Vicia faba*) as Affected by Extrusion Preconditioning and Drying Temperatures. *Cereal Chem.* 88(1):80-86.

Ali, S. M., Nitschke, L. F., Dube, A. J., Krause, M. R., & Cameron, B. (1978): Selection of pea lines for resistance to pathotypes of *Ascochyta pinodes*, *A. pisi* and *Phoma medicaginis* var. *pinodella*. *Australian Journal of Agricultural Research*. 29(4): 841-849.

Alonso, R., Orue, E. & Marzo, F. (1998): Effects of extrusion and conventional processing methods on protein and antinutritional factor contents in pea seeds. *Food Chemistry*. 63(4): 505-512.

Alonso, R., Aguirre, A. & Marzo, F. (2000): Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and in vitro digestibility of protein and starch in faba and kidney beans. *Food Chem.* 68, 159-165.

Al-Rabadi, G. J. S, Gilbert, R. G. & Gidley, M. J. (2009): Effect of particle size on kinetics of starch digestion in milled barley and sorghum grains by porcine alpha-amylase. *Journal of Cereal Science*. 50: 198-204.

Altan, A., McCarthy, K.L. & Maskan, M. (2009): Effect of extrusion cooking on functional properties and in vitro starch digestibility of barley-based extrudates from fruit and vegetable by-products. *Journal of Food Science*. 74: 77-86.

Ambigaipalan, P., Hoover, R., Donner, E., Liu, Q., Jaiswal, S., Chibbar, R., Nantanga, K.K.M. & Seetharaman, K. (2011): Structure of faba bean, black bean and pinto bean starches at different levels of granule organization and their physicochemical properties. *Food Res. Int.* 44: 2962-2974.

Anderson, V.L., Lardy, G.P. & Ilse, B.R. (2007): Field pea grain for beef cattle. *The Professional Animal Scientist*. 23(1): 1-7.

Anderson-Hafermann, J.C., Zhang, Y., Parsons, C.M. & Hymowitz, T. (1992): Effect of heating on nutritional quality of conventional and Kunitz trypsin inhibitorfree soybeans. *Poultry Science* 71: 1700-1709.

Anjos, F.D., Vazquez-Anon, M., Dierenfeld, E.S., Parsons, C.M. & Chimonyo, M. (2016): Chemical composition, amino acid digestibility, and true metabolizable energy of cowpeas as affected by roasting and extrusion processing treatments using the cecectomized rooster assay. *Journal of Applied Poultry Research*. 25(1): 85-94.

- Aparna, K., Naveeda, K., & Jamuna, P. (2000): Cooking quality and in vitro digestibility of legumes cooked in different media. *Journal of Food Science and Technology (Mysore)*. 37(2): 169-173.
- Arese, P. (1982): Favism. A natural model for the study of hemolytic mechanisms. *Rev. Pure Appl. Pharmacol. Sci.* 3: 123-183.
- Arese, P. & De Flora, A. (1990): Pathophysiology of hemolysis in glucose-6-phosphate dehydrogenase deficiency. *Semin. Hematol.* 27: 1-40.
- Aufrère, J., Graviou, D., Melcion, J. P., & Demarquilly, C. (2001): Degradation in the rumen of lupin (*Lupinus albus* L.) and pea (*Pisum sativum* L.) seed proteins: Effect of heat treatment. *Animal Feed Science and Technology*. 92(3-4): 215-236.
- Ayadi, F.Y. & Rosentrater, K.A. (2012): Alternative Protein Sources for Aquaculture Feeds. *Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition*. 4(1): 1-26.
- Aznar-Fernández, T., Cimmino, A., Masi, M., Rubiales, D., & Evidente, A. (2019): Antifeedant activity of long-chain alcohols, and fungal and plant metabolites against pea aphid (*Acyrtosiphon pisum*) as potential biocontrol strategy. *Natural product research*. 33(17): 2471-2479.
- Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Okon, P., Martens, S.D., Greef, J.M., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2019): Ruminant In Vitro Protein Degradation and Apparent Digestibility of Energy and Nutrients in Sheep Fed Native or Ensiled + Toasted Pea (*Pisum sativum*) Grains. *Animals*. 9. 401.
- Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Thierbach, A., Michel, S., Bochnia, M., Greef, J.M., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2020a): Effects of toasting temperature and duration on in vitro ruminal gas production kinetics and post-ruminal crude protein from field pea (*Pisum sativum*) legume grain silages. *Livestock Science*. 233 (2020) 103940.
- Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2020b): Control of bean seed beetle reproduction through cultivar selection and harvesting time. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 300. 107005.
- Bachmann, M., Wensch-Dorendorf, M., Kuhnitzsch, C., Kleinstreuber, S., Popp, D., Thierbach, A., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2022a): Changes in Composition and Diversity of Epiphytic Mikroorganisms on Field Pea Seeds, Partial Crops Peas, and Whole Crop Peas during Maturation and Ensiling with or without Lactic Acid Bacteria Inoculant. *Microbiology spectrum*. 10(4). e00953-22.
- Bachmann, M., Okon, P., Blunk, C., Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2022b): Ensiling and thermic treatment effect on nutrient content, protein solubility, and in vitro fermentation of partial crop faba beans. *Animal Feed Science and Technology*, 115349.
- Baik, B.-K. & Hwa Han, I. (2012): Cooking, Roasting, and Fermentation of Chickpeas, Lentils, Peas, and Soybeans for Fortification of Leavened Bread. *Cereal Chem*. 89(6): 269-275.

- Bajaj, R., Singh, N., Kaur, A., & Inouchi, N. (2018): Structural, morphological, functional and digestibility properties of starches from cereals, tubers and legumes: a comparative study. *Journal of food science and technology*. 55(9): 3799-3808.
- Baldwin, P.M., Melia, C.D. & Davies, M.C. (1997): The surface chemistry of starch granules studied by time-of-flight secondary ion mass spectrometry. *Journal of Cereal Science* 26: 329-346.
- Baumgärtel, T., Dunkel, S., Gräfe, E., Peyker, W. & Trauboth, K. (2013): Einsatz alternativer Eiweißquellen in der Wiederkäuerfütterung. Abschlussbericht Projekt-Nr.: 95.06.
- Beal, L. & Mehta, T. (1985): Zinc and Phytate Distribution in Peas. Influence of Heat Treatment, Germination, pH, Substrate, and Phosphorus on Pea Phytate and Phytase. *Journal of Food Science*. 50: 96-100.
- Bechtel, D.B., Zayas, I., Kaleikau, L. & Pomeranz, Y. (1990): Size-Distribution of Wheat Starch Granules During Endosperm Development. *Cereal Chem.* 67(1): 59-63.
- Bellof, G. & Weindl, P. (2016): Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes regionaler Eiweißfuttermittel als Ersatz für importiertes Sojaextraktionsschrot. Themen zur Tierernährung. Fachtag 2015/2016. Deutsche Vilomix Tierernährung GmbH.
- Bellof, G., Halle, I. & Rodehutschord, M. (2016): Ackerbohnen, Futtererbsen und blaue Süßlupinen in der Geflügelfütterung. UFOP-Praxisinformation. Berlin.
- Berry, C. S. (1986): Resistant starch: formation and measurement of starch that survives exhaustive digestion with amylolytic enzymes during the determination of dietary fibre. *Journal of Cereal Science*. 4(4): 301-314.
- Biddle, A & Cattlin, N. (2007): Pests, diseases and disorders of peas and beans: A colour handbook. CRC Press
- Birk, Y. (1984): The Bowman-Birk inhibitor. Trypsin- and chymotrypsin-inhibitor from soybeans. *Int. J. Peptide Protein Res.* 25: 113-131.
- Birk, Y. (1987): Proteinase inhibitors. In *New Comprehensive Biochemistry*. Elsevier.16: 257-305.
- Bishnoi, S. & Khetarpaul, N. (1993): Effect of domestic processing and cooking methods on in-vitro starch digestibility of different pea cultivars (*Pisum sativum*). *Food Chemistry*. 47(2): 177-182.
- Bishnoi, S., Khetarpaul, N. & Yadav, R. K. (1994): Effect of domestic processing and cooking methods on phytic acid and polyphenol contents of pea cultivars (*Pisum sativum*). *Plant Foods for Human Nutrition*. 45(4): 381-388.
- Bissinger, C., Steingaß, H. & Drochner, W. (2004): Steigerung des Gehaltes an nutzbarem Protein bei Körnerleguminosen mittels ökologisch konformer technischer

Bearbeitungsverfahren zur Förderung von Gesundheit und Leistungsfähigkeit von Hochleistungskühen im ökologischen Landbau.

Bissinger, C., Schneider, K. & Steingäß, H. (2007): 3.2 Untersuchungen an Milchkühen zur Erhöhung der nXP-Versorgung bei Einsatz von Ackerbohnen, Erbsen und Lupinen. Heft 33. 21-27.

Blasel, H.M., Hoffman, P.C. & Shaver, R.D. (2006): Degree of starch access: an enzymatic method to determine starch degradation potential of corn grain and corn silage. *Animal Feed Science and Technology* 128: 96-107.

Bochnia, M. (2013): Sieht man es der Stärke an wie sie wirkt? Ein Blick durchs Elektronenmikroskop (2013). Pferdeworkshop Burg Warberg. 28.09.2013. Warberg. p.1

Bonsels, T. & Grünewald, K-H. (2015): Schwefelgehalte in Futtermitteln für Milchkühe – Auswirkungen auf die Rationsgestaltung. *VDLUFA- Schriftenreihe* 71/2015. VDLUFA-Verlag. Darmstadt. 649-656.

Boroojeni, F.G., Svihus, B., von Reichenbach, H.G., & Zentek, J. (2016): The effects of hydrothermal processing on feed hygiene, nutrient availability, intestinal microbiota and morphology in poultry—A review. *Animal feed science and technology*. 220: 187-215.

Borreani, G., Chion, A. R., Colombini, S., Odoardi, M., Paoletti, R. & Tabacco, E. (2009): Fermentative profiles of field pea (*Pisum sativum*), faba bean (*Vicia faba*) and white lupin (*Lupinus albus*) silages as affected by wilting and inoculation. *Animal feed science and technology*. 151(3-4): 316-323.

Bowman, D.E. (1944): Fractions Derived from Soy Beans and Navy Beans Which Retard Tryptic Digestion of Casein. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* 57: 139-140.

Bravo, L., Siddhuraju, P. & Saura-Calixto, F. (1998): Effect of various processing methods on the in vitro starch digestibility and resistant starch content of Indian pulses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 46(11): 4667-4674.

Bretag, T.W., Keane, P.J. & Price, T.V. (2006): The epidemiology and control of ascochyta blight in field peas: a review. *Australian Journal of Agricultural Research*. 57(8): 883-902.

Brewer, D. & MacNeill, B. H. (1953): PRELIMINARY STUDIE IN ASCOCHYTA PISI LIB. *Canadian Journal of Botany*. 31(6): 739-744.

Bundessortenamt (2019): Beschreibende Sortenliste: Getreide, Mais Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte. Osterfelddamm 80, 30627 Hannover.

Burel, C., Boujard, T., Tulli, F. & Kaushik, S.J. (2000): Digestibility of extruded peas, extruded lupin, and rapeseed meal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and turbot (*Psetta maxima*). *Aquaculture*. 188: 285-298.

Butt, M. S., & Batool, R. (2010): Nutritional and functional properties of some promising legumes protein isolates. *Pakistan Journal of Nutrition*, 9(4), 373-379.

- Campbell, J. M., Russell, L. E., Crenshaw, J. D., Behnke, K. C. & Clark, P. M. (2006). Growth response of broilers to spray-dried plasma in pelleted or expanded feed processed at high temperature. *Journal of animal science*. 84(9): 2501-2508.
- Canibe, N., & Eggum, B. O. (1997): Digestibility of dried and toasted peas in pigs. 2. Ileal and total tract digestibilities of amino acids, protein and other nutrients. *Animal Feed Science and Technology*. 64(2-4): 311-325.
- Canibe, N., & Knudsen, K. B. (1997): Digestibility of dried and toasted peas in pigs. 1. Ileal and total tract digestibilities of carbohydrates. *Animal Feed Science and Technology*. 64(2-4): 293-310.
- Capriles, V. D., Coelho, K. D., Guerra-Matias, A. C., & Areas, J. A. G. (2008): Effects of processing methods on amaranth starch digestibility and predicted glycemic index. *Journal of Food Science*. 73: 160-164.
- Cappellini, M. D. & Fiorelli, G. (2008): Glucose-6-phosphate dehydrogenase deficiency. *Lancet* 371: 64-74.
- Cardador-Martínez, A., Maya-Ocaña, K., Ortiz-Moreno, A., Herrera-Cabrera, B. E., Dávila-Ortiz, G., Múzquiz, M., Martín-Pedrosa, M., Burbano, C., Cuadrado, C. & Jiménez-Martínez, C. (2012): Effect of Roasting and Boiling on the Content of Vicine, Convicine and L-3, 4-dihydroxyphenylalanine in *Vicia faba* L. *Journal of Food Quality*. 35(6): 419-428.
- Castell, A.G., Guenter, W. & Igbasan, F.A. (1996): Nutritive value of peas for nonruminant diets. *Anim. Feed Sci. Techn.* 60: 209-227.
- Castellanos-Onorio, O., Gonzalez-Rios, O., Guyot, B., Fontana, T. A., Guiraud J.P., Chau, C. F. & Cheung, P. K. (2011): Effect of various processing methods on antinutrients and *in vitro* digestibility of protein and starch of two Chinese indigenous legume seeds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 45(12): 4773-4776.
- Chau, C. F. & Cheung, P. K. (1997): Effect of various processing methods on antinutrients and *in vitro* digestibility of protein and starch of two Chinese indigenous legumes seeds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 45(12): 4773-4776.
- Chavan, J. K., Kadam, S. S. & Beuchat, L. R. (1989): Nutritional improvement of cereals by fermentation. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*. 28(5): 349-400.
- Cheftel, J. C. (1985): Nutritional effects of extrusion-cooking. *Food chemistry*. 20(4): 263-283.
- Chindapan, N., Soydok, S. & Devahastin, S. (2019): Roasting Kinetics and Chemical Composition Changes of Robusta Coffee Beans During Hot Air and Superheated Steam Roasting. *J Food Sci*. 84 (2): 292-302.
- Chiotelli, E. & Le Meste, M. (2002): Effect of small and large wheat starch granules on thermomechanical behavior of starch. *Cereal Chemistry*. 79: 286-293.

- Classen, H. L. (1996): Cereal grain starch and exogenous enzymes in poultry diets. *Anim. Feed Sci. Technol.* 62: 21-27.
- Coda, R., Melama, L., Rizzello, C. G., Curiel, J. A., Sibakov, J., Holopainen, U., Pulkkinen, M. & Sozer, N. (2015): Effect of air classification and fermentation by *Lactobacillus plantarum* VTT E-133328 on faba bean (*Vicia faba* L.) flour nutritional properties. *International journal of food microbiology.* 193: 34-42.
- Colonna, P., Leloup, V. & Buleon, A. (1992): Limiting factors of starch hydrolysis. *Eur J Clin Nutr* 46:17-32.
- Copeland, L., Blazek, J., Salman, H., & Tang, M. C. (2009): Form and functionality of starch. *Food hydrocolloids.* 23(6): 1527-1534.
- Crépon, K. (2007): Nutritional value of legumes (pea and faba bean) and economics of their use. *Recent advances in animal nutrition.* 1:331-366.
- Crépon, K., Marget, P., Peyronnet, C., Carrouée B, Arese, P. & Duc, G. (2010): Nutritional value of faba bean (*Vicia faba* L.) seeds for feed and food. *Field Crops Res.* 115: 329-339.
- Crowe, T. C., Seligman, S. A., & Copeland, L. (2000): Inhibition of enzymic digestion of amylose by free fatty acids in vitro contributes to resistant starch formation. *The Journal of nutrition,* 130(8): 2006-2008.
- Czarnecka, M., Czarnecki, Z., Nowak, J. & Roszyk, H. (1998): Effect of lactic fermentation and extrusion of bean and pea seeds on nutritional and functionell properties. *Food/Nahrung.* 42 (01): 7-11.
- Dänner, E.E. (2003): Einsatz von Vicin-/Convicin-armen Ackerbohnen (*Vicia faba*) bei Legehennen. *Archiv Geflügelkunde.* Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart. 67 (6): 249-252.
- Deacon, M.A., De Boer, G. & Kennelly, J.J. (1988): Influence of Jet-Sploding® and Extrusion on Ruminal and Intestinal Disappearance of Canola and Soybeans. *J. Dairy Sci.* 71: 745-753.
- Desroches, P., El Shazly, E., Mandon, N., Duc, G. & Huignard, J. (1995): Development of *Callosobruchus chinensis* (L.) and *C. maculatus* (F.) (Coleoptera: bruchidae) in seeds of *Vicia faba* L. differing in their tannin, vicine and convicine contents. *J Stored Prod Res.* 31: 83-9.
- Dewitte, K., Latre, J., Wambacq, E. & Haesaert, G. (2008): Culture, harvest and ensiling of some grain legumes. Production of forage crops and climatic changes. 13<sup>th</sup> ICFC 2008. 54-55.
- Divekar, M. T., Karunakaran, C., Lahlali, R., Kumar, S., Chelladurai, V., Liu, X. & Jayas, D. S. (2017): Effect of microwave treatment on the cooking and macronutrient qualities of pulses. *International Journal of Food Properties,* 20(2), 409-422.
- Dixon, R.M. & Hosking, B.J. (1992): NUTRITIONAL VALUE OF GRAIN LEGUMES FOR RUMINANTS. *Nutrition Research Reviews.* 5:19-43.
- DLG-Futterwerttabelle (1997): Wiederkäuer. 7. Auflage. DLG-Verlag. Frankfurt.

- Domoney, C., Welham, T., Sidebottom, C. & Firmin, J.L. (1995): Multiple isoforms of Pisum trypsin inhibitors result from modification of two primary gene products. Federation of European Biochemical Societies. FEBS Letters 360: 15-20.
- Dreher, M. L., Dreher, C.J. & Berry, J.W. (1984): Starch digestibility of foods: a nutritional perspective. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 20: 47-71.
- Driehuis, F. & Elferink, S.J.W.H.O. (2000): The impact of the Quality of silage on animal health and food safety: A review. The Veterinary Quarterly. 22(4): 212-216.
- D'souza, M. R. (2013): Effect of Traditional processing Methods on Nutritional Quality of Field Bean. Advances in BioResearch. 4(3).
- Duc, G., Sixdenier, G., Lila, M. & Furstoss, V. (1989): Search of genetic variability for vicine and convicine content in *Vicia faba* L. A first report of a gene which codes for nearly zero-vicine and zero-convicine contents. Wageningen. The Netherlands. 305-313.
- Dunkel, S., Baumgärtel, T., Degner, J., Gräfe, E., Guddat, C., Heinze, A., Herzog, E., Lumme, N., Müller, J., Peyker, W., Rau, K., Reinhold, G., Sauerteig, B., Scheit, J., Trauboth, K. & Wölfel, S., (2016): Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes einheimischer Eiweißpflanzen und anderer heimischer Eiweißträger in der Tierfütterung in Thüringen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Abschlussbericht. Projekt-Nr. 95.12.
- Dvořák, R., Pechová, A., Pavlata, L., Filípek, J., Dostálová, J., Réblová, Z., Klejdus, B., Kovařík, K. & Poul, J. (2005): Reduction in the content of antinutritional substances in pea seeds (*Pisum sativum* L.) by different treatments. Czech J. Anim. Sci. 50 (11): 519-527.
- Egounlety, M. & Aworh, O.C. (2003): Effect of soaking, dehulling, cooking and fermentation with *Rhizopus oligosporus* on the oligosaccharides, trypsin inhibitor, phytic acid and tannins of soybean (*Glycine max* Merr.), cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and groundbean (*Macrotyloma geocarpa* Harms). Journal of Food Engineering. 56: 2-3, 249-254.
- Edmunds, B., Südekum, K.H., Spiekers, H., Schuster, M. & Schwarz, F.J. (2012): Estimating utilizable crude protein at the duodenum, a precursor to metabolisable crude protein for ruminants, from forages using a modified gas test. Animal Feed Science Technology. 175: 106-113.
- El-Adawy, T.A., Rahma, E.H., El-Bedawey & El-Beltagy, A.E. (2003): Nutritional potential and functional properties of germinated mung bean, pea and lentil seeds. Plant Foods for Human Nutrition 58: 1-13.
- Elferink, S.J.W.H.O., Driehuis, F., Gottschal, J.C. & Spoelstra, S.F. (2000): Silage fermentation processes and their manipulation. FAO Plant Production and Protection Papers. 17-30.
- Elkhalifa, A. O. E., Schiffler, B. & Bernhard, R. (2004): Effect of fermentation on the starch digestibility, resistant starch and some physicochemical properties of sorghum flour. Nahrung/Food. 48 (2): 91-94.

- Elstner, F. (1997): Expander zur Verarbeitung von Ölsaaten. In: Fett/Lipid 99. VCH Verlagsgesellschaft mbH. Weinheim. Nr. 4. S. 147-152.
- Escarpa, A., González, M. C., Morales, M. D. & Saura-Calixto, F. (1997): An approach to the influence of nutrients and other food constituents on resistant starch formation. Food Chemistry. 60(4): 527-532.
- Ezeogu, L.I., Duodu, K.G. & Taylor, J.R.N. (2005): Effects of endosperm texture and cooking conditions on the in vitro starch digestibility of sorghum and maize flours. Journal of Cereal Science. 42: 33-44.
- Fabbri, A.D., Schacht, R.W. & Crosby, G.A. (2016): Evaluation of resistant starch content of cooked black beans, pinto beans, and chickpeas. NFS Journal. 3: 8-12.
- Facciolongo, A.M., Rubino, G., Zarrilli, A., Vicenti, A., Ragni, M. & Toteda, F. (2014): Alternative protein sources in lamb feeding 1. Effects on productive performances, carcass characteristics and energy and protein metabolism. Progress in Nutrition. 16(2): 15-115.
- Faldet, M.A., Satter, L.D. & Broderick, G.A. (1992): Determining optimal heat treatment of soybeans by measuring available lysine chemically and biologically with rates to maximize protein utilization by ruminants. J. Nutr. 122:151.
- Farrell, D. J, Perez-Maldonado, R. A. & Mannion, P. F. (1999): Optimum inclusions of field peas, faba beans, chick peas and sweet lupines in poultry diets. II. Broiler experiments. Brit. Poult. Sci. 40: 674-680.
- Fasoyiro, S.B., Ajibade, S.R., Saka, J.O., Ashaye, O.A., Obatolu, V.A., Farinde, E.O. & Afolabi, O.O. (2005): Physical characteristics and effects of processing methods on pigeon pea varieties. JOURNAL OF FOOD AGRICULTURE AND ENVIRONMENT. 3(3/4): 59.
- Faulkner, J.S. (1985): A comparison of faba beans and peas as whole-crop forages. Grass and forage science. 40(2): 161-169.
- Feller, C., Bleiholder, H., Buhr, L., Hack, H., Heß, M., Klose, R., Meier, U., Stauß, R., van den Boom, T. & Weber, E. (1995): Phänologische Entwicklungsstadien von Gemüsepflanzen II. Fruchtgemüse und Hülsenfrüchte. Nachrichtenblatt Deutscher Pflanzenschutzdienst. 47(9): 217-232.
- Ferrasson, E., Quillien, L. & Gueguen, J. (1997): Proteinase inhibitors from pea seeds: purification and characterization. J Agric Food Chem 45: 127-131.
- Fleming, S.E. (1982): Influence of cooking Method on Digestibility of Legume and Cereal Starches. Journal of Food Science. 47:1-3.
- Fraser, M.D., Fychan, R. & Jones, R. (2001): The effect of harvest date and inoculation on the yield, fermentation characteristics and feeding value of forage pea and field bean silages. Grass and Forage Science. 56(3). 218-230.



- Frei, M., Siddhuraju, P., & Becker, K. (2003): Studies on the in vitro starch digestibility and the glycemic index of six different indigenous rice cultivars from the Philippines. *Food chemistry*. 83(3): 395-402.
- Freitag, M. (2006): Einsatz von heimischen Körnerleguminosen mit erhöhtem UDP Gehalt. 13. Seminar der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe für Rinderhaltung und der Stiftung für Ernährungswissenschaften Göttingen. Braunschweig. S. 57-75.
- Freitag, M., Ludwig, E. & Südekum, K.-H. (2007): Verfahren zur Reduzierung des Proteinabbaus im Pansen. In: Heimische Körnerleguminosen mit geschütztem Protein in der Milchviehfütterung. Heft 33. UFOP-Schriften. S. 2-14.
- Frias, J., Vidal-Valverde, C., Kozłowska, H., Gorecki, R., Honke, J. & Hedley, C. (1996): Evolution of soluble carbohydrates during the development of pea, faba bean and lupine seeds. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*. 203(1): 27-32.
- Frui-Nji, F., Niess, E. & Pfeffer, E. (2007): Effect of graded replacement of soybean meal by faba beans (*Vicia faba*) or field peas (*Pisum sativum* L.) in rations for laying hens on egg production and quality. *Journal of Poult. Sci.* 44. 34-41.
- Gdala, J. & Buraczewska, L. (1997): Chemical composition and carbohydrate content of several varieties of faba bean and pea seeds. *Journal of Animal Feed Science*. 6: 123-135.
- Gefrom, A. (2012): Die Silierung von Körnern der großsamigen Leguminosen als Methode der Konservierung und der Verbesserung ihres ernährungsphysiologischen Wertes für Monogastrier: Dissertation. Universität Rostock.
- Gefrom, A., Ott, E. M., Hoedtke, S., & Zeyner, A. (2013): Effect of ensiling moist field bean (*Vicia faba*), pea (*Pisum sativum*) and lupine (*Lupinus* spp.) grains on the contents of alkaloids, oligosaccharides and tannins. *Journal of animal physiology and animal nutrition*. 97(6): 1152-1160.
- GfE, Society of Nutrition Physiology (1991): Leitlinien für die Bestimmung der Verdaulichkeit von Roh Nährstoffen an Wiederkäuern. *Journal Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 65:229-234.
- GfE, Society of Nutrition Physiology (2001): Empfehlung zur Energie- und Nährstoffversorgung der Milchkühe und Aufzuchttrinder. DLG-Verlag. Frankfurt (Main).
- Goelema, J. O., Spreeuwenberg, M. A. M., Hof, G., Van der Poel, A. F. B., & Tamminga, S. (1998): Effect of pressure toasting on the rumen degradability and intestinal digestibility of whole and broken peas, lupins and faba beans and a mixture of these feedstuffs. *Animal Feed Science and Technology*. 76(1-2): 35-50.
- Goelema, J.O., Smits, A., Vaessen, L.M. & Wemmers, A. (1999): Effects of pressure toasting, expander treatment and pelleting on in vitro and in situ parameters of protein and starch in a mixture of broken peas, lupins and faba beans. *Anim. Feed Sci. Technol.* 78: 109-126.

- González-Vega, J.C., Kim, B.G., Htoo, J.K., Lemme, A. & Stein H.H. (2011): Amino acid digestibility in heated soybean meal fed to growing pigs. *Journal of Animal Science* 89 (11). 3617-3625.
- Graf von Reichenbach, H. (2016): Futtermitteltechnologie und Futterqualität - Aufschluss-, Stabilisierungs- und Eliminierungs- wirkungen von druckhydrothermischen Behandlungen. 54. Jahrestagung der Bayerischen Arbeitsgemeinschaft Tierernährung e.V. Tagungsband. S. 17-24.
- Grela, E.R. (2016): Körnerleguminosen in der Nutztierernährung –Schweine-. *In* Jeroch, H. et al. Körnerleguminosen als Futter- und Nahrungsmittel. DLG-Verlag. Frankfurt am Main. 2016.
- Griffiths, D.W. (1984): The trypsin and chymotrypsin inhibitor activities of various pea (*Pisum* spp.) and field bean (*Vicia faba*) cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 35: 481-486.
- Gronle, A. & Böhm, H. (2017): Trumpf gegen Erbsenblattläuse. *Bioland*. (1/2017): 14-15.
- Grosjean, F., Jondreville, C., Williatte-Hazouard, I., Skiba, F., Carrouée, B. & Gatel, F. (2000): Ileal digestibility of protein and amino acids of feed peas with different trypsin inhibitor activity in pigs. *Canadian Journal of Animal Science*. 80(4): 643-652.
- Gruber, L., Stögmüller, G., Taferner, K., Haberl, L., Maierhofer, G., Steiner, B., Steinwidder, A., Schauer, A. & Knaus, W. (2005): Protein- und Kohlenhydrat-Fractionen nach dem Cornell Net Carbohydrate and Protein System sowie ruminaler Nährstoffabbau *in situ* von energie- und proteinreichen Kraftfuttermitteln. *Übersicht Tierernährung*. 33.
- Gruhn, G., Fratzscher, W. & Heidenreich, E. (1979): ABC Verfahrenstechnik. VEB deutscher Verlag für Grundstofftechnik. Leipzig. 1. Auflage. S. 14.
- Guddat, C., Degner, J., Zorn, W., Götz, R., Paul, R. & Baumgärtel, T. (2010): Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Ackerbohnen und Körnererbsen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 1. Auflage.
- Guillamón, E., Pedrosa, M.M., Burbano, C., Cuadrado, C., de Cortes Sánchez, M. & Muzquiz, M. (2008): The trypsin inhibitors present in seed of different grain legume species and cultivar. Elsevier. *ScienceDirect. Food Chemistry* 107: 68-74.
- Hamaker, B.R. & Bugusu, B.A. (2003): Overview: sorghum proteins and food quality. In *Workshop on the proteins of sorghum and millets: enhancing nutritional and functional properties for Africa [CD]* (Pretoria: South Africa).
- Han, S.H., Lee, S.W. & Rhee, C. (2008): Effects of cooking methods on starch hydrolysis kinetics and digestion-resistant fractions of rice and soybean. *European Food Research and Technology*. 227(5): 1315-1321.
- Häni, F.J., Popow, G., Reinhard, H., Schwarz, A. & Voegeli, U. (2008): Pflanzenschutz im nachhaltigen Ackerbau. *Edition LMZ*. 7: 466.

- Harker, K.N., Blackshaw, R.E. & Clayton, G.W. (2001): Timing weed removal in field pea (*Pisum sativum*). *Weed technology*. 15(2): 277-283.
- Harms, A.E. (2003): Untersuchungen zum Futterwert von expandierten Trockenschnitzeln sowie von Vinasse beim Rind. Dissertation. Tierärztliche Hochschule Hannover.
- Hejdysz, M., Kaczmarek, S.A. & Rutkowski, A. (2016): Extrusion cooking improves the metabolisable energy of faba beans and the amino acid digestibility in broilers. *Animal Feed Science and Technology*. 212: 100-111.
- Herrmann, C., Heiermann, M. & Idler, C. (2010): Silierbarkeit und Methanbildungspotenziale von Energiepflanzen. *Gülzower Fachgespräche*. 147.
- Hernandez, J.C.A., Medina, K.I.V., Sanchez, A.Z., Ortega, O.A.C., Osorio, A.M., Gutierrez, M.D.G. & Ronquillo, M.G. (2017): Ensiling on chemical composition and in vitro fermentation in rabbits of different forages. *Ciência Rural*. 47(6).
- Hickling, D. (2003): Canadian feed peas industry guide. Pulse Canada, Winnipeg, Manitoba, 1-36.
- Hiendl, J.G. (2010): Untersuchungen zum ruminalen Abbau des Proteins von Nebenprodukten aus der Bioethanolherstellung in situ und mit einer neuen in vitro-Methode sowie Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die praktische Milchkühhütterung. Dissertation (vet.). Universität Leipzig.
- Hoedtke, S. & Zeyner, A. (2011): Comparative evaluation of laboratory-scale silages using standard glass jar silages or vacuum-packed model silages. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 91(5): 841-849.
- Hoffmann, M. & Steinhöfel, O. (2010): Futtermittelspezifische Restriktionen. 5. Auflage. Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH. München.
- Hoffmann, M. (2015): Getrocknetes Wiesenfutter, Qualitätsheu als wichtige Struktur- und Rohproteinquelle für gesunde Kühe und hohe Milchqualität. Generalversammlung der ARGE-Heumilch Salzburg und Oberösterreich. Seekirchen. April 2015.
- Hofmann, T. (2021): Freie Maillard-Reaktionsprodukte in tierischen Lebensmitteln als Marker für eine artgerechte Tierfütterung. Dissertation. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden.
- Holm, J., Björck, I., Ostrowska, S., Eliasson, A.C., Asp, N.G., Larsson, K. & Lundquist, I. (1983): Digestibility of amylose-lipid complexes in-vitro and in-vivo. *Starch-Stärke*. 35(9): 294-297.
- Hoover, R., & Sosulski, F.W. (1991): Composition, structure, functionality, and chemical modification of legume starches: a review. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*. 69(1): 79-92.

- Hoover, R., & Zhou, Y. (2003): In vitro and in vivo hydrolysis of legume starches by  $\alpha$ -amylase and resistant starch formation in legumes—a review. *Carbohydrate Polymers*. 54(4): 401-417.
- Horstmann, S.W., Lynch, K.M. & Arendt, E.K. (2017): Starch characteristics linked to gluten-free products. *Foods*. 6: 29.
- Howard, T.M., Morton, J.D., Savage, G.P. & Russel, A.C. (1996): Trypsin inhibitors in New Zealand pea cultivars: quantification and isoforms. *Proceedings Nutrition-Society of New Zealand*. 21: 120-124.
- Honig, H. (1990): Evaluation of aerobic stability. *Grovfoder*. Schweden
- Huisman, J. & Jansman, A.J.M. (1991): DIETARY EFFECTS AND SOME ANALYTICAL ASPECTS OF ANTINUTRITIONAL FACTORS IN PEAS (PISUM SATIVUM), COMMON BEANS (PHASEOLUS VULGARIS) AND SOYBEANS (GLYCINE MAX) IN MONOGASTRIC FARM ANIMALS. ANTINUTRITIONAL EFFECTS OF LEGUME SEEDS IN PIGLETS, RATS AND CHICKENS. 5: 7-29.
- Hulshof, T.G., Van der Poel, A.F.B., Hendriks, W.H. & Bikker, P. (2016): Processing of soybean meal and 00-rapeseed meal reduces protein digestibility and pig growth performance but does not affect nitrogen solubilization along the small intestine. *Journal of Animal Science*. 94(6): 2403-2414.
- Igbasan, F.A. & Guenter, W. (1996): The enhancement of the nutritive value of peas for broiler chickens: An evaluation of micronization and dehulling processes. *Poultry science*. 75(10): 1243-1252.
- Illumina 16S Metagenomics Sequencing Library Preparation Guide (2020): [https://support.illumina.com/documents/documentation/chemistry\\_documentation/16s/16s-metagenomics-library-prep-guide-15044223-b.pdf](https://support.illumina.com/documents/documentation/chemistry_documentation/16s/16s-metagenomics-library-prep-guide-15044223-b.pdf), 04.05.2020.
- Ingalls, J.R., McKirdy, J.A. & Sharma, H.R. (1980): Nutritive value of fababeans in the diets of young Holstein calves and lactating dairy cows. *Canadian Journal of Animal Science*. 60(3): 689-698.
- Ivarsson, E. & Wall, H. (2017): Effects of toasting, inclusion levels and different enzyme supplementations of faba beans on growth performance of broiler chickens. *Journal of Applied Poultry Research*. 26(4): 467-475.
- Jankowski, J. & Mikulski, D. (2016): Körnerleguminosen in der Nutztierernährung –Puten-. *In* Jeroch, H. et al. *Körnerleguminosen als Futter- und Nahrungsmittel*. DLG-Verlag. Frankfurt am Main. 2016.
- Jane, J.L., Kasemsuwan, T., Leas, S., Zobel, H. & Robyt, J.F. (1994): Anthology of starch granule morphology by scanning electron microscopy. *Starch-Stärke*. 46(4). 121-129.
- Jaques, S., Dixon, R.M. & Holmes, J.H.G. (1994): Narbon beans and field peas as supplements for sheep. *Small Ruminant Research*. 15(1): 39-43.

- Jayalaxmi, B., Vijayalakshmi, D., Usha, R., Revanna, M.L., Chandru, R. & Gowda, P.H. (2016): Effect of different processing methods on proximate, mineral and antinutrient content of lima bean (*Phaseolus lunatus*) seeds. *Legume Research: An International Journal*, 39(4).
- Jeroch, H. & Dänicke, S. (2016): Faustzahlen zur Geflügelfütterung. *In* Geflügelernährung. Eugen Ulmer KG. Stuttgart (Hohenheim). 192-231.
- Jeroch, H. (2016a): Körnerleguminosen in der Nutztierernährung –Pferde-. *In* Jeroch, H. et al. Körnerleguminosen als Futter- und Nahrungsmittel. DLG-Verlag. Frankfurt am Main. 113-114.
- Jeroch, H. (2016b): Körnerleguminosen in der Nutztierernährung –Geflügel-. *In* Jeroch, H. et al. Körnerleguminosen als Futter- und Nahrungsmittel. DLG-Verlag. Frankfurt am Main. 133-153.
- Jeroch, H. (2016c): Anforderungen des Geflügels an Futter und Fütterung. *In* Jeroch, H. et al. Körnerleguminosen als Futter- und Nahrungsmittel. DLG-Verlag. Frankfurt am Main. S. 136.
- Jeroch, H., Drochner, W. & Simon, O. (2008): Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere. 2. Auflage. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart.
- Jeroch, H., Lipiec, A., Abel, H., Zentek, J., Grela, E. R. & Bellof, G. (2016): Körnerleguminosen als Futter- und Nahrungsmittel. DLG-Verlag. Frankfurt am Main.
- Jeroch, H., Schöne, F. & Jankowski, J. (2008): Inhaltsstoffe von Rapsfuttermitteln und Futterwert für das Geflügel. *Arch.Geflügelk.* 72 (1): 8-18.
- Jiang, Z.Q., Pulkkinen, M., Wang, Y.J., Lampi, A.M., Stoddard, F.L., Salovaara, H., Piironen, V. & Sontag-Strohm, T. (2016): Faba bean flavour and technological property improvement by thermal pre-treatments. *LWT-Food Science and Technology*. 68: 295-305.
- Jilg, T. (1986): Zur Wirkung verschiedener Sojaprodukte auf die Stickstoff- und Energiebilanz bei Hochleistungskühen. Dissertation, Hohenheim Universität.
- Jilg, T. (2003): Kraftfutterkonzepte und deren Wirkung auf die Wirtschaftlichkeit der Lämmerfleischerzeugung im Rahmen der „Arbeitsteiligen Lämmermast“. Versuchsbericht Nr. 2-2003. LVA Aulendorf. Fachbereich Viehhaltung.
- Jilg, T. (2014): Ackerbohneinsatz in der Milchviehfütterung. Versuchsbericht Nr. – 2014.
- Jilg, T. (2015): Ackerbohneinsatz in der Milchviehfütterung. VDLUFA- Schriftenreihe 71/2015. VDLUFA-Verlag. Darmstadt. 633-640.
- Johansson, B., Fernqvist, T., Hessle, A., Nadeau, E., Arnesson, A. & Kumm, K.I. (2011): Locally produced protein feeds for dairy bull calves. In Eighth International Symposium on the Nutrition of Herbivores, Aberystwyth, Wales, UK (Vol. 489).
- Jones, L.K. (1927): Studies of the nature and control of blight, leaf and pod spot, and foot-rot of Peas caused by species of ASCO-chyta. Studies of the nature and control of blight, leaf and pod spot, and foot-rot of Peas caused by species of ASCO-chyta. 547.

- Jood, S., Chauhan, B.M. & Kapoor, A.C. (1988): Contents and digestibility of carbohydrates of chickpea and black gram as affected by domestic processing and cooking. *Food Chemistry*. 30(2): 113-127.
- Kahnt, G. (2008): Leguminosen im konventionellen und ökologischen Landbau. DLG-Verlag. Frankfurt am Main.
- Kakade, M., Rackis, J.J., McGhee, J.E. & Puski, G. (1974): Determination of trypsin inhibitor activity of soy products: a collaborative analysis of an improved procedure. *American Association of Cereal Chemists*. 51(3): 376-382.
- Karalus, W. (2018): Sortenempfehlung 2019, Körnerfüttererbsen – Ackerbohnen. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Kaur, L., Singh, J., McCarthy, O.J. & Singh, H. (2007): Physicochemical, rheological and structural properties of fractionated potato starches. *Journal of Food Engineering*. 82: 383-394.
- Khamassi, K., Ben Jeddi, F., Hobbs, D., Irigoyen, J., Stoddard, F., O'Sullivan, D.M. & Jones, H. (2013): A baseline study of vicine–convicine levels in faba bean (*Vicia faba* L.) germplasm. *Plant Genet Resour*. 11: 250-257.
- Khattab, R.Y. & Arntfield, S.D. (2009): Nutritional quality of legume seeds as affected by some physical treatments 2. Antinutritional factors. *LWT-Food Science and Technology*. 42(6): 1113-1118.
- Khazaei, H., O'Sullivan, D.M., Jones, H., Pitts, N., Sillanpää, M.J., Pärssinen, P., Manninen, O. & Stoddard, F.L. (2015): Flanking SNP markers for vicine–convicine concentration in faba bean (*Vicia faba* L.). *Mol Breeding*. 35-38.
- Khazaei, H., Purves, R.W., Hughes, J., Link, W., O'Sullivan, D.M., Schulman, A.H., Björnsdotter, E., Geu-Flores, F., Nadzieja, M., Andersen S.U., Stougaard, J., Vandenberg, A. & Stougaard, J. (2019): Eliminating vicine and convicine, the main anti-nutritional factors restricting faba bean usage. *Trends in Food Science & Technology*. 91: 549-556.
- Khazaei, H. & Vandenberg, A. (2020): Seed Mineral Composition and Protein Content of Faba Beans (*Vicia faba* L.) with Contrasting Tannin Contents. *Agronomy*. 10(4):511.
- Kiczorowska, B. (2016): Maßnahmen zur Beeinflussung der Inhaltstoffe. In Jeroch, H. et al. *Körnerleguminosen als Futter- und Nahrungsmittel*. DLG-Verlag. Frankfurt am Main. S. 79-85.
- Kolbe, H., Karalus, W., Hänsel, M., Grünbeck, A., Gramm, M., Arp, B. & Krelling, B. (2002): Körnerleguminosen im Ökologischen Landbau. Information für Praxis und Beratung. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. Dresden.
- Kratzer, F.M., Bersch, S., Vohra, P. & Ernst, R.A. (1990) Chemical and biological evaluation of soybean flakes autoclaved for different durations. *Animal Feed Science Technology*. 31: 247-259.

- Krička, T., Jurišić, V., Voća, N., Čurić, D., Brlek Savić, T. & Matin, A. (2009): Amino acid composition, urease activity and trypsin inhibitor activity after toasting of soybean in thick and thin layer. *Agriculturae Conspectus Scientificus*. 74(3): 209-213.
- Kumar, A., Lal, A. & Semwal, A.D. (2016): Effect of microwave drying on nutritional and antinutritional factors of *Dolichos lablab* beans. *International Journal of Science, Engineering and Technology*. 4: 711-715.
- Kumar, S., Nimlsh, T. & Banniza, S. (2017): Assessment of the effect of seed infection with *Ascochyta pisi* on pea in western Canada. *Frontiers in Plant Science*. 8: 933.
- Kuhnitzsch, C., Hofmann, T., Bachmann, M., Martens, S.D., Henle, T., Zeyner, A. & Steinhöfel, O. (2019): Effekte des Silierens und Toastens teigreif geernteter Erbsen auf die Bildung von Maillard-Produkten. 15. Tagung Schweine- und Geflügelernährung. LEUCOREA Lutherstadt Wittenberg. Tagungsband S. 149-151.
- Kutoš, T., Golob, T., Kač, M. & Plestenjak, A. (2003): Dietary fibre content of dry and processed beans. *Food chemistry*. 80(2): 231-235.
- Kutschera, L., Lichtenegger, E. & Sobotik, M. (2018): Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßiger Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues: 7. Band der Wurzelatlas Reihe Gebundenes Buch – 29. November 2018.
- Lajolo, F.M. & Genovese, M.I. (2002). Nutritional significance of lectins and enzyme inhibitors from legumes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 50: 6592-6598.
- Lalles, J.P. (1993): Nutritional and antinutritional aspects of soyabean and field pea proteins used in veal calf production: a review. *Livestock Production Science*. 34(3-4): 181-202.
- Langworthy, C.F. & Deuel, H.J. (1922): Digestibility of raw rice, arrowroot, canna, cassava, taro, tree-fern, and potato starches. *J. Biol. Chem*. 52: 251-261.
- Lanza, M., Fabro, C., Scerra, M., Bella, M., Pagano, R., Brogna, D.M.R. & Pennisi, P. (2011): Lamb meat quality and intramuscular fatty acid composition as affected by concentrates including different legume seeds. *Italian Journal of Animal Science*. 10(2): e18: 87-94
- Le, B.H., Wagmaister, J.A., Kawashima, T., Bui, A.Q., Harada, J.J. & Goldberg, R.B. (2007): Using genomics to study legume seed development. *Plant physiology*. 144(2): 562-574.
- Lebas, F. (2004): Reflection on rabbit nutrition with a special emphasis on feed ingredients utilization. Proc. 8<sup>th</sup> World Rabbit Congress 2004. Mexiko.
- Lenz, M. (2015): Ausreichender Schutz für sichere Erträge. In: praxisnah. Sonderausgabe Leguminosen 2015. Ackerbohnen und Körnererbsen. 24-27.
- Lehmann, U. & Robin, F. (2007): Slowly digestible starch- its structure and health implications: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 18: 346-355.

- Leontowicz, H., Leontowicz, M., Kostyra, H., Kulasek, G., Gralak, M.A., Krzeminski, R. & Podgurniak, M. (2001): Effects of raw or extruded legume seeds on some functional and morphological gut parameters in rats. *Journal of Animal and Feed Sciences*. 10(1): 169-184.
- Lessire, M., Gallo, V., Prato, M., Akide-Ndunge, O., Mandili, G., Marget, P., Arese, P. & Duc, G. (2017): Effects of faba beans with different concentrations of vicine and convicine on egg production, egg quality and red blood cells in laying hens. *Animal*. 11(8). 1270-1278.
- Leterme, P., Beckers, Y. & Thewis, A. (1990): Trypsin inhibitors in peas: varietal effect and influence on digestibility of crude protein by growing pigs. *Animal Feed Science and Technology*. 29(1-2): 45-55.
- LfL, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2011): Ackerbohnen und Erbsen zur Kornnutzung. Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. Bayern.
- LfL-Information (2013): Eiweißfuttermittel in der Rinderfütterung. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. 2. Auflage.
- LfULG (2019): Aktuelle Erzeugerpreise für Körnerfrüchte in Sachsen. <https://www.landwirtschaft.sachsen.de/aktuelle-erzeugerpreise-fuer-koernerfruechte-in-sachsen-6198.html>. 16.10.2019/13:23
- Licitra, G., Hernandez, T.M. & van Soest, P.J. (1996): Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds. *Animal Feed Science Technology*. 57: 347-358.
- Licitra, G., Lauria, F., Carpino, S., Schadt, I., Sniffen, C.J. & Van Soest, P.J. (1998): Improvement of the *Streptomyces griseus* method for degradable protein in ruminant feeds. *Animal Feed Science Technology*. 72: 1-10.
- Licitra, G., Van Soest, P.J., Schadt, I., Carpino, S. & Sniffen, C.J. (1999): Influence of the concentration of the protease from *Streptomyces griseus* relativ to ruminal protein degradability. *Animal Feed Science Technology*. 77: 99-113.
- Lin, C. & Kung, L. (1999): Heat treated soybeans and soybean meal in ruminant nutrition. Technical Bull. American Soybean Assoc. and United Soybean Board. 1-18.
- Lindeboom, N., Chang, P.R., & Tyler, R.T. (2004): Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: a review. *Starch-Stärke*. 56(3-4): 89-99.
- Lipiec, A. (2016): Nährstoffe. In Jeroch, H. et al. Körnerleguminosen als Futter- und Nahrungsmittel. DLG-Verlag. Frankfurt am Main. S. 52-55.
- Ljøkjel, K., Skrede, A., & Harstad, O.M. (2003): Effects of pelleting and expanding of vegetable feeds on in situ protein and starch digestion in dairy cows. *Journal of Animal and Feed Sciences*. 12(3): 435-450.



- Lobón, S., Joy, M., Casasús, I., Rufino-Moya, P.J. & Blanco, M. (2020): Field Pea can be Included in Fattening Concentrate without Deleterious Effects on the Digestibility and Performance of Lambs. *Animals*. 10(2): 243.
- Losand, B., Dreschel, H., Martin, J. & Priepke, A. (2003): Nutzung einheimischer Eiweißpflanzen in der Fütterung. *Arch. Tierz. Dummerstorf*. 46. Sonderheft. 107-114.
- Losand, B., Pries, M. & Steingäß, H. (2016): Ackerbohnen, Futtererbsen und Blaue Süßlupinen in der Rinderfütterung. *UFOP-Praxisinformation*.
- Lund, D. & Lorenz, K.J. (1984): Influence of time, temperature, moisture, ingredients, and processing conditions on starch gelatinization. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 20(4): 249-273.
- Lund, P., Weisbjerg, M.R. & Hvelplund, T. (1999): Effect of expander treatment on rumen and total tract availability of protein determined in situ. *S. Afr. J. Anim. Sci.* 29: 164-165.
- Lund, P., Weisbjerg, M.R. & Kristensen, T. (2004): The effect of heat treatment on degradability and microbial synthesis of protein in the rumen. *Journal of Animal and Feed Sciences*. 13: 146-146.
- Luo, Y-W. & Xie, W-H (2013): Effect of different processing methods on certain antinutritional factors and protein digestibility in green and white faba bean (*Vicia faba* L.). *CyTA. Journal of food*. 11(1): 43-49.
- Luzzatto, L. & Arese, P. (2018): Favism and Glucose-6-Phosphate Dehydrogenase Deficiency. *The New England Journal of Medicine*. 378: 60-71.
- Ma, Z., Boye, J.I., Simpson, B.K., Prasher, S.O., Monpetit, D. & Malcolmson, L. (2011): Thermal processing effects on the functional properties and microstructure of lentil, chickpea, and pea flours. *Food Research International*. 44(8): 2534-2544.
- Ma, Z., Boye, J.I. & Hu, X. (2017). In vitro digestibility, protein composition and techno-functional properties of Saskatchewan grown yellow field peas (*Pisum sativum* L.) as affected by processing. *Food research international*. 92: 64-78.
- Ma, M., Wang, Y., Wang, M., Jane, J.L. & Du, S.K. (2017a): Physicochemical properties and in vitro digestibility of legume starches. *Food Hydrocolloids*. 63: 249-255.
- Maertens, L. (1998): Nährstoffbedarf und Fütterung der Kaninchen. *In* Petersen, J. *Handbuch zur Kaninchenfleischgewinnung*. Verlag Oertel und Spörer. Reutlingen.
- Mager, J., Glaser, G., Razin, A., Izak, G., Bien, S. & Noam, A.M. (1965): Metabolic effects of pyrimidines derived from fava bean glycosides on human erythrocytes deficient in glucose-6-phosphate dehydrogenase. *Biochemical and biophysical research communications*. 20(2): 235-240.

- Makkar, H.P.S., Becker, K., Abel, H. & Pawelzik, E. (1997): Nutrient Contents, Rumen Protein Degradability and Antinutritional Factors in Some Colour- and White-Flowering Cultivars of *Vicia faba* Beans. *J Sci Food Agric.* 75: 511-520.
- Martens, S.D., Hoedtke, S., Avila, P., Heinritz, S.N. & Zeyner, A. (2013): Effect of ensiling treatment on secondary compounds and amino acid profile of tropical forage legumes, and implications for their pig feeding potential. *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 94: 1107-1115.
- Masoero, F., Pulimeno, A.M. & Rossi, F. (2005): Effect of extrusion, expansion and toasting on the nutritional value of peas, faba beans and lupins. *Italian Journal of Animal Science.* 4(2): 177-189.
- Mateos, G.G., Latorre, M.A. & Lázaro, R (1999): Processing soybeans. American Soybean Association: Brussels.
- Mbofung, C.M.F., Rigby, N. & Waldron, K. (1999): Use of two varieties of hard-to-cook beans and cowpeas in the processing of Koki (a steamed legume product). *Plant Food and Human Nutrition.* 54: 131-150.
- Menke, K.H., Raab, L., Salewski, A., Steingass, H., Fritz, D. & Schneider, W. (1979): The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feeding stuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor *in vitro*. *J.Agric. Sci.* 93: 217-222.
- Menke, K.H. & Steingass, H. (1988): Estimation of the energetic feed value from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid. *Anim. Res. Dev.* 28: 7-55.
- McDonald, G.K. & Peck, D. (2009): Effects of crop rotation, residue retention and sowing time on the incidence and survival of ascochyta blight and its effect on grain yield of field peas (*Pisum sativum* L.). *Field Crops Research* 111:11-21.
- McKay, A.M. (1992): Hydrolysis of vicine and convicine from faba beans by microbial  $\beta$ -glucosidase enzymes. *Journal of Applied Microbiology.* 72. 6: 475-478.
- Meier, U. (2001): Entwicklungsstadien mono- und dikotyle Pflanzen. BBCH Monografie. 2. Auflage. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft.
- Meijer, M.M.T. & Muuse, B.G. (1988): Optimalization of dehulling technique and enzyme hydrolysis of vicine/convicine to eliminate ANF's of faba beans. In: Recent advances of research in antinutritional factors in legume seeds. Proceedings of the First International Workshop on "Antinutritional Factors (ANF) in Legume Seeds". Wageningen, Netherlands (Eds. Huisman, J., van der Poel, T.F.B., Liener, I.E.). 268-271.
- Meyer, H. (1995): Pferdefütterung. 3. Auflage. Blackwell Wissenschaftsverlag. Berlin/Wien.
- Mihailović, V., Mikić, A., Erić, P., Vasiljević, S., Čupina, B. & Katić, S. (2005): Protein pea in animal feeding. *Biotechnology in Animal Husbandry.* 21 (5-6): 281-285.

- Mikić, A., Perić, V., Đorđević, V., Srebrić, M. & Mihailović, V. (2009): ANTI-NUTRITIONAL FACTORS IN SOME GRAIN LEGUMES. *Biotechnology in Animal Husbandry* 25 (5-6): 1181-1188.
- Mishra, S., Monro, J. & Hedderley, D. (2008): Effect of processing on slowly digestible starch and resistant starch in potato. *Starch-Stärke*. 60(9): 500-507.
- Mittal, A., Kansal, R., Kalia, V., Tripathi, M. & Gupta, V.K. (2014): A kidney bean trypsin inhibitor with an insecticidal potential against *Helicoverpa armigera* and *Spodoptera litura*. *Acta Physiologiae Plantarum*. 36 (2): 525-539.
- Moran, E.T. (1982): Starch digestion in fowl. *Poultry Science*. 61(7): 1257-1267.
- Mościcki, L. & van Zuilichem, D.J. (2011): Extrusion-cooking and related technique. *Extrusion-cooking techniques: applications, theory and sustainability*. Wiley. Weinheim. 1-24.
- Mosenthin, R., Jezierny, D. & Eklund, M. (2007): Untersuchungen zur Bestimmung der standardisierten praecaecalen Verdaulichkeiten von Protein und Aminosäuren aus Körnerleguminosen beim Schwein. [https://www.ufop.de/files/5613/3922/7160/Abschlussber\\_Mosenthin.pdf](https://www.ufop.de/files/5613/3922/7160/Abschlussber_Mosenthin.pdf). 12.06.2019.12:45.
- Moussou, N., Corzo-Martínez, M., Sanz, M.L., Zaidi, F., Montilla, A. & Villamiel, M. (2017): Assessment of Maillard reaction evolution, prebiotic carbohydrates, antioxidant activity and  $\alpha$ -amylase inhibition in pulse flours. *Journal of food science and technology*. 54(4): 890-900.
- Murray, H.M., Lall, S.P., Rajaselvam, R., Boutilier, L.A., Blanchard, B., Flight, R.M., Colombo, S., Mohindra, V. & Douglas, S.E. (2010): A nutrigenomic analysis of intestinal response to partial soybean meal replacement in diets for juvenile Atlantic halibut, *Hippoglossus hippoglossus*, L. *Aquaculture*. 298: 282-293.
- Mustafa, A.F., Christensen, D.A. & MC Kinnon, J.J. (1998): Effects of moist heat treatment on crude protein composition and degradability of field peas. *Can. J. Anim. Sci* 78: 453-456.
- Mustafa, A.F. & Seguin, P. (2003): Characteristics and in situ degradability of whole crop faba bean, pea, and soybean silages. *Canadian journal of animal science*. 83(4): 793-799.
- Nagaraju, V.D. & Bhattacharya, S. (2010): Roasting green coffee beans using spouted bed roaster: changes in physical characteristics. *J. Food Sci. Technol.* 47: 674-677.
- Nocek, J.E. (1997): Bovine acidosis: implications on lameness. *Journal of Dairy Science*. 80: 1005-1028.
- Norton, G. (1991): Proteinase inhibitors. In: D'Mello, J.P.F., Duffus, C.M., Duffus, J.H. (Eds.), *Toxic Substances in Crop Plants*. The Royal Society of Chemistry. Cambridge. 68-106.
- NRC, National Research Council (2001): *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 7 revised Edition.

- Ntatsi, G., Gutiérrez-Cortines, M.E., Karapanos, I., Barros, A., Weiss, J., Balliu, A., dos Santos Rosa, E.A. & Savva, D. (2018): The quality of leguminous vegetables as influenced by preharvest factors. *Scientia Horticulturae*. 232: 191-205.
- Nülken, C., Abraham, U. & Kluth, H. (2015): Fütterung heimischer Körnerleguminosen als thermisch behandeltes Gemisch bei langsam wachsenden Masthähnchen. *VDLUFA-Schriftenreihe 71/2015*. VDLUFA-Verlag. Darmstadt. 572-578.
- O'Doherty, J.V. & Keady, U. (2001): The effect of expander processing and extrusion on the nutritive value of peas for pigs. *Animal Science*. 72(1): 43-53.
- Oates, C.G. (1997): Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis. *Trends Food Sci. Technol.* 8: 375-382
- Olaboro, G., Marquardt, R.R. & Campbell, L.D. (1981a): Isolation of the egg weight depressing factor in fababeans (*Vicia faba* L. var. minor). *J. Sci. Food Agr.* 32: 1074–1080.
- Olaboro, G., Marquardt, R.R., Campbell, L.D. & Fröhlich, A. (1981b): Purification, identification and quantification of an egg-weight-depressing factor (vicine) in fababeans (*Vicia faba* L.). *J. Sci. Food Agric.* 32: 1163-1171.
- Olsen, H.S. & Andersen, J.H. (1978): The estimation of vicine and convicine in fababeans (*Vicia faba* L.) and isolated fababean proteins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 29(4): 323-331.
- Onfroy, C., Tivoli, B., Corbiere, R. & Bouznad, Z. (1999): Cultural, molecular and pathogenic variability of *Mycosphaerella pinodes* and *Phoma medicaginis* var. *pinodella* isolates from dried pea (*Pisum sativum*) in France. *Plant Pathology*. 48(2): 218-229.
- Pahlow, G., Muck, R. E., Driehuis, F., Elferink, S. J. O. & Spoelstra, S. F. (2003): Microbiology of ensiling. *Silage science and technology*. 42: 31-93.
- Pavlik, M., Vanova, M., Laudova, V. & Harmatha, J. (2002): Fungitoxicity of natural heterocycle glucoside vicine obtained from *Vicia faba* L. against selected filamentous fungi. *Rostlinna Vyroba*. 48: 543-7.
- Petterson, D.S. & Mackintosh, J.B. (1994): The chemical composition and nutritive value of Australian grain legumes. Grain Research and Development Corporation. Canberra. 13-16.
- Piecyk, M., Wołosiak, R., Drużynska, B. & Worobiej, E. (2012): Chemical composition and starch digestibility in flours from Polish processed legume seeds. *Food Chemistry*. 135: 1057-1064.
- Piergiovanni, A.R. & Pignone, D. (2003). Effect of year-to-year variation and genotype on trypsin inhibitor level in common bean (*Phaseolus vulgaris* L) seeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 83: 473-476.

- Pisulewska, E. & Pisulewski, P.M. (2000): Trypsin inhibitor activity of legume seeds (peas, chickling vetch, lentils, and soya beans) as affected by the technique of harvest. *Animal Feed Science and Technology*. 86: 261-265.
- Pitz, W.J., Sosulski, F.W. & Hogge, L.R. (1980): Occurrence of vicine and convicine in seeds of some *Vicia* species and other pulses. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*. 13(1): 35-39.
- Platel, K. & Shurpalekar, K.S. (1994): Resistant starch content of Indian foods. *Plant Foods Human Nutr.* 45(1): 91-95.
- Poerio, E., Carrano, L., Garzillo, A.M. & Buonocore, V. (1989): A trypsin inhibitor from the water-soluble protein fraction of wheat kernel. *Phytochemistry*. Vol. 28. No. 5: 1307-1311.
- Prestløkken, E. (1999a): Ruminal degradability and intestinal digestibility of protein and amino acids in barley and oats expander-treated at various intensities. *Animal feed science and technology*. 82(3-4): 157-175.
- Prestløkken, E. (1999b): In situ ruminal degradation and intestinal digestibility of dry matter and protein in expanded feedstuffs. *Anim. Feed Sci. Tech.* 77: 1-23.
- Prestløkken E. & Harstad O.M. (2001): Effects of expander-treating a barley-based concentrate on ruminal fermentation, bacterial N synthesis, escape of dietary N and performance of dairy cows. *Anim. Feed Sci. Tech.* 90: 227-246.
- Priepke, A. & Sanftleben, P. (2018): Bestimmung der Nährstoffverdaulichkeit und des energetischen Futterwertes für Wiederkäuer von diversen Futtermitteln im Hammeltest. Abschlussbericht 2018. Forschungsnummer 2/67.
- Prodanov, M., Sierra, I. & Vidal-Valverde, C. (2004): Influence of soaking and cooking on the thiamin, riboflavin and niacin contents of legumes. *Food Chem.* 84(2): 271-277.
- Pulkkinen, M., Gautam, M., Lampi, A.M., Ollilainen, V., Stoddard, F., Sonntag-Strohm, T., Salovaara, H. & Piironen, V. (2015): Determination of vicine and convicine from faba bean with an optimized high-performance liquid chromatographic method. *Food Research International*. 76: 168-177.
- Putra, S.A., Hanifah, U. & Adriansyah Karim, M. (2019): Theoretical study of fluidization and heat transfer on fluidized bed coffee roaster. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2097, No. 1, p. 030112). AIP Publishing.
- Puvača, N., Stanačev, S., Glamočić, D., Lević, J., Stanačev, Ž., Milić, D., Vukelić, N. & Ljubojević, D. (2012): Application of the process of extrusion and micronisation and their influence on nutritive value of feedstuffs. In *Conference proceeding, International Conference on BioScience: Biotechnology and Biodiversity–Step in the Future-The Forth Joint UNS-PSU Conference*. Novi Sad. 18-20.

- Rackis, J.J., Wolf, W.J. & Baker, E.C. (1986): Protease inhibitors in plant foods: content and inactivation. in: Friedman, M. (ed). Nutritional and Toxicological Significance of enzyme inhibitors in food. Plenum Publishing. New York. United States of America. 216-220.
- Ramírez-Jiménez, A., García-Villanova, B. & Guerra-Hernández, E. (2001): Effect of toasting time on the browning of sliced bread. *J. Sci. Food Agric.* 81: 513-518.
- Rao, P.S. (1969): Studies on the digestibility of carbohydrates in pulses. *Indian Journal of Medical Research.* 57: 2151-2157.
- Ratnayake, W.S., Hoover, R. & Warkentin, T. (2002): Pea starch: composition, structure and properties – a review. *Starch-Stärke.* 54(6): 217-234.
- Rehman, Z.U., Salariya, A.M., Yasin, M. & Zafar, S. I. (2001): Thermal heat processing effects on in vitro protein digestibility of chickpea (*Cicer arietinum*). *Pakistan Journal of Science and Research.* 53: 75-77.
- Rehman, Z.U. & Shah, W.H. (2005): Thermal heat processing effects on antinutrients, protein and starch digestibility of food legumes. *Food chemistry.* 91(2): 327-331.
- Rezvani, M.R., Kluth, H., Bulang, M., & Rodehutschord, M. (2011): Verdaulichkeit der Aminosäuren aus Rapsextraktionsschroten bei der Legehennen.
- Riccioni, L., Orzali, L., Romani, M., Annicchiarico, P. & Pecetti, L. (2019): Organic seed treatments with essential oils to control ascochyta blight in pea. *European Journal of Plant Pathology.* 155(3): 831-840.
- Richter, G. (1981): Erbsen (*Pisum sativum* L.) als Mischfutterkomponente für Legehennen. *Arch. Tierernährung* 31: 713-719.
- Richter, G., Hartung, H., Ochrimenko, W.I. & Arnhold, W. (2008): Einsatz von Erbsen im Geflügelfutter. *Tierärztliche Umschau.* 63: 431-436.
- Richter, K. & Schüler, L. (1959): Die Wirkung von Dampferhitzen (Toasten) auf die biologische Eiweißwertigkeit von Sojaschrot. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 14: 1-5.
- Riemer, N., Schieler, M., Kleinhenz, B., Racca, P., Hammer-Weis, M., Clemenz, C., Schwabe, K., Müller, U. & Saucke, H. (2017): Erbsenwickler (*Cydia nigricana*) in Gemüse- und Körnererbsen: Grundlagen zur Befallsprognose und Schadensprävention.
- Ring, S.G., Gee, J. M., Whittam, M., Orford, P. & Johnson, I. (1988): Resistant Starch. Its chemical form in foodstuffs and effect on digestibility in vitro. *Food Chem.* 28: 97-109.
- Rinne, M., Zanolli, R., Alberti, F. & Priori, S. (2016). Feeding home-grown protein and novel feeds to dairy cows. *Sustainable Organic and Low-Input Dairying (SOLID)*. Organic Research Centre. UK.
- Rinne, M., Leppä, M.M., Kuoppala, K., Koivunen, E., Kahala, M., Jalava, T., Salminen, J-P. & Manni, K. (2020): Fermentation quality of ensiled crimped faba beans using different additives

with special attention to changes in bioactive compounds. *Animal Feed Science and Technology*. 265:114497.

Ritthausen, H. & Preuss, D. (1899): Zusammensetzung des Convicins aus Wicken- und Saubohnensamen. *Journal für Praktische Chemie* 59.1: 487-488.

Rizzello, C.G., Losito, I., Facchini, L., Katina, K., Palmisano, F., Gobbetti, M. & Coda, R. (2016): Degradation of vicine, convicine and their aglycones during fermentation of faba bean flour. *Scientific reports*. 6: 32452.

Rochat, C. & Boutin, J.P. (1992): Temporary storage compounds and sucrose-starch metabolism in seed coats during pea seed development (*Pisum sativum*). *Physiologia Plantarum*. 85: 567-572.

Rooke, J.A. & Hatfield, R.D. (2003): Biochemistry of ensiling. *Silage science and technology*. 42: 95-139.

Rooney, L.W. & Pflugfelder, R.L. (1986): Factors affecting starch digestibility with special emphasis on sorghum and corn. *Journal of Animal Science*. 63(5): 1607-1623.

Roth-Maier, D. A., Paulicks, B. R., Steinhöfel, O. & Weiß, J. (2004): Inhaltsstoffe, Futterwert und Einsatz von Lupinen in der Nutztierfütterung. 2. Auflage. UFOP-Praxisinformation.

Roy, F., Boye, I. J. & Simpson, B. K. (2010): Bioactive proteins and peptides in pulse crops: Pea, chickpea and lentil. *Food Res International*. 43: 432-442.

Rubiales, D., Fondevilla, S., Chen, W. & Davidson, J. (2018): Advances in Ascochyta Research. *Frontiers in plant science*. 9: 22.

Rufián-Henares, J.A., Delgado-Andrade, C. & Morales, F.J. (2009): Assessing the Maillard reaction development during the toasting process of common flours employed by the cereal products industry. *Food Chemistry*. 114(1): 93-99.

Rybiński, W.A. & Górynówciz, B. (2016): Pflanzenbauliche Voraussetzungen und Maßnahmen zur Erzeugung von Körnerleguminosen. In Jeroch, H. et al. *Körnerleguminosen als Futter- und Nahrungsmittel*. DLG-Verlag. Frankfurt am Main. 2016.

Sajilata, M.G., Singhal, R.S. & Kulkarni, P.R. (2006): Resistant starch—a review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*. 5(1): 1-17.

Salawu, M.B., Warren, E.H. & Adesogan, A.T. (2001): Fermentation characteristics, aerobic stability and ruminal degradation of ensiled pea/wheat bi-crop forages treated with two microbial inoculants, formic acid or quebracho tannins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 81(13): 1263-1268.

Saldanha do Carmo, C., Silventoinen, P., Nordgård, C.T., Poudroux, C., Dessev, T., Zobel, H., Holtekjølen, A.K., Draget, K.I., Holopainen-Mantila, U., Knutsen, S.H. & Sahlstrøm, S. (2020): Is dehulling of peas and faba beans necessary prior to dry fractionation for the production of

protein- and starch-rich fractions? Impact on physical properties, chemical composition and techno-functional properties. *Journal of Food Engineering*. 278: 109937.

Sandhu, K.S. & Lim, S.T. (2008): Digestibility of legume starches as influenced by their physical and structural properties. *Carbohydrate polymers*. 71(2): 245-252.

Sanroma'n, A., Murado, M.A. & Lema, J.M. (1996): The influence of substrate structure on the kinetics of the hydrolysis of starch by glucoamylase. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 59: 329-336.

Sattler, K. & Babel, W. (1986): Silierung durch aerobe Säuerung–paradoxe Einfall oder praktische Lösung?. *Acta Biotechnologica*. 6(2): 201-204.

Sauermann, W., Gronow, J., Specht, M. & Sass, O. (2002): Anbauratgeber Körnerfüttererbse. UFOP-Praxisinformation.

Sauermann, W. & Sass, O. (2016): Anbauratgeber Ackerbohne. UFOP-Praxisinformation. Berlin.

Schäffler, M., Brunlehner, E.M., Lindermayer, H., Mosenthin, R., Eklund, M. & Rosenfelder, P. (2015): Standardisierte praecaecale Aminosäurenverdaulichkeiten in Soja- und Rapsprodukten beim Schwein. Bayer. Landesanstalt für Landwirtschaft Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft ITE 1/2–Futterwirtschaft/Schweinefütterung. Grub.

Schieler, M., Riemer, N., Racca, P., Saucke, H., Clemenz, C., Schwabe, K., Müller, U., Hammer-Weis, M. & Kleinhenz, B. (2017): Entwicklung eines zeitlichen und räumlichen Entscheidungshilfesystems gegen den Erbsenwickler (*Cydia nigricana*, Fabricius).

Schingoethe, D.J., Casper, D.P., Yang, C., Illg, D.J., Sommerfeldt, J.L. & Mueller, C.R. (1988): Lactational response to soybean meal, heated soybean meal, and extruded soybeans with ruminally protected methionine. *Journal of dairy science*. 71(1): 173-180.

Schmidt, H., Fuchs, J., Möller, D. & Wolf, D. (2014): Kapitel 1: Schlagauswahl. *in* Körnerleguminosen und Bodenfruchtbarkeit, Strategien für einen erfolgreichen Anbau. Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). 1: 9-15.

Serrano, M.P., Frikha, M., Corchero, J., & Mateos, G.G. (2013): Influence of feed form and source of soybean meal on growth performance, nutrient retention, and digestive organ size of broilers. 2. Battery study. *Poultry science*. 92(3): 693-708.

Seppälä, A., Rinne, M. & Huuskonen, A. (2019): Efficacy of different additives in ensiling faba bean and field pea based whole crop silages. *AGRICULTURAL AND FOOD SCIENCE*. 28: 165-175.

Sharma, A. & Sehgal, S. (1992): Effect of processing and cooking on the antinutritional factors of faba bean (*Vicia faba*). *Food Chemistry*. 43: 383-385.



- Sharma, S., Singh, N. & Singh, B. (2015): Effect of extrusion on morphology, structural, functional properties and in vitro digestibility of corn, field pea and kidney bean starches. *Starch-Stärke*. 67(9-10): 721-728.
- Shen, S., Hou, H., Ding, C., Bing, D.J. & Lu, Z.X. (2016): Protein content correlates with starch morphology, composition and physicochemical properties in field peas. *Canadian journal of plant science*. 96(3): 404-412.
- Shi, L., Mu, K., Arntfield, S. D., & Nickerson, M. T. (2017): Changes in levels of enzyme inhibitors during soaking and cooking for pulses available in Canada. *Journal of food science and technology*. 54(4): 1014-1022.
- Shimelis, E.A. & Rakshit, S.K. (2008): Influence of natural and controlled fermentations on a-galactosides, antinutrients and protein digestibility of beans (*Phaseolus vulgaris L.*). *International Journal of Food Science and Technology*. 43: 658-665.
- Singh, J. & Basu, P.S. (2012): Non-nutritive bioactive compounds in pulses and their impact on human health: an overview. *Food and Nutrition Science*. 3: 1664-1672.
- Singh, J., Dartois, A. & Kaur, L. (2010): Starch digestibility in food matrix: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 21: 168-180.
- Singh, J., McCarthy, O.J., Singh, H. & Moughan, P.J. (2008): Low temperature post-harvest storage of New Zealand Taewa (Maori potato): Effects on starch physico-chemical and functional characteristics. *Food Chemistry*. 106(2): 583-596.
- Sitohy, M.Z. & Ramadan, M.F. (2001): Degradability of different phosphorylated starches and thermoplastic films prepared from corn starch phosphomonoesters. *Starch-Stärke*. 53(7): 317-322.
- Snow, P. & O'Dea, K. (1981): Factors affecting the rate of hydrolysis of starch in food. *The American journal of clinical nutrition*. 34(12): 2721-2727.
- Sokrab, A.M., Ahmed, I.A.M. & Babiker, E.E. (2012): Effect of germination on antinutritional factors, total, and extractable minerals of high and low phytate corn (*Zea mays L.*) genotypes. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 11: 123-128.
- Sosulski, F.W. & McCurdy, A.R. (1987): Functionality of flours, protein fractions and isolates from field peas and faba bean. *Journal of Food Science*. 52(4): 1010-1014.
- Statistisches Bundesamt (2011, 2013, 2015, 2017, 2019): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Wachstum und Ernte – Feldfrüchte. Fachserie 3, R 3.2.1, Feldfrüchte.
- Statistisches Bundesamt (2019a): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Landwirtschaftliche Bodennutzung, Anbau auf dem Ackerland. Fachserie 3, Reihe 3.1.2, 2019 (Vorbericht).
- Statistisches Bundesamt (2019b): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Wachstum und Ernte – Feldfrüchte. Fachserie 3, R 3.2.1, Feldfrüchte August/September 2019.

Statistisches Bundesamt (2020): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Wachstum und Ernte – Feldfrüchte. Fachserie 3, R 3.2.1, Feldfrüchte August/September 2020.

Stein, H.H. & Bohlke, R.A. (2007): The effects of thermal treatment of field peas (*Pisum sativum* L.) on nutrient and energy digestibility by growing pigs. *Journal of Animal Science*. 85(6): 1424-1431.

Stein, H.H., Benzoli, G., Bohlke, R.A. & Peters, D. N. (2004): Assessment of the feeding value of South Dakota-grown field peas (*Pisum sativum* L.) for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 82: 2586-2578.

Stein, H.H., Everts, A.K.R., Sweeter K.K., Peters, D.N., Maddock, R.J., Wulf, D.M. & Pedersen, C. (2006): The influence of dietary field peas on pig performance, carcass quality, and the palatability of pork. *Journal of Anim. Sci.* 84: 3110-3117.

Steiner, T. & Bellof, G. (2009): Qualitätssicherung für Eiweißfuttermittel in der ökologischen Tierernährung: Sojabohnen und -kuchen. Schlussbericht. FKZ: 06OE233. Bundesprogramm Ökologischer Landbau.

Steingäß, H., Prieß, M., Mahlkow-Nerge, K., Engelhard, T. & Richardt, W. (2012): Futterwert und Einsatz von Raps- und Sojaextraktionsschrot in der Fütterung von Kühen mit hoher Milchleistung und unterschiedlichen Anteilen an Maissilage in der Grobfuttermittellagerung. Teil: Futterwert. UFOP-Schriften. Abschlussbericht. Agrar.

Steinhöfel, O., Krieg, D., Hanschmann, G., Mietke, H., Richardt, W. & Hoffmann, M. (2008): Futterbewertung für Wiederkäuer. Empfehlungen des Landesarbeitskreises –Futter und Fütterung im Freistaat Sachsen-. 3. Auflage.

Steinhöfel, O., Martens, S., Richardt, W. & Zeyner, A. (2017): Vergleichende Aspekte zur Verwendung von frischem, siliertem oder getrocknetem Grünfutter in der Fütterung von Milchrindern. LBH: 9. Leipziger Tierärztekongress. 3: 151-154.

Stern, M.D., Santos, K.A. & Satter, L.D. (1985): Protein Degradation in Rumen and Amino Acid Absorption in Small Intestine of Lactating Dairy Cattle Fed Heat-Treated Whole Soybeans. *J Dairy Sci.* 68: 45-56.

Surra, J., Purroy, A., Munoz, F. & Treacher, T. (1992): Lentils and faba beans in lamb diets. *Small ruminant research.* 7(1): 43-49.

Südekum, K.-H. (2005): Möglichkeiten und Grenzen einer Standardisierung der in situ-Methode zur Schätzung des ruminalen Nährstoffabbaus. *Übersichten zur Tierernährung.* 33. Jahrgang. Heft 2: 71-86.

Taylor, J.R.N. & Emmanbux, M.N. (2008): *Handbook of gluten free cereal products and beverage.* Amsterdam & London.

Tester, R. F., Qi, X. & Karkalas, J. (2006): Hydrolysis of native starches with amylases. *Animal Feed Science and Technology.* 130: 39-54.

- Thacker, P., Deep, A., Petri, D. & Warkentin, D. (2013): Nutritional evaluation of low-phytate peas (*Pisum sativum* L.) for young broiler chicks. *Arch. Anim. Nutr.* 67: 1-14.
- Tharanathan, R.N. & Mahadevamma, S. (2003): Grain legumes—a boon to human nutrition. *Trends in Food Science & Technology.* 14(12): 507-518.
- Thaysen, J. (2009): Erprobung des Verfahrens der Feuchtkörnerleguminosensilierung (Erbsen, Lupinen und Ackerbohnen) unter Verwendung von Silier- und Konservierungszusätzen zur betriebseigenen Verfütterung. Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein.
- Thomason, D.M. (1987): Review of processing systems for full-fat soy. En: Full fat soya. A regional Conference. American Soybean Association. Milan. Italy. 114-122.
- Thöming, G. & Norli, H. R. (2015): Olfactory cues from different plant species in host selection by female pea moths. *Journal of agricultural and food chemistry.* 63(8): 2127-2136.
- Thompson, L.U. & Gabon, J.E. (1987): Effect of Lectins on Salivary and Pancreatic Amylase Activities and the Rate of Starch Digestion. *Journal of Food Science.* 52(4): 1050-1053.
- Tivoli, B., Beasse, C., Lemarchand, E. & Masson, E. (1996): Effect of ascochyta blight (*Mycosphaerella pinodes*) on yield components of single pea (*Pisum sativum*) plants under field conditions. *Annals of Applied Biology.* 129(2): 207-216.
- Troegel, T. (2017): Leguminosen – Chance einer Renaissance?. *Zeitschrift für amtliche Statistik.* Berlin Brandenburg. 1: 26-45.
- Trugo, L.C., Ramos, L.A., Trugo, N.M.F. & Souza, M.C.P. (1990): Oligosaccharide composition and trypsin inhibitor activity of *P. vulgaris* and the effect of germination on the  $\alpha$ -galactoside composition and fermentation in the human colon. *Food Chemistry.* 36(1): 53-61.
- Tufarelli, V., Naz, S., Khan, R. U., Mazzei, D. & Laudadio, V. (2012): Milk quality, manufacturing properties and blood biochemical profile from dairy cows fed peas (*Pisum sativum* L.) as dietary protein supplement. *Tierzucht.* 55: 132-139.
- UFOP (2013): Geschäftsbericht 2011/2012. Union zur Förderung von Öl- Proteinpflanzen e.V.
- Urbatzka, P., Graß, R., Reulein, J. & Schüler, C. (2003): Untersuchung verschiedener Wintererbsenherkünfte auf ihre Winterhärte und ihre Anbauwürdigkeit im Ökologischen Landbau. Abschlußbericht zum Projekt BLE-02OE566. Kassel. BÖL-Bericht-ID 16445.
- Ussuf, K.K., Laxmi, N. H. & Mitra, R. (2001): Proteinase inhibitors: Plant-derived genes of insecticidal protein for developing insect-resistant transgenic plants. *CURRENT SCIENCE.* 80(7): 847-853.
- Vaga, M., Hetta, M. & Huhtanen, P. (2017): Effects of heat treatment on protein feeds evaluated in vitro by the method of estimating utilisable crude protein at the duodenum. *Journal of animal physiology and animal nutrition.* 101(6): 1259-1272.

- Valdebouze, P., Bergeron, E., Gaborit, T. & Delort-Laval, J. (1980): Content and distribution of trypsin inhibitors and haemagglutinins in some legume seeds. *Canadian Journal of Plant Science*. 60: 695-701.
- Van der Poel, A.F.B. (1990): Effects of processing on bean (*Phaseolus vulgaris* L.): protein quality. Dissertation. Wageningen. Niederlande.
- Van Dongen, J.T., Ammerlaan, A.M., Wouterlood, M., Van Aelst, A.C. & Borstlap, A.C. (2003): Structure of the developing pea seed coat and the post-phloem transport pathway of nutrients. *Annals of Botany*. 91(6): 729-737.
- Vander Pol, M., Hristov, A. N., Zaman, S. & Delano, N. (2008): Peas can replace soybean meal and corn grain in dairy cow diets. *Journal of dairy science*. 91(2): 698-703.
- VDLUFA (2004): Standpunkt Humusbilanzierung. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten.
- VDLUFA (2012): Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. Methodenbuch. 3. Auflage. VDLUFA-Verlag. Darmstadt.
- Vidal-Valverde, C., Frias, J., Diaz-Pollan, C., Fernandez, M., Lopez-Jurado, M. & Urbano, G. (1997): Influence of processing on trypsin inhibitor activity of faba beans and its physiological effect. *J. Agric. Food Chem.* 45: 3559-3564.
- Vilariño, M., Métayer, J. P., Crépon, K. & Duc, G. (2009): Effects of varying vicine, convicine and tannin contents of faba bean seeds (*Vicia faba* L.) on nutritional values for broiler chicken. *Animal Feed Science and Technology*. 150(1-2): 114-121.
- Wallen, V.R. (1965): Field evaluation and the importance of the Ascochyta complex on peas. *Canadian Journal of Plant Science*. 45(1): 27-33.
- Wang, N. & Daun, J.K. (2004): Effect of variety and crude protein content on nutrients and certain antinutrients in field peas (*Pisum sativum*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 84(9): 1021-1029.
- Wang, N., Daun, J.K. & Malcolmson, L.J. (2003): Relationship between physicochemical and cooking properties, and effects of cooking on antinutrients, of yellow field peas (*Pisum sativum*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 83(12): 1228-1237.
- Wang, P.X. & Ueberschär, K.H. (1990): The estimation of vicine, convicine and condensed tannins in 22 varieties of fababeans (*Vicia faba* L.). *Animal feed science and technology*. 31(1-2): 157-165.
- Weber, E. & Bleiholder, H. (1990): Explanations of the BBCH decimal codes for the growth stages of maize, rape, faba beans, sunflowers and peas – with illustrations. *Gesunde Pflanzen*. 42(9): 308-321.

- Weber, M. & Schulze, U. (2013): Ergebnisse des UFOP-Monitorings 2012 zur Qualität von Rapsextraktionsschrot. In: Verband der Landwirtschaftskammern (Hrsg.). Forum angewandte Forschung in der Rinder- und Schweinefütterung. 55-57.
- Weber, M. (2017): Inhaltsstoffe von Lupinen und Sojabohnen 2016 deutschlandweit geprüft. Veredlungsproduktion. Proteinmarkt.de. Fachartikel.
- Weinberg, Z.G., Szakacs, G., Ashbell, G. & Hen, Y. (2001): The effect of temperature on the ensiling process of corn and wheat. *Journal of applied microbiology*. 90(4): 561-566.
- Weinberg, Z.G. & Ashbell, G. (2003): Engineering aspects of ensiling. *Biochemical Engineering Journal*. 13(2-3): 181-188.
- Weißbach, F., Schmidt, L. & Hein, E. (1974): Method of anticipation the run of fermentation in silage making, based on the chemical composition of green fodder. *Proceedings of the XIIth International Grassland Conference*. Moskau. 663-667.
- Weißbach, F. & Kuhla, S. (1995): Stoffverluste bei der Bestimmung des Trockenmassegehaltes von Silagen und Grünfütter: Entstehende Fehler und Möglichkeiten der Korrektur. *Übersicht Tierernährung*. 23: 189-214.
- Welham, T., O'Neill, M., Johnson, S., Wang, T. L. & Domoney, C. (1998). Expression patterns of genes encoding seed trypsin inhibitors in *Pisum sativum*. *Plant Science*. 131: 13-24.
- Wenderlein, J., Kienzle, E., Straubinger, R.K., Schöl, H., Ulrich, S., Böswald, L.F. (2022): Morphology of Starch Particles along the Passage through the Gastrointestinal Tract in Laboratory Mice Fed Extruded and Pelleted Diets. *Animals*. 12(8): 952.
- Wharton, H. J., & Duesselmann, W. (1947): Favism: A Short Review and Report of a Case. *New England Journal of Medicine*. 236(26): 974-977.
- Wiseman, J., Al-Mazooqi, W., Welham, T. & Domoney, C. (2003): The apparent ileal digestibility, determined with young broilers, of amino acids in near-isogenic lines of peas (*Pisum sativum* L) differing in trypsin inhibitor activity. *J Sci Food Agric* 83: 644-651.
- Woolford, M.K. (1990): The detrimental effects of air on silage. *Journal of Applied Bacteriology*. 68: 101-116.
- Xu, J., Ma, Z., Ren, N., Li, X., Liu, L. & Hu, X. (2019): Understanding the multi-scale structural changes in starch and its physicochemical properties during the processing of chickpea, navy bean, and yellow field pea seeds. *Food chemistry*. 289: 582-590.
- Xue, A.G., & Warkentin, T.D. (2001): Partial resistance to *Mycosphaerella pinodes* in field pea. *Canadian Journal of Plant Science*. 81(3): 535-540.
- Yavelow, J., Finlay, T.H., Kennedy, A.R. & Troll, W. (1983): Bowman-Birk soybean protease inhibitor as an anticarcinogen. *Cancer Res*. 43: 2454-2459.

- Yu, P., Holmes, J.H.G., Leury, B.J. & Egan, A.R. (1998). Influence of dry roasting on rumen protein degradation characteristics of whole faba bean (*Vicia faba*) in dairy cows. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 11(1): 35-42.
- Yu, P., Goelema, J.O. & Tamminga, S. (1999). Influence of pressure toasting on starch ruminal degradative kinetics and fermentation characteristics and gelatinization of whole horse beans (*Vicia faba*) in lactating dairy cows. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 12(4): 537-543.
- Yu, P., Goelema, J.O. & Tamminga, S. (2000): Using the DVE/OEB model to determine optimal conditions of pressure toasting on horse beans (*Vicia faba*) for the dairy feed industry. *Animal feed science and technology*. 86(3-4): 165-176.
- Yu, P., Sprague, M., Egan, A.R., Castleman, G.H. & Leury, B.J. (2001): Comparison of raw and roasted narbon beans (*Vicia narbonensis*) on performance and meat sensory attributes of lambs fed a roughage-based diet. *Animal feed science and technology*. 92(1-2): 1-16.
- Yu, P., Goelema, J.O., Leury, B.J., Tamminga, S. & Egan, A.R. (2002a): An analysis of the nutritive value of heat processed legume seeds for animal production using the DVE/OEB model: a review. *Animal Feed Science and Technology*. 99(1-4): 141-176.
- Yu, P., Egan, A.R., Boon-Ek, L. & Leury, B.J. (2002b): Purine derivative excretion and ruminal microbial yield in growing lambs fed raw and dry roasted legume seeds as protein supplements. *Animal Feed Science and Technology*. 95(1-2): 33-48.
- Yu-Hui, T. (1991): Effect of the hard to cook defect and processing on protein and starch digestibility of cowpeas. *Journal of the Cereal Chemistry*. 68: 413-418.
- Żebrowska, T., Długolecka, Z., Pająk, J.J. & Korczyński, W. (1997): Rumen degradability of concentrate protein, amino acids and starch, and their digestibility in the small intestine of cows. *Journal of Animal and Feed Sciences*. 6: 451-470.
- Zeyner, A., Gefrom, A., Hillegeist, D., Sommer, M. & Greef, J.M. (2015): Contribution to the method of sugar analysis in legume grains for ensiling—a pilot study. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. 1(2): 74-80.
- Zuber, T. & Rodehutsord, M. (2017): Aminosäurenverdaulichkeit von Lupinen und Erbsen bei Legehennen. Abschlussbericht. UFOP-Schriften. Agrar. Berlin.

## **9 Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

---

Datum

---

Unterschrift des Antragstellers

**10 Lebenslauf**

<b>Beruflicher Werdegang</b>	
• seit 01.07.2023	Referent (Vermarktung tierischer Produkte, Fütterung) im Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (SMEKUL), Referat 35, Tierische Erzeugung
• 1.04.2021 - 30.06.2023	Sachbearbeiter (Teamleiter Konditionalitäten, Flächenförderung) im sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Referat 36, Informations- und Servicestelle Rötha
• 01.01.2019 - 31.03.2021	Referent (Projektbearbeiter SilaToast-Projekt) im LfULG, Referat 74, Tierhaltung in Köllitsch
• seit 07.02.2018	Doktorand an der Naturwissenschaftlichen Fakultät III der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (MLU)
• 22.09.2016 - 31.12.2018	Sachbearbeiter (Projektbearbeiter SilaToast-Projekt) im LfULG, Referat 74, Tierhaltung in Köllitsch
• 22.06.2016 - 21.09.2016	Sachbearbeiter (Tierhaltung) im LfULG, Referat 74, Tierhaltung in Köllitsch
• 22.06.2015 - 21.05.2016	Sachbearbeiter (Projektbearbeiter Tannisil-Projekt) im LfULG, Referat 74, Tierhaltung in Köllitsch
• 01.02.2014 - 31.05.2015	wissenschaftliche Hilfskraft im Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften der MLU Halle (Saale) zur Unterstützung von Forschungsvorhaben im AEVZ Merbitz
• 02.05. - 30.09.2014	Masterand (Projektbearbeiter Halbtags-Weidefütterung Milchrind) im LfULG, Referat 74, Tierhaltung in Köllitsch

<b>Schulbildung</b>	
• 2013 - 19.09.2016	Master-Studiengang (Master of Science, M.Sc.) Agrarwissenschaft mit der Vertiefungsrichtung Nutztierwissenschaften an der Naturwissenschaftlichen Fakultät III der MLU
• 2010 - 17.10.2013	Bachelor-Studiengang (Bachelor of Science, B.Sc.) Agrarwissenschaft an der Naturwissenschaftlichen Fakultät III der MLU
• 2001 - 20.06.2009	Abitur am Conrad Felixmüller Gymnasium Geithain



## 11 Referenzen

### Zeitschriften

Okon, P., Bachmann, M., Wensch-Dorendorf, M., Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Greef, J.M., Steinhöfel, O., Kuhla, B. & Zeyner (2023): In vitro and in vivo analyses of the nutritive value of native and ensiled partial crop field peas. *Animal Feed Science and Technology*. 304. 115723

Bachmann, M., Okon, P., Pilger, F., Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2023): Ensiling and thermic treatment effects on ruminal carbohydrate fermentation and post-ruminal crude protein concentration in partial-crop peas and faba beans. *Journal of Applied Animal Nutrition*. ISSN 2049-257X online. DOI 10.3920/JAAN2023.0001

Bachmann, M., Wensch-Dorendorf, M., Kuhnitzsch, C., Kleinstauber, S., Popp, D., Thierbach, A., Martens, D.S., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2022): Changes in Composition and Diversity of Epiphytic Microorganisms on Field Pea Seeds, Partial Crop Peas, and Whole Crop Peas during Maturation and Ensiling with or without Lactic Acid Bacteria Inoculant. *Microbiology Spectrum*, e00953-22.

Bachmann, M., Okon, P., Blunk, C., Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2022): Ensiling and thermic treatment effects on nutrient content, protein solubility, and in vitro fermentation of partial crop faba beans. *Animal Feed Science and Technology*. 290: 115349.

Kuhnitzsch, C. & Steinhöfel, O. (2021): Ergebnisse aus dem Köllitscher Fütterungstest – Erbsenteilpflanzen in Milchkuhrationen. *PROTEINMARKT*. 02.06.2021

Kuhnitzsch, C. & Steinhöfel, O. (2021): Ergebnisse aus dem Köllitscher Fütterungstest – Aufbereitete Erbsen in Milchkuhrationen. *PROTEINMARKT*. 19.05.2021

Steinhöfel, O., Kuhnitzsch, C. & Kaindl, T. (2021): Королевский силос Люцерна – королева кормовых трав, но заготавливать ее совсем непросто. Для сохранности протеина скошенную массу предпочитают сушить. Немецкие ученые в поисках альтернативного способа силосования культуры (Königliches Silo - Luzerne ist die Königin der Futtergräser, aber sie ist nicht einfach zu ernten. Deutsche Wissenschaftler auf der Suche nach einem alternativen Weg, um Luzerne zu silieren). *НОВОЕ СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО*. НСХ. 3/2021: 34 - 35

Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Michel, S., Thierbach, A., Bochnia, M., Greef, J.M., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2020): Effect of toasting grain silages from field peas (*Pisum sativum*) and field beans (*Vicia faba*) on in vitro gas production, methane production, and post-ruminal crude protein content. *Animal Nutrition*. 6: 342-352.

Kuhnitzsch, C., Hofmann, T., Bachmann, M., Martens, S., Henle, T., Zeyner, A. & Steinhöfel, O. (2020): Effekte des Silierens und Toastens teigreif geernteter Erbsen auf die Bildung von Maillardprodukten. *REKASAN*. 27. Jahrgang. Heft 53/54. S. 22 – 24

Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2020): Control of bean seed beetle reproduction through cultivar selection and harvesting time. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 300 (2020) 107005

Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Michel, S., Thierbach, A., Bochnia, M., Greef, J. M., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2020): Effect of toasting grain silages from field peas (*Pisum sativum*) and field beans (*Vicia faba*) on in vitro gas production, methane production, and post-ruminal crude protein content. *Animal Nutrition*.

Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2020): Estimation of gas production and post-ruminal crude protein from native or ensiled *Pisum sativum* and *Vicia faba* grains. *Journal of Applied Animal Research*. 48(1): 78-85.

Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Thierbach, A., Michel, S., Bochnia, M., Greef, J. M., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2020): Effects of toasting temperature and duration on in vitro ruminal gas production kinetics and post-ruminal crude protein from field pea (*Pisum sativum*) legume grain silages. *Livestock Science*. 103944.

Kuhnitzsch, C., Martens, S., Bachmann, M., Zeyner, A., Hofmann, T. & Steinhöfel, O. (2019): Untersuchungen zum Einsatz siliierter und getoasteter Erbsen in der Fütterung von Milchkühen. *REKASAN-Journal*. Ratgeber für Tierernährung Tierzucht und Management. 26. Jahrgang. Heft 51/52: 46 - 49

Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Okon, P., Martens, S. D., Greef, J. M., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2019). Ruminal In Vitro Protein Degradation and Apparent Digestibility of Energy and Nutrients in Sheep Fed Native or Ensiled + Toasted Pea (*Pisum sativum*) Grains. *Animals*. 9(7): 401.

### **Tagungsbeiträge**

Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Bachmann, M., Zeyner, A. & Steinhöfel, O. (2021): Untersuchungen zum Futterwert von Erbsen und Ackerbohnen nach kombinierter gärbiochemischer und thermischer Behandlung –Ein Resümee nach vier Jahren SilaToast<sup>BLE</sup>-Projekt-. *Forum angewandte Forschung in der Rinder- und Schweinefütterung*. Tagungsband 97 - 101

Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2020): Apparent digestibility of energy and proximate nutrients of ensiled and ensiled + dried partialcrop field peas in sheep. 74. Jahrestagung. 03. bis 05. März 2020 in Göttingen.

Kuhnitzsch, C., Hofmann, T., Bachmann, M., Martens, S., Henle, T., Zeyner, A. & O. Steinhöfel (2019): Effekte des Silierens und Toastens teigreif geernteter Erbsen auf die Bildung von Maillard-Produkten. 15. Tagung Schweine- und Geflügelernährung in der LEUCOREA in der Lutherstadt Wittenberg 19. - 21. November 2019. Tagungsband S. 149 - 151

Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2019): Einfluss des Silierens und Toastens auf antinutritive Inhaltsstoffe von Erbsen und Ackerbohnen. 15.

Tagung Schweine- und Geflügelernährung in der LEUCOREA in der Lutherstadt Wittenberg 19. - 21. November 2019. Tagungsband S. 146 - 148

Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Okon, P., Martens, S.D., Greef, J.M., Steinhöfel, O. & A. Zeyner (2019): Ruminant *in vitro* protein degradation, anti-nutrient reduction, and *in vivo* digestibility of energy and nutrients in ensiled + toasted pea grains. International Symposium on Ruminant Physiology. Leipzig.

Kuhnitzsch, C., Hofmann, T., Bachmann, M., Martens, S., Henle, T., Zeyner, A. & O. Steinhöfel (2019): Effect of ensiling and toasting of field pea grains on formation of Maillard polymers from lysine and arginine. International Symposium on Ruminant Physiology. Leipzig.

Kuhnitzsch, C., Hofmann, T., Bachmann, M., Martens, S., Henle, T., Zeyner, A. & O. Steinhöfel (2019): Effect of ensiling and toasting of early harvested field pea grains on formation of Maillard polymers from lysine and arginine. 18th International Symposium Forage Conservation. Brno.

Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Bachmann, M., Zeyner, A., Hofmann, T. & Steinhöfel, O. (2019): Vergleichende Untersuchungen zum Einsatz siliert und getoasteter Erbsen bzw. Erbsenschröpfschnitt-GPS in der Fütterung hochleistender Milchkühe. Forum angewandte Forschung. 02/03.04.2019.

Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Steinhöfel, O., Bachmann, M., Bochnia, M. & Zeyner, A. (2018): Influence of ensiling and thermal treatment of peas on their feed value. Proceedings of the XVIII International Silage Conference 2018. Bonn. S. 186-187.

Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Wensch-Dorendorf, M., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2018): Estimation of ruminal gas production and utilizable crude protein at the duodenum from native, ensiled and ensiled + toasted peas and field beans. Proceedings of the XVIII International Silage Conference 2018. Bonn. S. 506-507.

Bachmann, M., Kuhnitzsch, C., Martens, S.D., Steinhöfel, O. & Zeyner, A. (2018): Comparison of two *in vitro* systems for the estimation of total gas production and utilizable crude protein at the duodenum from native or ensiled field peas and field beans in ruminants. In: Society of Nutrition Physiology (eds). Proceedings of the 72<sup>nd</sup> Conference of the Society of Nutrition Physiology. Göttingen. 2018. S. 137

## 12 Anhang

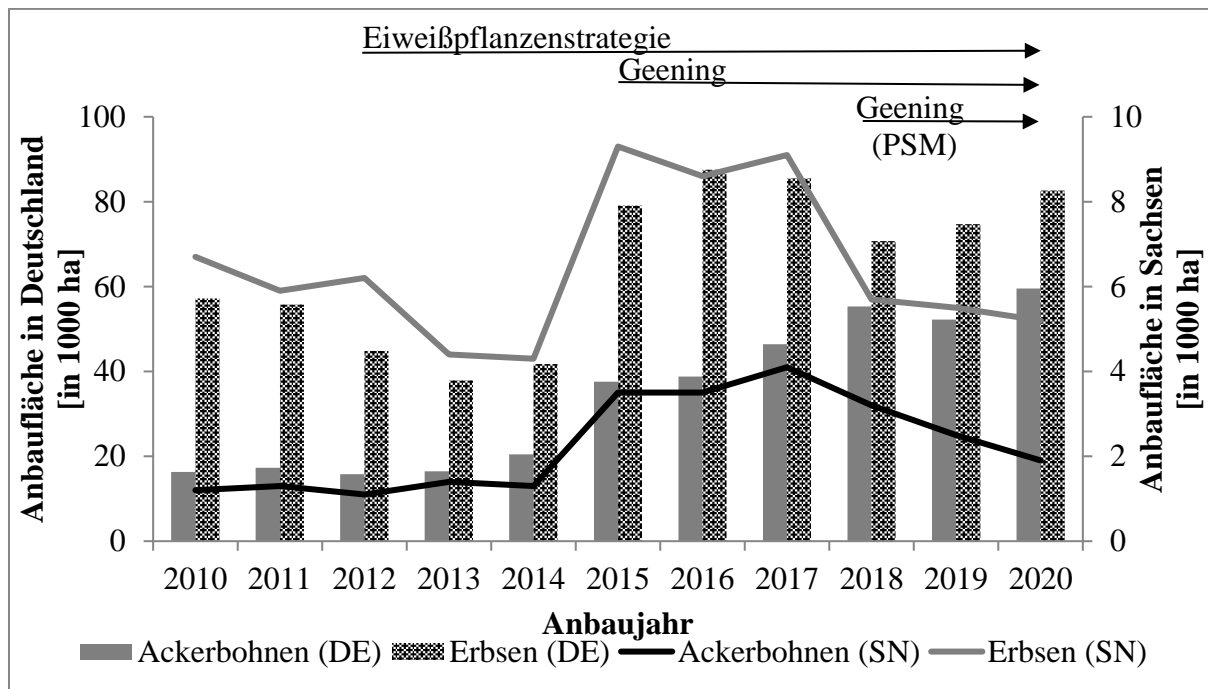
### Abbildungsverzeichnis Anhang

<b>Abbildung Anhang 1:</b> Entwicklung der Anbauflächen von Erbsen (ohne Frischerbsen) und Ackerbohnen in Deutschland (DE) und Sachsen (SN) von 2010 bis 2020.....	- 155 -
<b>Abbildung Anhang 2:</b> Ertragsentwicklung von Erbsen (ohne Frischerbsen) und Ackerbohnen in Deutschland (DE) und Sachsen .....	- 155 -
<b>Abbildung Anhang 3:</b> Mittlere Nährstoffträge aus den Jahren 2010 bis 2020 ausgewählter Ackerpflanzen in Sachsen .....	- 156 -
<b>Abbildung Anhang 4:</b> Bewurzelung ausgewählter Fruchtarten .....	- 158 -
<b>Abbildung Anhang 5:</b> Mittlere Erträge von Erbsen und Ackerbohnen in ausgewählten sächsischen Regionen in den Jahren 2010 - 2020 .....	- 162 -
<b>Abbildung Anhang 6:</b> Bildung von Maillardprodukten .....	- 164 -
<b>Abbildung Anhang 7:</b> Aufbau einer mobilen Toastanlage der Firma Agrel.....	- 166 -
<b>Abbildung Anhang 8:</b> Aufbau eines Einwellenexpanders .....	- 166 -
<b>Abbildung Anhang 9:</b> Schema eines Einwellen-Extruders.....	- 167 -
<b>Abbildung Anhang 10:</b> Elektronenmikroskopische Aufnahmen siliierter (MSB) Erbsen der Sorte „Alvesta“ sowie siliierter (MSB) der Ackerbohnen der Sorte „Taifun“.....	- 175 -
<b>Abbildung Anhang 11:</b> Elektronenmikroskopische Aufnahmen der Erbse „Astronaut“ eines mittleren Reifestadium (70 % TM) zu ausgewählten Behandlungen .....	- 176 -
<b>Abbildung Anhang 12:</b> Eindrücke der elektronenmikroskopischen Untersuchungen der Erbse „Astronaut“ .....	- 177 -
<b>Abbildung Anhang 13:</b> Elektronenmikroskopische und natürliche Aufnahmen der Erbse „Astronaut“ während der Abreife.....	- 178 -
<b>Abbildung Anhang 14:</b> Elektronenmikroskopische und natürliche Aufnahmen der Ackerbohne „Taifun“ während der Abreife .....	- 179 -
<b>Abbildung Anhang 15:</b> Entwicklung der Sojabohne .....	- 182 -
<b>Abbildung Anhang 16:</b> Relative Häufigkeit epiphytischer Eukaryoten als Prozentsatz der gesamten Eukaryoten der Erbse „Astronaut“ zu ausgewählten Kornreifestadien.....	- 182 -
<b>Abbildung Anhang 17:</b> Relative Häufigkeit epiphytischer Eukaryoten im Verhältnis zur Gesamteukaryotenanzahl der silierten Erbse „Astronaut“ zu ausgewählten Kornreifestadien ohne (KON) oder mit Zugabe von Milchsäurebakterien (MSB) .....	- 183 -
<b>Abbildung Anhang 18:</b> Relative Häufigkeit epiphytischer Eukaryoten im Verhältnis zur Gesamteukaryotenanzahl in silierten Erbsenkörnern („Astronaut“) zu ausgewählten Kornreifestadien ohne (KON) oder mit Zugabe von Milchsäurebakterien (MSB) .....	- 184 -
<b>Abbildung Anhang 19:</b> Relative Häufigkeit epiphytischer Eukaryoten im Verhältnis zur Gesamteukaryotenanzahl in silierten Erbsenkörnern („Astronaut“) nach 7 Tagen aerober Lagerung.....	- 184 -
<b>Abbildung Anhang 20:</b> Korrelation des Lysingehaltes mit der Bildung des Maillardproduktes Carboxymethyllysin (CML) .....	- 188 -

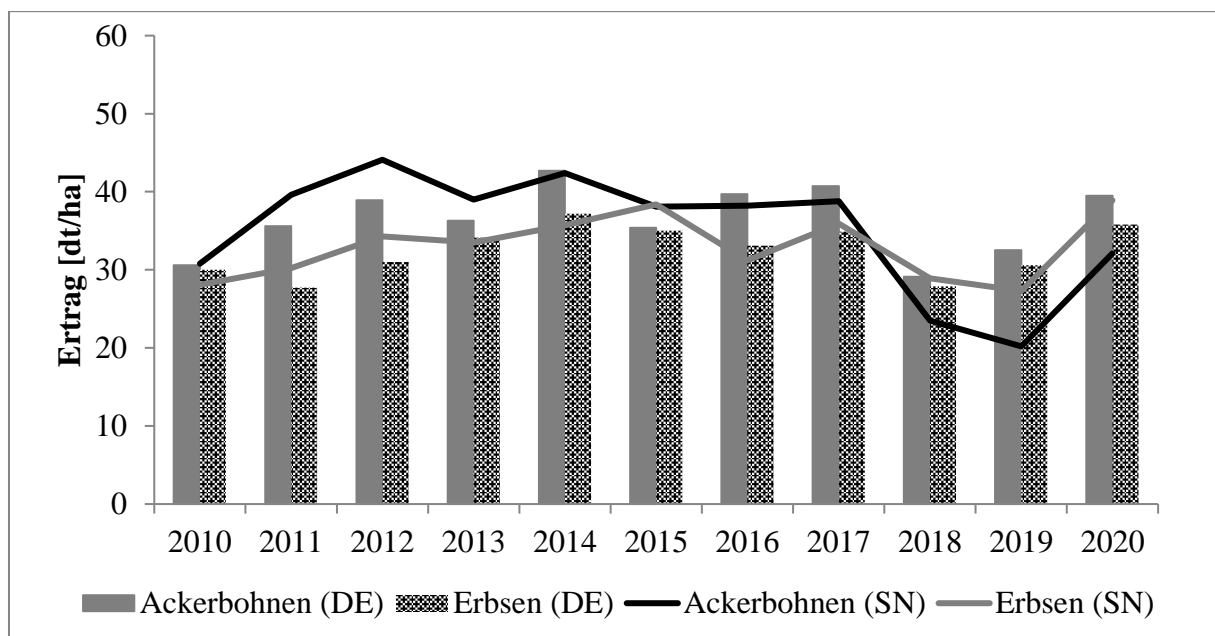
<b>Abbildung Anhang 21:</b> Korrelation des Arginingehaltes mit der Bildung des Maillardproduktes Carboxymethyllysin (CML) .....	- 188 -
<b>Abbildung Anhang 22:</b> Korrelation des Lysingehaltes mit der Bildung des Maillardproduktes Methylglyoxal-Hydroimidazol (MG-H1) .....	- 189 -
<b>Abbildung Anhang 23:</b> Korrelation des Arginingehaltes mit der Bildung des Maillardproduktes Methylglyoxal-Hydroimidazol (MG-H1).....	- 189 -
<b>Abbildung Anhang 24:</b> Korrelation des Lysingehaltes mit der Bildung des Maillardproduktes Pyrralin .....	- 190 -
<b>Abbildung Anhang 25:</b> Korrelation des Arginingehaltes mit der Bildung des Maillardproduktes Pyrralin .....	- 190 -
<b>Abbildung Anhang 26:</b> Elektronenmikroskopische Aufnahmen des Ackerbohnenkäfers .....	- 191 -
<b>Abbildung Anhang 27:</b> Entwicklungszyklus des Ackerbohnenkäfers am Beispiel der Ackerbohne „Fuego“ mit möglicher Unterbrechung des Zykluses durch die Ganzpflanzenernte und den Feuchtkorndrusch .....	- 192 -
<b>Abbildung Anhang 28:</b> Effekte auf den UDP-Gehalt sowie dem Lysingehalt gerösteter Sojabohnen .....	- 193 -
<b>Abbildung Anhang 29:</b> Veränderung der ruminalen Protein-Abbaubarkeit von Ackerbohnen durch Rösten.....	- 193 -
<b>Abbildung Anhang 30:</b> Voruntersuchungen zum Stärkeabbau nicht amylolytisch wirksamer MSB („Josilac®classic“) und amylolytisch wirksamer MSB ( <i>Lactobacillus plantarum</i> , LMG 18053) auf mit Erbsenstärke angereicherten Agrarplatten geimpft. ....	- 194 -
<b>Abbildung Anhang 31:</b> Entwicklung der TM in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums am Beispiel der Erbse „Alvesta“ .....	- 196 -
<b>Abbildung Anhang 32:</b> Entwicklung der TM über dem Zeitraum der Abreife am Beispiel der Ackerbohne „Taifun“ .....	- 197 -
<b>Abbildung Anhang 33:</b> Die Korrelation zwischen der Behandlungsintensität und der Bildung ausgewählter Maillardprodukte (CML, MG-H1, Pyrralin) bei der großtechnischen kombinierten Behandlung (silieren + toasten) der Erbsen „Alvesta“ .....	- 198 -
<b>Abbildung Anhang 34:</b> Darstellung der aufsummierten relativen Häufigkeit der Milchsäurebakterien <i>Lactobacillus</i> , <i>Pediococcus</i> und <i>Weisella</i> der Erbse „Astronate“ zu ausgewählten Behandlungsstufen .....	- 198 -

## Tabellenverzeichnis Anhang

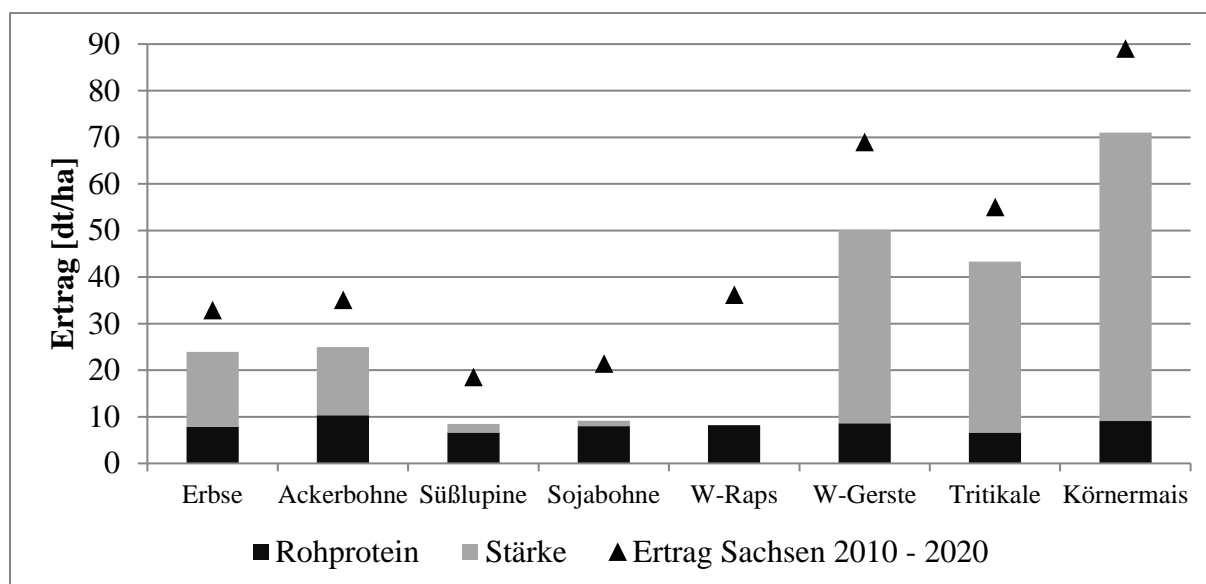
<b>Tabelle Anhang 1:</b> Auswirkungen der amylytischen Aktivität zweier Milchsäurebakterien auf ausgewählte Nährstoffparameter.....	- 156 -
<b>Tabelle Anhang 2:</b> Klassifizierung von Hefen- und Schimmelbefall an Silagen nach 7 Tagen aerober Lagerung.....	- 157 -
<b>Tabelle Anhang 3:</b> Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der aeroben Stabilität siliierter Ackerbohnen mit und ohne Zugabe von Milchsäurebakterien nach 7 Tagen aerober Lagerung .....	- 157 -
<b>Tabelle Anhang 4:</b> Faktoren, die die Stärkeverdaulichkeit beeinflussen .....	- 159 -
<b>Tabelle Anhang 5:</b> Preiswürdigkeiten von Erbsen und Ackerbohnen auf Basis NEL/ME und Rohprotein.....	- 163 -
<b>Tabelle Anhang 6:</b> Verfahrensbeschreibung ausgewählter Wärmebehandlungsverfahren .....	- 165 -
<b>Tabelle Anhang 7:</b> Einsatzempfehlungen von Erbsen und Ackerbohnen bei Wiederkäuern....	- 168 -
<b>Tabelle Anhang 8:</b> Einsatzempfehlungen von Erbsen und Ackerbohnen beim Geflügel -	169 -
<b>Tabelle Anhang 9:</b> Einsatzempfehlung für Erbsen und Ackerbohnen in der Fütterung von Monogastern.....	- 170 -
<b>Tabelle Anhang 10:</b> Verwendete Milchsäurebakterien (MSB)-Präparate.....	- 171 -
<b>Tabelle Anhang 11:</b> Ausgewählte Nährstoffparameter siliierter Erbsen verschiedener Sorten.....	- 172 -
<b>Tabelle Anhang 12:</b> Ausgewählte Nährstoffparameter siliierter Ackerbohnen verschiedener Sorten .....	- 173 -
<b>Tabelle Anhang 13:</b> Auswirkung der amylytischen Aktivität von Milchsäurebakterien als Silierzusatz bei ausgewählten Erbsen auf den Siliererfolg .....	- 174 -
<b>Tabelle Anhang 14:</b> BBCH Code für Erbse ab Fruchtentwicklung am Beispiel der Sorten „Alvesta“ und „Astronaute“ .....	- 180 -
<b>Tabelle Anhang 15:</b> BBCH Code für Ackerbohnen ab Fruchtentwicklung am Beispiel der Sorte „Taifun“ .....	- 181 -
<b>Tabelle Anhang 16:</b> Merkmale der in dem Fütterungstest eingesetzten Milchrinder ....	- 185 -
<b>Tabelle Anhang 17:</b> Rationskomponenten der vorgelegten Totalen-Misch-Rationen....	- 185 -
<b>Tabelle Anhang 18:</b> Mittlere Gehalte ausgewählter Nährstoffparameter der eingesetzten TMR .....	- 186 -
<b>Tabelle Anhang 19:</b> Veränderung der Proteinqualität siliierter Erbsen „Alvesta“ bei der thermischen Aufbereitung in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur und –dauer.....	- 187 -
<b>Tabelle Anhang 20:</b> Veränderung der Proteinqualität in Folge der großtechnisch durchgeführten kombinierten Behandlung der Erbse „Alvesta“ .....	- 195 -



**Abbildung Anhang 1:** Entwicklung der Anbauflächen von Erbsen (ohne Frischerbsen) und Ackerbohnen in Deutschland (DE) und Sachsen (SN) von 2010 bis 2020 (Statistisches Bundesamt, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019, 2020; PSM, Pflanzenschutzmittel)



**Abbildung Anhang 2:** Ertragsentwicklung von Erbsen (ohne Frischerbsen) und Ackerbohnen in Deutschland (DE) und Sachsen (SN; Statistisches Bundesamt, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019, 2020)



**Abbildung Anhang 3:** Mittlere Nährstoffträge aus den Jahren 2010 bis 2020 ausgewählter Ackerpflanzen in Sachsen (berechneter mittlerer Ertrag, Statistisches Bundesamt 2011, 2013, 2015, 2017, 2019, 2020; für Wintergerste, Triticale und Körnermais wurden Rohprotein und Stärke nach DLG-Futterwert-Tabelle (1997) verwendet; W, Wintersorte)

**Tabelle Anhang 1:** Auswirkungen der amylolytischen Aktivität zweier Milchsäurebakterien auf ausgewählte Nährstoffparameter

[g/kg TM]	Erbse <sup>1</sup>		Ackerbohne <sup>2</sup>		p-Wert			SEM
	MSB	MSB <sup>A</sup>	MSB	MSB <sup>A</sup>	A	Z	A*Z	
	TM [%]	72,4	71,1	72,3	71,9	n.s.	n.s.	
Rohfaser	67,4	65,1	92,8	93,3	< 0,001	n.s.	n.s.	1,634
aNDFom	115	108	144	148	< 0,001	n.s.	n.s.	3,081
ADFom	85,8	83,4	125	129	< 0,001	n.s.	n.s.	2,323
ADL	6,36	5,22	8,17	6,17	n.s.	0,049	n.s.	0,381
NFC	610	614	518	513	< 0,001	n.s.	n.s.	2,948
Stärke	526	535	447	447	< 0,001	n.s.	n.s.	3,334
Zucker	47,1	38,6	15,2	7,83	< 0,001	0,006	n.s.	1,34
Rohprotein	224	223	279	280	< 0,001	n.s.	n.s.	2,165
Reinprotein	191	187	232	232	< 0,001	n.s.	n.s.	1,755
Proteinlöslichkeit [% d. RP]	58,7	65,0	68,1	66,3	0,016	n.s.	n.s.	1,046

<sup>1</sup> „Alvesta“, Probenmaterial 1 und „E.F.B.33“; Probenmaterial 5 und „Astronaut“, Probenmaterial 3, n = 9; <sup>2</sup> „Taifun“, Probenmaterial 7 und „Fanfare“, Probenmaterial 6 (Tabelle 6), n = 6; ADFom, saure Detergentienfaser abzüglich Rohasche; ADL, Saures Detergentienlignin, acid detergent lignin; aNDFom, neutrale Detergentienfaser behandelt mit einer hitzestabilen Amylase abzüglich Rohasche; NFC, Nicht-Faser-Kohlenhydrate; MSB, Milchsäurebakterien („Josilac®classic“; L. plantarum, LSI NCIMB 30083 1k20736 und L256 NCIMB 30084 1k20737 sowie Pediococcus acidilactici P11 DSM 23689 1k1011 und P6 DSM 23688 1k1010; Josera GmbH & Co. KG, Kleinheubach); MSB<sup>A</sup>, Milchsäurebakterien mit amylolytischer Aktivität (L.plantarum Stamm, LMG 18053); n.s., nicht signifikant; Proteinlöslichkeit berechnet aus Proteinfraktion A + B1; RP, Rohprotein; A, Leguminosenart; TM, Trockenmasse; Z, Zugabe



**Tabelle Anhang 2:** Klassifizierung von Hefen- und Schimmelbefall an Silagen nach 7 Tagen aerober Lagerung

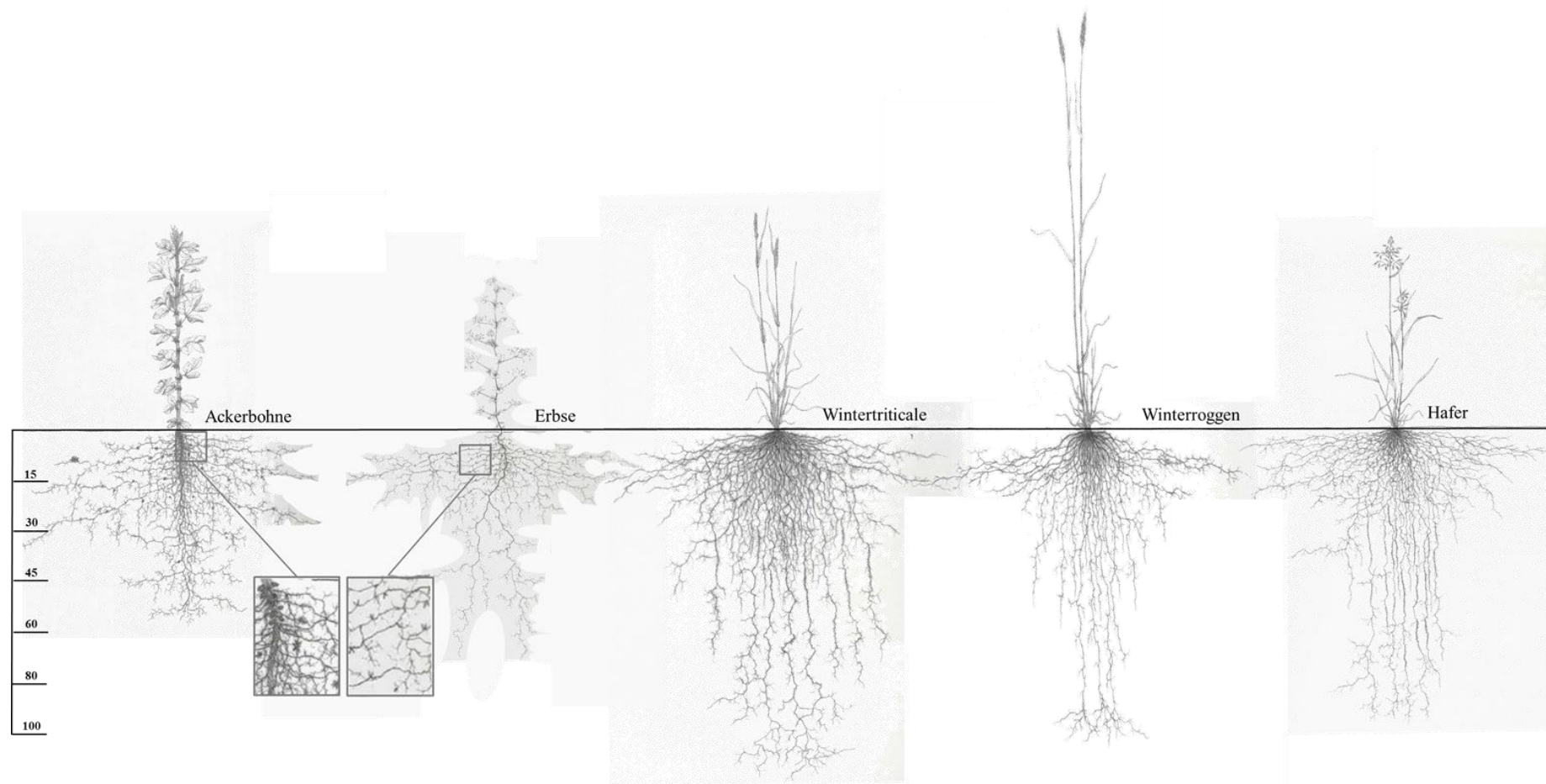
Schimmel	Hefen	Boniturnote
kein	keine	0
eine kleine Stelle	spurenweise	0,5
kein	vereinzelt (10 %)*	1
vereinzelt kleine Stellen	vermehrt (20 - 30 %)*	1,5
kein	durchgehend (> 50 %)*	2
vermehrt	durchgehend (> 50 %)*	2,5
durchgehend	stark (> 80 %) *	3
	Total verdorben	4

\*Anteil der mit Hefen belegten Silage

**Tabelle Anhang 3:** Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der aeroben Stabilität siliierter Ackerbohnen mit und ohne Zugabe von Milchsäurebakterien nach 7 Tagen aerober Lagerung (MW; n = 3)

	Ackerbohne, siliert, 7 d aerob gelagert						p-Wert	SEM
	Taifun			Fanfare				
	KON	MSB	MSB <sup>A</sup>	KON	MSB	MSB <sup>A</sup>		
aerobe Stabilität <sup>+</sup> [h]	150	168	168	168	168	168	n.s.	3,056
pH-Wert	6,0 <sup>a</sup>	4,4 <sup>b</sup>	4,6 <sup>b</sup>	6,2 <sup>a</sup>	4,4 <sup>b</sup>	4,5 <sup>b</sup>	< 0,001	0,027
TM <sub>k</sub> -Verlust <sub>ASTA</sub> [%]	2,80	3,17	4,63	1,97	2,07	4,00	n.s.	0,463
Schimmel*	0	0	0	0	0	0		
Hefen*	2	0	1	1	1	1		

„Taifun“, Probenmaterial 7; „Fanfare“, Probenmaterial 6 (Tabelle 6); <sup>+</sup> Zeitpunkt, bei dem sich die Silage  $\geq 3$  °C der Außentemperatur erwärmt; \* Bonitur nach Tabelle Anhang 2; KON, Kontrolle ohne MSB-Zugabe; MSB<sup>A</sup>, amylolytisch aktive Milchsäurebakterien als Zugabe, *L.plantarum* Stamm (LMG 18053); MSB, nicht amylolytisch aktive Milchsäurebakterien, „Josilac@classic“; *Lactobacillus plantarum*, LSI NCIMB 30083 1k20736 und L256 NCIMB 30084 1k20737 sowie *Pediococcus acidilactici* P11 DSM 23689 1k1011 und P6 DSM 23688 1k1010; Joser GmbH & Co. KG, Kleinheubach); n.s., nicht signifikant; TM<sub>k</sub>-Verlust<sub>ASTA</sub>, Rückgang der korrigierten Trockenmasse nach 7 Tagen aerober Lagerung; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede über alle Varianten mit  $p < 0,05$



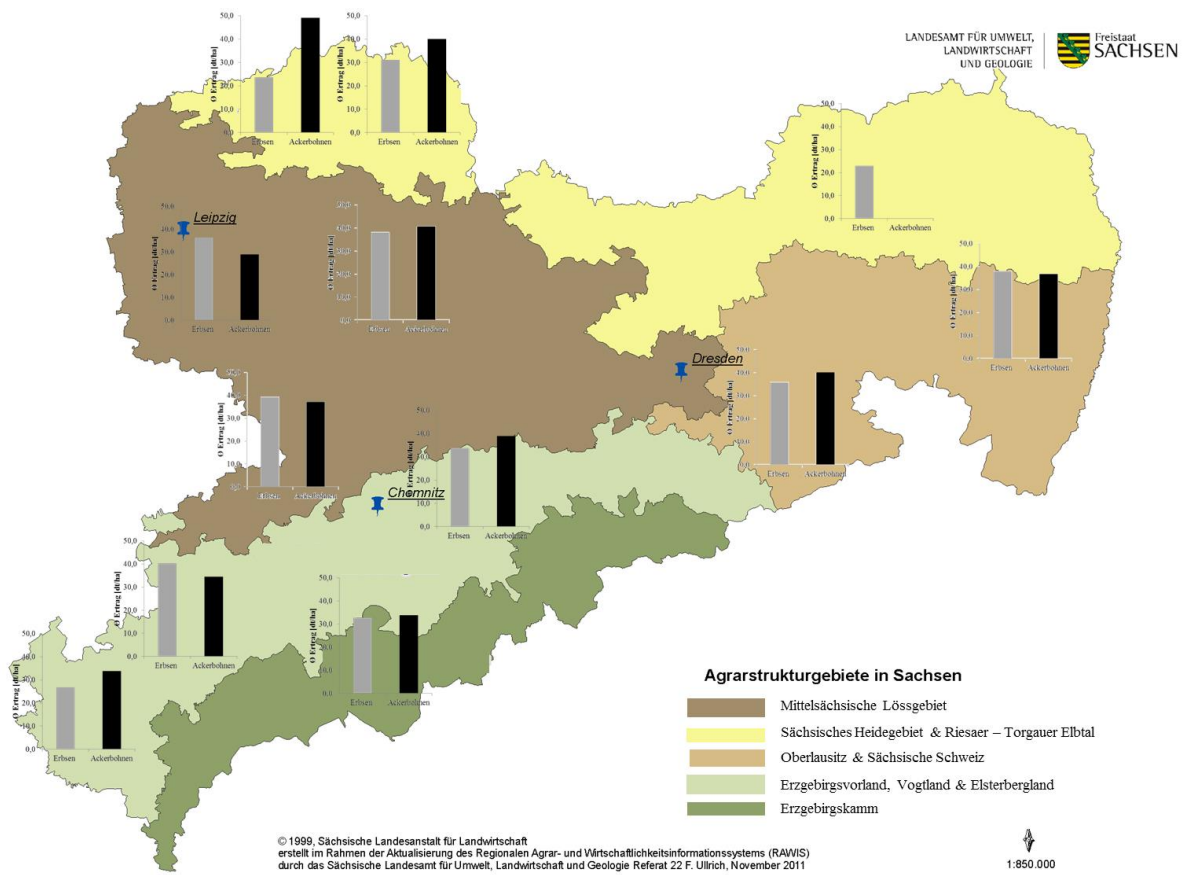
**Abbildung Anhang 4:** Bewurzelung ausgewählter Fruchtarten modifiziert nach KUTSCHERA et al. (2018)

**Tabelle Anhang 4:** Faktoren, die die Stärkeverdaulichkeit beeinflussen

Faktor	Beschreibung
Größe	<p>Es besteht eine negative Beziehung zwischen der Größe des Stärkekorns und dessen Verdaulichkeit (VQ). Große Granula weisen eine kleinere spezifische Oberfläche für den enzymatischen Abbau auf und haben damit eine geringere VQ (CAPRILES et al., 2008; KAUR et al., 2007; LANGWORTHY &amp; DEUEL, 1922; LINDEBOOM et al., 2004; SINGH et al., 2010; TESTER et al., 2006).</p> <p>Die höchste Stärke-VQ weist Amaranthstärke mit Korngrößen von 1 - 3 <math>\mu\text{m}</math> auf (CAPRILES et al., 2008)</p>
Oberflächenbeschaffenheit	<p>Glatte Oberflächen wie z.B. bei Weizen weisen eine schlechtere VQ auf als Furchen (z.B. Mais; SINGH et al., 2010) oder Knoten/Vorsprünge (z.B. Kartoffelstärke; SINGH et al., 2008).</p> <p>Getreidestärke hat eine höhere VQ im Vergleich zu Hülsenfruchtstärke, da Enzyme durch die porengeprägte Oberfläche besser in das Korn eindringen können = bessere Endokorrosion (DREHER et al., 1984). Damit steigt die verfügbare Fläche für den enzymatischen Abbau (z.B. Mais: Anstieg der Größe um 100<math>\mu\text{m}</math>; BLASEL et al., 2006).</p> <p>Bei Getreide verläuft die Hydrolyse punktförmig. Bei Mais, Sorghum und Hirse findet die Hydrolyse auf Grund der Gruben im Inneren des Stärkekorns statt. Proteine und Lipide auf der Oberfläche des Stärkekorns reduzieren Enzymbindung (DREHER et al., 1984; LANGWORTHY &amp; DEUEL, 1922; OATES, 1997; TESTER et al., 2006).</p>
Amylose-Amylopektin Verhältnis	<p>Es besteht eine positive Korrelation zwischen dem Amylosegehalt und dem Gehalt an resistenter Stärke, sodass die Stärke-VQ reduziert wird (ABBAS et al., 1987; BERRY, 1986; OATES, 1997; SINGH et al., 2010; THARANATHAN &amp; MAHADEVAMMA, 2003)</p> <p>Amylopektin ist hingegen leichter verdaulich, da die enthaltenen Glucoseketten der Amylose stärker durch Wasserstoffbrückenbindungen gebunden und für amylytische Angriffe weniger verfügbar sind (BECHTEL et al., 1990).</p> <p>Das Stärkekorn besteht meist zu 98 – 99 % aus Amylose + Amylopektin. Den Rest bilden Proteine, Fette, Mineralstoffe und Phosphor (COPELAND et al., 2009; LINDEBOOM et al., 2004).</p> <p>Leguminosen haben einen deutlich niedrigeren Anteil an Amylose (30 - 40 %) im Vergleich zu Mais-, Weizen-, Kartoffel-, Reis- und Maniokstärke mit 70 -80 % Amylose (SINGH et al., 2010; TAYLOR &amp; EMMANBUX, 2008).</p>
Molekularstruktur des Stärkekorns	<p>Ein höheres Molekulargewicht verschlechtert die enzymatische Hydrolyse. Die polymere Form (A, B, C) der Stärke beeinflusst die Hydrolyse ebenfalls, wobei der A-Type auf Grund kürzerer Doppelhelixen anfälliger gegen die enzymatische Hydrolyse ist</p>

	<p>im Vergleich zum B-Typ welcher längere Helixstrukturen aufweist. Die VQ beim C-Typ liegt zwischen Typ-A und B (LEHMANN &amp; ROBIN, 2007; OATES, 1997; SINGH et al., 2010).</p> <p>Hülsenfrüchte sind überwiegend den Typ C zuzuordnen und sind mit ihrer kristallinen Struktur weniger löslich als z.B. Getreidestärke (Typ A; RING et al., 1988).</p> <p>Amylose (Molekulargewicht: 105-106 g/mol) besteht aus 1.000 - 10.000 Glucoseeinheiten, wovon nur &lt; 0,5 % mit 1,6 glykosidischen Bindungen verzweigt sind, was zu geringen Verzweigungsgrad mit 3 - 11 Ketten mit 200 - 700 Glucoseresten pro Molekül führt. Amylopektin hat hingegen ein höheres Molekulargewicht <math>10^8</math> (107 - 109 g/mol) mit &gt; 1 Mio. Glucoseeinheiten, wovon 5 % aus 1,6 glykosidische Bindungen bestehen (= hochverzweigte/baumartige Struktur; COPELAND et al., 2009).</p>
Verzweigungsgrad	<p>Die Glukoseketten der Amylose sind durch Wasserstoffbrücken mehr aneinander gebunden und für den amylolytischen Prozess weniger verfügbar im Vergleich zu den vielen verzweigten Ketten des Amylopektins. Dieser höhere Verzweigungsgrad ermöglicht eine höhere Anzahl an enzymatischen Angriffspunkten und daher eine bessere Stärke-VQ (SAJILATA et al., 2006; SANROMAÍN et al., 1996).</p>
Physikalische Zustand durch technische Behandlung	<p>Temperaturen &gt; 100 °C (z.B. beim Kochen) zerstört die kristalline Struktur und H<sub>2</sub> bindet sich an die Hydroxylgruppe der Amylose/Amylopektin und erhöht die Quellung und Löslichkeit (REHMAN &amp; SHAH, 2005; SINGH et al., 2010). Die Stärke gelatinisiert als Folge und erleichtert die Hydrolyse in Abhängigkeit der Behandlungsdauer (z.B. Maismehl, 5 min = 94,8 %; 10 min = 97,2 % und 30 min = 99,3 %; EZEUGU et al., 2005).</p> <p>Zu beachten ist bei hydrothermischen Verfahren ein Verlust an Stärke von 1 – 7 % Auflösen/Solubilisierung der löslichen Stärke (MBOFUNG et al., 1999; REHMAN et al., 2001; YU-HUI, 1991; REHMAN &amp; SHAH, 2005)</p> <p>Auch Scherkräfte und Kneten/Formen/Pressen erhöhen, auf Grund der Veränderung der Oberflächenstruktur, die Stärkehydrolyse (ALONSO et al. 2000; ALTAN et al., 2009). Die Extrusion erzeugt dabei, als druck-hydrothermisches Verfahren, die effektivste Erhöhung der Stärkeverdaulichkeit (SINGH et al., 2010).</p> <p>Ein Zerkleinern der Körner (Quetschen, Schrotten, Mahlen) und damit der Stärke, führt zu einer Vergrößerung der Oberfläche. Zusätzlich wird die Stärke von Zellwand (Endospermzellwand) und gebundenen Proteinen getrennt und Hydrolysierbarkeit wird erhöht (AL-RABADI et al., 2009).</p> <p>Auch die Entkeimung, das Einweichen sowie die Keimung führen durch die einhergehende Reduzierung von Phytinsäure, Tanninen und Polyphenolen. Dies wiederum schafft Platz in der Stärkematrix und erleichtert das enzymatische Eindringen und</p>

	<p>weiterhin wird die Aktivität der <math>\alpha</math>-Amylase gehemmt was letztlich zu einer Erhöhung der Verdaulichkeit führt (REHMAN &amp; SHAH, 2005).</p> <p>Die Fermentation reduziert RS-Gehalt und ändert die Proteinfractionen. Dadurch wird die Stärke für die enzymatische Verdauung zugänglicher. Der Gesamtstärkegehalt kann während Fermentation sinken (ELKHALIFA et al., 2004).</p>
Nichtstärkehaltige Substanzen	<p>Aufliegende /absorbierende Schichten aus Nicht-Stärke-Material (Proteine, Fette, Polysaccharide, Mineralstoffe) blockieren die Absorptionsstellen der Enzymbindung und hemmen damit die Wirkung/Eindringen von Enzymen (BALDWIN et al., 1997; CLASSEN, 1996; ESCARPA et al., 1997; RING et al., 1988; OATES, 1997).</p> <p>Albumine, Globuline und Glutenine verkleben die Stärkegranula (Matrixstruktur) und verhindern enzymatischen Abbau (HAMAKER &amp; BUGUSU, 2003).</p> <p>Ebenso beeinflusst Phosphor (Phosphatmonoester und Phospholipid) die Stärke-VQ, da Phospholipide mit Amylose und Amylopektin Komplexe Strukturen bilden (= Phosphorylierung; SITOBY &amp; RAMADAN, 2001). Körnerleguminosen haben auf Grund höhere Phosphorgehalte (~ 4,7 g/kg TM) im Vergleich zu Kartoffel (2,7 g/kg TM), Gerste (3,9 g/kg TM) und Mais (2,6 g/kg TM) eine reduzierte Stärke-VQ (CROWE et al., 2000).</p> <p>Fettsäuren (Laurin-, Myristin-, Palmetin- und Ölsäure) reduzieren auf Grund der Komplexbildung ebenfalls die enzymatische Hydrolyse z.B. der Amylose um 35 % (CROWE et al., 2000).</p>



**Abbildung Anhang 5: Mittlere Erträge von Erbsen und Ackerbohnen in ausgewählten sächsischen Regionen in den Jahren 2010 - 2020**

**Tabelle Anhang 5:** Preiswürdigkeiten von Erbsen und Ackerbohnen auf Basis NEL/ME und Rohprotein

SES	Gerste							
	Rind*				Schwein**			
	10 €/dt		15 €/dt		10 €/dt		15 €/dt	
Erbse	Acker- bohne	Erbse	Acker- bohne	Erbse	Acker- bohne	Erbse	Acker- bohne	
30 €/dt	18,40	21,62	22,66	25,19	21,50	21,61	25,03	24,27
40 €/dt	21,69	26,44	25,95	30,02	26,32	27,03	29,85	29,70
50 €/dt	24,99	31,26	29,25	34,84	31,13	32,46	34,66	35,12

Berechnet nach Preiswürdigkeitsrechner LFULG, 2019; \* auf Basis NEL, Netto Energie Laktation und Rohprotein; \*\* auf Basis ME, Umsetzbarer Energie und Lysin; Ackerbohne: 13,8 MJ ME/ 8,6 MJ NEL/ 294 g RP/ 17,8 g Lys; Erbse: 15,2 MJ ME/ 8,5 MJ NEL/ 239 g RP/ 16,7 g Lys; SES: 14,1 MJ ME/ 8,3 MJ NEL/ 508 g RP/ 30,5 g Lys; Gerste: 12,5 MJ ME/ 7,5 MJ NEL/ 110 g RP/ 3,7 g Lys

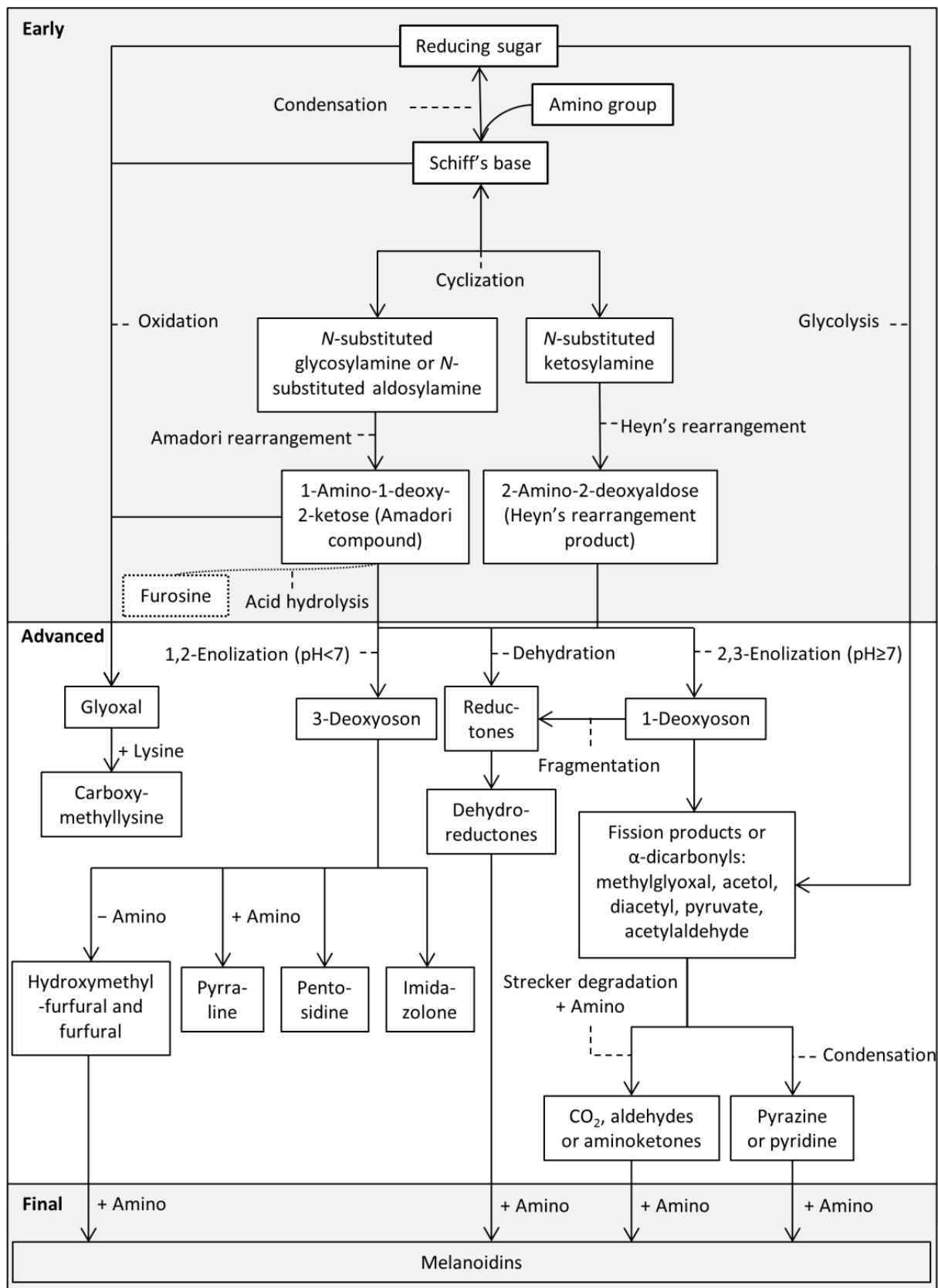
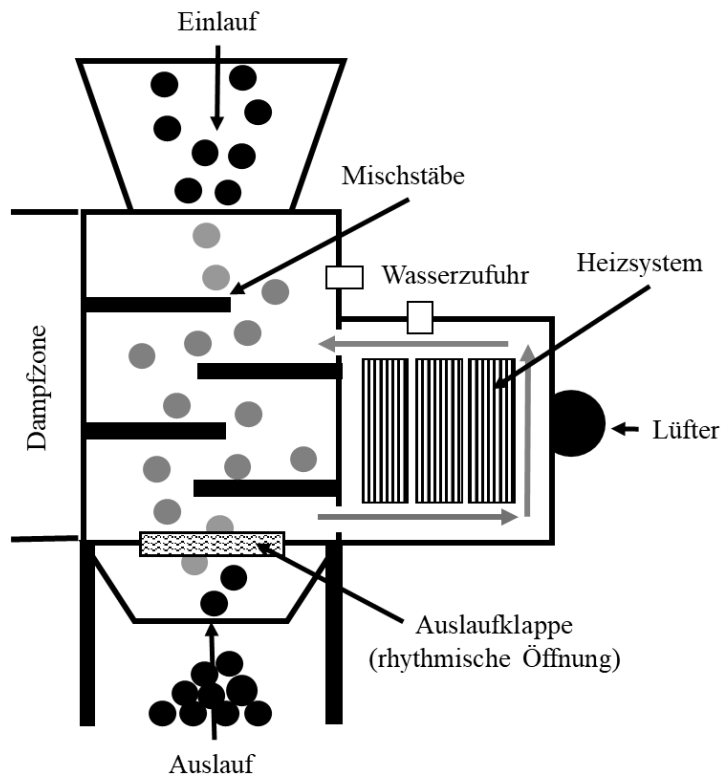


Abbildung Anhang 6: Bildung von Maillardprodukten (HULSHOF et al., 2016)

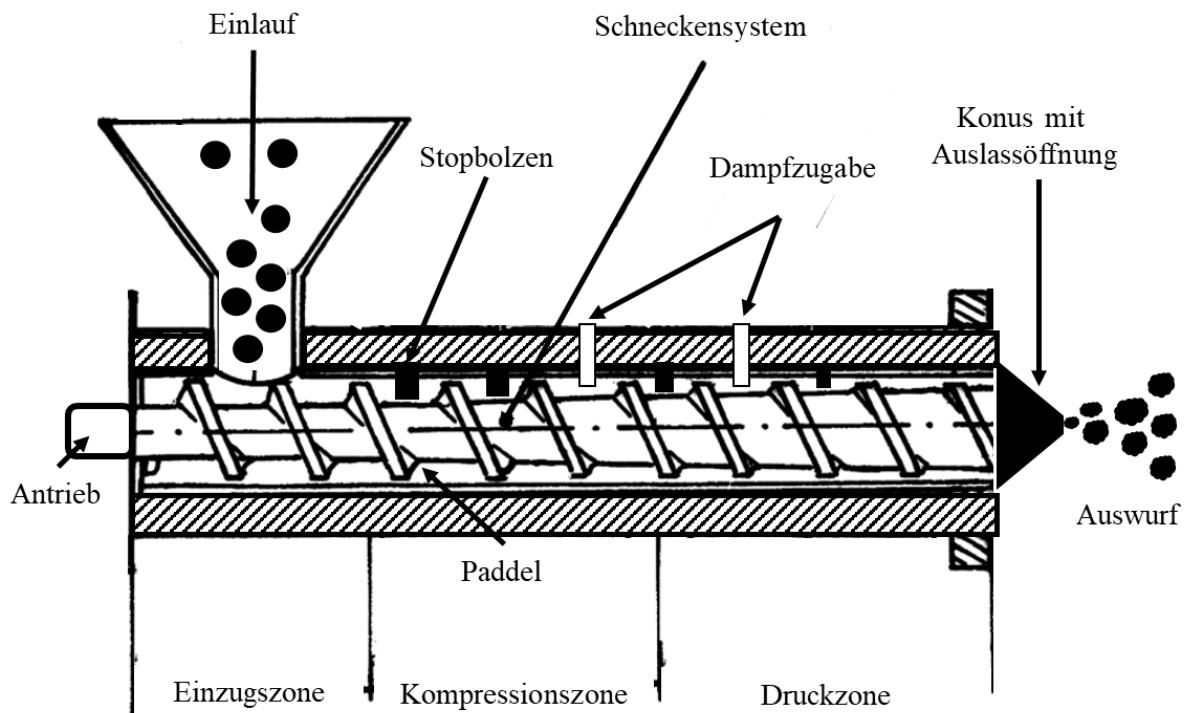


**Tabelle Anhang 6:** Verfahrensbeschreibung ausgewählter Wärmebehandlungsverfahren

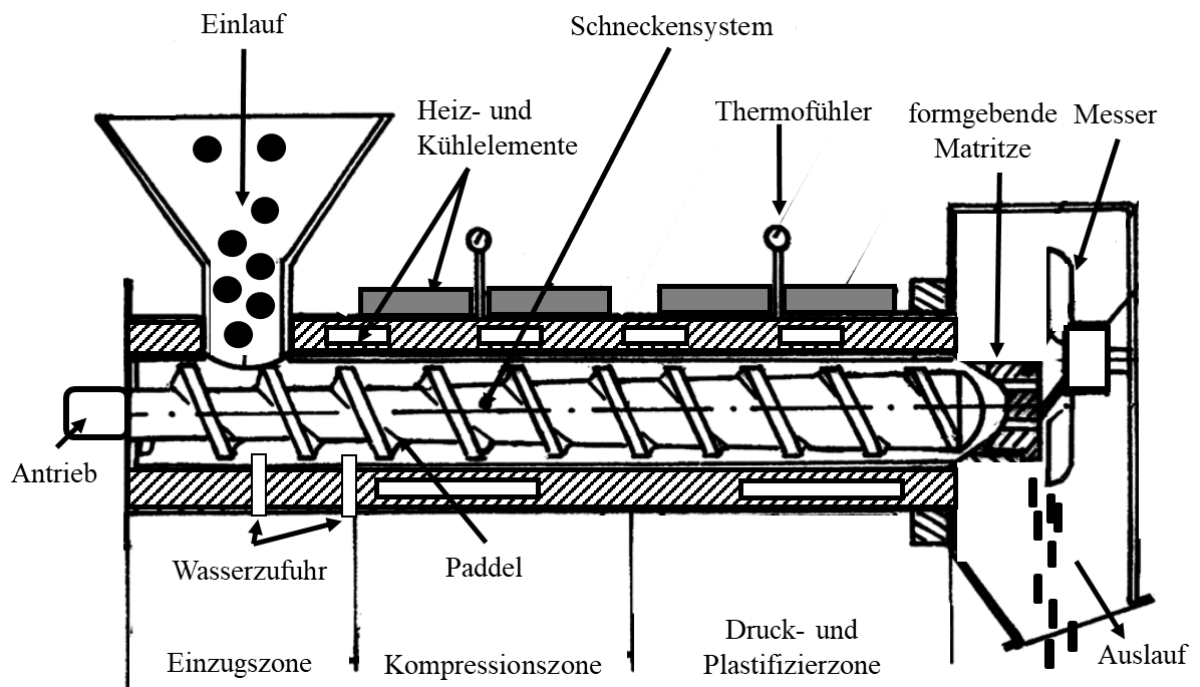
Form + Methode	Technik	Beschreibung	Quellen	
thermisch	Jet Sploder (HTST)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- heiße Luft umströmt Material (140 °C – 315 °C)</li> <li>- Korninnere heizt sich auf (90 – 95 °C), Körner schwellen an und platzen</li> <li>- Dauer: 26 - 80 Sekunden</li> </ul>	DEACON et al., 1988; JILG, 1986; FREITAG et al., 2007; MATEOS et al., 1999	
	Rösten	Rösttrommel (MTMT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wärme durch Gasbrenner</li> <li>- Material wird in heißer Trommel bewegt</li> <li>- Dauer: 2 - 5 Minuten</li> </ul>	CASTELLANOS-ONORIO et al., 2011; FREITAG et al., 2007; MATEOS et al., 1999
		Flachbettröster (MTMT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wärme durch Gasbrenner</li> <li>- heiße Luft (110 °C – 145 °C) steigt auf und umströmt das auf einem Förderband liegende Material und wendet es</li> </ul>	
		Mikronisieren (HTST)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wärme durch Infrarotstrahlen (700 – 1200 Mio. Megazyklen, 140 °C)</li> <li>- effiziente Erhitzung des Korninneren, Zellen platzen auf</li> <li>- Dauer: 50 – 90 Sekunden</li> </ul>	FREITAG et al., 2007; MATEOS et al., 1999
		Mikrowellen (HTST)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wärme durch Mikrowellenstrahlen (0,1 – 100 cm)</li> <li>- Energie wird vom Wasser absorbiert, es entsteht Reibung und Wärme im Korn</li> </ul>	MATEOS et al., 1999
hydrothermisch	Toasten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wärme durch Wasserdampf und Heißluft</li> <li>- Toastkammer mit heißem Wasserdampf und Heißluft</li> <li>- Heizsysteme (Elektrisch/Gas), Lüfter für Luftzirkulation</li> <li>- Mischstäbe in Toastkammer sorgen für Durchmischung des Materials</li> <li>- Durchsatzsteuerung über schwenkbare Auslaufklappen</li> </ul>	GOELEMA et al., 1998; HUISMAN & JANSMAN, 1991; VAN DER POEL, 1990	
druckhydrothermisch - mechanisch	Expansion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wärme durch Wasserdampf, Reibung und Druck</li> <li>- Transportschnecke mit Paddeln transportiert Material Richtung Auslassöffnung, durch Reibung entsteht Wärme</li> <li>- Stopbolzen an Innenwand durchmischen das Material</li> <li>- Konus am Ende des Expanders erhöht Druck + Wärme, es kommt zur mechanischen Verformung</li> <li>- Auslassöffnung steuerbar, dadurch Regelung der Behandlungsintensität (Temperatur, Druck)</li> <li>- Rückartiger Druckverlust nach Auslass, bis zu 8-fache Volumenvergrößerung des Materials</li> <li>- Expandat flockig, Pelletierung als Nachkonditionierung möglich</li> </ul>	STEINER & BELLOF, 2009; GRAF VON REICHENBACH, 2016	
	Extrusion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wärme durch Wasserdampf, Reibung und Druck</li> <li>- Transportschnecke mit Paddeln transportiert Material durch Extruder, durch Reibung entsteht Wärme</li> <li>- keine Stopbolzen zur Durchmischung</li> <li>- Matrize am Ende des Extruders erhöht Druck + Wärme und formt das feuchte Material, es kommt zur mechanischen Verformung</li> <li>- Messer schneiden das Extrudat in gewünschter Länge ab</li> <li>- Extrudat-Pellets</li> </ul>	CHEFTEL, 1985; MATEOS et al., 1999; PUVÁČA et al., 2012; BOROOJENI et al., 2016	



**Abbildung Anhang 7:** Aufbau einer mobilen Toastanlage der Firma Agrel



**Abbildung Anhang 8:** Aufbau eines Einwellenexpanders (modifiziert nach ELSTNER, 1997; MOŚCICKI & ZUILICHEM, 2011)



**Abbildung Anhang 9:** Schema eines Einwellen-Extruders (modifiziert nach MOŚCICKI & ZULICHEM, 2011)

**Tabelle Anhang 7:** Einsatzempfehlungen von Erbsen und Ackerbohnen bei Wiederkäuern (modifiziert nach FACCIOLONGO et al., 2014; HOFFMANN & STEINHÖFEL, 2010; INGALLS et al., 1980; JAQUES et al., 1994; JILG, 2003; JILG, 2015; JOHANSSON et al., 2011; LALLES, 1993; LANZA et al., 2011; LOBÓN et al., 2020; LOSAND et al., 2003; LOSAND et al., 2016; SURRA et al., 1992; YU et al., 2002b)

Tierart	Einsatzempfehlung (nativ, Menge je Tier und Tag [kg])		Begrenzender Faktor	Folgen
	Ackerbohne	Erbsen		
<b>Rind</b>				
<b>Kälber</b> (< 100 kg LM)	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	ANF (v.a beim Kalb), Methionin, geringe Rohprotein- und Stärkebeständigkeit, hohe ruminale Abbauraten, weites Energie/Eiweißverhältnis mit 22-24 g nRP je MJ NEL	Reduzierte Verdaulichkeit, negative Wechselwirkung zwischen Nährstoffen am Darm, Überempfindlichkeit, Leistungsdepressionen
<b>Aufzucht</b> (300 – 650 kg LM)	<b>3</b>	<b>3</b>		
<b>Laktierend</b> (650 kg LM)		<b>4 - 5</b>		
<b>Mast</b> (> 300 kg LM)		<b>2 - 2,5</b>		
<b>Schaf</b>				
<b>Laktierend</b> (100 kg LM)	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	Geringer Gehalt schwefelhaltiger AS für laktierende Tiere, hoher Anteil schnell abbaubarer Stärke, ANF	Reduzierte Milchleistung, verringerte Mastleistung und Schlachtkörperqualität, sinkende Futteraufnahme, Schlachtkörperverfettung
<b>Mast</b>	<b>0,2 - 0,5</b>	<b>0,2 - 0,5</b>		

ANF, Antinutritive Faktoren; AS, Aminosäuren; LM, Lebendmasse [kg]

**Tabelle Anhang 8:** Einsatzempfehlungen von Erbsen und Ackerbohnen beim Geflügel (modifiziert nach BELLOF & WEINDL, 2016; CASTELL et al., 1996; FARRELL et al., 1999; FRUI-NJI et al., 2007; HOFFMANN & STEINHÖFEL, 2010; JANKOWSKI & MIKULSKI, 2016; JEROCH, 2016b; JEROCH & DÄNICKE, 2016; LOSAND et al., 2003; RICHTER et al., 1981; RICHTER et al., 2008; THACKER et al., 2013)

Tierart	Einsatzempfehlung (nativ, % Mischung)		Begrenzender Faktor	Folgen
	Ackerbohne	Erbse		
<b>Geflügel</b>				
Legehennen	<b>5 - 10</b>	<b>30 - 40</b>	Pyrimidinglycoside (Vicin, Convicin), Tannine & Trypsininhibitoren, Versorgung schwefelhaltigen Aminosäuren (Methionin, Cystin), Niedrige P-Verfügbarkeit, Preis und Verfügbarkeit	Leistungsdepressionen, Morphologische und histologische Veränderungen der Darmwand und inneren Organe, Funktionsstörungen und pathologische Phänomene, Verminderte Eigewichte, Bruteiquitäten und Schlupfgewichte
Mastbroiler	<b>20 - 40</b>	<b>30</b>		
Mastputen	<b>5 - 15</b>	<b>30</b>		
Enten/Gänse	<b>5 - 20</b>	<b>20 - 30</b>		

**Tabelle Anhang 9:** Einsatzempfehlung für Erbsen und Ackerbohnen in der Fütterung von Monogastern (modifiziert nach BELLOF & WEINDL, 2016; CASTELL et al., 1996; DUNKEL et al., 2016; GRELA, 2016; HOFFMANN & STEINHÖFEL, 2010; JEROCH, 2016a; LEBAS, 2004; LOSAND et al., 2003; MAERTENS, 1998; MEYER, 1995; STEIN et al., 2004; STEIN et al., 2006)

Tierart	Einsatzempfehlung (nativ, % Mischung)		Begrenzender Faktor	Folgen
	Ackerbohne	Erbse		
<b>Schwein</b>				
Ferkel	< 5	20 - 30	Defizit an schwefelhaltigen Aminosäuren (Methionin), Tanningehalt > Proteaseinhibitoren	Verzehrs- und Leistungsminderung, reduzierte Fruchtbarkeit
tragend/ laktierend	< 15	20 – 25	> Lectine, bitterer Geschmack durch Tannine und Alkaloide, Toxizität Alkaloide, Lectine	
Mast	5 – 25	20 – 40		
<b>Pferd</b>	15	20	Proteinqualität, Gehalt spez. Kohlenhydrate (Oligosaccharide), antinutritiven Inhaltsstoffe <sup>1</sup>	Blähungen durch Schalenabbau im Dickdarm, Blinddarm, Verstopfungsgefahr durch Tannine (Gerbsäuren), Gallebildung, Gelenkverdickungen, Ödeme
<b>Kaninchen</b>			Antinutritive Substanzen	Störungen des Vorderen Verdauungstraktes
Absetzer	5	10	Defizit an schwefelhaltigen Aminosäuren (Methionin)	
Zucht	10	15		
Mast	15	10 – 18		

**Tabelle Anhang 10:** Verwendete Milchsäurebakterien (MSB)-Präparate

MSB-Präparat	Name	Milchsäurebakterien	Vertrieb	Hersteller
1	Kofasil LAC	<i>L. plantarum</i> DSM 3676/3677		Addcon
2	Josilac®classic	<i>L. plantarum</i> LSI NCIMB 30083 1k20736; L256 NCIMB 30084 1k20737; <i>P. acidilactici</i> P11 DSM 23689 1k1011; P6 DSM 23688 1k1010		Josera
3	jbs pentolac	<i>L. plantarum</i> DSM 16568/120720	Behrens- Scheessel	Chr. Hansen
4	SiloSolve HF	<i>L. lactis</i> , <i>L. plantarum</i> , <i>Enterococcus faecium</i> .		
5	M097-16 homofermentativ	<i>P. pentosaceus</i> , <i>L. paracasei</i>	Schaumann	Lactosan
6	M097-16 heterofermentativ	<i>L. brevis</i> , <i>L. buchneri</i>		
7	Ecosyl 100	<i>L. plantarum</i> MTD1 NCIMB 40027	Volac	Ecosyl
8	Biosil	<i>L. plantarum</i> DSM 8862; DSM 8866	Dr. Pieper TuP	
9	<i>P. pentosaceus</i> (PP R1094)	LPPR10940		
10	<i>L. plantarum</i> 120 (LP R1012)	LLPR10120		
11	<i>L. plantarum</i> 140 (LP R2014)	LLPR20140		
12	<i>P. acidilactici</i> (PA R2142)	LPAR21420		Lallemand

**Tabelle Anhang 11:** Ausgewählte Nährstoffparameter siliierter Erbsen verschiedener Sorten

[g/kg TM]		Erbsen, siliert [n = 3]								p-Wert			SEM
		Alvesta		Astronaute*		Astronaute**		E.F.B.33		S	Z	S*Z	
		KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON	MSB	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>				
A	[% d. RP]	14,8 <sup>c</sup>	11,9 <sup>d</sup>	18,3 <sup>a</sup>	17,2 <sup>ab</sup>	10,5 <sup>e</sup>	9,80 <sup>e</sup>	14,6 <sup>c</sup>	16,1 <sup>bc</sup>	< 0,001	0,006	< 0,001	0,123
B1	[% d. RP]	55,1 <sup>a</sup>	51,4 <sup>ab</sup>	52,5 <sup>ab</sup>	46,5 <sup>b</sup>	29,9 <sup>c</sup>	34,8 <sup>c</sup>	48,3 <sup>ab</sup>	36,6 <sup>c</sup>	< 0,001	0,004	0,002	0,614
B2	[% d. RP]	n.a.	33,0 <sup>c</sup>	n.a.	n.a.	55,5 <sup>a</sup>	51,6 <sup>ab</sup>	n.a.	43,0 <sup>bc</sup>	0,002	n.s.	-	1,172
B3	[% d. RP]	n.a.	3,37	n.a.	n.a.	3,67	3,23	n.a.	2,83	n.s.	n.s.	-	0,687
C	[% d. RP]	n.a.	0,33 <sup>b</sup>	n.a.	n.a.	0,47 <sup>b</sup>	0,57 <sup>b</sup>	n.a.	1,47 <sup>a</sup>	< 0,001	n.s.	-	0,036
NH <sub>3</sub>	[% d. GesamtN]	0,69 <sup>ab</sup>	0,77 <sup>a</sup>	0,25 <sup>ab</sup>	0,13 <sup>b</sup>	0,35 <sup>ab</sup>	0,35 <sup>ab</sup>	0,60 <sup>ab</sup>	0,43 <sup>ab</sup>	0,002	n.s.	n.s.	0,042
ADL		3,33	7,33	7,33	6,50	4,67	5,00	5,67	6,67	n.s.	n.s.	n.s.	0,571
Hemicellulose		39,6	27,0	22,1	26,1	25,6	28,5	32,1	35,8	n.s.	n.s.	n.s.	1,372
Cellulose		80,6 <sup>abc</sup>	66,6 <sup>c</sup>	69,6 <sup>c</sup>	75,9 <sup>bc</sup>	72,7 <sup>c</sup>	79,3 <sup>bc</sup>	92,7 <sup>ab</sup>	98,2 <sup>a</sup>	< 0,001	n.s.	0,042	1,355
NFC		619	637	612	537	618	609	594	587	n.s.	n.s.	n.s.	9,174

\* Erntejahr 2017; \*\* Erntejahr 2018; A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; B2, mäßig schnell abbaubares Reineiweiß; B3, langsam abbaubares Reineiweiß; C, unlösliches zellwandgebundenes Protein; Cellulose = ADFom – ADL (Saures Detergentienlignin, acid detergent lignin); E.F.B.33, Sortenname Wintererbse; Hemicellulose = aNDFom – ADFom; NFC, Nicht-Faser-Kohlenhydrate; KON, Kontrolle ohne MSB-Zugabe; MSB, Milchsäurebakterien als Zugabe (MSB2); n.a., nicht analysiert; n.s., nicht signifikant; Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1; RP, Rohprotein; S, Sorte; TM, Trockenmasse; Z, Zugabe MSB, Milchsäurebakterien als Zugabe (MSB2); <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede über alle Varianten mit p < 0,05



**Tabelle Anhang 12:** Ausgewählte Nährstoffparameter siliierter Ackerbohnen verschiedener Sorten

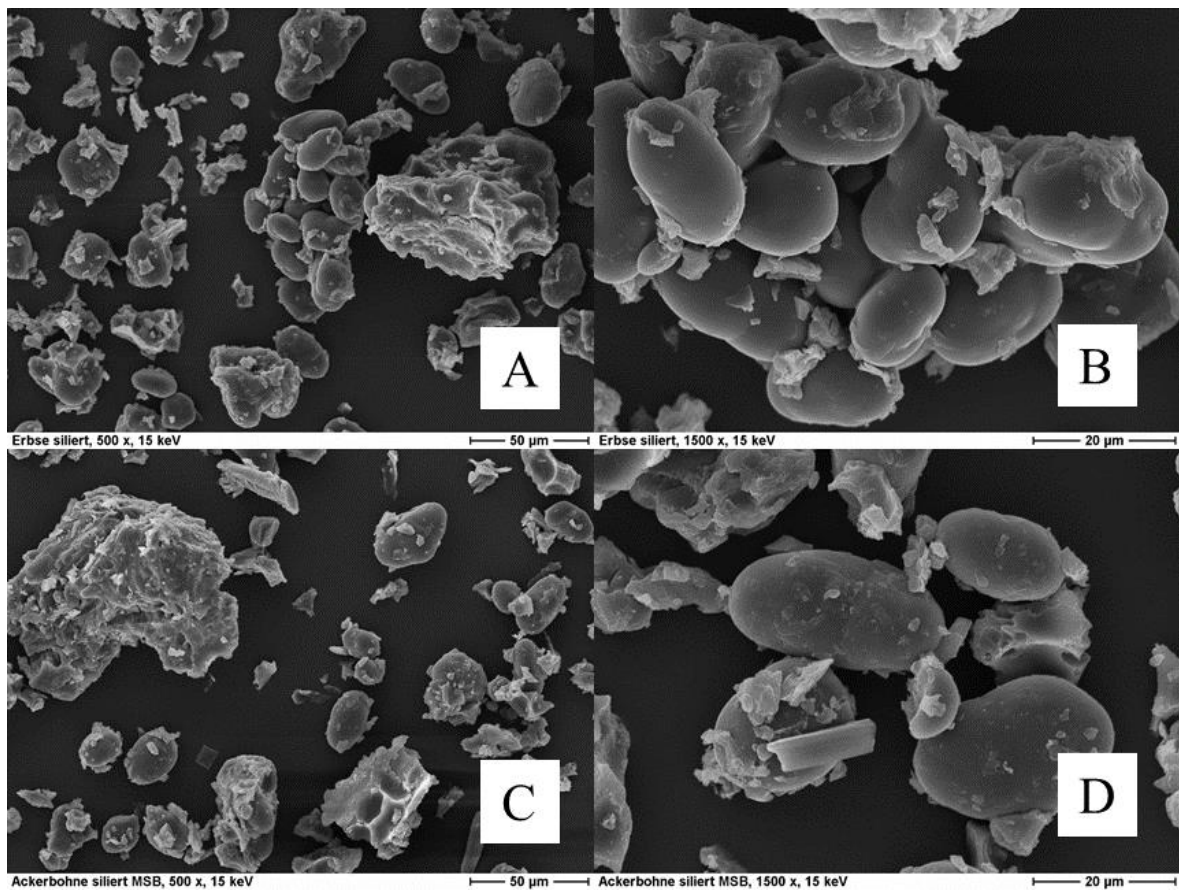
[g/kg TM]		Ackerbohne, siliert [n = 3]								<i>p</i> -Wert			SEM
		Fanfare (trockenreif)		Taifun* (trockenreif)		Taifun** (teigreif)		<i>S</i>	<i>Z</i>				
		KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>	KON	MSB			KON <sub>rück</sub>	MSB <sub>rück</sub>		
A	[% d. RP]	17,6 <sup>ab</sup>	11,4 <sup>b</sup>	21,0 <sup>a</sup>	16,4 <sup>ab</sup>	16,9 <sup>ab</sup>	15,7 <sup>ab</sup>	20,5 <sup>a</sup>	18,2 <sup>a</sup>	0,010	0,002	n.s.	0,480
B1	[% d. RP]	49,4	44,1	49,3	53,5	50,1	50,2	47,3	47,3	n.s.	n.s.	n.s.	0,877
B2	[% d. RP]	n.a.	41,2	n.a.	28,4	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.s.	-	-	2,668
B3	[% d. RP]	n.a.	1,97	n.a.	0,82	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	< 0,001	-	-	0,024
C	[% d. RP]	n.a.	1,33	n.a.	0,88	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,004	-	-	0,044
NH <sub>3</sub> [% d. Gesamt-N]		0,85	0,54	0,84	0,71	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.s.	n.s.	n.s.	0,077
ADL		6,67	11,0	5,33	5,33	5,33	17,00	7,00	7,33	n.s.	n.s.	n.s.	1,298
Hemicellulose		17,2	24,2	18,5	13,9	26,7	24,7	19,8	18,3	n.s.	n.s.	n.s.	1,641
Cellulose		141 <sup>a</sup>	128 <sup>ab</sup>	119 <sup>abc</sup>	106 <sup>bc</sup>	111 <sup>abc</sup>	91,6 <sup>c</sup>	108 <sup>abc</sup>	106 <sup>bc</sup>	0,001	0,030	n.s.	2,501
NFC		509 <sup>b</sup>	506 <sup>b</sup>	509 <sup>b</sup>	530 <sup>a</sup>	466 <sup>a</sup>	482 <sup>cd</sup>	471 <sup>cd</sup>	487 <sup>c</sup>	< 0,001	< 0,001	0,017	1,225

\* Erntejahr 2016; \*\* Erntejahr 2017; A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; B2, mäßig schnell abbaubares Reineiweiß; B3, langsam abbaubares Reineiweiß; C, unlösliches zellwandgebundenes Protein; Cellulose = ADFom – ADL (Saures Detergentienlignin, acid detergent lignin); E.F.B.33, Sortenname Wintererbse; Hemicellulose = aNDFom – ADFom; NFC, Nicht-Faser-Kohlenhydrate; KON, Kontrolle ohne MSB-Zugabe; MSB, Milchsäurebakterien als Zugabe (MSB2); n.a., nicht analysiert; n.s., nicht signifikant; Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1; RP, Rohprotein; S, Sorte; TM, Trockenmasse; Z, Zugabe MSB, Milchsäurebakterien als Zugabe (MSB2); <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede über alle Varianten mit  $p < 0,05$

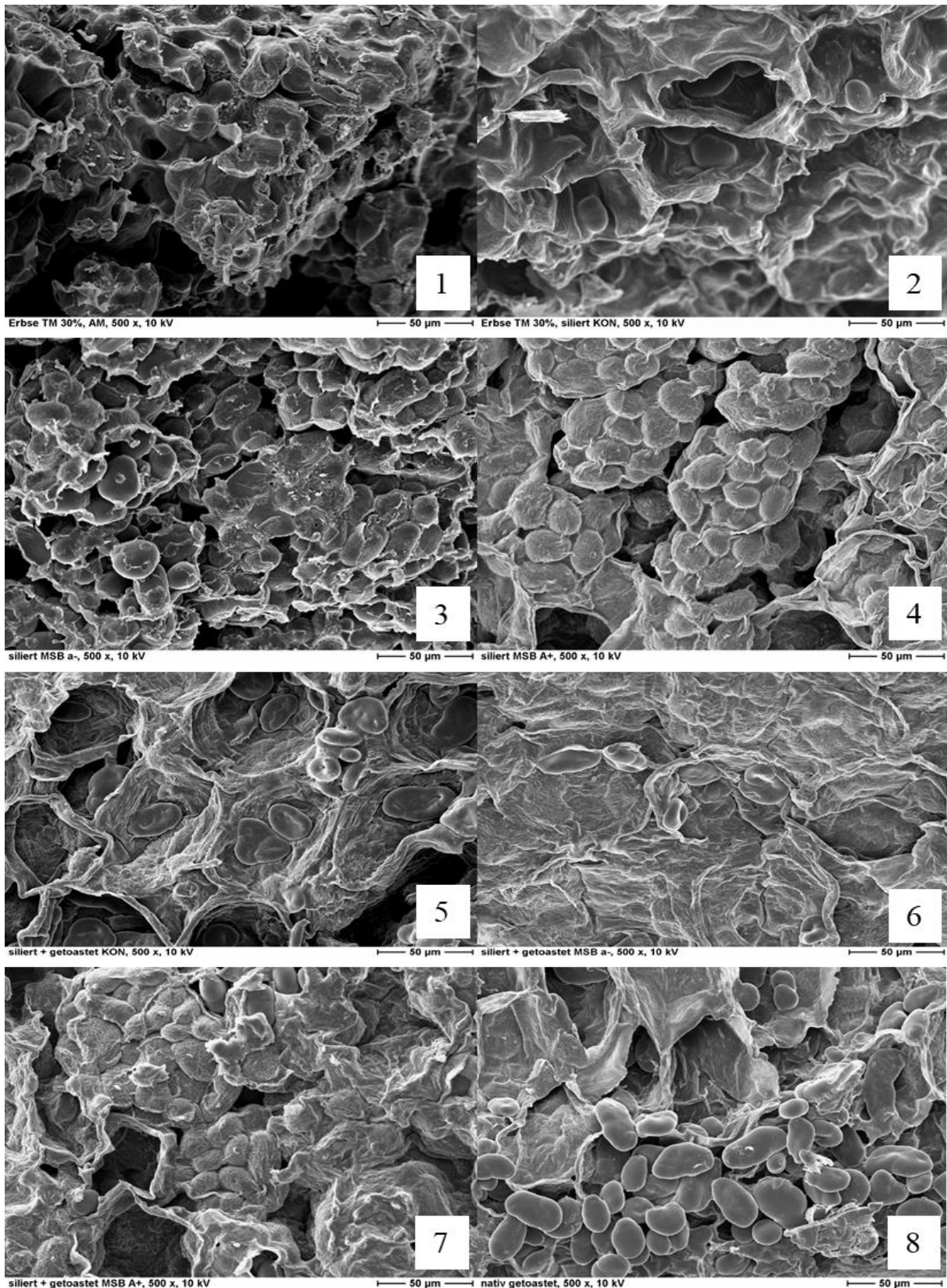
**Tabelle Anhang 13:** Auswirkung der amylolytischen Aktivität von Milchsäurebakterien als Silierzusatz bei ausgewählten Erbsen auf den Siliererfolg (n = 3)

[% d. TM]	Erbsen, siliert (rückbefeuchtet)						<i>p</i> -Wert			SEM
	Alvesta		E.F.B. 33		Astronaute		<i>S</i>	<i>Z</i>	<i>S*Z</i>	
	MSB	MSB <sup>A</sup>	MSB	MSB <sup>A</sup>	MSB	MSB <sup>A</sup>				
TM [g/kg FM]	706 <sup>a</sup>	708 <sup>a</sup>	702 <sup>a</sup>	700 <sup>a</sup>	683 <sup>b</sup>	680 <sup>b</sup>	< 0,001	n.s.	n.s.	1,141
pH-Wert	4,6 <sup>b</sup>	4,8 <sup>a</sup>	4,4 <sup>c</sup>	4,4 <sup>c</sup>	4,3 <sup>d</sup>	4,3 <sup>d</sup>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,003
Milchsäure	1,76 <sup>bc</sup>	1,82 <sup>b</sup>	1,72 <sup>bc</sup>	1,17 <sup>c</sup>	3,57 <sup>a</sup>	3,49 <sup>a</sup>	< 0,001	n.s.	n.s.	0,051
Essigsäure	0,14 <sup>b</sup>	0,11 <sup>b</sup>	0,11 <sup>b</sup>	0,06 <sup>c</sup>	0,32 <sup>a</sup>	0,28 <sup>a</sup>	< 0,001	< 0,001	n.s.	0,004
Ethanol	0,24 <sup>d</sup>	0,38 <sup>c</sup>	0,30 <sup>cd</sup>	0,23 <sup>d</sup>	0,89 <sup>b</sup>	1,20 <sup>a</sup>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,007
TM-Verlust [%]	2,6 <sup>ab</sup>	3,1 <sup>a</sup>	1,1 <sup>b</sup>	1,6 <sup>ab</sup>	2,5 <sup>ab</sup>	2,7 <sup>ab</sup>	0,006	n.s.	n.s.	0,161
pH-Wert <sub>ASTA</sub> <sup>+</sup>	4,6 <sup>b</sup>	4,8 <sup>a</sup>	4,4 <sup>c</sup>	4,1 <sup>d</sup>	4,3 <sup>c</sup>	4,4 <sup>c</sup>	< 0,001	< 0,001	0,003	0,008
aerobe Stabilität <sup>++</sup> [h]	168	168	168	168	168	168	-	-	-	0,000

„Alvesta“, Probenmaterial 1; „Astronaute“, Probenmaterial 3; „E.F.B.33“, Probenmaterial 5 (Tabelle 6); + nach 7 d aerober Lagerung; ++ Zeitpunkt, bei dem sich die Silage  $\geq 3$  °C der Außentemperatur erwärmt; MSB, MSB ohne amylolytischer Aktivität; MSB<sup>A</sup>, MSB mit amylolytischer Aktivität; n.s., nicht signifikant; S, Sorte; TM, Trockenmasse; Z, Zugabe; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede über alle Varianten mit  $p < 0,05$

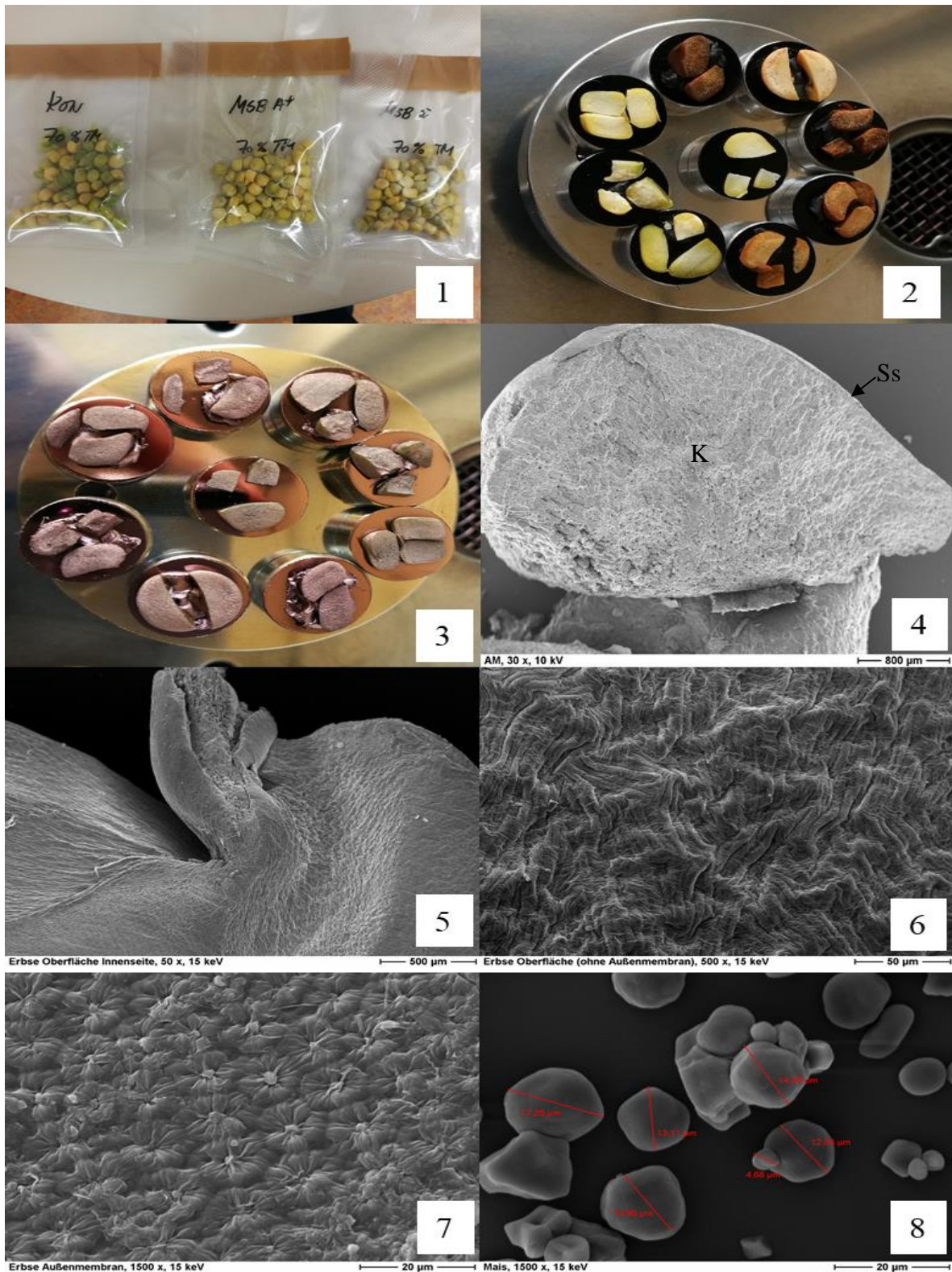


**Abbildung Anhang 10:** Elektronenmikroskopische Aufnahmen siliierter (MSB) Erbsen der Sorte „Alvesta“ (A, 500-fache Vergrößerung; B, 1500-fache Vergrößerung) sowie siliierter (MSB) der Ackerbohnen der Sorte „Taifun“ (C, 500-fache Vergrößerung; D, 1500-fache Vergrößerung)

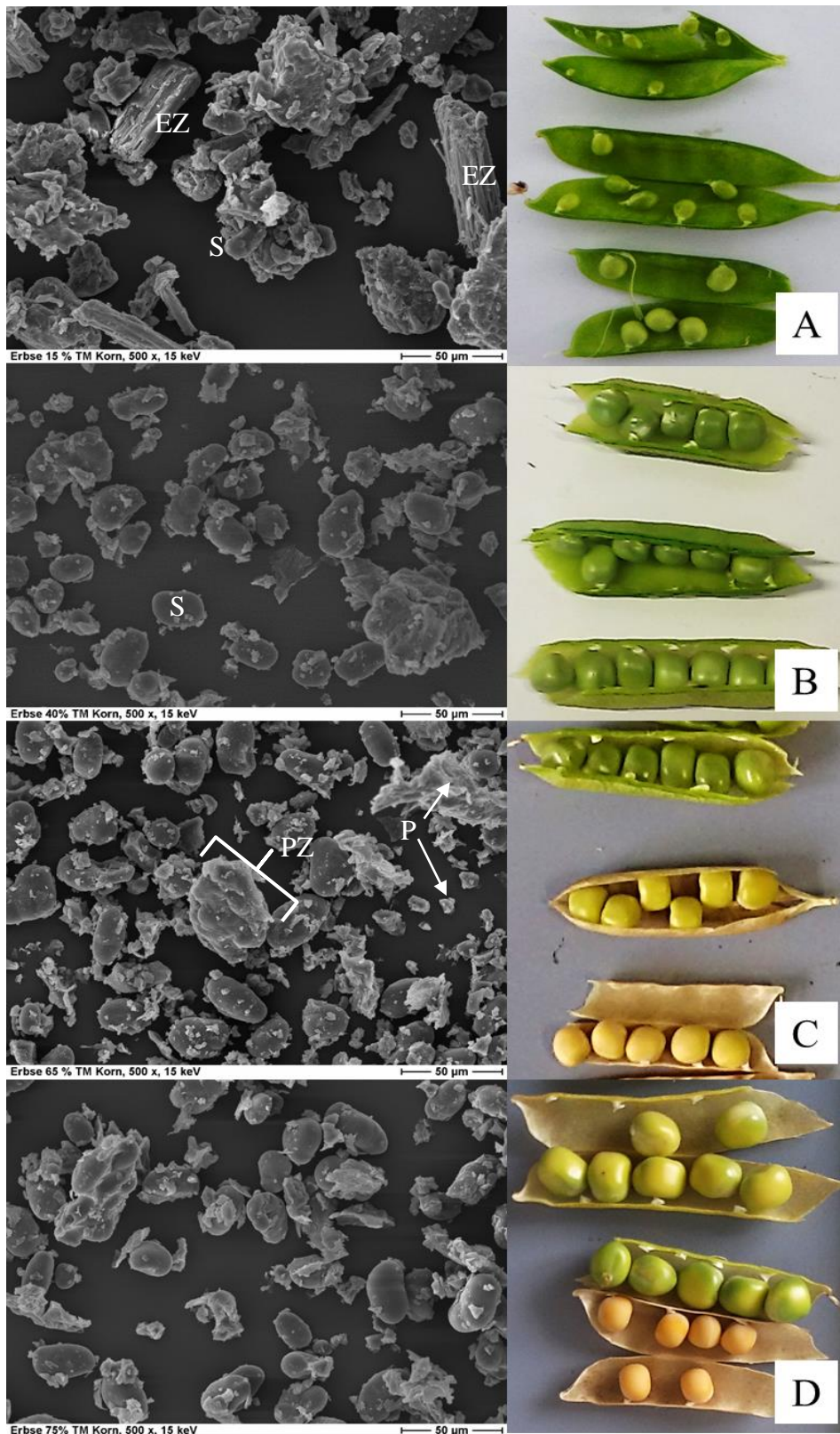


**Abbildung Anhang 11:** Elektronenmikroskopische Aufnahmen in 500-facher Vergrößerung der Erbse „Astronaute“ (frühes Reifestadium, 30 % TM, Probenmaterial 4) zu ausgewählten Behandlungen (1 = nativ, 30 % TM; 2 = siliert, KON; 3 = siliert, MSB; 4 = siliert, MSBA; 5 = siliert + getoastet, KON; 6 = siliert + getoastet, MSB; 7 = siliert + getoastet, MSBA; 8 = getoastet)



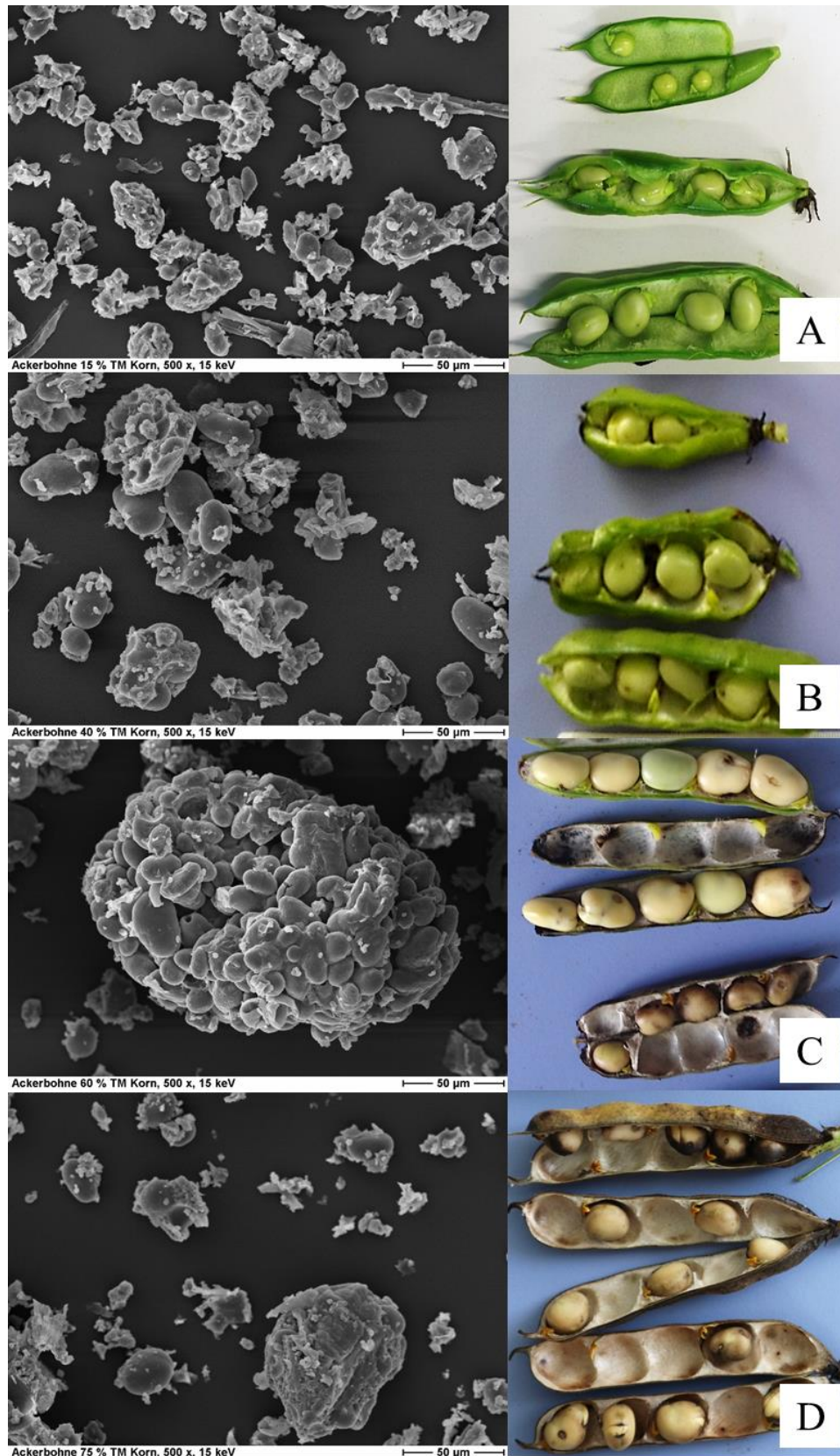


**Abbildung Anhang 12:** Eindrücke der elektronenmikroskopischen Untersuchungen der Erbse „Astronaute“ (30 % TM, 70 % TM, Sorte 4; 1 = vakuumverpackte halbierte Erbsen zur Silierung; 2 = Erbsenstücke der Behandlungsstufen 30 % TM; 3 = Erbsenstücke wurden mit Gold beplattert; 4 = Erbsenstück/Keimblatt, nativ; 5 = Innenseite einer halbierten Erbse mit Keimling; 6 = Oberfläche des Erbsenstückes ohne Außenmembran (Epidermis); 7 = Außenmembran/Samenschale mit geschlossenen Spaltöffnungen; 8 = Maisstärke, nativ; K, Keimblatt; Ss, Samenschale nach ROCHAT & BOUTIN, 1992; VAN DONGEN et al., 2003)









**Abbildung Anhang 13:** Elektronenmikroskopische (500-fache Vergrößerung) und natürliche Aufnahmen der Erbse „Astronaute“ (Probenmaterial 5; Tabelle 6) während der Abreife (A = Kornbildung, 15 % TM,  $BBCH_{\text{Erbse}} 72$ ; B = Grünreife, 40 % TM,  $BBCH_{\text{Erbse}} 78$ ; C = Beginn Teigreife, 65 % TM,  $BBCH_{\text{Erbse}} 81$ ; D = Beginn Trockenreife, 75 % TM,  $BBCH_{\text{Erbse}} 85$ ; EZ, Epidermis/Epidermalzellen; PZ, Parenchymzelle; P, Parenchym/zerstörte Parenchymzellen; S, Stärke nach VAN DONGEN et al., 2003)











**Abbildung Anhang 14:** Elektronenmikroskopische (500-fache Vergrößerung) und natürliche Aufnahmen der Ackerbohne „Taifun“ (Probenmaterial 8; Tabelle 6) während der Abreife (A = Kornbildung, 15 % TM, BBCH<sub>Bohne</sub> 75; B = Grünreife, 40 % TM, BBCH<sub>Bohne</sub> 78; C = Beginn Teigreife, 60 % TM, BBCH<sub>Bohne</sub> 82; D = Beginn Trockenreife, 75 % TM, BBCH<sub>Bohne</sub> 86)

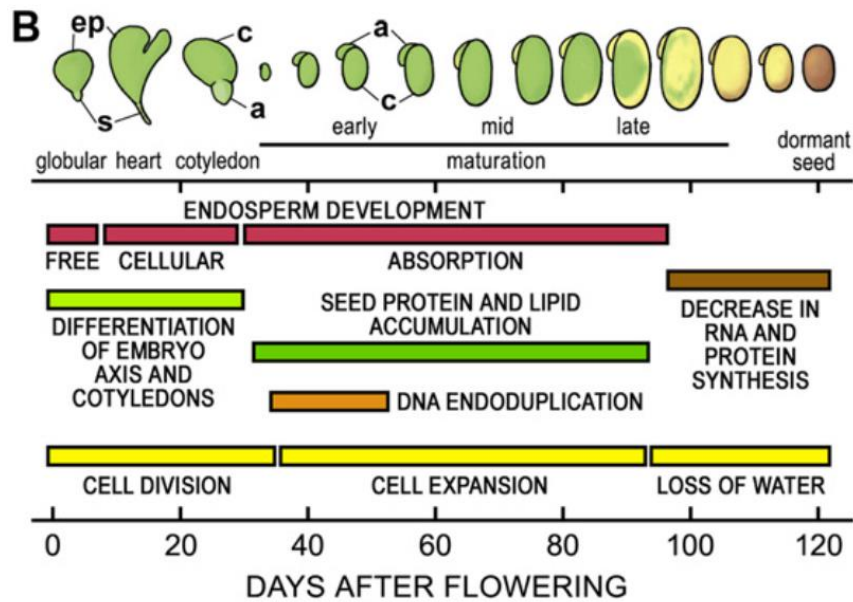
**Tabelle Anhang 14:** BBCH Code für Erbse ab Fruchtentwicklung am Beispiel der Sorten „Alvesta“ und „Astronaute“ (Erntejahr 2017; nach WEBER & BLEIHOLDER, 1990; FELLER et al., 1995)

BBCH	Beschreibung	Foto
<b>Makrostadium 7: Fruchtentwicklung</b>		
71 - 75	10 – 50 % der Hülsen haben sortentypische Länge erreicht, Hülsenlängen 3 – 7 cm, Körner sind hellgrün und teilweise verfestigt mit einem Korndurchmesser von 3 – 8 mm, mittlere - große Homogenität der Kornentwicklung, Saftaustritt beim Zerdrücken, Korn-TM 15 – 25 %, Pflanzen-TM 20 %	
76 - 78	60 – 80 % der Hülsen haben sortentypische Länge erreicht, Hülsenlängen 5 – 7 cm, Körner sind grün mit einem Korndurchmesser von 5 – 10 mm, sehr große Homogenität der Kornentwicklung, Korninhalt verfestigt, Korn-TM 30 % - 40 %, Pflanzen-TM 30 %	
79	> 90 % Hülsen haben sortentypische Größe von 7 cm erreicht, Körner sind voll ausgebildet, grün mit beginnender Gelbfärbung und verfestigt, Korndurchmesser 10 mm, Ende Grünreife, Korn-TM 50 %, Pflanzen-TM 40 %	
<b>Makrostadium 8: Frucht- und Samenreife</b>		
81 - 85	10 – 50 % der Hülsen sind reif, < 50 % der Körner sind sortentypisch gelb gefärbt und hart, mittlere Homogenität der Kornreife, Ø Korn-TM 55 – 70 %, Pflanzen-TM 45 – 60 %	
86 - 88	60 – 80 % der Hülsen sind reif, < 80 % der Körner sind sortentypisch gelb gefärbt und hart, große Homogenität der Kornreife, Ø Korn-TM 75 – 85 %, Pflanzen-TM 70 %	
89	Voll- bzw. Trockenreife, alle Hülsen und Körner sind trocken, Korn-TM > 90 %, Pflanzen-TM > 80 %; anschließend Makrostadium 9: Absterben der Pflanze	

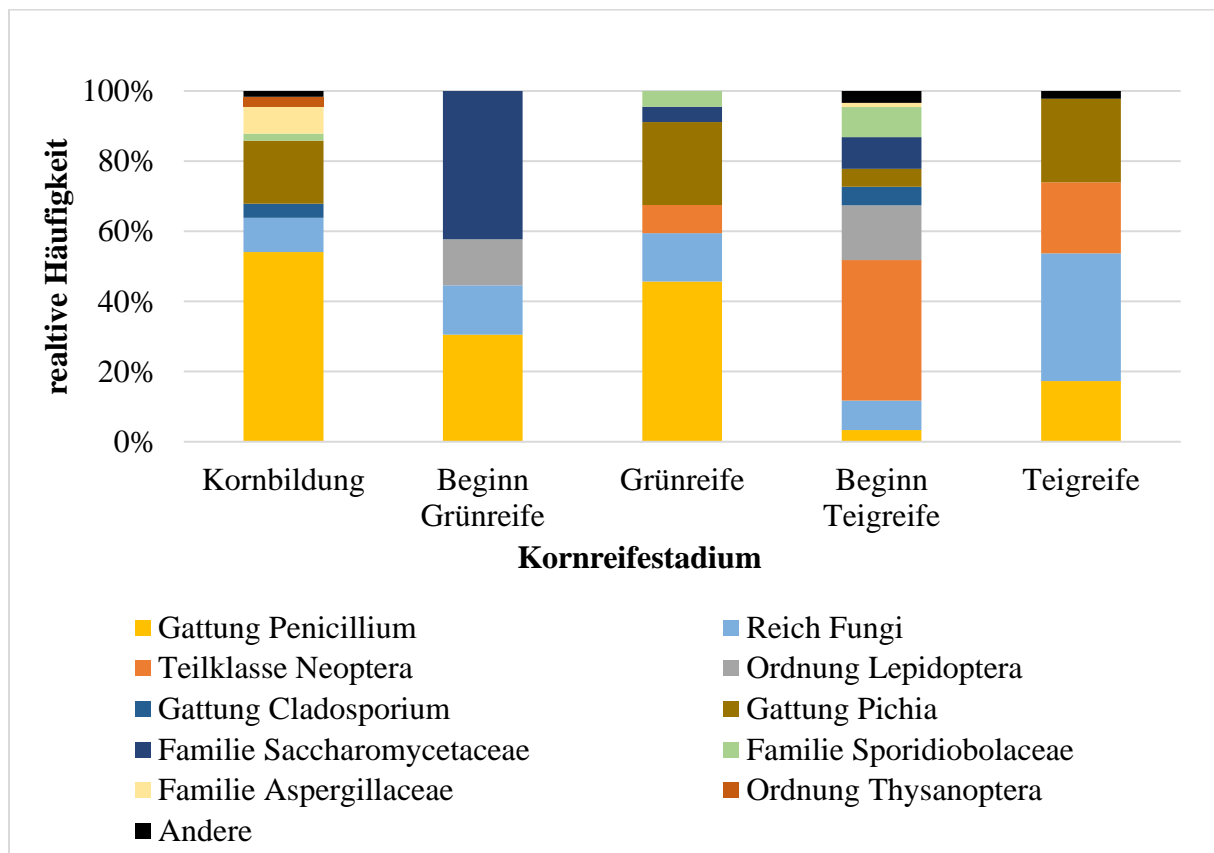


**Tabelle Anhang 15:** BBCH Code für Ackerbohnen ab Fruchtentwicklung am Beispiel der Sorte „Taifun“ (Erntejahr 2017; nach WEBER & BLEIHOLDER, 1990; FELLER et al., 1995)

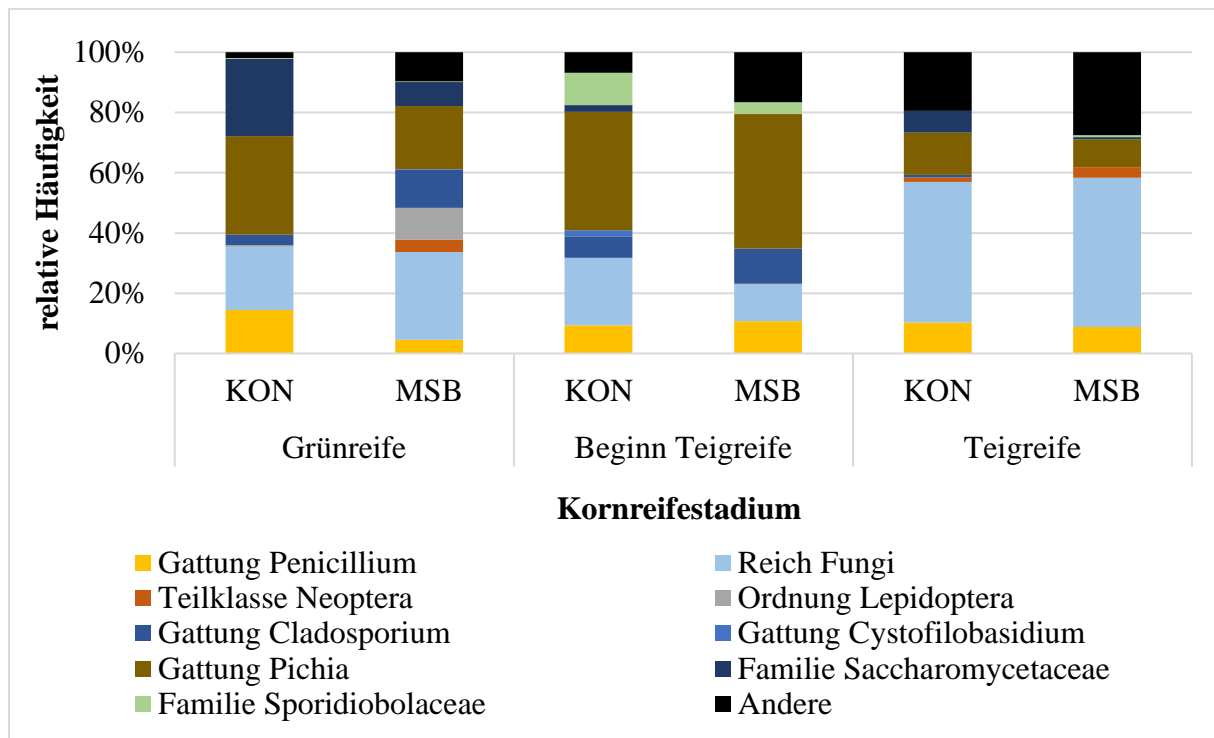
BBCH	Beschreibung	Foto
<b>Makrostadium 7: Fruchtentwicklung</b>		
71 - 75	10 – 50 % der Hülsen haben sortentypische Länge erreicht, Hülsenlängen 3 – 10 cm, Körner sind hellgrün und teilweise verfestigt mit einem Korndurchmesser von 3 – 14 mm, mittlere Homogenität der Kornentwicklung, Saftaustritt beim Zerdrücken, Korn-TM 15 %, Pflanzen-TM 20 %. Hinweis: schwarze Punkte auf dem Korn deuten auf Ackerbohnenkäferbefall hin!	
76 - 78	60 – 80 % der Hülsen haben sortentypische Länge erreicht, Kornanlagen sind in der Hülse klar erkennbar, Hülsenlängen 5 – 10 cm, Körner sind hellgrün mit einem Korndurchmesser von 7 – 14 mm, sehr große Homogenität der Kornentwicklung, Korninhalt verfestigt, Korn-TM 20 % - 30 %, Pflanzen-TM 20 %	
79	> 90 % Hülsen haben sortentypische Größe von 7 - 10 cm erreicht, Körner sind voll ausgebildet, hellgrün mit beginnender Gelbfärbung und verfestigt, Korndurchmesser bis 17 mm, Ende Grünreife, Korn-TM 35 - 45 %, Pflanzen-TM 30 %	
<b>Makrostadium 8: Frucht- und Samenreife</b>		
81 - 85	10 – 50 % der Hülsen sind reif und dunkel, < 50 % der Körner sind sortentypisch dunkel grau (z.B. „Taifun“) gefärbt und hart, mittlere Homogenität der Kornreife, Ø Korn-TM 60 %, Pflanzen-TM 40 %, Hinweis: Ackerbohnenlarven erkennbar!	
86 - 88	60 – 80 % der Hülsen sind reif und dunkel, < 80 % der Körner sind sortentypisch grau gefärbt und hart, große Homogenität der Kornreife, Ø Korn-TM 70 - 80 %, Pflanzen-TM 45 - 60 %	
89	Voll- bzw. Trockenreife, alle Hülsen und Körner sind trocken, Korn-TM > 90 %, Pflanzen-TM > 80 %; anschließend Makrostadium 9: Absterben der Pflanze, Hinweis: Ackerbohnenkäfer vollständig entwickelt und teilweise ausgeflogen!	



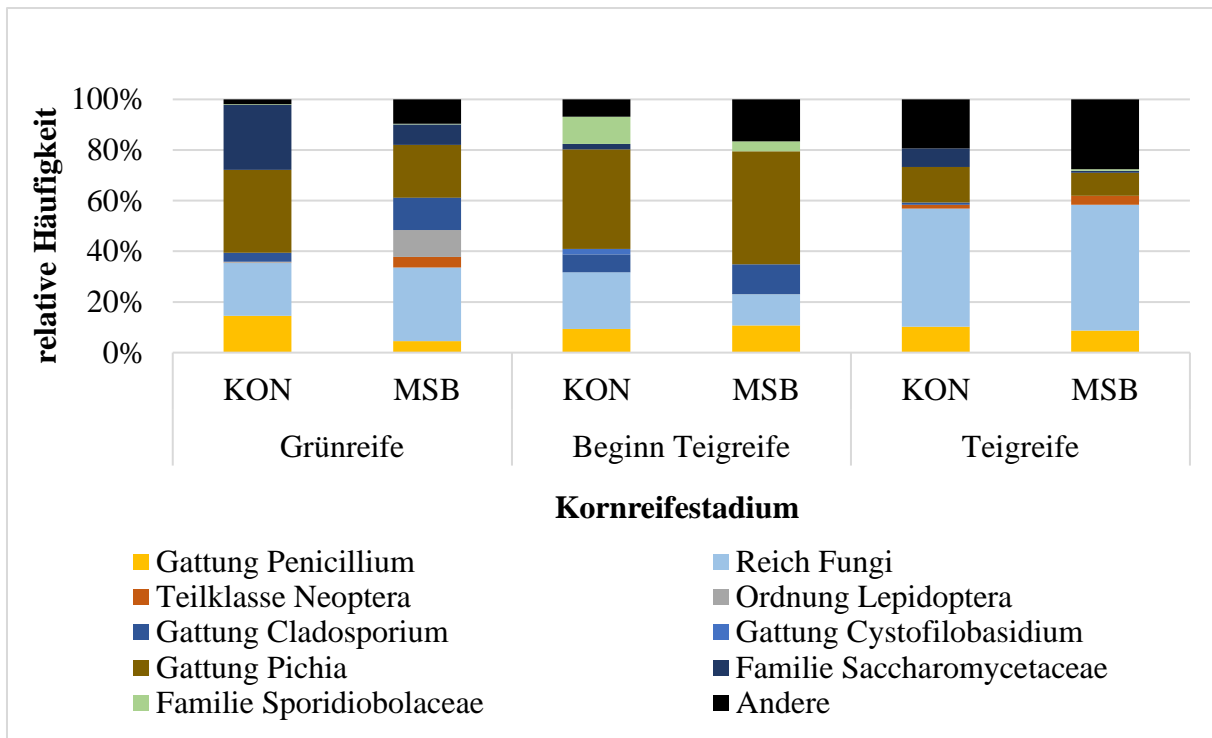
**Abbildung Anhang 15:** Entwicklung der Sojabohne (LE et al., 2007)



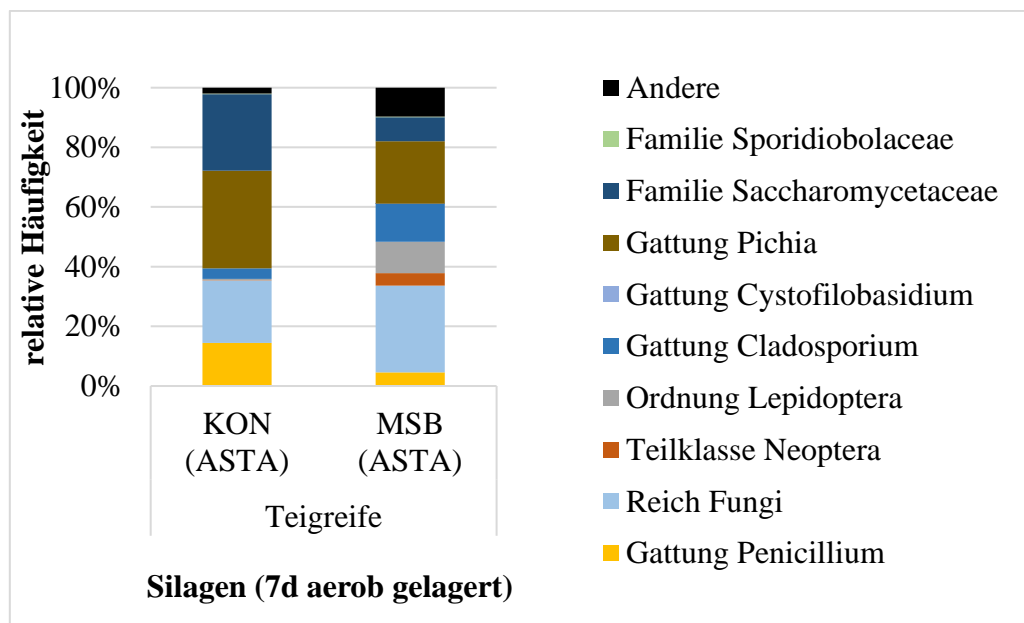
**Abbildung Anhang 16:** Relative Häufigkeit epiphytischer Eukaryoten als Prozentsatz der gesamten Eukaryoten der Erbse „Astronaute“ (Sorte 4) zu ausgewählten Kornreifestadien ( $n = 2$ ; Kornbildung, TM = 31 %; Beginn Grünreife, TM = 39 %; Grünreife, TM = 43 %; Beginn Teigreife, TM = 55 %; Teigreife, TM = 74 %)



**Abbildung Anhang 17:** Relative Häufigkeit epiphytischer Eukaryoten im Verhältnis zur Gesamteukaryotenanzahl der silierten Erbse „Astronaute“ (Probenmaterial 4) zu ausgewählten Kornreifestadien ohne (KON) oder mit Zugabe von Milchsäurebakterien (MSB; Silierdauer 59 - 62 d; Grünreife,  $TM_{KON} = 42\%$  ( $n = 4$ ),  $TM_{MSB} = 40\%$  ( $n = 4$ ); Beginn Teigreife,  $TM_{KON} = 53\%$  ( $n = 3$ ),  $TM_{MSB} = 52\%$  ( $n = 3$ ); Teigreife,  $TM_{KON} = 73\%$  ( $n = 4$ ),  $TM_{MSB} = 74\%$  ( $n = 4$ ); MW)



**Abbildung Anhang 18:** Relative Häufigkeit epiphytischer Eukarioten im Verhältnis zur Gesamteukariotenanzahl in silierten Erbsenkörnern („Astronaut“, Probenmaterial 4) zu ausgewählten Kornreifestadien ohne (KON) oder mit Zugabe von Milchsäurebakterien (MSB; Silierdauer 59 - 62 d; Grünreife,  $TM_{KON} = 42\%$  ( $n = 4$ ),  $TM_{MSB} = 40\%$  ( $n = 4$ ); Beginn Teigreife,  $TM_{KON} = 53\%$  ( $n = 3$ ),  $TM_{MSB} = 52\%$  ( $n = 3$ ); Teigreife,  $TM_{KON} = 73\%$  ( $n = 4$ ),  $TM_{MSB} = 74\%$  ( $n = 4$ ); MW)



**Abbildung Anhang 19:** Relative Häufigkeit epiphytischer Eukarioten im Verhältnis zur Gesamteukariotenanzahl in silierten Erbsenkörnern („Astronaut“, Probenmaterial 4) nach 7 Tagen aerober Lagerung ( $n = 3$ , MW)

**Tabelle Anhang 16:** Merkmale der in dem Fütterungstest eingesetzten Milchrinder (MW, SD)

<b>Parameter</b>	<b>Test "Erbse"</b>		<b>Kontrolle "RES/Gerste"</b>		<b>p-Wert</b>
<b>Alter</b> [n]	n = 32		n = 32		
Kühe	25		25		
Jungkühe	7		7		
tragende Kühe	21		20		
<b>Laktation</b> [n]					
Laktationsnummer	<b>2,88</b>	<i>1,661</i>	<b>3,03</b>	<i>1,787</i>	0,718
Laktationstag	<b>216</b>	<i>55,71</i>	<b>213</b>	<i>69,29</i>	0,855
Trächtigkeitstag trag. Kühe	<b>130</b>	<i>40,38</i>	<b>131</b>	<i>39,85</i>	0,775
Besamungen	<b>2,94</b>	<i>1,865</i>	<b>2,55</b>	<i>1,352</i>	0,363
<b>Milch</b> [%]					
Leistung [kg/Tier*d]	<b>35,4</b>	<i>6,681</i>	<b>35,0</b>	<i>5,575</i>	0,424
Fett	<b>4,26</b>	<i>0,607</i>	<b>4,29</b>	<i>0,503</i>	0,589
Eiweiß	<b>3,79</b>	<i>0,276</i>	<b>3,87</b>	<i>0,241</i>	0,783
Laktose	<b>4,76</b>	<i>0,137</i>	<b>4,72</b>	<i>0,167</i>	0,220
Harnstoff [mg/l]	<b>277</b>	<i>31,28</i>	<b>269</b>	<i>42,99</i>	0,214
<b>Kondition</b>					
Körpermasse [kg]	<b>712</b>	<i>85,01</i>	<b>728</b>	<i>62,87</i>	0,380
BCS	<b>3,42</b>	<i>0,521</i>	<b>3,47</b>	<i>0,519</i>	0,280
Rückenfettdicke [mm]	<b>1,21</b>	<i>0,813</i>	<b>1,24</b>	<i>0,781</i>	0,868

BCS, „Body condition score“

**Tabelle Anhang 17:** Rationskomponenten der vorgelegten Totalen-Misch-Rationen (TMR; Mittelwert, MW  $\pm$  Standardabweichung, SD)

<b>Parameter</b>	<b>Test "Erbse"</b>		<b>Kontrolle "RES/Gerste"</b>	
	n = 35		n = 35	
<b>Grobfutter</b> [kg TM/Tier*d]				
Grassilage	<b>7,10</b>	<i>0,895</i>	<b>6,80</b>	<i>1,476</i>
Maissilage	<b>3,69</b>	<i>0,196</i>	<b>3,88</b>	<i>1,081</i>
LTG	<b>1,00</b>	<i>0,080</i>	<b>1,00</b>	<i>0,097</i>
Trockenschnitzel	<b>2,00</b>	<i>0,157</i>	<b>1,98</b>	<i>0,134</i>
<b>Krafftutter</b> [kg TM/Tier*d]				
Erbsen siliert + getoastet	<b>3,30</b>	<i>0,704</i>	<b>0,00</b>	<i>0,000</i>
RES	<b>1,05</b>	<i>0,880</i>	<b>3,08</b>	<i>0,422</i>
Gerste	<b>1,11</b>	<i>0,146</i>	<b>2,25</b>	<i>0,298</i>
Maisschrot	<b>1,88</b>	<i>0,144</i>	<b>1,81</b>	<i>0,094</i>
<b>Mineralfutter</b> [kg TM/Tier*d]				
Glyzerin	<b>0,37</b>	<i>0,242</i>	<b>0,38</b>	<i>0,247</i>
hofeigener Mineralmix	<b>2,30</b>	<i>0,263</i>	<b>2,38</b>	<i>0,101</i>
Calciumcarbonat	<b>0,12</b>	<i>0,068</i>	<b>0,00</b>	<i>0,000</i>
Viehsalz	<b>0,15</b>	<i>0,126</i>	<b>0,11</b>	<i>0,131</i>
Futtermorale	<b>24,0</b>	<i>1,166</i>	<b>23,7</b>	<i>0,845</i>

LTG, Luzernetrockengrün; RES, Rapsextraktionsschrot

**Tabelle Anhang 18:** Mittlere Gehalte ausgewählter Nährstoffparameter der eingesetzten TMR (Mittelwert, MW  $\pm$  Standardabweichung, *SD*; n = 5)

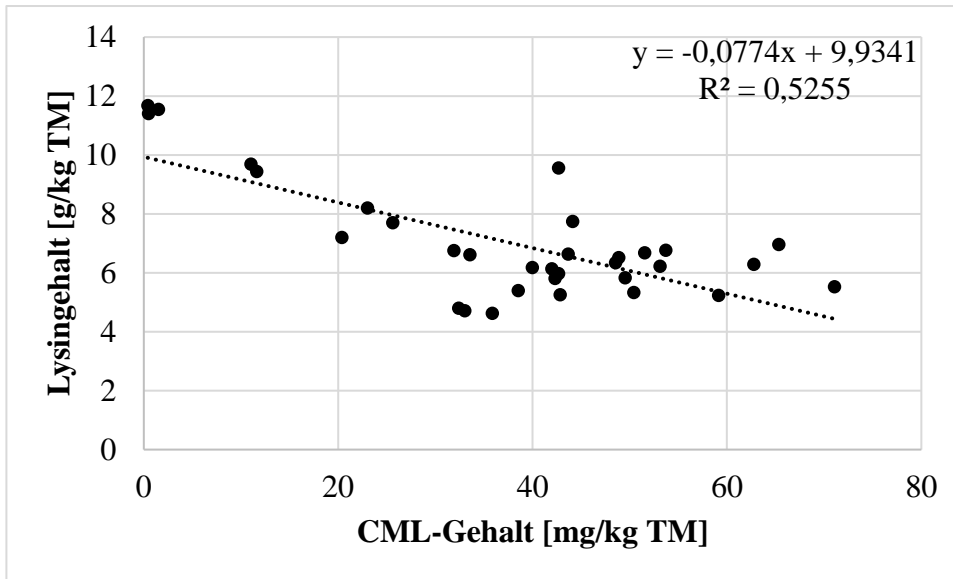
<b>Parameter</b>	<b>Test</b> "Erbse"		<b>Kontrolle</b> "RES/Gerste"		<b>p-Wert</b>
<b>Energie</b> [g/kg TM]					
TM [g/kg OM]	<b>467</b>	<i>14,76</i>	<b>470</b>	<i>8,585</i>	0,686
NEL [MJ/kg TM]	<b>6,80</b>	<i>0,114</i>	<b>6,80</b>	<i>0,167</i>	0,403
Stärke	<b>207</b>	<i>19,36</i>	<b>192</b>	<i>28,07</i>	0,366
Rohfett	<b>34,8</b>	<i>0,837</i>	<b>36,4</b>	<i>2,074</i>	0,148
<b>Protein</b> [g/kg TM]					
Rohprotein	<b>151</b>	<i>10,62</i>	<b>162</b>	<i>7,661</i>	0,108
Proteinlöslichkeit (A+B1)	<b>67,6</b>	<i>3,349</i>	<b>70,2</b>	<i>1,994</i>	0,171
nutzbares Rohprotein	<b>153</b>	<i>4,359</i>	<b>157</b>	<i>4,550</i>	0,174
RNB	<b>0,30</b>	<i>0,998</i>	<b>0,80</b>	<i>0,554</i>	0,067
<b>Faser</b> [g/kg TM]					
Rohfaser	<b>187</b>	<i>7,829</i>	<b>187</b>	<i>13,96</i>	0,914
ADFom	<b>217</b>	<i>8,228</i>	<b>216</b>	<i>11,73</i>	0,833
aNDFom	<b>381</b>	<i>22,16</i>	<b>383</b>	<i>21,59</i>	0,922
ELOS	<b>74,2</b>	<i>0,760</i>	<b>74,1</b>	<i>1,177</i>	0,853

ADFom, saure Detergentienfaser („acid detergent fibre“) abzüglich Rohasche; aNDFom, Neutrale Detergentienfaser („neutral detergent fibre“) behandelt mit einer hitzestabilen Amylase abzüglich Rohasche; ELOS, Enzymlösliche Organische Substanz; NEL, Netto Energie Laktation; TM, Trockenmasse; OM, Organische Masse; A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; RNB, Ruminale Stickstoff Bilanz

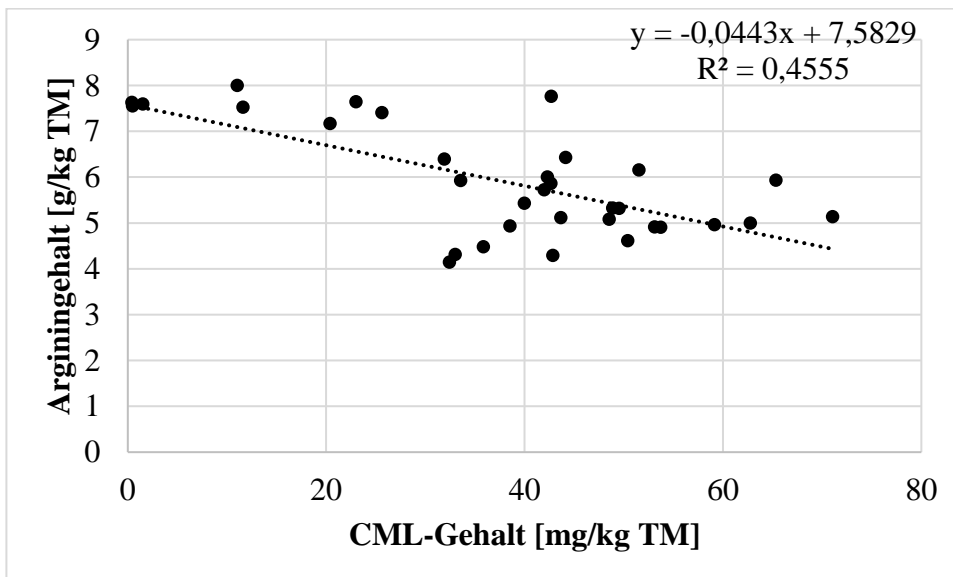
**Tabelle Anhang 19:** Veränderung der Proteinqualität siliierter Erbsen „Alvesta“ bei der thermischen Aufbereitung in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur und –dauer [n = 3]

	Erbsen „Alvesta“, siliert + getoastet										<i>p</i> -Wert			SEM
	10 min					30 min								
	120 °C	140 °C	160 °C	180 °C	200 °C	120 °C	140 °C	160 °C	180 °C	200 °C	<i>T</i>	<i>Z</i>	<i>T*Z</i>	
TM [g/kg OM]	710	721	731	747	755	787	860	854	915	921	< 0,001	< 0,001	< 0,001	2,149
Rohprotein [g/kg TM]	207	213	213	213	207	205	216	212	215	211	< 0,001	n.s.	n.s.	0,453
Proteinlöslichkeit [% des RP]	72,4	65,4	63,3	57,3	59,8	67,0	61,2	55,3	47,0	33,8	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,420
A [% des RP]	10,6	8,77	10,5	9,17	9,37	9,77	9,70	9,93	9,53	10,9	n.s.	n.s.	n.s.	0,171
B1 [% des RP]	61,8	56,6	52,8	48,1	50,4	57,2	51,5	45,4	37,5	22,9	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,438
B2 [% des RP]	26,2	31,4	35,3	39,8	38,6	29,4	36,6	42,9	48,3	56,1	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,425
B3 [% des RP]	0,90	2,63	0,87	2,17	1,10	3,23	1,43	1,10	4,00	9,37	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,227
C [% des RP]	0,50	0,60	0,53	0,76	0,53	0,40	0,77	0,67	0,76	0,64	0,030	n.s.	n.s.	0,024
UDP [g/kg TM]						44 <sup>e</sup>	52 <sup>d</sup>	59 <sup>c</sup>	66 <sup>b</sup>	88 <sup>a</sup>	-	-	-	-
UDP [% d. RP]						21	24	28	30	42	-	-	-	-

Erbsen „Alvesta“, Probenmaterial 2 (Tabelle 6) siliert + getoastet, 1000 g FM; A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; B2, mäßig schnell abbaubares Reineiweiß; B3, langsam abbaubares Reineiweiß; C, unlösliches zellwandgebundenes Protein; n.s., nicht signifikant; OM, Organische Masse; RP, Rohprotein; TM, Trockenmasse; Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1; *T*, Behandlungstemperatur; *Z*, Behandlungszeit; UDP, Pansen unabbaubares Rohprotein („ruminal-undegraded protein“), *in vitro*-Bestimmung, Angabe bei einer Passagerate von 8 %/h, Ergebnisse veröffentlicht in Bachmann et al., 2020a; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied mit  $p \leq 0,05$

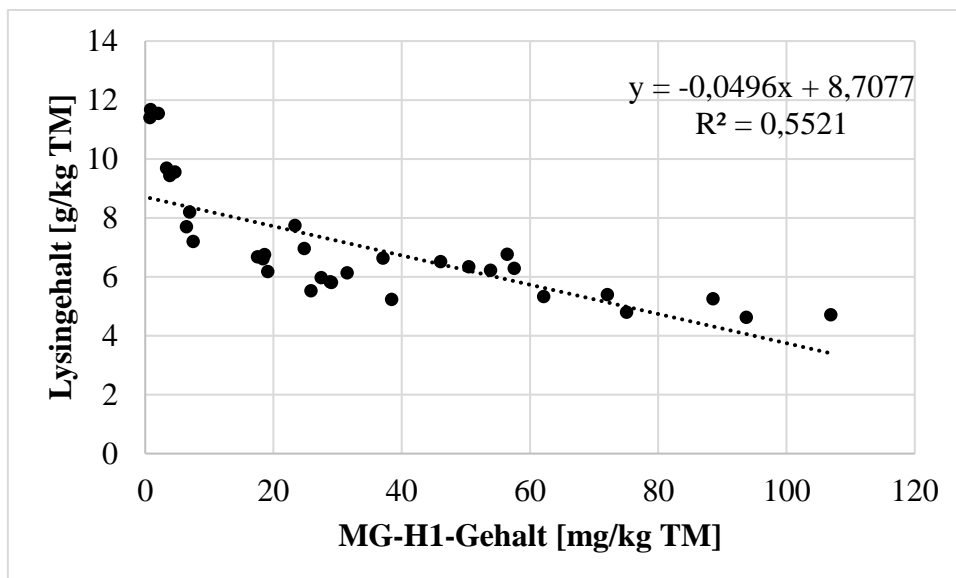


**Abbildung Anhang 20:** Korrelation des Lysingehaltes mit der Bildung des Maillardproduktes Carboxymethyllysin (CML)

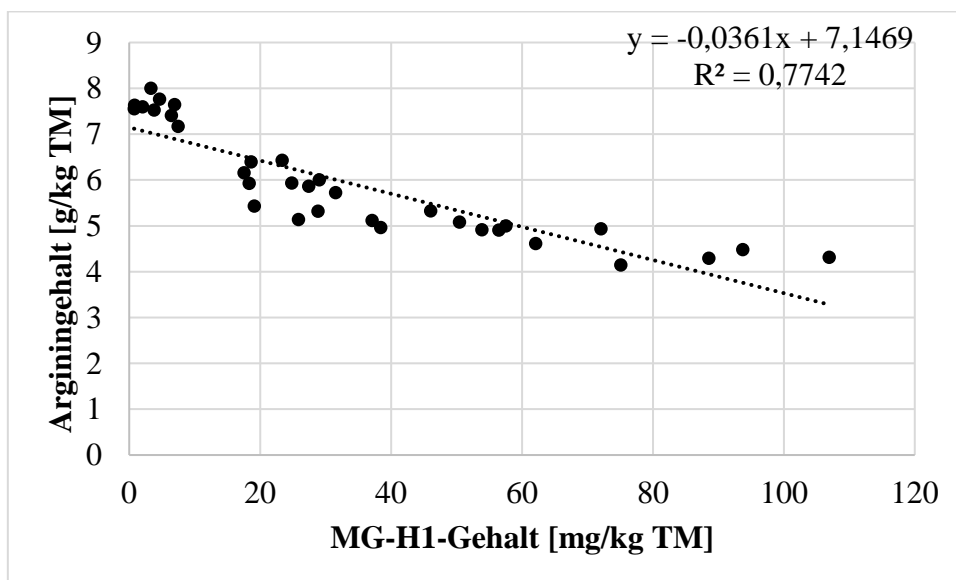


**Abbildung Anhang 21:** Korrelation des Arginingehaltes mit der Bildung des Maillardproduktes Carboxymethyllysin (CML)

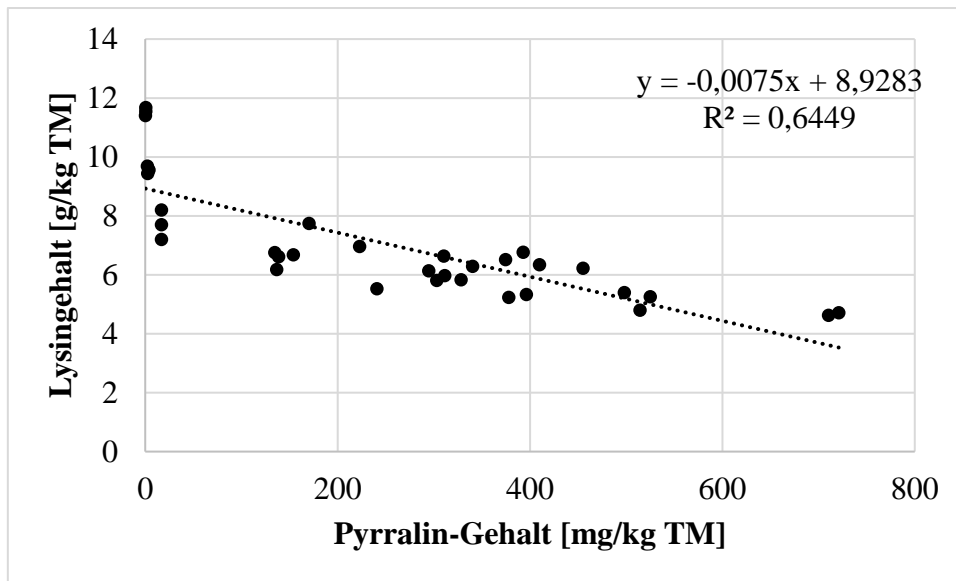




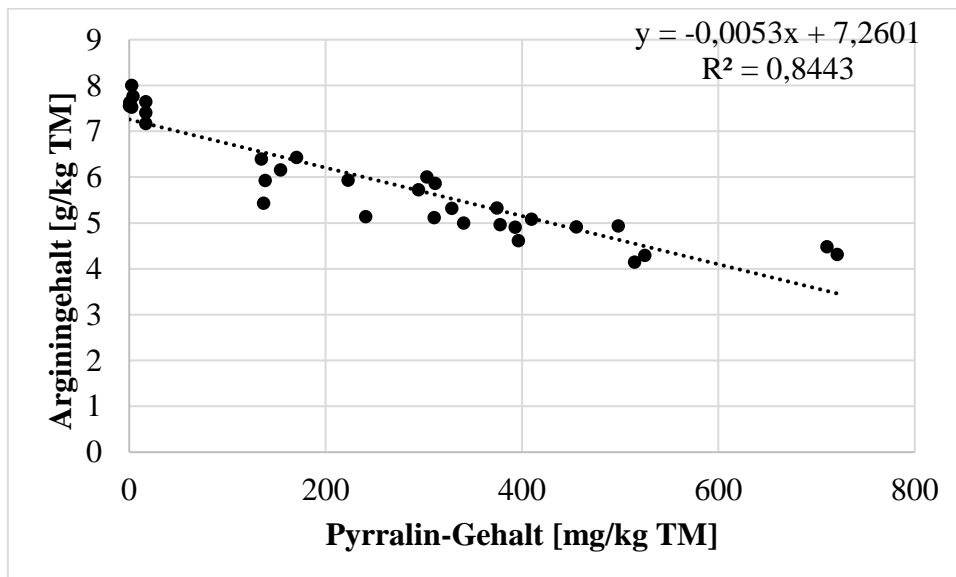
**Abbildung Anhang 22:** Korrelation des Lysingehaltes mit der Bildung des Maillardproduktes Methylglyoxal-Hydroimidazol (MG-H1)



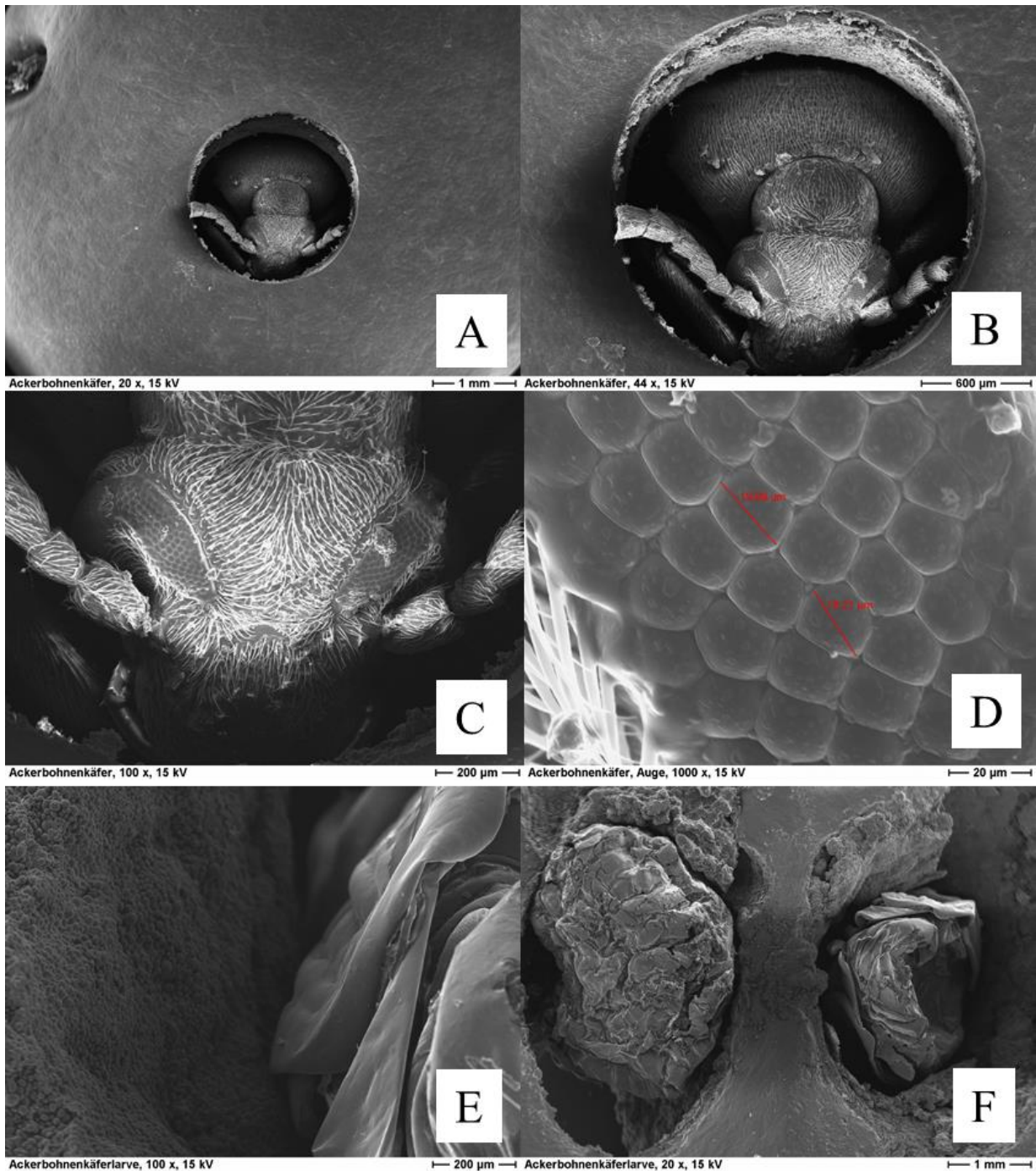
**Abbildung Anhang 23:** Korrelation des Argininingehaltes mit der Bildung des Maillardproduktes Methylglyoxal-Hydroimidazol (MG-H1)



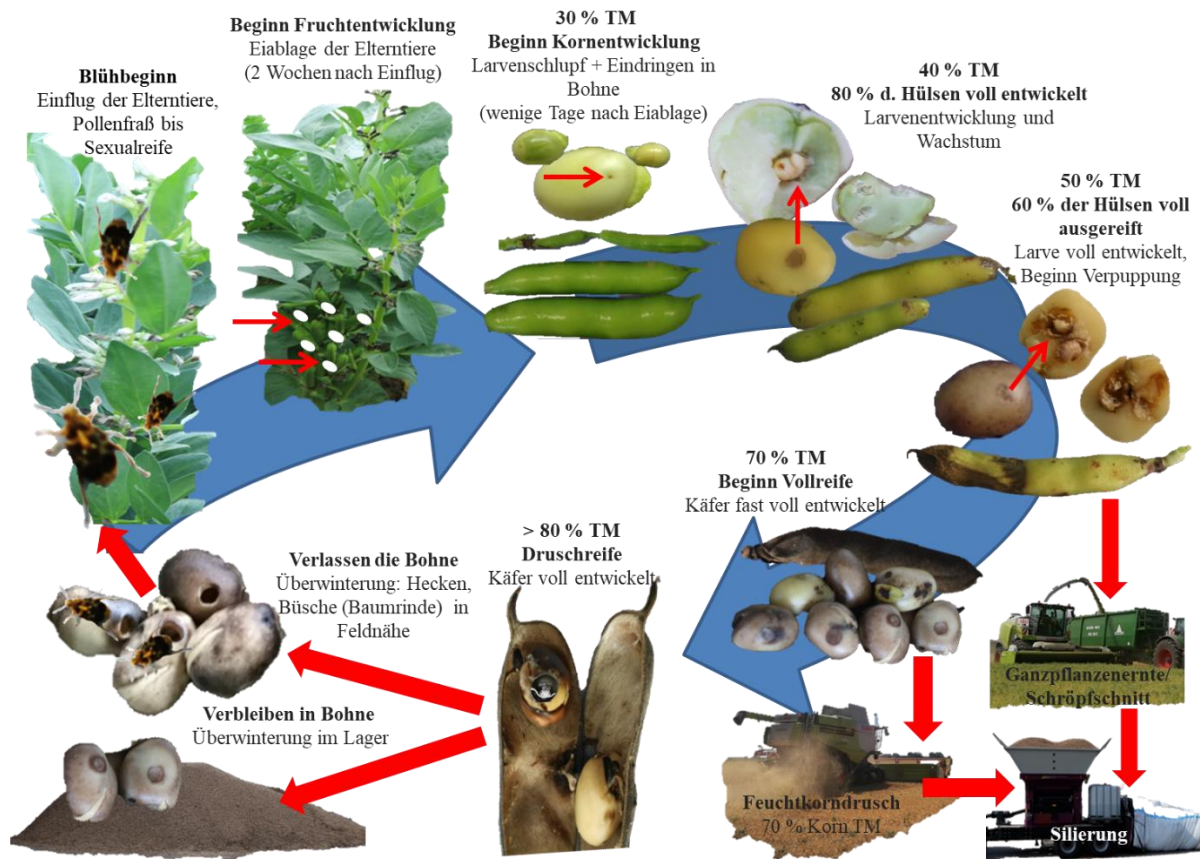
**Abbildung Anhang 24:** Korrelation des Lysingehaltes mit der Bildung des Maillardproduktes Pyrralin



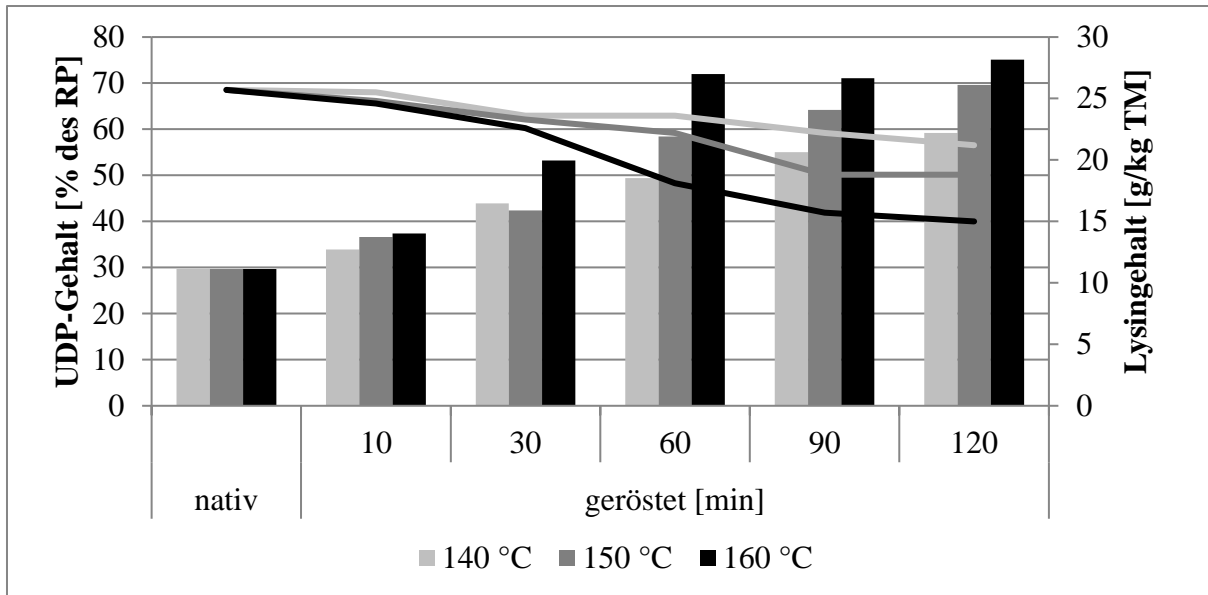
**Abbildung Anhang 25:** Korrelation des Argininhalt mit der Bildung des Maillardproduktes Pyrralin



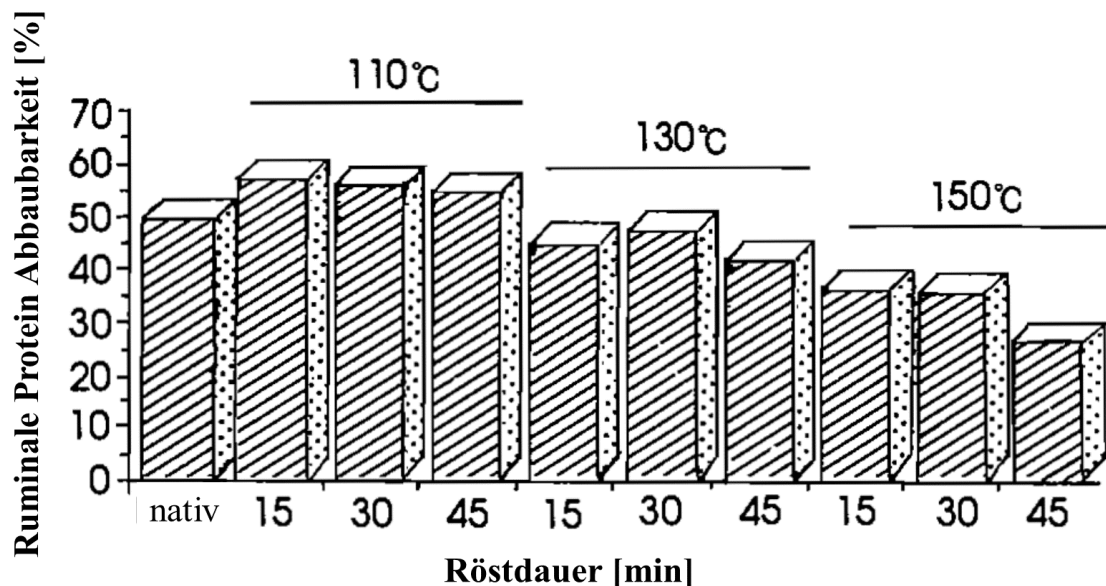
**Abbildung Anhang 26:** Elektronenmikroskopische Aufnahmen des Ackerbohnenkäfers (A, Ackerbohnenkäfer in Ackerbohne, 20-fache Vergrößerung; B, Ackerbohnenkäfer in Ackerbohne, 44-fache Vergrößerung; C, Ackerbohnenkäfer in Ackerbohne, 100-fache Vergrößerung; D, Auge des Ackerbohnenkäfers, 1000-fache Vergrößerung; E, Larve des Ackerbohnenkäfers mit Stärkegranulae in einer Grünreifen Ackerbohne, 100-fache Vergrößerung; F, zwei Larven des Ackerbohnenkäfers in einer Grünreifen Ackerbohne, 20-fache Vergrößerung)



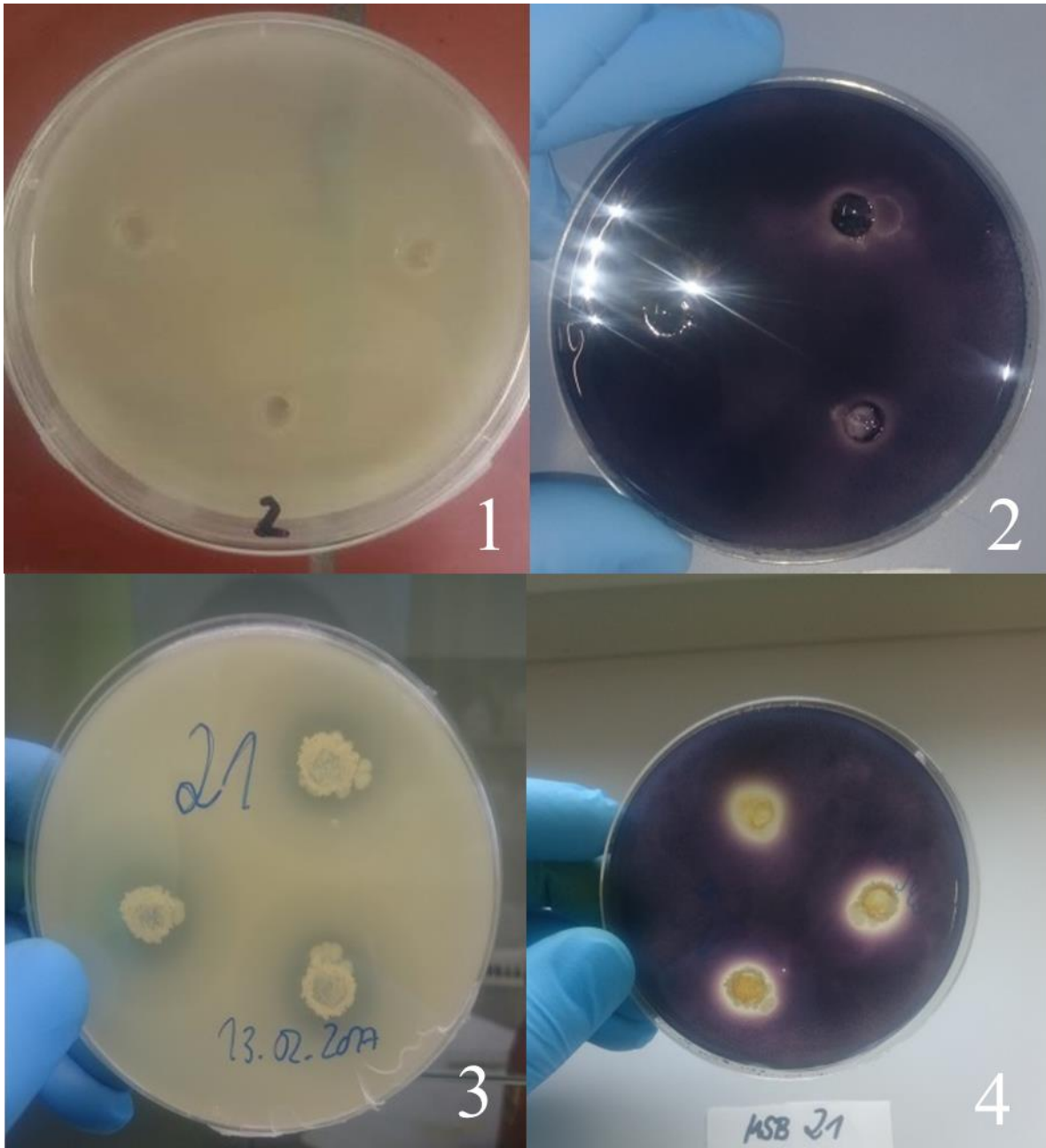
**Abbildung Anhang 27:** Entwicklungszyklus des Ackerbohnenkäfers am Beispiel der Ackerbohne „Fuego“ mit möglicher Unterbrechung des Zykluses durch die Ganzpflanzenernte und den Feuchtkorndrusch



**Abbildung Anhang 28:** Effekte auf den UDP-Gehalt („undegradable protein“, berechnet nach NRC, 2001;  $UDP \% = (B[kp/(kd + kp)] + C) \cdot 100$ ; B, Proteinfraction (B1 + B2 + B3); C, unlösliche Proteinfraction; kp, Passagerate; kd, Abbaurrate) sowie dem Lysingehalt gerösteter Sojabohnen (modifiziert nach FALDET et al., 1992); TM, Trockenmasse; RP, Rohproteingehalt



**Abbildung Anhang 29:** Veränderung der ruminalen Protein-Abbaubarkeit von Ackerbohnen durch Rösten (modifiziert nach YU et al., 1998)



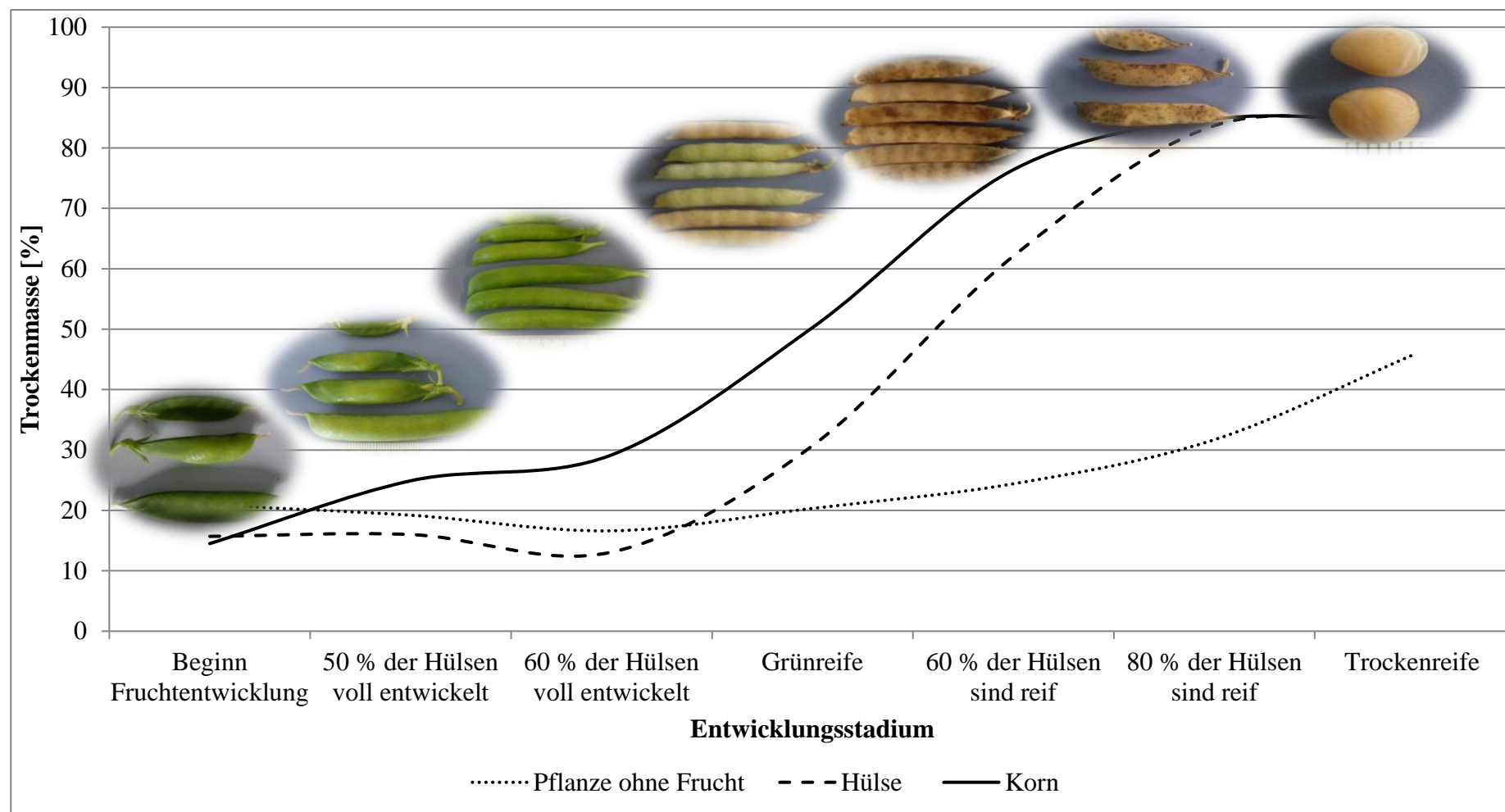
**Abbildung Anhang 30:** Voruntersuchungen zum Stärkeabbau nicht amylytisch wirksamer MSB („Josilac®classic“; *Lactobacillus plantarum*, LSI NCIMB 30083 1k20736 und L256 NCIMB 30084 1k20737 sowie *Pediococcus acidilactici* P11 DSM 23689 1k1011 und P6 DSM 23688 1k1010; Josera GmbH & Co. KG, Kleinheubach; Foto 1 und 2) und amylytisch wirksamer MSB (*Lactobacillus plantarum*, LMG 18053; Foto 3 und 4) auf mit Erbsenstärke angereicherten Agrarplatten geimpft, 5 Tage bei 35 °C inkubiert und anschließend mit Lugolscher Lösung (Jod-Kaliumiodid) benetzt (Foto 2 und 4).



**Tabelle Anhang 20:** Veränderung der Proteinqualität in Folge der großtechnisch durchgeführten kombinierten Behandlung der Erbse „Alvesta“ (MW, n = 3)

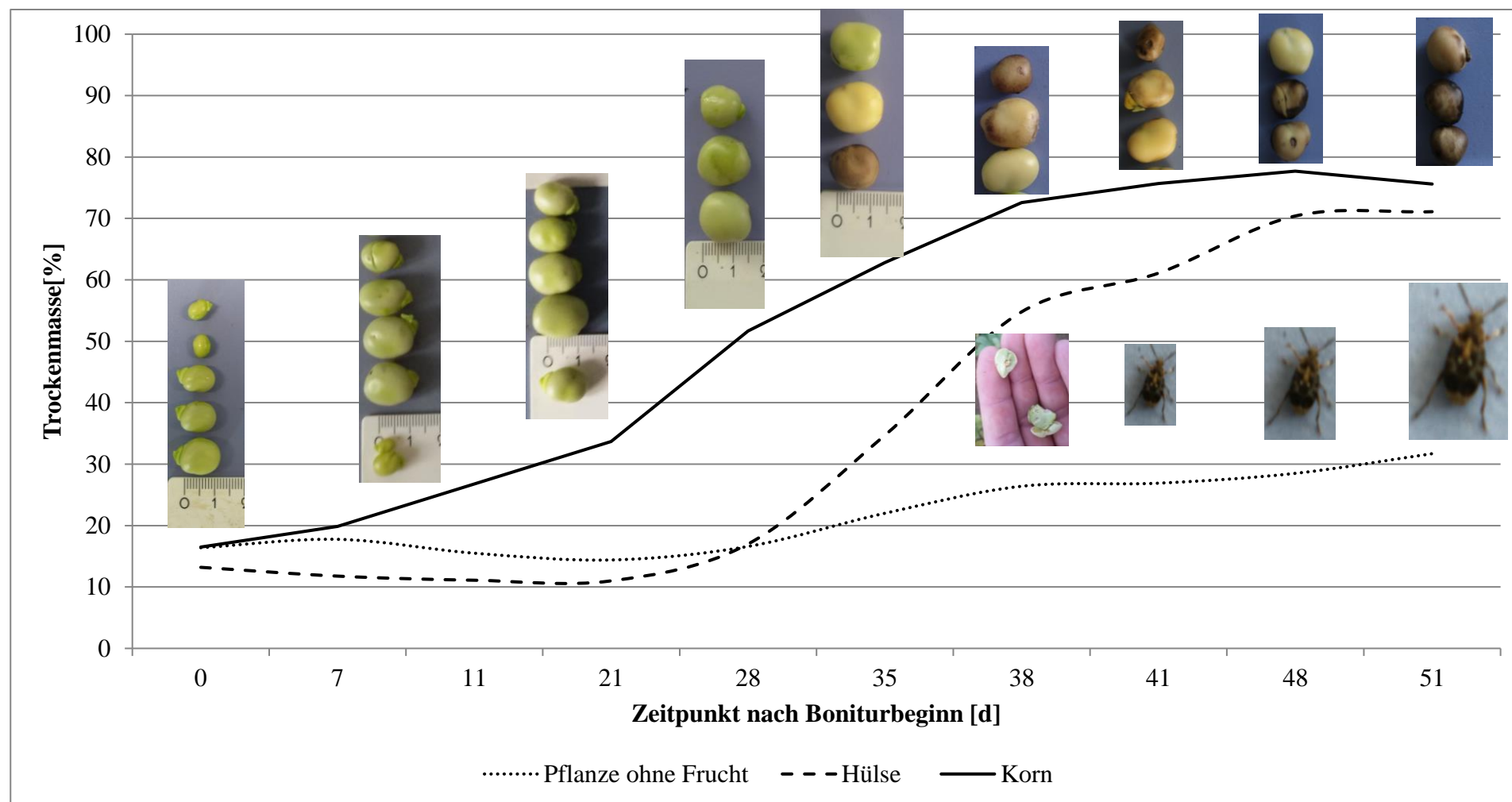
	Erbse "Alvesta"										p-Wert	SEM
	AM	siliert	siliert + getoastet [°C Korntemperatur]									
			60	70	75	80	85	90	100	110		
TM [g/kg OM]	787 <sup>f</sup>	768 <sup>e</sup>	857 <sup>d</sup>	875 <sup>c</sup>	877 <sup>c</sup>	886 <sup>bc</sup>	896 <sup>bc</sup>	890 <sup>b</sup>	946 <sup>a</sup>	942 <sup>a</sup>	< 0,001	1,153
Proteinlöslichkeit [% des RP]	73,9 <sup>a</sup>	32,7 <sup>b</sup>	28,8 <sup>b</sup>	21,7 <sup>c</sup>	20,0 <sup>c</sup>	19,0 <sup>c</sup>	19,3 <sup>c</sup>	17,6 <sup>cd</sup>	13,1 <sup>de</sup>	11,1 <sup>e</sup>	< 0,001	0,386
A [% des RP]	6,20 <sup>c</sup>	9,51 <sup>b</sup>	10,1 <sup>b</sup>	10,6 <sup>ab</sup>	13,4 <sup>a</sup>	13,4 <sup>a</sup>	12,5 <sup>ab</sup>	11,8 <sup>ab</sup>	10,9 <sup>ab</sup>	9,59 <sup>b</sup>	< 0,001	0,204
B1 [% des RP]	67,7 <sup>a</sup>	23,2 <sup>b</sup>	18,7 <sup>c</sup>	11,1 <sup>d</sup>	6,61 <sup>e</sup>	5,61 <sup>ef</sup>	6,79 <sup>e</sup>	5,80 <sup>ef</sup>	2,23 <sup>fg</sup>	1,51 <sup>g</sup>	< 0,001	0,286
B2 [% des RP]	23,8 <sup>e</sup>	59,8 <sup>abc</sup>	61,6 <sup>ab</sup>	64,9 <sup>a</sup>	58,6 <sup>abc</sup>	61,7 <sup>ab</sup>	54,1 <sup>c</sup>	54,8 <sup>bc</sup>	33,1 <sup>d</sup>	35,4 <sup>d</sup>	< 0,001	0,503
B3 [% des RP]	1,51 <sup>f</sup>	6,85 <sup>ef</sup>	9,11 <sup>def</sup>	12,6 <sup>cde</sup>	20,5 <sup>bc</sup>	18,1 <sup>bcd</sup>	24,8 <sup>b</sup>	24,1 <sup>b</sup>	35,6 <sup>a</sup>	34,7 <sup>a</sup>	< 0,001	0,665
C [% des RP]	0,70 <sup>b</sup>	0,64 <sup>b</sup>	0,49 <sup>b</sup>	0,71 <sup>b</sup>	0,89 <sup>b</sup>	1,19 <sup>b</sup>	1,81 <sup>b</sup>	3,50 <sup>b</sup>	18,2 <sup>a</sup>	18,8 <sup>a</sup>	< 0,001	0,246
puRP [g/kg TM]	4,71 <sup>b</sup>	4,62 <sup>b</sup>	5,19 <sup>b</sup>	5,22 <sup>b</sup>	5,81 <sup>b</sup>	6,09 <sup>b</sup>	6,11 <sup>b</sup>	7,39 <sup>b</sup>	24,3 <sup>a</sup>	25,8 <sup>a</sup>	< 0,001	0,373
nRP2 [g/kg TM]	130 <sup>b</sup>	115 <sup>bc</sup>	104 <sup>c</sup>	112 <sup>bc</sup>	n.a	125 <sup>b</sup>	n.a	126 <sup>b</sup>	188 <sup>a</sup>	181 <sup>a</sup>	< 0,001	1,521
nRP5 [g/kg TM]	169 <sup>c</sup>	170 <sup>c</sup>	170 <sup>c</sup>	176 <sup>bc</sup>	n.a	185 <sup>bc</sup>	n.a	190 <sup>b</sup>	230 <sup>a</sup>	224 <sup>a</sup>	< 0,001	1,428
nRP8 [g/kg TM]	189 <sup>d</sup>	199 <sup>cd</sup>	204 <sup>bcd</sup>	210 <sup>bcd</sup>	n.a	216 <sup>bc</sup>	n.a	223 <sup>b</sup>	251 <sup>a</sup>	246 <sup>a</sup>	< 0,001	1,808

Erbse „Alvesta“, Probenmaterial 2 (Tabelle 6); A, Nicht-Protein-Stickstoff (NPN); B1, lösliches schnell abbaubares Reineiweiß; B2, mäßig schnell abbaubares Reineiweiß; B3, langsam abbaubares Reineiweiß; C, unlösliches zellwandgebundenes Protein; n.a., nicht analysiert; nRP, nutzbare Rohprotein am Duodenum in Abhängigkeit der Passagerate von 2, 5 und 8 %/h; OM, Organische Masse; RP, Rohprotein; TM, Trockenmasse; Proteinlöslichkeit berechnet aus A + B1; <sup>ab</sup> unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit p < 0,05

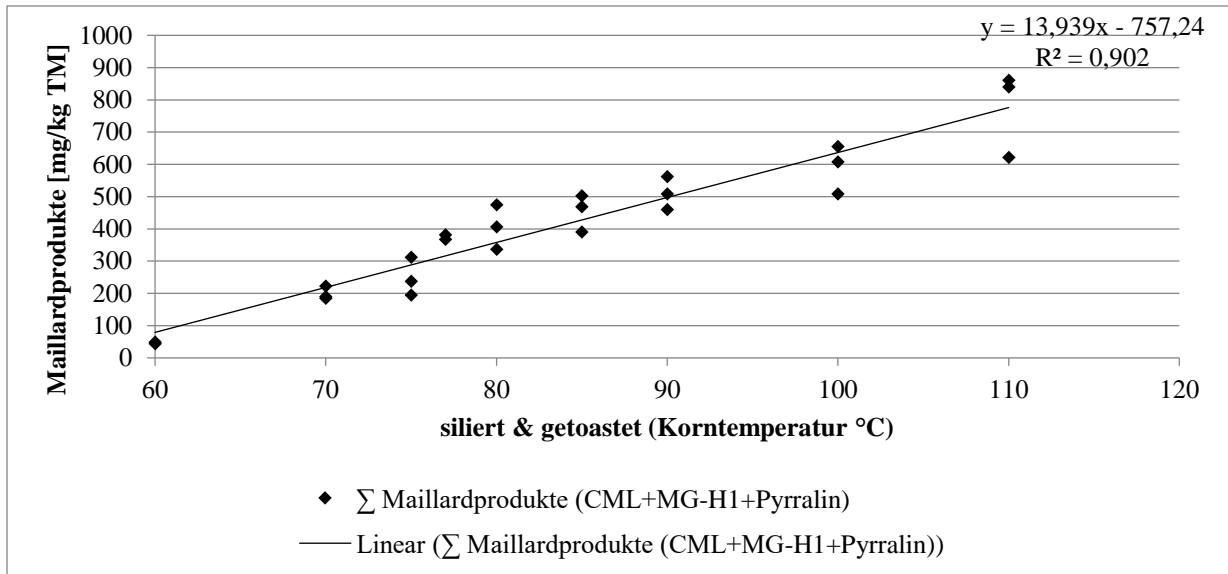


**Abbildung Anhang 31:** Entwicklung der TM in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums am Beispiel der Erbse „Alvesta“ (Probenmaterial 2, standardisierte Vegetationsbonitur über den gesamten Bestand)

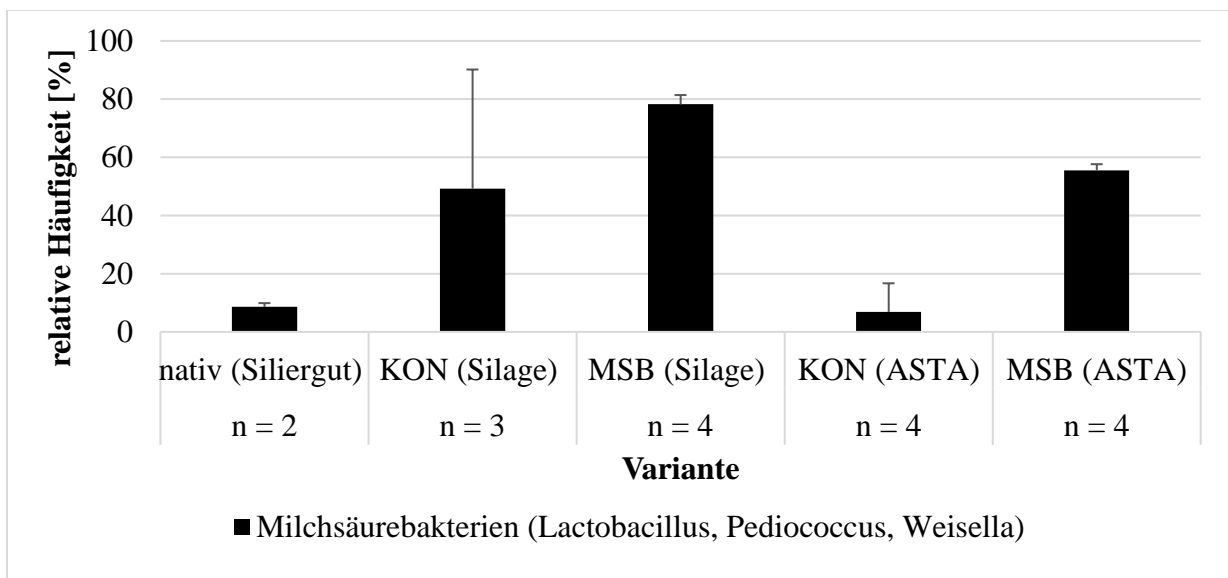




**Abbildung Anhang 32:** Entwicklung der TM über dem Zeitraum der Abreife am Beispiel der Ackerbohne „Taifun“ (Probenmaterial 8, standardisierte Vegetationsbonitur über den gesamten Bestand)



**Abbildung Anhang 33:** Die Korrelation zwischen der Behandlungsintensität und der Bildung ausgewählter Maillardprodukte (CML, MG-H1, Pyrralin) bei der großtechnischen kombinierten Behandlung (silieren + toasten) der Erbsen „Alvesta“; n = 3



**Abbildung Anhang 34:** Darstellung der aufsummierten relativen Häufigkeit der Milchsäurebakterien Lactobacillus, Pediococcus und Weisella der Erbse „Astronaut“ (Probenmaterial 4) zu ausgewählten Behandlungsstufen (MW)