

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Züchtungsmethodisch optimierte Kombination von Gemengepartnern der Andenlupine und Mais sowie der Weißen Lupine und Hafer mit dem Ziel der Biomasseproduktion unter Nutzung ökosystemarer Leistungen der Lupine

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Julius Kühn-Institut,
Institut für Züchtungsforschung an landwirtschaftlichen Kulturen, Dr. Steffen Roux
Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Dr. Frank Höppner

Teilvorhaben 2: Thünen-Institut
Institut für Ökologischen Landbau, Dr. Herwart Böhm

Teilvorhaben 3: Universität Rostock
Professur Agrartechnologie und Verfahrenstechnik, Dr. Denny Wiedow

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 22009017

Teilvorhaben 2: 22016418

Teilvorhaben 3: 22026118

Laufzeit:

15.03.2019 bis 31.12.2023

Monat der Erstellung:

01/2024

Datum der Veröffentlichung:

16.07.2024

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
I. Kurzbericht	11
1. Aufgabenstellung	11
2. Planung und Ablauf des Vorhabens	11
3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse	12
a) Arbeitspakete und Meilensteine	12
b) Zusammenfassung	15
II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	18
1 Erzielte Ergebnisse	18
1.1 Standorte, Versuchsdesign, Datenmanagement (AP 1).....	18
1.2 Prüfung verschiedener Andenlupinen-Linien in Eigenleistung und in Kombination mit zwei Mais-Hybriden (AP 2).....	19
Gemeingeleistungsprüfung von 20-25 LUA am Standort Groß Lüsewitz (AP 2.1)	19
Gemeingeanbau von Andenlupinen und Mais (AP 2.2 – 2.5)	19
Prüfung ausgewählter Gemenge-Kombinationen aus Andenlupine und Mais (LuMi-Best)	25
1.3 Prüfung verschiedener Mais-Hybriden in Kombination mit zwei Andenlupinen (AP 3)	26
1.4 Anbautechnische Versuche zum Anbau von Andenlupinen mit Mais (AP 4)	27
Saatzeitenversuch zum Gemeingeanbau von Andenlupine und Mais (AP 4.1).....	27
Anbauversuch zu Saatchichten der Andenlupine und Reihenweite von Andenlupine und Mais in Reinsaat und im Gemenge (AP 4.2)	28
1.5 Leistungsprüfung der Weißen Lupine am Standort Triesdorf (AP 5).....	29
1.6 Ermittlung der spezifischen Gemeingetauglichkeit ausgewählter Sorten und Linien der Weißen Lupine und verschiedenen Hafergenotypen (AP 6)	29
1.7 Saatstärkenversuch zum Gemeingeanbau von Weißer Lupine und Hafer (AP 7)	32
1.8 Ganzpflanzensilierung mit Silagequalität und Futterwertparameter (AP 8).....	33
Gäreigenschaften und Silagequalität von LUA-Mais und LUW-Hafer der Versuchsansätze LuMi-opt und LuMi-Best.....	34
Futterwertparameter von LUA-Mais und LUW-Hafer der Versuchsansätze LuMi-opt und LuMi-Best.....	41
1.9 Biogas- und Methanausbeute (AP 9).....	44
Batchversuch	44
Erster kontinuierlicher Versuch mit Gemengen (frisch) aus Andenlupinen und Mais	48
Zweiter kontinuierlicher Versuch mit Silagen aus Andenlupinen und Mais	60
1.10 Saatgutvermehrung von Andenlupine und Weißer Lupine (AP 10).....	74
1.11 Demonstrationsanbau von Mais mit Andenlupinen auf Praxisbetrieben	75
2 Verwertung.....	76
a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	76
b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	76
c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende.....	77
d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	77
3 Erkenntnisse von Dritten.....	77

4	Veröffentlichungen	77
	Projektbezogene Veröffentlichungen	77
	Projektbezogene Vorträge	78
	Projektbezogene Filme.....	78
	ANHANG	79
	Teilvorhaben 1: Julius Kühn-Institut	79
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	79
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	79
	Arbeitspaket 4.1	79
	Arbeitspaket 8	80
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	92
	Teilvorhaben 2: Thünen-Institut	94
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	94
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	94
	Wurzeluntersuchungen von Andenlupine-Mais und Weißer Lupine-Hafer (AP 4.2 und 7)	94
	Infiltrationsleistungen von Andenlupine-Mais und Weißer Lupine-Hafer (AP 4.2 und 7).....	96
	N _{min} -Untersuchungen nach Ernte von Andenlupine und Weißer Lupine in Reinsaat	
	und im Gemenge (AP 4.2 und 7)	97
	N ₂ -Fixierleistung von Andenlupine und Weißer Lupine in Reinsaat und im Gemenge.....	
	(AP 4.2 und 7)	98
	Saatstärkenversuch zum Gemengeanbau von Weißer Lupine und Hafer (AP 7)	100
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	102

Abkürzungsverzeichnis

Ergänzend zu den allgemein gebräuchlichen Abkürzungen des internationalen SI-Systems werden folgende Abkürzungen verwendet:

ADF	Acid (Säure)-Detergenzien-Faser
ANOVA	Varianzanalyse
ASTA	Aerobe Stabilität
AYL	Actual Yield Loss
BD	2,3-Butandiol
BS	Buttersäure
JKI-BS	Julius-Kühn-Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Standort Braunschweig
d	Tag
ELOS	Enzymlösliche Organische Substanz
ES	Essigsäure
ETH	Ethanol
FM	Frischmasse
GL	Groß Lüsewitz
GTM-Ertrag	Gesamt-Trockenmasse-Ertrag
HA	Hafer
JKI-GL	Julius-Kühn-Institut, Institut für Züchtungsforschung an landwirtschaftlichen Kulturpflanzen Standort Groß Lüsewitz
KbE	Koloniebildende Einheiten
kf Kö m ⁻²	keimfähige Körner pro Quadratmeter
l _N	Normliter
LUA	Andenlupine
LUA-TM-Ertrag	Andenlupinen-Trockenmasse-Ertrag
LUW	Weißer Lupine
LUW-TM-Ertrag	Weißer Lupine-TM-Ertrag
MA	Mais
MA-TM-Ertrag	Mais-TM-Ertrag
MS	Milchsäure
MSB	Milchsäurebakterien
N	Stickstoff
n	Stichprobenumfang
NDF	Neutral-Detergenzien-Faser
NDFA	nitrogen derived from the atmosphere
NH ₄ -N	Ammoniak-Stickstoff
N _{min}	Gehalt des Bodens an mineralisiert verfügbaren Stickstoffs
n.v.	Nicht vorhanden
ADFom	Säure-Detergenzien-Faser, nach Veraschung
aNDFom	Neutrale-Detergenzien-Faser, nach Veraschung
OS	Organische Substanz
oSr	organische Säuren
oTS	organische Trockensubstanz
PA	Propanol
PD	1,2-Propandiol
pH	pH-Wert
PK	Pufferkapazität
PS	Propionsäure
TI-OL	Thünen-Institut, Institut für Ökologischen Landbau, Standort Trenthorst
TH	Trenthorst
TS	Trockensubstanzgehalt
TSn	Trockensubstanzgehalt, normal
TSk	Trockensubstanzgehalt, korrigiert nach Weißbach und Strubelt (2008)
VK	Vergärbarkeitskoeffizient
WR	Wirkungsrichtung
XA	Rohasche
XF	Rohfaser
XP	Rohprotein
XS	Stärke
WSC	Wasserlösliche Kohlenhydrate
Z/PK	Zucker-Pufferkapazitäts-Quotient

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: TM-Erträge [dt ha ⁻¹] von Mais-Andenlupinen-Gemengen im Vergleich zu Mais- und Andenlupinen-Reinsaat an den Standorten JKI-Groß Lüsewitz, JKI-Braunschweig und TI-Trenthorst im Jahr 2019 unterschiedliche Buchstaben in jeder Teilgrafik kennzeichnen signifikante Unterschiede für den Andenlupinen-TM-Ertrag, LUA=Andenlupine, LUA-N=Bezeichnung der LUA-Herkünfte, RS=Reinsaat	22
Abbildung 2: TM-Erträge [dt ha ⁻¹] von Mais-Andenlupinen-Gemengen im Vergleich zu Mais- und Andenlupinen-Reinsaat an den Standorten JKI-Groß Lüsewitz, JKI-Braunschweig und TI-Trenthorst im Jahr 2020 unterschiedliche Buchstaben in jeder Teilgrafik kennzeichnen signifikante Unterschiede für den Andenlupinen-TM-Ertrag, LUA=Andenlupine, LUA-N=Bezeichnung der LUA-Herkünfte, RS=Reinsaat	23
Abbildung 3: TM-Erträge [dt ha ⁻¹] von Mais-Andenlupinen-Gemengen im Vergleich zu Mais- und Andenlupinen-Reinsaat an den Standorten JKI-Groß Lüsewitz, JKI-Braunschweig und TI-Trenthorst im Jahr 2021 unterschiedliche Buchstaben in jeder Teilgrafik kennzeichnen signifikante Unterschiede für den Andenlupinen-TM-Ertrag, LUA=Andenlupine, LUA-N=Bezeichnung der LUA-Herkünfte, RS=Reinsaat	24
Abbildung 4: Gesamttrockenmasseerträge (GTM-Erträge) getrennt nach Andenlupinen (LUA)-TM-Ertrag und Mais-TM-Ertrag für die Wechselwirkung Andenlupine x Umwelt im Vergleich zu den mittleren TM-Erträgen von Andenlupine und Mais in Reinsaat der Standorte Braunschweig (BS) und Groß Lüsewitz (GL). unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede für den GTM-Ertrag in den Gemengen mit LUA 1, unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede für den GTM-Ertrag in den Gemengen mit LUA 2, * = signifikanter Unterschied zwischen dem GTM-Ertrag der Gemeinde von LUA 1 versus LUA 2. Werte in den blau eingefärbten Säulen kennzeichnen den prozentualen Anteil an Andenlupine in den Gemengen.	27
Abbildung 5: Gemittelte Gesamttrockenmasse(GTM)-Erträge des dreijährigen Anbauversuchs 2019-2021 am Standort Trenthorst zu Saatstärke der LUA im Gemeinde und Reihenabstand (37,5 und 50 cm). Es wurden eine Maissorte und zwei LUA-Sorten zu den Gemengen kombiniert. Verschiedene Buchstaben markieren signifikante Unterschiede (ANOVA, n = 9 für MA-RS, n = 15 für LUA-RS, n = 45 für Gemeinde).	28
Abbildung 6: Gemeindeprüfung am Beispiel von GL2019, Vorderer Block links und hinterer Block zentral = Gemeindeprüfung, alternierende Reihen der jeweiligen Gemeindepartner. Vorderer Block rechts und hinten beidseitig außen = Leistungsprüfung aller Prüfglieder in Reinsaat	29
Abbildung 7: GTM-Erträge der einzelnen Kombinationen aus Weißer Lupine und Hafer sowie deren Mehr- bzw. Minderleistung gegenüber dem Ertragsprüfung gemittelt über die Jahre 2019 – 2021 für 10 Umwelten	31
Abbildung 8: Gesamttrockenmasseerträge des Mittels der beiden Reinsaaten im Vergleich zu den Gemengen	32
Abbildung 9: Einfluss der LUW-Saatstärke auf den GTM-Ertrag (links) und der Saatstärke auf die Unkrautbiomasse (rechts) in AP 7 in den Jahren 2019-2021 am Standort TH. Unterschiedliche Buchstaben zeigen Gruppenunterschiede an. GTM-Erträge: Chi-Quadrat test mit Kruskal-Wallis-post-hoc, p < 0,001***, n=36 für LUW-Reinsaat, n=24 Jahr für Hafer-Reinsaat, je n=24 für Gemeinde. Unkrauttrockenmasse: rang-transformierte Mixed Model ANOVA mit Jahr als random Factor, p < 0,001***, n=36 für LUW-Reinsaat, n=24 Jahr für Hafer-Reinsaat, n=24 für Gemeinde.	33
Abbildung 10: Darstellung des Batchversuchstandes	44
Abbildung 11: Vorderansicht des kontinuierlichen Versuchstandes mit der Einbindung ins Gaserfassungssystem und den Rührwerken	49
Abbildung 12: Gasmengen und Gasqualitäten vom Fermenter 1 während der Hochfahr- und Versuchsphase	53
Abbildung 13: Gasmengen und Gasqualitäten vom Fermenter 2 während der Hochfahr- und Versuchsphase	56
Abbildung 14: Gasmengen und Gasqualitäten vom Fermenter 3 während der Hochfahr- und Versuchsphase	59
Abbildung 15: Gasmengen und Gasqualitäten vom Fermenter 1 während der Versuchsphase	64
Abbildung 16: Gasmengen und Gasqualitäten vom Fermenter 2 während der Versuchsphase	68
Abbildung 17: Gasmengen und Gasqualitäten vom Fermenter 3 während der Versuchsphase	72
Abbildung 18: Vermehrungsanbau Chile	74
Abbildung 19: Demonstrationsanbau Bielefeld-Jöllenbeck, Aussaat	75

Abbildung 20: Ansicht des Demonstrationsanbaus mit dem Gemengeanbau von Andenlupine und Mais im Projekt LuMi-opt am Standort Dummerstorf (Foto: JKI-GL).	76
Abbildung 21: Rohprotein (XP) in der Trockensubstanz von Erntegut aller Prüfglieder der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüforte der Arbeitspakete 2.2-2.5, 3 und LuMi-Best	82
Abbildung 22: Stärke (XS) in der Trockensubstanz von Erntegut aller Prüfglieder der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüforte der Arbeitspakete 2.2-2.5, 3 und LuMi-Best	83
Abbildung 23: Rohfaser (XF) in der Trockensubstanz von Erntegut aller Prüfglieder der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüforte der Arbeitspakete 2.2-2.5, 3 und LuMi-Best	84
Abbildung 24: Enzymlösliche Organische Substanz (ELOS) in der Trockensubstanz von Erntegut aller Prüfglieder der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüforte der Arbeitspakete 2.2-2.5, 3 und LuMi-Best	85
Abbildung 25: Rohprotein (XP) in der Trockensubstanz von Erntegut der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüfglieder getrennt nach Rein- und Gemengesaaten der Arbeitspakete 2.3-2.5 und 3, gruppiert nach Prüfort	86
Abbildung 26: Stärke (XS) in der Trockensubstanz von Erntegut der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüfglieder getrennt nach Rein- und Gemengesaaten der Arbeitspakete 2.3-2.5 und 3, gruppiert nach Prüfort	86
Abbildung 27: Rohfaser (XP) in der Trockensubstanz von Erntegut der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüfglieder getrennt nach Rein- und Gemengesaaten der Arbeitspakete 2.3-2.5 und 3, gruppiert nach Prüfort	87
Abbildung 28: Enzymlösliche Organische Substanz (ELOS) in der Trockensubstanz von Erntegut der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüfglieder getrennt nach Rein- und Gemengesaaten der Arbeitspakete 2.3-2.5 und 3, gruppiert nach Prüfort	87
Abbildung 29: Rohnährstoffe inkl. Stärke sowie ELOS in der Trockensubstanz von Erntegut der LUA-Mais-Anbauten über alle Prüfglieder getrennt nach Rein- und Gemengesaaten des Arbeitspaketes LuMi-Best (XP=Rohprotein, XF=Rohfaser, XS=Stärke, ELOS=Enzymlösliche Organische Substanz), gruppiert nach Umwelt	88
Abbildung 30: Rohnährstoffe inkl. Stärke sowie ELOS in der Trockensubstanz von Erntegut aller Prüfglieder der LUW-Hafer-Anbauten (AP 6) über alle Versuchsjahre und Prüforte (XP=Rohprotein, XS=Stärke, XF=Rohfaser, ELOS=Enzymlösliche Organische Substanz)	89
Abbildung 31: Rohnährstoffe inkl. Stärke sowie ELOS in der Trockensubstanz von Erntegut aller Prüfglieder der LUW-Hafer-Anbauten (AP 6) über alle Versuchsjahre und Prüfglieder getrennt nach Rein- und Gemengesaaten (XP=Rohprotein, XS=Stärke, XF=Rohfaser, ELOS=Enzymlösliche Organische Substanz), gruppiert nach Prüfort	90
Abbildung 32: Vergärbarkeitskoeffizient (VK) von Erntegut aller Prüfglieder der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüforte der Arbeitspakete 2.2-2.5, 3 und LuMi-Best, Zielwert mind. 45	91
Abbildung 33: Vergärbarkeitskoeffizient (VK) von Erntegut aller Prüfglieder der LUW-Hafer-Anbauten (AP 6) über alle Versuchsjahre und Prüforte, Zielwert mind. 45	92
Abbildung 34: Wurzelbeprobung im Feld (links: Dokumentation der freien Wurzelenden in einem LUA-RS-Bestand, mitte: Entnahme der Bodenblöcke anhand des Rasters) und beispielhafte Profilwand-Dokumentation (rechts) am Standort TH. Die Grenze zwischen Ober- und Unterboden war stets deutlich sichtbar (siehe links, mitte) und lag bei ca. 30-35 cm (siehe Beispiel rechts).	94
Abbildung 35: Wurzelverteilung in ausgewählten Gemengen und Reinsaat Hafer (HA) Arborg in Reinsaat (RS), Weiße Lupine (LUW) Celina in Reinsaat und ihrem Gemenge aus AP 6.1 und 6.2 sowie von Mais 2 (MA) in Reinsaat, Andenlupine 1 (LUA) in Reinsaat und ihrem Gemenge aus AP 2.4, 2.5 anhand der Profilwanddokumentationen aus 2020 und 2021 am Standort Trenthorst. Verschiedene Buchstaben beschreiben Unterschiede bei Gesamtgruppenvergleichen der kumulativen Wurzeldichte (rang-transformierte ANOVA, $p=0,003^{**}$). Weiße Sternchen markieren Unterschiede zwischen RS und Gemenge, schwarze Sternchen zwischen den RS in einer Bodentiefe (rang-transformierte ANOVA, $p<0,001^{***}$), $n = 6$.	95
Abbildung 36: Einfluss von Kultur und Anbausystem (Hafer (HA) Arborg in Reinsaat (RS), Weiße Lupine (LUW) Celina in RS und ihrem Gemenge aus AP 6.1 und 6.2 sowie von Mais 2 (MA) in RS, Andenlupine 1 (LUA) in RS und ihrem Gemenge aus AP 2.4, 2.5) auf den Bodenwassergehalt bis 1 m Tiefe (links) und die Infiltrationskapazität des Bodens (rechts). Unterschiedliche Buchstaben zeigen Gruppenunterschiede für den Bodenwassergehalt an, Kleinbuchstaben für LUA-MA, Großbuchstaben für LUW-HA (Mixed Linear Model ANOVA mit Jahr als random factor, $p<0.001^{***}$, $n = 6$ (*9 Pseudoreplikate). Infiltrationskapazitäten ohne signifikante Unterschiede, $n = 6$. Standort Trenthorst, 2020 und 2021.	96

Abbildung 37: Gesamttrockenmasse-Erträge (GTM) der für die Wurzeluntersuchungen ausgewählten Varianten (Hafer (HA) Arborg in Reinsaat (RS), Weiße Lupine (LUW) Celina in RS und ihrem Gemenge aus AP 6.1 und 6.2 sowie von Mais 2 (MA) in Reinsaat, Andenlupine 1 (LUA) in RS und ihrem Gemenge aus AP 2.4, 2.5) aus 2020 und 2021 am Standort Trenthorst. Unterschiedliche Buchstaben zeigen Gruppenunterschiede an, Kleinbuchstaben für LUA-MA, Großbuchstaben für LUW-HA (Rang-transformierte ANOVA mit $p < 0.001^{***}$, $n = 6$). 97

Abbildung 38: GTM-Erträge aller Varianten (nach Hafer, Weiße Lupine-Sorte, Saatstärke der Lupine) aus AP 7 am Standort TH 2019-2021. HA = Hafer, LUW = Weiße Lupine, Nummern nach HA / LUW geben die Sorte/ Linie an. Unterschiedliche Buchstaben zeigen einen signifikanten Unterschied auf, MMANOVA mit Jahr als Zufallsfaktor, $p < 0,05$. 101

Abbildung 39: Unkrautbiomasse in den Gemengevarianten (nach Hafer, Weiße Lupine-Sorte, Saatstärke der Lupine) des AP 7 am Standort TH 2019-2021 nach der Sorte der LUW (links) und in alle Varianten aufgeschlüsselt (rechts). HA = Hafer, LUW = Weiße Lupine, Nummern nach HA / LUW geben die Sorte/ Linie an. Verschiedene Buchstaben zeigen Gruppenunterschiede anhand MMANOVA mit dem Jahr als Zufallsfaktor, $p < 0,05$. 102

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Versuche zu Andenlupinen in den 3 Versuchsjahren und Prüforten	12
Tabelle 2: Übersicht des Versuches ‚LuMi-Best‘ mit Prüforten in den Jahren 2021 und 2022	12
Tabelle 3: Übersicht der Versuche zur Weißen Lupine für die 3 Versuchsjahre und Prüforte	12
Tabelle 4: Übersicht zu den Arbeitspaketen, deren Bearbeitungszeitraum und den Zeitpunkt der Zielerreichung	13
Tabelle 5: Übersicht zu den Meilensteinen, deren Fälligkeit und Zielerreichung	14
Tabelle 6: Sortennamen bzw. Herkünfte der geprüften Andenlupinen (LUA) und des Mais (MA) und deren Bezeichnung	18
Tabelle 7: Sortennamen bzw. Herkünfte der geprüften Weißen Lupinen (LUW) und der Haferarten (HA) und deren Bezeichnung	18
Tabelle 8: Gesamttrockenmasseerträge (GTM-Ertrag) der Gemenge von Mais und Andenlupine, verrechnet über die 3 Standorte Groß Lüsewitz, Braunschweig und Trenthorst für die Jahre 2019 - 2021	20
Tabelle 9: TM-Ertrag der Andenlupine angebaut im Gemenge mit Mais, verrechnet über die 3 Standorte Groß Lüsewitz, Braunschweig und Trenthorst für die Jahre 2019 - 2021	20
Tabelle 10: Gesamt- und Andenlupinentrockenmasseertrag [GTM- bzw. LUA-TM-Ertrag] sowie der prozentuale Anteil an Andenlupinen [LUA-Anteil] im Gemenge von Mais mit Andenlupinen für die Jahre 2019 – 2021 getrennt für die Prüforte Groß Lüsewitz (GL), Braunschweig (BS) und Trenthorst (TH)	21
Tabelle 11: Trockenmasseerträge [TME] der Andenlupinen-Maisgemenge [GM], Mais- und Andenlupinen [LUA]-Reinsaaten im Mittel der Jahre 2021 und 2022 sowie der 9 Umwelten	25
Tabelle 12: Biogasausbeute [IN-kg-1 oS] und Methananteil im Biogas [Vol.% Methan] für die Andenlupinen-Maisgemenge sowie der Reinsaaten von Andenlupine bzw. Mais am Standort Groß Lüsewitz im Mittel der Jahre 2021 und 2022	25
Tabelle 13: Mittelwerte, Spannweiten und Zusammensetzung der GTM-Erträge im Gemenge aus AP 3.1 im Vergleich zu den Reinsaaten (AP 3.2) für die Jahre 2019 - 2021 für die Versuchsstandorte Groß Lüsewitz (JKI-GL) und Braunschweig (JKI-BS)	26
Tabelle 14: F-Werte und p-Werte für den Gesamttrockenmasseertrag (GTM-Ertrag), Andenlupinen (LUA)-TM-Ertrag und Mais-TM-Ertrag der Gemengevarianten, verrechnet über die beiden Standorte Groß Lüsewitz und Braunschweig über die Jahre 2019 - 2021	27
Tabelle 15: Varianzanalyse (Mixed Linear Model ANOVA mit Jahr als random factor) des Effekts der anbautechnischen Einflussgrößen und ihrer Kombinationen auf den GTM-Ertrag im Gemengeanbau der Andenlupinen LUA 1 und LUA 2 mit Mais MA 1 von 2019-2021 am Standort TH, n = 45.	28
Tabelle 16: Mittelwerte, Spannweite und Zusammensetzung der Gesamttrockenmasse (GTM)-Erträge der Gemenge aus AP 6.1 im Vergleich zu den Reinsaaten von Weißer Lupine (LUW) und Hafer (AP 6.2) in den 10 Umwelten der Jahre 2019-2021	30
Tabelle 17: In AP 7 verwendete Saatstärken der Gemengepartner.	32
Tabelle 18: Varianzanalyse (Rang-transformierte Mixed Linear Model ANOVA mit Jahr und Wiederholung als random factor) des Effekts der anbautechnischen Einflussgrößen und ihrer Kombinationen auf den Ertragsgewinn im Gemengeanbau der Weißen Lupinen-Sorten ‚TRI‘, ‚Rumbo‘, ‚Energy‘ mit den Hafern ‚Arborg‘ und ‚Abyz‘ von 2019-2021 am Standort TH, n = 72.	33
Tabelle 19: Prüfglieder für die Silierversuchsansätze	34
Tabelle 20: Informationen zu verwendeten Siliermitteln	34
Tabelle 21: Gäreigenschaften des Silierguts der LUA-Mais- und LUW-Hafer-Gemenge sowie deren Reinsaaten der Versuchsjahre 2019-2021/2022 von den Versuchsansätzen LuMi-opt und LuMi-BEST, Kontrolle: ohne Siliermittel, Zusatz: mit Siliermittel	36
Tabelle 22: Silagequalität nach 90 Tagen Silierdauer der LUA-Mais- und LUW-Hafer-Gemenge sowie deren Reinsaaten der Versuchsjahre 2019-2021/2022 von den Versuchsansätzen LuMi-opt und LuMi-BEST, Kontrolle: ohne Siliermittel, Zusatz: mit Siliermittel	38

Tabelle 23: Gärprodukte in den Silagen nach 90 Tagen Silierdauer der LUA-Mais- und LUW-Hafer-Gemenge sowie deren Reinsaaten der Versuchsjahre 2019-2021/2022 von den Versuchsansätzen LuMi-opt und LuMi-BEST, (MS=Milchsäure, ES=Essigsäure, PS=Propionsäure, ETH=Ethanol, PD=1,2-Propandiol, BD=2,3-Butandiol, BS=Buttersäure, PA=Propanol, BA=Butanol), Kontrolle: ohne Siliermittel, Zusatz: mit Siliermittel	39
Tabelle 24: Aerobe Stabilität (ASTA) von Silagen nach 90 Tagen Silierdauer der LUA-Mais- und LUW-Hafer-Gemenge sowie deren Reinsaaten der Versuchsjahre 2019-2021/2022 von den Versuchsansätzen LuMi-opt und LuMi-BEST sowie deren Qualitätsbewertung nach ASTA, Kontrolle: ohne Siliermittel, Zusatz: mit Siliermittel	40
Tabelle 25: Rohnährstoffe inkl. Stärke von Siliergut (Ernte) und Silagen (Kontrolle und mit Siliermitteln) nach 90 Tagen Silierdauer der LUA-Mais- und LUW-Hafer-Gemenge sowie deren Reinsaaten der Versuchsjahre 2019-2021/2022 (XP=Rohprotein, XA=Rohasche, XF=Rohfaser, XS=Stärke, XZ=Zucker) von den Versuchsansätzen LuMi-opt und LuMi-BEST	42
Tabelle 26: ELOS und Gerüstsubstanzen von Siliergut (Ernte) und Silagen (Kontrolle und mit Siliermitteln) nach 90 Tagen Silierdauer der LUA-Mais- und LUW-Hafer-Gemenge sowie deren Reinsaaten der Versuchsjahre 2019-2021/2022 (ELOS=Enzymlösliche Organische Substanz, ADFom=Säure-Detergentien-Faser, aNDFom=Neutrale-Detergentien-Faser) von den Versuchsansätzen LuMi-opt und LuMi-BEST	43
Tabelle 27: Signikanztabelle für Rohnährstoffe inkl. Stärke, ELOS und Gerüstsubstanzen der 3-fachen Wechselwirkung Jahr $\times$ Prüfglied $\times$ Kontrolle/Silierungsmittelbehandlung der Versuchansätze LuMi-opt und LuMi-BEST (SAS 9.4, (p < 0,05))	43
Tabelle 28: Gemittelte Analysenergebnisse der Substrate von AP 6.1 (Weiße Lupine und Hafer) vom Standort Groß Lüsewitz der Ernte 2019 bis 2021 sowie der Reinsaaten der Ernte 2021 (TS: Trockensubstanz, oTS: organische Trockensubstanz, oS: organische Substanz)	45
Tabelle 29: Gemittelte Analysenergebnisse der Substrate von AP 2.4 (Andenlupine und Mais) vom Standort Groß Lüsewitz der Ernte 2019 bis 2021 (TS: Trockensubstanz, oTS: organische Trockensubstanz, oS: organische Substanz)	45
Tabelle 30: Gemittelte Analysenergebnisse der Substrate von AP 3.1 (Andenlupine und Mais) vom Standort Groß Lüsewitz der Ernte 2019 bis 2021 sowie der Reinsaaten von Andenlupinen (AL) und Mais der Ernte 2021 (TS: Trockensubstanz, oTS: organische Trockensubstanz, oS: organische Substanz)	45
Tabelle 31: Gemittelte Analysenergebnisse der LuMi-Best-Varianten (Andenlupine und Mais) sowie der Reinsaaten von Andenlupinen (AL) und Mais vom Standort Groß Lüsewitz sowie Silagen aus Braunschweig der Ernte 2022 (TS: Trockensubstanz, oTS: organische Trockensubstanz, oS: organische Substanz)	46
Tabelle 32: Biogas- und Methanausbeuten der Substrate von AP 6.1 (Weiße Lupine und Hafer) vom Standort Groß Lüsewitz der Ernten 2019 bis 2021 sowie der Reinsaaten (RS) der Ernte 2021 (l _N : Normliter, FM: Frischmasse, oS: organische Substanz)	47
Tabelle 33: Biogas- und Methanausbeuten der Andenlupinen-Mais-Gemenge von AP 2.4 vom Standort Groß Lüsewitz der Ernten 2019 bis 2021 (l _N : Normliter, FM: Frischmasse, oS: organische Substanz)	47
Tabelle 34: Biogas- und Methanausbeuten der Andenlupinen-Mais-Gemenge von AP 3.1 vom Standort Groß Lüsewitz der Ernten 2019 bis 2021 sowie der Reinsaaten der Ernte 2021 (l _N : Normliter, FM: Frischmasse, oS: organische Substanz)	47
Tabelle 35: Biogas- und Methanausbeuten der Andenlupinen-Mais-Gemenge (LuMi-Best) und der Reinsaaten vom Standort Groß Lüsewitz der Ernte 2022 sowie der Silagen von Braunschweig (l _N : Normliter, FM: Frischmasse, oS: organische Substanz)	48
Tabelle 36: Prozessparameter und chemische Analysengrößen während der Versuchszeit	49
Tabelle 37: Analysenergebnisse der drei verwendeten Gemenge (frisch) aus Andenlupine und Mais im kontinuierlichen Versuch	50
Tabelle 38: Wöchentliche Analysenergebnisse des verwendeten Gemenges (frisch) der Variante 6503 vom 50. bis zum 120. Versuchstag im Fermenter 1 während der Versuchsphase	50
Tabelle 39: Wöchentliche Analysenergebnisse vom Fermenter 1 während der Hochfahr- und Versuchsphase	52
Tabelle 40: Essigsäure, Buttersäure, Essigsäureäquivalent (ES äq.), Gesamtstickstoff (N _{gesamt}) und Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N) in der Hochfahr- und Versuchsphase von Fermenter 1	53
Tabelle 41: Wöchentliche Analysenergebnisse des verwendeten Gemenges (frisch) der Variante 6510 vom 50. bis zum 120. Versuchstag im Fermenter 2 während der Versuchsphase	54

Tabelle 42: Wöchentliche Analysenergebnisse vom Fermenter 2 während der Hochfahr- und Versuchsphase	55
Tabelle 43: Essigsäure, Buttersäure, Essigsäureäquivalent (ES äq.), Gesamtstickstoff (N gesamt) und Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N) in der Hochfahr- und Versuchsphase von Fermenter 2	56
Tabelle 44: Wöchentliche Analysenergebnisse des verwendeten Gemenges (frisch) der Variante 6519 vom 50. bis zum 120. Versuchstag im Fermenter 3 während der Versuchsphase	57
Tabelle 45: wöchentliche Analysenergebnisse vom Fermenter 3 während der Hochfahr- und Versuchsphase	58
Tabelle 46: Essigsäure, Buttersäure, Essigsäureäquivalent (ES äq.), Gesamtstickstoff (N gesamt) und Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N) in der Hochfahr- und Versuchsphase von Fermenter 3	59
Tabelle 47: Analysenergebnisse der drei verwendeten Gemenge aus Andenlupine und Mais im zweiten kontinuierlichen Versuch	60
Tabelle 48: wöchentliche Analysenergebnisse des verwendeten Gemenges der Variante L265/ Smoothi frisch im Fermenter 1 während der Versuchsphase	61
Tabelle 49: wöchentliche Analysenergebnisse vom Fermenter 1 während der Versuchsphase	63
Tabelle 50: Essigsäure, Buttersäure, Essigsäureäquivalent (ES äq.), Gesamtstickstoff (N gesamt) und Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N) in der Versuchsphase von Fermenter 1	64
Tabelle 51: wöchentliche Analysenergebnisse des verwendeten Gemenges der Variante L265/ Smoothi siliert im Fermenter 2 während der Versuchsphase	65
Tabelle 52: wöchentliche Analysenergebnisse vom Fermenter 2 während der Versuchsphase	67
Tabelle 53: Essigsäure, Buttersäure, Essigsäureäquivalent (ES äq.), Gesamtstickstoff (N gesamt) und Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N) in der Versuchsphase von Fermenter 2	68
Tabelle 54: wöchentliche Analysenergebnisse des verwendeten Gemenges der Variante L265/ Smoothi siliert mit einem Siliermittel im Fermenter 3 während der Versuchsphase	69
Tabelle 55: wöchentliche Analysenergebnisse vom Fermenter 3 während der Versuchsphase	71
Tabelle 56: Essigsäure, Buttersäure, Essigsäureäquivalent (ES äq.), Gesamtstickstoff (N gesamt) und Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N) in der Versuchsphase von Fermenter 3	72
Tabelle 57: Mittlerer GTM-Ertrag von 5 Andenlupinen zu jeweils 3 unterschiedlichen Saatzeitpunkten (V1 bis V3) der Andenlupinen in Kombination mit der Maishybride AGRO ESPIRITO in den Jahren 2019, 2020 und 2021 am Standort Groß Lüsewitz und die Resultate der 3-jährigen Betrachtung dieser Versuchsdaten in der Serienverrechnung	80
Tabelle 58: Signifikanztabelle für Rohnährstoffe (XP=Rohprotein, XS=Stärke, XF=Rohfaser, ELOS=Enzymlösliche Organische Substanz) und ELOS der Wechselwirkungen von den Versuchsansätzen LUA-Mais und LUW-Hafer (Jahr $\times$ Prüfglied $\times$ Prüfort) sowie LuMi-Best (Umwelt $\times$ Prüfglied), (SAS 9.4, ($p < 0,05$))	80
Tabelle 59: N _{min} -Gehalte (kg ha ⁻¹) im Frühjahr zur Aussaat der Versuche für die Jahre 2019 bis 2021 am Standort Trenthorst in 0-90 cm Tiefe	97
Tabelle 60: N _{min} -Gehalte (kg ha ⁻¹) im Herbst nach der Ernte für die Jahre 2019 bis 2021 am Standort Trenthorst in 0-60 cm Tiefe	98
Tabelle 61: N _{min} -Gehalte (kg ha ⁻¹) im Herbst nach der Ernte für die Jahre 2020 und 2021 am Standort Trenthorst in 0-60 cm Tiefe dargestellt für die Wechselwirkung von Sorte und Jahr	98
Tabelle 62: N ₂ -Fixierleistung [kg ha ⁻¹] der Andenlupinen in Reinsaat und im Gemenge mit Mais sowie gemittelt über den Anbau in Reinsaat und Gemenge	99
Tabelle 63: N ₂ -Fixierleistung [kg ha ⁻¹] der Weißen Lupine im Mittel der Jahre, der Anbau-form und der Sorte am Standort Trenthorst	100
Tabelle 64: N ₂ -Fixierleistung [kg ha ⁻¹] der Weißen Lupine im Mittel der Jahre, der Anbau-form und der Sorte am Standort Trenthorst	100

Tabelle 65: Gemengeindices Landequivalent-Index (LER) und Ertragsgewinn (actual yield loss, AYL) der Gemengevarianten aus AP 7 am Standort TH 2019-2021. HA = Hafer, LUW = Weiße Lupine, Nummern nach HA / LUW geben die Sorte / Linie an

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

In dem hier berichteten Forschungsvorhaben mit dem Akronym LuMi-opt wurde untersucht, ob die beiden Kulturartkombinationen Andenlupine (*L. mutabilis*) und Mais (*Zea mays*) sowie Weiße Lupine (*L. albus*) und Hafer (*Av. sativa*; *Av. byzantina* und *Av. strigosa*) für den Gemengeanbau im Ertragsmerkmal Biomassebildung über die notwendige Leistungsfähigkeit verfügen. Hierzu wurden erstmals unter dem Schwerpunkt ‚Einsatz der Andenlupine (*Lupinus mutabilis*) für die energetische Nutzung‘ entlang der gesamten dann wirksamen Wertschöpfungskette von der Saatgutproduktion bis zur Verarbeitung der im Gemenge gebildeten Biomasse Fragestellungen identifiziert, diese mit entsprechenden Versuchen bearbeitet und beantwortet oder durch auftretende Fragenstellungen weiter präzisiert. Durch die optimierte Identifikation von pflanzlichen Partnern, die im Gemengeanbau eine sehr hohe Biomasseleistung zeigen, wurde versucht, überlegene Kombinationen der Gemengepartner zu finden und bereits hiermit für die Praxis empfehlenswerte Kombinationen von Genotypen einzelner Partnerspezies zu benennen. Fragen, die sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette stellten, betrafen bei dieser bislang nicht gängigen und demzufolge neuen Methode pflanzenzüchterische und pflanzenbauliche Verfahren sowie Aspekte der Verwertbarkeit der gebildeten Biomasse. Es stellten sich u. a. Fragen zu der Saatgutvermehrung und Identifikation einzelner für die Biomassebildung wertvoller Genotypen, zu der optimierten Bestandesdichte beider Partner, zur Silierung bis zu einer abschließenden Verwertung sowie der Zusammensetzung der gebildeten Biomasse und des daraus entstandenen Biogases.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

In dem von der FNR geförderten Verbundvorhaben „Züchterische Evaluierung der Andenlupine (*L. mutabilis*) im Vergleich zur Weißen (*L. albus*) und zur blauen Lupine (*L. angustifolius*) für die Bioenergienutzung“ (FKZ: 22402111 bzw. 11EKF021) wurden in den Jahren 2014 bis 2017 verschiedene Lupinenarten und -linien bzw. -sorten als potentielle Energiepflanzen auf 3 Standorten (Groß Lüsewitz (MV), Braunschweig (NDS) und Triesdorf (BY)) evaluiert. Unter den geprüften Andenlupinen konnten einige Linien mit einem hohen Biomasseertragspotential identifiziert werden. Hierbei wurde ein mittlerer GTM-Ertrag in Höhe von 175 dt ha⁻¹ bzw. im Maximum 220 dt ha⁻¹ GTM-Ertrag erzielt, sodass die Ertragsleistungen nahezu an die von Mais zur Silagenutzung heranreichten. Die GTM-Erträge der Andenlupinen lagen auf einem deutlich höheren Niveau im Vergleich zur Weißen Lupinen, die im Durchschnitt der Prüforte und Jahre einen GTM-Ertrag von 100 dt ha⁻¹, im Maximum jedoch auch bis über 150 dt ha⁻¹ erreichte.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde das Projekt „Züchtungsmethodisch optimierte Kombination von Gemengepartnern der Andenlupine und Mais sowie der Weißen Lupine und Hafer mit dem Ziel der Biomasseproduktion unter Nutzung ökosystemarer Leistungen der Lupine“ (Akronym LuMi-opt) als Verbundvorhaben mit 4 Partnerinstitutionen konzipiert, wobei der Fokus bei den Lupinen zum einen auf die Andenlupine und zum anderen auf die Weiße Lupine gelegt wurde. Aufgrund der bei reduzierter Standfläche verminderten Standfestigkeit und der durchschnittlich geringeren Ertragsleistungen der Lupinen im Vergleich zu Mais oder Getreide wurde gezielt auf den Gemengeanbau fokussiert, d.h. auf den Anbau von Andenlupinen mit Mais bzw. von Weißen Lupinen mit Hafer. Ziel war es leistungsfähige Kombinationen von einerseits Andenlupinen mit Mais und andererseits von Weißer Lupine und Hafer für die Biomasseproduktion zu identifizieren, um auf diese Weise einen Beitrag zur Diversifizierung von Anbausystemen zu leisten.

Im Fokus der Untersuchungen im Projekt LuMi-opt stand auch die Frage nach dem optimalen Nutzungszeitpunkt bzw. der Erreichung des für die Silierung angestrebten optimalen TS-Gehaltes. Im Vorgängerprojekt hatte sich gezeigt, dass die Lupinen, insbesondere die Andenlupinen zum Zeitpunkt der Biomassebeerntung, zumeist einen noch zu geringen TS-Gehalt aufwiesen, der sich oftmals im Bereich von 20 bis 23% bewegte. Für eine optimale Herstellung von Silagen für die Biogasproduktion werden jedoch TS-Gehalte von 28 - 35% angestrebt. Durch die Kombination der Lupinen mit frühzeitiger abreifenden Gemengepartnern, d.h. Mais oder Hafer sollten höhere TS-Gehalte zum Erntezeitpunkt realisiert werden.

Gesamtziel des Verbundvorhabens LuMi-opt war es durch die Integration von Lupinen mit hohem Biomassepotenzial in alternative Anbausysteme die Erschließung von Ökosystemleistungen der Leguminosen für den Energiepflanzenanbau zu ermöglichen. Das System des Gemengeanbaus von Mais mit Andenlupinen wurde durch die an die Züchtungsmethodik der Hybridzüchtung angelehnte, optimierte Zusammenführung von Partnern, die auf ihre Eignung zur Kombination mit der jeweiligen komplementären Partnerspezies getestet wurden, einen Beitrag zu einer nachhaltigeren Biomasseproduktion und zu einer Erhöhung der Kulturartenvielfalt in diesem Bereich leisten. Exemplarisch wurde dieser Ansatz außerdem für die Kombination von Weißer Lupine und Hafer geprüft.

Damit handelte es sich bei dem Verbundvorhaben LuMi-opt um eines der ersten Projekte, das sich mit dem Gemengeanbau von Lupinen mit Mais bzw. Hafer als weiteren Partner für die Biomasseproduktion befasst hat.

Zur Klärung der damit verbundenen Fragestellungen wurde das Verbundvorhaben mit entsprechenden Partnern konzipiert. Dazu gehörte das JKI, das sich neben der Zurverfügungstellung von Prüforten, der Koordination des Bedarfs und der Vermehrung des Saatguts (JKI-Groß Lüsewitz) auch mit der Eignung der Gemeinde zur Silierung (JKI-Braunschweig) und damit auch einer möglichen Konservierung, beschäftigte. Weitere Kooperationspartner waren die Universität Rostock, an der die Biogasausbeute verschiedener Gemeinde untersucht wurden sowie das Thünen-Institut für Ökologischen Landbau (Trenthorst), an dem neben den gemeinsamen Leistungsprüfungen weitere pflanzenbauliche Fragestellungen zu unterschiedlichen Saatstärken der Andenlupinen im Gemeinde mit Mais bzw. Saatstärkenverhältnissen von Weißer Lupine und Hafer unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus, bearbeitet wurden. Zusätzlich wurden Untersuchungen zur Durchwurzelung, zur N-Fixierleistung und zur Infiltrationsleistung durchgeführt. Neben dem Gemeinde aus Andenlupine und Mais wurden für die Produktion von Biomasse auf deutlich südlich gelegenen mitteleuropäischen Anbaugeländen verschiedene Kombinationen aus vorgeprüften Sorten und Zuchtlinien der Weißen Lupine (*Lupinus albus*) im Gemeinde mit Hafer (*Avena ssp.*) untersucht. Feldprüfungen hierfür wurden zusätzlich im Unterauftrag von den weiter südlich in Bayern gelegenen Landwirtschaftlichen Lehranstalten Triesdorf in Form von Leistungsprüfungen durchgeführt.

In den Tabelle 1 – 3 werden die durchgeführten Versuche einschließlich ihrer Zuordnung zu den jeweiligen Arbeitspaketen aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht der Versuche zu Andenlupinen in den 3 Versuchsjahren und Prüforten

Versuche	Jahr Standorte	2019			2020			2021		
		GL	BS	TH	GL	BS	TH	GL	BS	TH
LUA-Eigenleistungsprüfung (AP 2.1)		x								
7 LUA x 2 Mais (AP 2.2 und 2.3)		x	x	x	x	x	x	x	x	x
12 LUA x 2 Mais (AP 2.4 und 2.5)		x	x	x	x	x	x	x	x	x
7 Mais x 2 LUA (AP 3.1 und 3.2)		x	x		x	x		x	x	
LUA-Saatzeitenversuch (AP 4.1)		x			x			x		
LUA-Saatstärkenversuch (AP 4.2)			x			x			x	

GL – Groß Lüsewitz, BS – Braunschweig, TH - Trenthorst

Tabelle 2: Übersicht des Versuches ‚LuMi-Best‘ mit Prüforten in den Jahren 2021 und 2022

Versuche	Jahr Standorte	2021			2022			GL-ö	BS-ö	TD
		GL	BS	TH	GL	BS	TH			
LUA-Mais (Lumi-BEST) (AP 2.1)		x								

GL – Groß Lüsewitz, BS – Braunschweig, TH – Trenthorst

Tabelle 3: Übersicht der Versuche zur Weißen Lupine für die 3 Versuchsjahre und Prüforte

Versuche	Jahr Standorte	2019				2020				2021			
		GL	BS	TH	TD	GL	BS	TH	TD	GL	BS	TH	TD
LUW-Eigenleistungsprüfung					x				x				x
4 LUW x 4 Hafer		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
LUW-Hafer-Aussaatsstärkenversuch				x				x				x	

GL – Groß Lüsewitz, BS – Braunschweig, TH - Trenthorst

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

In Tabelle 4 sind alle innerhalb der Projektarbeiten bei den jeweiligen VersuchsanstellerInnen bearbeiteten und abgeschlossenen Arbeitspakete zu finden. Desweiteren sind hier auch etwaigende Meilensteine der Arbeiten terminlich einsehbar.

Tabelle 4: Übersicht zu den Arbeitspaketen, deren Bearbeitungszeitraum und den Zeitpunkt der Zielerreichung

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 Planung der Feldversuche, Saatgut- und Datenmanagement	03/2019 bis 04/2019	04/2019
AP 2.1 LUA Evaluierung	03/2019 bis 10/2019	10/2019
AP 2.2 LUA-Mais LP Kombination LUA-Mat.1	03/2019 bis 10/2019	10/2019
AP 2.3 LUA LP Reinkultur zu AP 2.2	03/2019 bis 10/2019	10/2019
AP 2.4 LUA-Mais-LP Kombination LUA-Mat.2	03/2020 bis 10/2021	10/2021
AP 2.5 LUA LP Reinkultur zu AP 2.4	03/2020 bis 10/2021	10/2021
AP 3.1 Mais-LUA LP Kombination	03/2019 bis 10/2021	10/2021
AP 3.2 Mais LP Reinkultur zu AP 3.1	03/2019 bis 10/2021	10/2021
AP 4.1 LUA-Mais Saatzeitpunkt	03/2019 bis 10/2021	10/2021
AP 4.2 LUA-Mais Reihenweite, Saatstärke	03/2019 bis 10/2021	10/2021
VL 1 LuMi-BEST: LUA-Mais LP Kombinationen	03/2022 bis 10/2022	10/2022
VL 2 LuMi-BEST: LUA- und Mais Reinkulturen	03/2022 bis 10/2022	10/2022
VL 3 Wurzeluntersuchungen, N ₂ -Fixierleistung, N _{min} -Analysen	03/2019 bis 03/2023	09/2023
AP 5 Evaluierung Weiße Lupine (LUW)	03/2019 bis 09/2020	09/2020
AP 6.1 LUW-HA LP Spezifische Kombination	03/2019 bis 09/2020	09/2020
AP 6.2 LUW-HA LP Reinkultur zu AP 6.1	03/2019 bis 09/2020	09/2020
AP 7 LUW-HA Saatstärkenverhältnisse	03/2019 bis 09/2020	09/2020
AP 8/VL Silierung	08/2019 bis 03/2023	07/2023
AP 9/VL Biogas und Methanausbeute	08/2019 bis 12/2023	12/2023
AP 10 Vermehrung LUA + LUW	03/2019 bis 03/2021	03/2021
AP 11 Demonstrationsanbau	03/2021 bis 11/2021	11/2021
AP 12 Saatgutmanagement	Durch langfristigen krankheitsbedingten Ausfall Ergänzung auf der Position der Koordination durch Dr. Herwart Böhm (TI-OL) Folglich gemeinsame Bearbeitung von AP 12 und AP 13	
AP 13/VL Daten, Verrechnung, Bericht		

Tabelle 5: Übersicht zu den Meilensteinen, deren Fälligkeit und Zielerreichung

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1 Identifizierung von BM-PRG der Andenlupine für den Einsatz in LP der AP 2.4 und 2.5	Erreicht (s. ZB 2020).	AP 2.1: Erreicht
M 2 Beurteilung der Gemengetauglichkeit von LUA-Material I anhand von LP über mehrere Umwelten	Erreicht (s. ZB 2020).	AP 2.2 & 2.3: Erreicht
M 3 Etablierung der Labor-Silierversuche und Bestimmung der Silierfähigkeit und –qualität des 1. Anbaujahres	Erreicht (s. ZBe 2020 und 2021).	AP 8: Erreicht
M 4 Erfolgreiche Vermehrung von LUA-Genotypen in Chile für die Durchführung von LP im 2. und 3. PJ E	Erreicht (s. ZBe 2020 und 2021).	AP 10: Erreicht
M 5 Abschluss von Batchversuchen mit Aufwuchs des 1. Projektjahres	Erreicht 08/2020 (s. ZBe der Uni. Rostock).	AP 9: M 5 wurde planmäßig erreicht. Von allen geernteten Biomassen des 1. Projektjahres wurden die Biogas- und Methanausbeuten bestimmt.
M 6 Identifizierung von BM-PRG der Weißen Lupine für weitere Untersuchungen	Erreicht (s. ZB 2021).	AP 5: Erreicht
M 7 Beurteilung der Gemengetauglichkeit von LUW-Mat. durch LP über mehrere Umwelten in den PJ1 u. PJ2	Erreicht (s. ZB 2021).	AP 6.1 & 6.2: Erreicht
M 8 Beurteilung der Gemengetauglichkeit von Mais-Mat. durch LP über mehrere Umwelten in PJ1 und PJ2	Erreicht (s. ZB 2021).	AP 3.1 & 3.2: Erreicht
A-MS-1 Beurteilung der Andenlupinen/Mais-Kombinationen anhand des Anforderungskatalogs.	Erreicht (s. ZB 2021).	AP 11: Erreicht
M 9 Erfolgreiche Vermehrung von LUA-Genotypen in Chile für die Durchführung von LP in PJ3	Saatgutversorgung aller geplanten Versuche wurde durch den Vermehrungsanbau in Chile gesichert	AP 10: Erreicht
M 10 Abschluss von Batchversuchen mit Aufwuchs aus PJ2	Erreicht 03/2021 (s. ZBe der Universität Rostock)	AP 9: Von allen Biomassen des 2. Projektjahres wurden die Biogas- und Methanausbeuten planmäßig bestimmt. Somit wurde auch der M 10 erreicht.
M 11 Beurteilung der Gemengetauglichkeit von LUA-Material II anhand von LP über mehrere Umwelten in PJ2 und PJ3	Erreicht (s. ZB 2022)	AP 2.4 & 2.5: Erreicht
M 12 Abschluss von Batch-Versuchen mit Ausgangsmaterial aus PJ 3	ZB durch Universität Rostock	AP 9: Erreicht
M 13 Versuch zur Saatgutvermehrung	Der Versuch wurde im Rahmen des	VL-Saatgutvermehrung / -erzeugung: Erreicht

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
abgeschlossen	Unterauftrages der LLA Triesdorf durchgeführt und abgeschlossen.	
M 14 Bewertung der LuMi-BEST-Varianten und Beurteilung im Vergleich mit den LUA-Mais-Anbauversuchen der 3 PJ	Das LuMi-BEST-Material wurde im Jahr 2021 in 6 und 2022 in 3 Umwelten geprüft. Insgesamt liegen somit Resultate aus 9 Umwelten vor.	VL 1 & 2: LuMi-Best: Erreicht
M 15 Silierversuche LuMi-BEST	Silierversuche in LuMi-BEST wurden durchgeführt.	AP 9/VL: Erreicht

b) Zusammenfassung

Die hier berichteten Projektarbeiten ‚Züchtungsmethodisch optimierte Kombination von Gemengepartnern der Andenlupine und Mais sowie der Weißen Lupine und Hafer mit dem Ziel der Biomasseproduktion unter Nutzung ökosystemarer Leistungen der Lupine‘ wurden als Verbundvorhaben durchgeführt. Beteiligt waren:

- Institut für Züchtungsforschung an landwirtschaftlichen Kulturen in Groß Lüsewitz, Julius Kühn-Institut (Teilvorhaben 1, Koordination),
- Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde in Braunschweig, Julius Kühn-Institut (Teilvorhaben 1),
- Institut für Ökologischen Landbau in Trenthorst, Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für ländliche Räume, Wald und Fischerei (Teilvorhaben 2),
- Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Professur Agrartechnologie und Verfahrenstechnik (Teilvorhaben 3).

Die drei erst genannten Institute sind geographisch maximal ca. 220 km von den Küsten Norddeutschlands entfernt, mit jeweils komplementären Schwerpunkten und der Möglichkeit und Bereitschaft zur Anlage umfangreicher Feldversuche.

Ziel der Projektarbeiten war neben der Identifikation optimierter Partner der Andenlupine (LUA) und Mais für Standorte mit kürzeren Tageslängen durch den Gemenge-Anbau von Weißer Lupine (LUW) und Hafer einen möglichst hohen Gesamttrockenmasseertrag (GTM-Ertrag) zu generieren. Unter der Mitwirkung von 3 bzw. 2 der beteiligten Institute wurde gezeigt, dass die Gemenge auf einem nur etwas geringeren Niveau im Vergleich zu den Reinsaaten von Mais lagen. Die Maissorte und auch die Andenlupinenherkunft hatte keinen nachzuweisenden Einfluss auf den GTM-Ertrag. Es wurde ein signifikanter Effekt der LUA-Herkunft auf die LUA-GTM-Erträge nachgewiesen, wobei auch Interaktionen von Umwelt und LUA vorlagen. Die Ergebnisse zeigten, dass zwei LUA-Linien in 7 bzw. 8 von insgesamt 9 geprüften Umwelten die höchsten LUA-TM-Erträge erzielt haben. Diese Linien sind damit für einen Gemengeanbau mit Mais vorrangig einzusetzen.

Die geprüften 4 Stämme der Weißen Lupine und der 4 Haferherkünfte waren so angelegt, dass jeder Stamm und alle Haferherkünfte gleich oft und in allen Kombinationen vorhanden waren. Die Leistungsprüfungen wurden in 3 Jahren an jeweils 4 Standorten angelegt, wovon 10 Umwelten auswertbar waren. Nur in 2 von 16 Fällen erzielten die Prüfglieder im Gemenge deutlich höhere Trockenmassewerte, als aus ihren Reinsaaten zu erwarten war. Allgemein fiel das Ertragsniveau der Weißen Lupinen und des Hafers sowohl in den Reinsaaten, als auch in den Gemengen niedriger aus als erwartet.

Am Julius Kühn-Institut wurde in Groß Lüsewitz neben der Konzeption der umfangreichen Leistungsprüfungen auch der Nachweis erbracht, dass es keinerlei Vorteil bezüglich der gebildeten GTM ist, wenn die Andenlupinen (LUA) unter Ausnutzung ihrer besseren Kühletoleranz vor (1 oder 2 Wochen) dem Gemengepartner Mais ausgesät werden.

Grundlegende Evaluierungen der LUA erfolgten hier. Desweiteren wurde hier die in Südamerika erfolgte Saatgutvermehrung der LUA zentral für das gesamte Konsortium geplant und durchgeführt.

Die Saatstärke und die Reihenweite der LUA in Kombination mit Mais wurde am Thünen-Institut für Ökologischen Landbau untersucht. Die Saatstärke der LUA sollte aufgrund der voraussichtlich im Vergleich zu Mais höheren Saatgutkosten (Saatgutknappheit, Vermehrung in Südamerika) den Wert von 10 kf Kö m⁻² in der Kombination mit 8 kf Kö m⁻² Mais nicht übersteigen. Desweiteren sollte der Anbau mit einer Reihenweite von 37,5 cm erfolgen, damit ein leichter Mehrertrag realisiert werden kann.

Profilwanduntersuchungen zeigten den Einfluss des Gemengeanbaus von LUA und Mais bzw. LUW und Hafer. Wurzelstratifikation reduziert somit den Wasserentzug der Kulturen aus dem Boden. Gemenge von LUW und Hafer zeigten eine positive unterirdische Interaktion mit gleichmäßiger Durchwurzelung des Bodenraumes wogegen dies bei den Gemengen von LUA und Mais nicht der Fall war. Deshalb muss in diesem

Anbausystem auf eine negative Interaktion geschlossen werden, die die geringere Flächennutzungseffizienz des Anbausystems LUA-Mais erklären könnte.

Am Standort Trenthorst konnte in dem Replacement-Versuch gezeigt werden, dass eine Gemengekombination aus LUW und Hafer den Reinsaaten im Ertrag überlegen war. Für die Kombination von guter Unkrautunterdrückung und einem Ertragsvorteil ist ein Gemenge mit 50 % beider Partner in der Aussaatmischung zu empfehlen. Unterschiede zwischen den verschiedenen Sortenkombinationen wurden festgestellt. So war Rumbo, in Reinsaat mit dem geringsten Ertrag, im Gemenge in Abhängigkeit vom Hafer-Partner durchaus vorteilhaft. Mit der frühreifen Sorte Arborg konnte bei 25 % LUW der höchste Ertrag als auch eine gute Unkrautunterdrückung erreicht werden.

Die N_2 -Fixierleistung der LUW war in den Reinsaaten mit durchschnittlich 77 kg ha^{-1} deutlich höher als bei den LUA mit 40 kg ha^{-1} . Im Gemengeanbau war die N_2 -Fixierleistung im Vergleich zu den Reinsaaten deutlich reduziert, auch fixierten die LUWs im Gemenge mit durchschnittlich 25 kg ha^{-1} , deutlich mehr während die LUAs lediglich 8 kg ha^{-1} Luftstickstoff fixierten.

Zur Erzeugung qualitativ guter Silagen waren bei beiden Kulturartkombinationen die Erntegutqualitäten hinsichtlich des Vergärbarkeitskoeffizienten und der Gärerschädlinge Hefen und Schimmel nicht immer genügend. Trotzdem ließen sich jeweils Silagen der Rein- und Gemengesaaten erzeugen. Durch geringe TS-Gehalte kam es bei den Reinsaaten von LUA zur Gärstaftbildung während des Silierprozesses. Jedoch wurde bei allen Laborsilagen eine akzeptierbare Ansäuerung mit den angestrebten pH-Werten zwischen 3,7 und 4,9 erzielt. Diese waren abhängig vom TS-Gehalt, der Pflanzenart und der Behandlung ohne bzw. mit einem chemischen und zwei biologischen Siliermitteln. Die Gärverluste lagen erwartungsgemäß in einer Spanne von 3,4 bis 8,2%. Höhere Verluste beim Zusatz des 2. biologischen Siliermittels wurden mit einer verstärkten Essigsäuregärung erklärt. Kontrollsilagen und Silagen mit dem Siliermittel „Zusatz biol. 1“ führten nicht zur Eliminierung der Hefen. Mit Einsatz des chemischen Siliermittels und unter Zusatz von biol. 2“ konnte die Aktivität der Hefen bei allen Silagen soweit eingeschränkt werden, dass eine aerobe Stabilität vorhanden war. Zusammenfassend war die Silierbarkeit und Gärqualität zur Erzeugung von LUA-Mais-Silagen oder LUW-Hafer-Silagen gegeben. Der oft bei den Lupinenreinsaaten zu niedrig liegende Vergärbarkeitskoeffizient wurde durch den Gemengeanbau bezüglich der Zielwertrealisierung positiv aufgewertet.

Die Rohnährstoffe, Stärke, die enzymlösliche organische Substanz und die Gerüstsubstanzen der Gemengesaaten hatten vergleichbare Gehalte zu den beteiligten Kombinationspartnern. Dabei bestand ein starker Einfluss durch deren Gehaltsunterschiede sowie der Höhe des pflanzlichen Trockenmasseanteils, der von jedem Kombinationspartner in das Gemenge eingebracht wurde. Durch die große Vielfalt der in den Versuchen eingesetzten Sorten und die Ernteorientierung an Leitsorten konnten nicht alle Prüfglieder im optimalen Reifestadium beerntet werden. Bei den LUA-Mais-Gemengesaaten war der Mais in der Regel die dominierende Frucht, was dazu führte, dass die Rohproteingehalte meist nur leicht gegenüber der Maisreinsaat erhöht waren. Im Gegenzug pendelten sich die Stärkegehalte auf einem leicht niedrigeren Niveau ein. Eine Ausnahme bildete mit höheren trockenmassebasierten LUA-Anteilen der Versuchsort Groß Lüsewitz. Dort ergaben sich gegenüber den anderen Versuchsorten Braunschweig und Trenthorst höhere Rohproteingehalte mit im Gegenzug deutlich niedrigeren Stärkegehalten. Beim LUW-Hafer-Gemengeanbau wurden meist immer höhere LUW-Anteile realisiert. Deshalb kam es bei den Gemengesaaten gegenüber der Haferreinsaat zu einer stärkeren Erhöhung der Rohproteingehalte, die sich mittig beider Fruchtarten wiederfanden.

Ziel der Arbeiten der Universität Rostock war die Beurteilung der Biogasausbeute bislang nicht in der europäischen Landwirtschaft vertretener Substrate aus dem Gemengeanbau der Weißen Lupine und Hafer sowie der Andenlupine und Mais. Die Batchversuche waren bei allen untersuchten Substraten von der Witterung beeinflusst. Das zeigte sich auch in den Biogas- und Methanausbeuten. Für die Weiße Lupine wurden Biogas- und Methanerträge erreicht, wie sie auch im Vorgängerprojekt (FKZ 22407312), für diese Art nachgewiesen wurden. Die Biogas- und Methanausbeuten für Hafer lagen im Bereich von $550 \text{ l N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTS}$, $120 \text{ l N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ und 53 Vol % Methan (LFL, 2022). Aus dem Gemenge wurde im Durchschnitt der 3 Untersuchungsjahre $164 \text{ l N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ generiert.

Für die Andenlupinen-Mais-Gemenge wurden mittlere Biogaserträge bezogen auf die Frischmasse (FM) von $153 \text{ l N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ erfasst. Die Biogasausbeuten bezogen auf die organische Substanz (oS) liegen im Durchschnitt bei $537 \text{ l N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oS}$. Der Methangehalt befindet sich mit 54 Vol. % in einem erwarteten Bereich.

Dennoch werden im Mittel der Projektarbeiten geringere Werte im Vergleich zu Maissilage ($600 \text{ bis } 650 \text{ l N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oS}$) erreicht. Bei dieser Betrachtung müssen jedoch auch die ökosystemaren Leistungen der Lupine mitberücksichtigt werden, die im Rahmen einer nachhaltigen Bewirtschaftung von besonderer Bedeutung sind.

In einem ersten kontinuierlichen Versuch mit Andenlupinen und Mais sollte als Ziel eine wöchentliche Raumlaststeigerung von $0,25 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}$ bis zum Eintreten einer Prozessstörung erreicht werden. Fermenter 3 wies als erstes Problem ab einer Raumlast von $2,71 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}$ auf, wogegen Fermenter 2 erste Prozessstörungen ab einer Raumlast von $3,30 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}$ zeigte. Fermenter 1, hingegen, lief bis zum 120. Versuchstag störungsfrei durch und erreichte damit eine Raumlast von $3,51 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}$. Die optimale Raumlast von Gülle-NawaRo-Anlagen ($2,5 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}$) konnte mit den Substraten von Fermenter 1 und 2 problemlos erreicht werden. Positiv

zu beurteilen ist des Weiteren, dass es in keinem Fermenter zur Schaumbildung und Anreicherung von Stickstoff und Ammonium gekommen ist. Damit konnte die Gemengetauglichkeit des frischen Gemengesubstrates in den Fermentern 1 und 2 nachgewiesen werden.

Mit einem frischen, silierten und silierten mit Silierzusatz Andenlupinen-Mais-Gemenge wurde ein weiterer kontinuierlicher Versuch durchgeführt. In diesem Versuch wurde mit allen drei untersuchten Gemengesubstraten eine wöchentliche Raumlaststeigerung von $0,25 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}$ erfolgreich umgesetzt. Während Fermenter 1 ab einer Raumlast von $4,04 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}$ und Fermenter 2 ab einer Raumlast von $4,21 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}$ erste prozessbiologische Störungen aufwiesen, lief Fermenter 3 bis zum 126. Versuchstag störungsfrei durch und erreichte damit eine maximale Raumlast von $4,16 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}$. Eine optimale Raumlast für Gülle-NawaRo-Anlagen wird mit $2,5 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}$ beschrieben. Diese Raumlast konnte mit allen drei untersuchten Substraten in Monovergärung problemlos erreicht werden. Der Effekt der Silierung und insbesondere der des Zusatzes des Siliermittels wirkte sich positiv auf die Stabilität des Biogasprozesses und der Biogas- sowie Methanpotentiale aus.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1 Erzielte Ergebnisse

1.1 Standorte, Versuchsdesign, Datenmanagement (AP 1)

Das hier berichteten Verbundvorhaben war gekennzeichnet von einer Vielzahl an Standorten, die jeder der Projektpartner für umfangreiche Leistungsprüfungen zur Verfügung stellte.

Entsprechend dem bei Antragstellung gelieferten Balkenplan wurden die geplanten und innerhalb dieses Planes angekündigten Versuche in ihrer Gänze durchgeführt.

Als Standorte kam es zur jeweiligen Nutzung der Versuchsfelder der beteiligten Institute: Institut für Züchtungsforschung an landwirtschaftlichen Kulturpflanzen des Julius Kühn-Institutes, Groß Lüsewitz; Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde des Julius Kühn-Institutes, Braunschweig; Thünen-Institut für ökologischen Landbau, Trenthorst. Desweiteren fungierten die Landwirtschaftlichen Lehranstalten in Triesdorf im Rahmen eines Unterauftrages als Unterauftragsnehmer und führte Leistungsprüfungen durch. Weiter hin beteiligt war die Professur für Agrartechnologie und Verfahrenstechnik der Universität Rostock.

Tabelle 6: Sortennamen bzw. Herkünfte der geprüften Andenlupinen (LUA) und des Mais (MA) und deren Bezeichnung

Bezeichnung	Sorte/Herkunft	Bezeichnung	Sorte
LUA 1	Tarwi blanco	MA 1	Agro Espirito
LUA 2	L 265	MA 2	Smoothi CS
LUA 3	L 302	MA 3	KWS Keops
LUA 4	L 393	MA 4	LG 31.227
LUA 5	Cometa	MA 5	Amaroc
LUA 6	L 292	MA 6	RGT Multiplex
LUA 7	L 315	MA 7	Amaverde
LUA 13	L 354		
LUA 15	L 403		
LUA 18	L 210		
LUA 19	L 281		
LUA 24	L 356		

Tabelle 7: Sortennamen bzw. Herkünfte der geprüften Weißen Lupinen (LUW) und der Haferarten (HA) und deren Bezeichnung

Bezeichnung	Sorte/Linie	Kulturart	Wissenschaftlicher Name
LUW 1	Energy	Weiße Lupine	<i>Lupinus albus</i> L.
LUW 2	Rumbo	Weiße Lupine	<i>Lupinus albus</i> L.
LUW 3	Celina	Weiße Lupine	<i>Lupinus albus</i> L.
LUW 4	TRI 07077	Weiße Lupine	<i>Lupinus albus</i> L.
HA 1	CDC Arborg	Hafer	<i>Avena sativa</i> L.
HA 2	Everest	Hafer	<i>Avena sativa</i> L.
HA 3	Abyz	Hafer	<i>A. sativa</i> L. x <i>A. byzantina</i>
HA 4	Codex	Hafer	<i>Avena strigosa</i>

Als Versuchsdesign wurden verschiedene Anlagen verwendet, um der jeweiligen Fragestellung des Versuchs gerecht zu werden. Die Versuche zur Evaluierung der Andenlupinen (AP 2.1) und zur Gesamttrockenmasseproduktion in Reinsaat wurden jeweils als vollständig randomisierte Anlagen in zwei Wiederholungen durchgeführt (AP 2.3, 2.5, 3.2 5 und 6.2). Der Gemengeanbau erfolgte als vollständig randomisierte Blockanlage in zwei Wiederholungen (AP 2.2, 2.4 und 3.1). Der Versuch 4.1 wurde als Randomized Complete Block Design angelegt. In der Kombination von Weißer Lupine und Hafer (AP 6.1) hingegen, wurde ein 4x4-Gitter gewählt. Bei der Zahl an Kombinationen dieses Versuches bot sich dies als vorteilhaftestes Design mit der geringsten Gefahr einer falschen Einschätzung der Prüfglieder an.

Die Versuche im Gemenge und in der Reinsaat wurden an den Standorten auf den gleichen oder unmittelbar benachbarten Schlägen durchgeführt. Dies erfolgte, um die Standorteffekte innerhalb eines Versuches zu minimieren und mit diesen Standorteffekten nicht eine zusätzliche Varianz innerhalb des Versuchs zu verursachen. Zur Gewährleistung einer fachgerechten Beerntung durch ein Dienstleistungsunternehmen wurde von einer Durchmischung der Reinsaat- und Gemenge-Parzellen abgesehen.

Die Versuche zur Gemengeeignung und die Versuche während derer die Leistung des Genotyps oder der Sorte in dem Reinsaatbau geprüft wurde, wurde separat randomisiert, um so sowohl die Aussaat als auch die Beerntung der verschiedenen Versuche durch die Position der Prüfglieder technisch zu ermöglichen.

Die zusätzlich nur am Standort Trenthorst durchgeführten Versuche in den AP 4.2 und 7 wurden als randomisierte Spaltanlage mit 3 Feldwiederholungen und dem Großparzellenfaktor ‚Reihenweite‘ sowie dem Kleinparzellenfaktor ‚Anbauvariante‘ (AP 4.2) bzw. als randomisierte vollständige Blockanlage mit 4 Feldwiederholungen (AP 7) angelegt. Die statistische Auswertung erfolgte mit R (Version 4.0.3) in R-Studio (Version 1.4.1103) oder SAS 9.4 (SAS Institute, USA) mit Hilfe entsprechender varianzanalytischer Modelle, wobei gegebenenfalls eine Datentransformation durchgeführt wurde. Mittelwerte (Ismeans) wurden mit dem Tukey-Test auf dem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ verglichen.

1.2 Prüfung verschiedener Andenlupinen-Linien in Eigenleistung und in Kombination mit zwei Mais-Hybriden (AP 2)

Gemengeleistungsprüfung von 20-25 LUA am Standort Groß Lüsewitz (AP 2.1)

Bei der Evaluierung von 20 Herkünften der Andenlupine im Gemenge mit der einheitlich eingesetzten Maishybride Agro Espirito erbrachte die leistungsfähigste Kombination im Gemenge 140,7 dt/ha. Es wurde dabei ein mittlerer Gesamt-trockenmasseertrag von 126,2 dt/ha erreicht. In der geernteten Biomasse, die in Groß Lüsewitz im Mittel zu 29 % aus Andenlupine- und 71 % aus Maisbiomasse bestand, betrug der mittlere Trockenmassegehalt zur Ernte 37,6 %. Bereits hier zeigte sich in den Projektarbeiten die Überlegenheit des Mais gegenüber seinem Gemengepartner der Andenlupine in Bezug auf die Flächenproduktivität. Bei jeweils 2 Reihen/Parzelle für jeden Gemengepartner, lag die gebildete GTM des Maises deutlich über seinem Gemengepartner, der Andenlupine. Neben verschiedenen Merkmalen (Blühbeginn-, Hauptblüte-, Blühende-Lupine, 2x Wuchshöhe, TS-Gehalt), die allesamt hochsignifikante genotypische Effekte aufwiesen, zeigten sich, in großer Übereinstimmung mit AP 3.1, auch einige Merkmale mit schwach signifikanten Wiederholungseffekten. Dies wird als ein Resultat der durch Trockenstress und damit sub-optimalen Wasser- und Nährstoffversorgung beim Mais bedingten Verstärkung der Wirkung leichter Bodeninhomogenitäten am Standort Groß Lüsewitz gewertet. Zwischen dem GTM-Ertrag der untersuchten Kombinationen und dem Anteil Mais im Erntegut bestand eine schwach positiv signifikante Korrelation; die Mais-Wuchshöhe zum Zeitpunkt des Schnittes war dagegen hochsignifikant positiv mit dem GTM-Ertrag korreliert. Dies unterstreicht den maßgeblichen Einfluss und die damit verbundene hohe Ertragsleistung hochwüchsiger Maishybriden. Den untersuchten Maishybriden kommt im Gemenge somit eine bedeutendere Rolle auf die insgesamt gebildete GTM im Vergleich zu der im Gemenge verwendeten Andenlupine zu.

Das für die Qualität des Grünschnitts negativ wirksame Merkmal Lager war hochsignifikant negativ korreliert mit dem GTM-Ertrag des Gemenges. Ebenso wirkte sich ein Anthraknose-Befall der Lupinen bei bestehendem Mais mit einem Absinken des GTM-Ertrages aus.

Gemengeanbau von Andenlupinen und Mais (AP 2.2 – 2.5)

Die Gemengeanbauversuche zu Andenlupine und Mais wurden in den Jahren 2019 – 2021 an den Standorten in Groß Lüsewitz, Braunschweig und Trenthorst in 2-facher Feldwiederholung durchgeführt. Im ersten Versuchsjahr 2019 wurden 7 Andenlupinenlinien (AP 2.2 und 2.3), in den Jahren 2020 und 2021 12 Andenlupinenlinien (AP 2.4 und 2.5) mit jeweils 2 Maissorten im Gemenge und in Reinsaat angebaut.

Die statistische Auswertung erfolgte getrennt nach Jahren für den Gesamt-Trockenmasseertrag (GTM-Ertrag), den TM-Ertrag der Andenlupinenherkünfte sowie weitere erhobene Parameter wie Ertragsanteile der Andenlupinen, Bonituren und Wuchshöhe der geprüften Varianten.

Die statistische Auswertung zeigte, dass keine signifikanten Unterschiede für die Hauptfaktoren Maissorte und Andenlupinenherkunft vorlagen (Tabelle 8). Lediglich wurde in allen 3 Anbaujahren ein statistisch gesicherter Effekt der Umwelt nachgewiesen (Tabelle 8), d.h. die 3 Standorte wiesen signifikant unterschiedlich hohe Erträge auf (Tabelle 10). Wechselwirkungen wurden für den GTM-Ertrag nicht nachgewiesen.

Tabelle 8: Gesamttrockenmasseerträge (GTM-Ertrag) der Gemenge von Mais und Andenlupine, verrechnet über die 3 Standorte Groß Lüsewitz, Braunschweig und Trenthorst für die Jahre 2019 - 2021

Effekt	2019			2020			2021		
	Num DF	F-value	Pr > F	Num DF	F-value	Pr > F	Num DF	F-value	Pr > F
Mais [MA]	1	0,02	0,8888	1	3,05	0,0850	1	0,62	0,4357
LUA	6	0,73	0,6274	11	0,61	0,8114	11	0,65	0,7811
Umwelt [UMW]	2	72,22	<,0001	2	228,17	<,0001	2	193,76	<,0001
LUA * MA	6	0,75	0,6096	11	0,82	0,6244	11	0,48	0,9117
UMW * MA	2	1,84	0,1711	2	1,72	0,1855	2	1,06	0,3526
UMW * LUA	12	0,98	0,4822	22	1,25	0,2353	21	1,23	0,2617
UMW * LUA * MA	12	0,58	0,8467	22	0,66	0,8588	20	0,58	0,9096

Hinsichtlich der Trockenmasseerträge der Andenlupinen im Gemenge zeigten sich in allen 3 Anbaujahren signifikante Effekte für die Hauptfaktoren Andenlupinenherkunft und Umwelt. Allerdings lagen in allen 3 Jahren zusätzlich Wechselwirkungen von Umwelt x LUA-Sorte auf, sodass nur diese betrachtet werden können (Tabelle 9).

Der Hauptfaktor Maissorte hatte nur im Jahr 2020 einen signifikanten Einfluss auf den TM-Ertrag der Andenlupinen, wobei der LUA-TM-Ertrag in den Kombinationen mit der Maissorte 1 mit 22,9 dt TM ha⁻¹ signifikant niedriger als in den Kombinationen mit der Maissorte 2 (25,8 dt TM ha⁻¹) war.

Tabelle 9: TM-Ertrag der Andenlupine angebaut im Gemenge mit Mais, verrechnet über die 3 Standorte Groß Lüsewitz, Braunschweig und Trenthorst für die Jahre 2019 - 2021

Effekt	2019			2020			2021		
	Num DF	F-value	Pr > F	Num DF	F-value	Pr > F	Num DF	F-value	Pr > F
Mais [MA]	1	1,41	0,2411	1	4,06	0,0477	1	0,25	0,6173
LUA	6	21,25	<,0001	11	2,98	0,0026	11	9,69	<,0001
Umwelt [UMW]	2	191,09	<,0001	2	107,89	<,0001	2	213,73	<,0001
LUA * MA	6	0,69	0,6567	11	0,56	0,8517	11	1,53	0,1430
UMW * MA	2	1,26	0,2953	2	2,48	0,0905	2	0,69	0,5032
UMW * LUA	12	4,18	0,0003	22	2,21	0,0063	21	1,78	0,0416
UMW * LUA * MA	12	0,95	0,5062	22	0,92	0,5664	20	1,17	0,3091

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der mittleren GTM-Erträge, die LUA-TM-Erträge sowie die LUA-Anteile in Prozent an dem GTM-Ertrag für die 3 Anbaujahre getrennt für die 3 Umwelten (Standorte) aufgeführt. Deutlich zeigen sich in allen 3 Jahren die höchsten LUA-Ertragsanteile für den Standort Groß Lüsewitz mit fast 50 % im Jahr 2019. Allerdings war der LUA-Anteil im Jahr 2021 an diesem Standort bei einem deutlich höheren Ertragsniveau ebenfalls deutlich niedriger. Dennoch scheinen im Vergleich mit den beiden anderen Standorten Braunschweig und Trenthorst an dem nord-östlich gelegenen Standort Groß Lüsewitz höhere LUA-Erträge sowie LUA-Ertraganteile realisierbar.

Tabelle 10: Gesamt- und Andenlupinentrockenmasseertrag [GTM- bzw. LUA-TM-Ertrag] sowie der prozentuale Anteil an Andenlupinen [LUA-Anteil] im Gemenge von Mais mit Andenlupinen für die Jahre 2019 – 2021 getrennt für die Prüforde Groß Lüsewitz (GL), Braunschweig (BS) und Trenthorst (TH)

	2019			2020			2021		
	GL	BS	TH	GL	BS	TH	GL	BS	TH
GTM-Ertrag [dt TM ha⁻¹]	120,5 a	173,8 b	170,6 b	132,0 a	192,9 b	132,8 a	193,5 b	203,3 c	122,7 a
LUA-TM-Ertrag [dt TM ha⁻¹]	59,8	19,5	18,3	48,0	20,8	18,4	35,2	10,8	5,0
LUA-Anteil [%]	48,9	11,1	10,9	37,3	10,9	14,3	18,7	5,6	4,4

unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede für den jeweiligen Parameter im jeweiligen Jahr

In den Abbildung 1 bis 3 werden für die 3 Anbaujahre die GTM-Erträge getrennt nach Mais und Andenlupine für die 3 Standorte mit den jeweiligen geprüften Andenlupinenherkünften gemittelt über die zwei Maissorten dargestellt. Zum Vergleich der Gemengeertragsleistungen wurden ergänzend die Reinsaaterträge von Mais (gemittelt über die beiden Maissorten) und von der Andenlupine mit der im Mittel der Versuche höchsten Ertragsleistung in die Abbildungen integriert.

Im Jahr 2019 zeigten die LUA-Herkünfte LUA 1 und LUA 2 an allen 3 Standorten die höchsten Andenlupinenerträge, ebenso die Herkunft LUA 7 in Braunschweig und Trenthorst sowie die herkünfte LUA 3, LUA 4 sowie LUA 6 und LUA 7 am Standort Trenthorst.

Im zweiten Versuchsjahr wurden insgesamt 12 LUA-Herkünfte geprüft. Wiederum wiesen die Herkünfte LUA 1 und LUA 2, aber auch LUA 6, LUA 7 und LUA 24 an den beiden Standorten Groß Lüsewitz und Braunschweig die höchsten LUA-TM-Erträge auf. Am Standort Braunschweig war der LUA-TM-Ertrag von LUA 3 und LUA 15 ebenso auf vergleichbarem Niveau während am Standort Trenthorst in diesem Jahr nur die Herkünfte LUA 18 und LUA 19 höhere LUA-TM-Erträge aufwiesen.

Die LUA-TM-Erträge im Anbaujahr 2021 waren an allen 3 Standorten bei der Herkunft LUA 2 am höchsten, ebenso wie LUA 1 an den beiden Standorten Groß Lüsewitz und Braunschweig.

Somit konnte in diesen Versuchen festgestellt werden, dass die GTM-Erträge der Mais-Andenlupine-Gemenge signifikante Umwelteffekte (Standort, Jahr), aber keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Mais-Andenlupine Kombinationen zeigten. Die Mais-Reinsaaten wiesen vergleichbare oder höhere TM-Erträge im Vergleich zu den Mais-Andenlupinen Gemengen auf.

Zwischen den geprüften LUA-Linien lagen im Hinblick auf die Andenlupinen-TM-Erträge signifikante Unterschiede vor, wobei deutliche Wechselwirkungen von Umwelt (Standort) und LUA-Linie nachgewiesen wurden. Dennoch zeigten die Ergebnisse, dass die Andenlupinen-Linien LUA 1 und LUA 2 in 7 bzw. 8 von insgesamt 9 geprüften Umwelten sowie die Linie LUA 7 in 4 von 9 Umwelten die höchsten LUA-TM-Erträge erzielt haben. Diese Linien sind damit für einen Gemengeanbau mit Mais besonders gut geeignet.

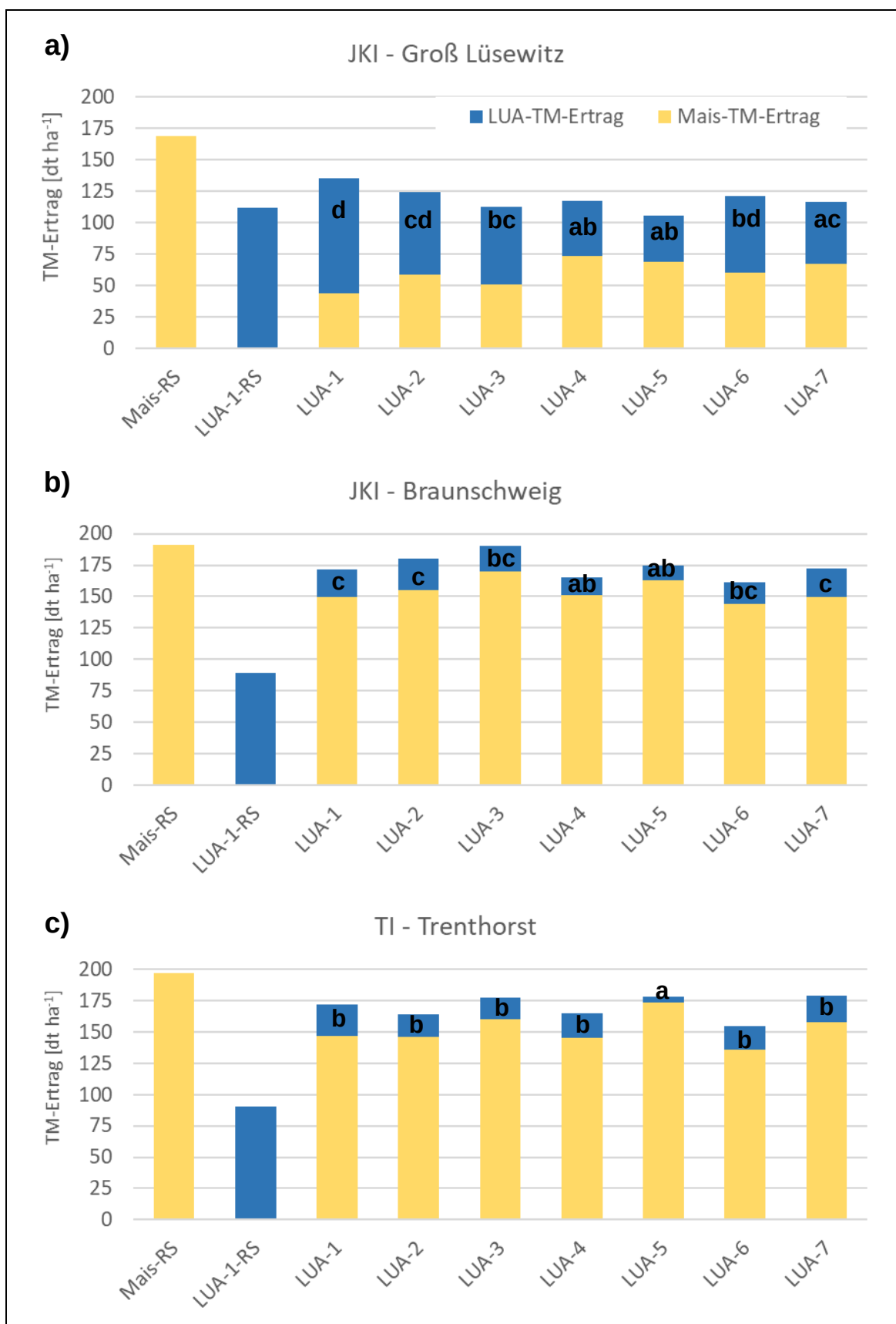


Abbildung 1: TM-Erträge [dt ha⁻¹] von Mais-Andenlupinen-Gemengen im Vergleich zu Mais- und Andenlupinen-Reinsaat an den Standorten JKI-Groß Lüsewitz, JKI-Braunschweig und TI-Trenthorst im Jahr 2019
unterschiedliche Buchstaben in jeder Teilgrafik kennzeichnen signifikante Unterschiede für den Andenlupinen-TM-Ertrag, LUA=Andenlupine, LUA-N=Bezeichnung der LUA-Herkünfte, RS=Reinsaat

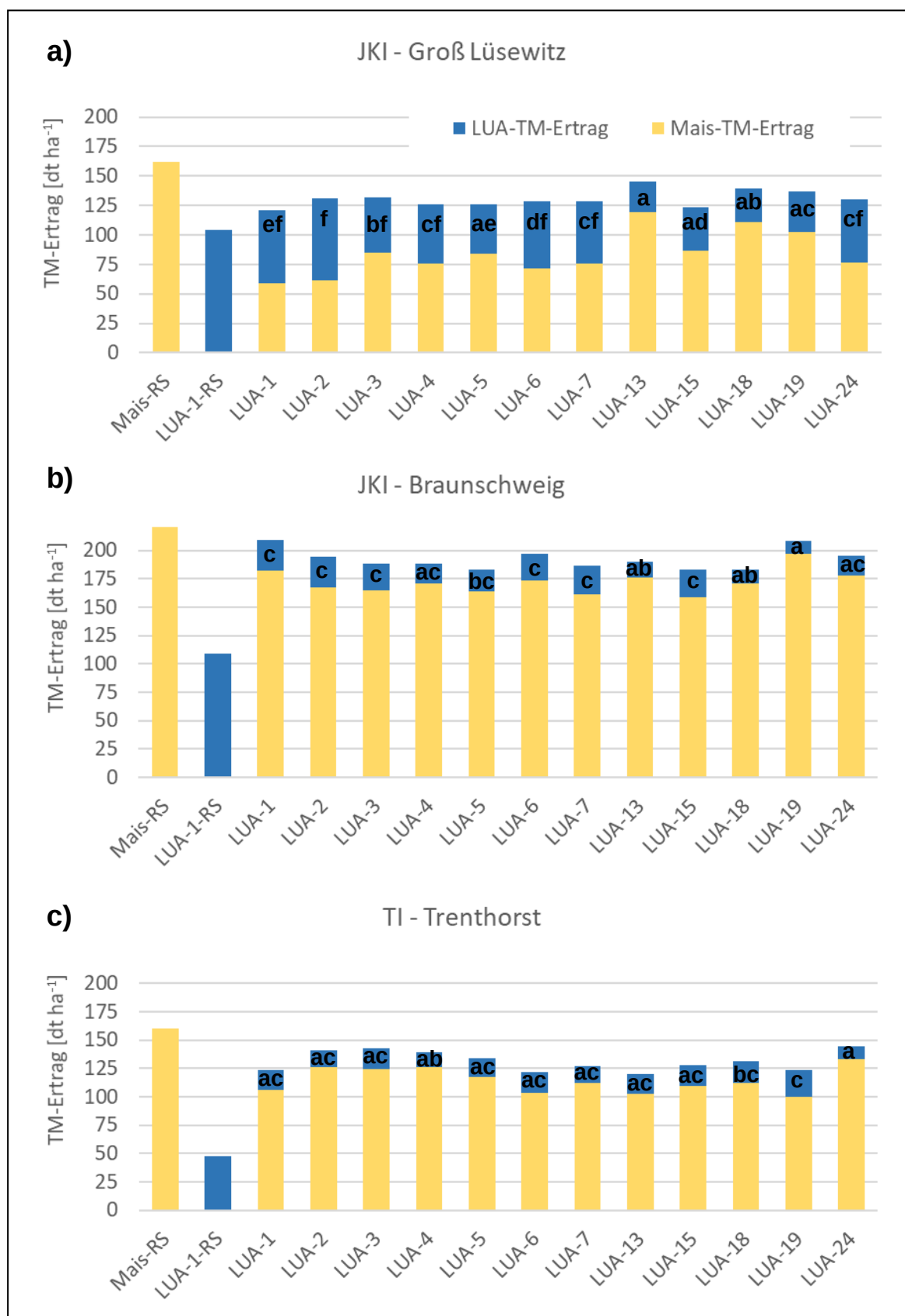


Abbildung 2: TM-Erträge [dt ha⁻¹] von Mais-Andenlupinen-Gemengen im Vergleich zu Mais- und Andenlupinen-Reinsaat an den Standorten JKI-Groß Lüsewitz, JKI-Braunschweig und TI-Trenthorst im Jahr 2020
unterschiedliche Buchstaben in jeder Teilgrafik kennzeichnen signifikante Unterschiede für den Andenlupinen-TM-Ertrag, LUA=Andenlupine, LUA-N=Bezeichnung der LUA-Herkünfte, RS=Reinsaat

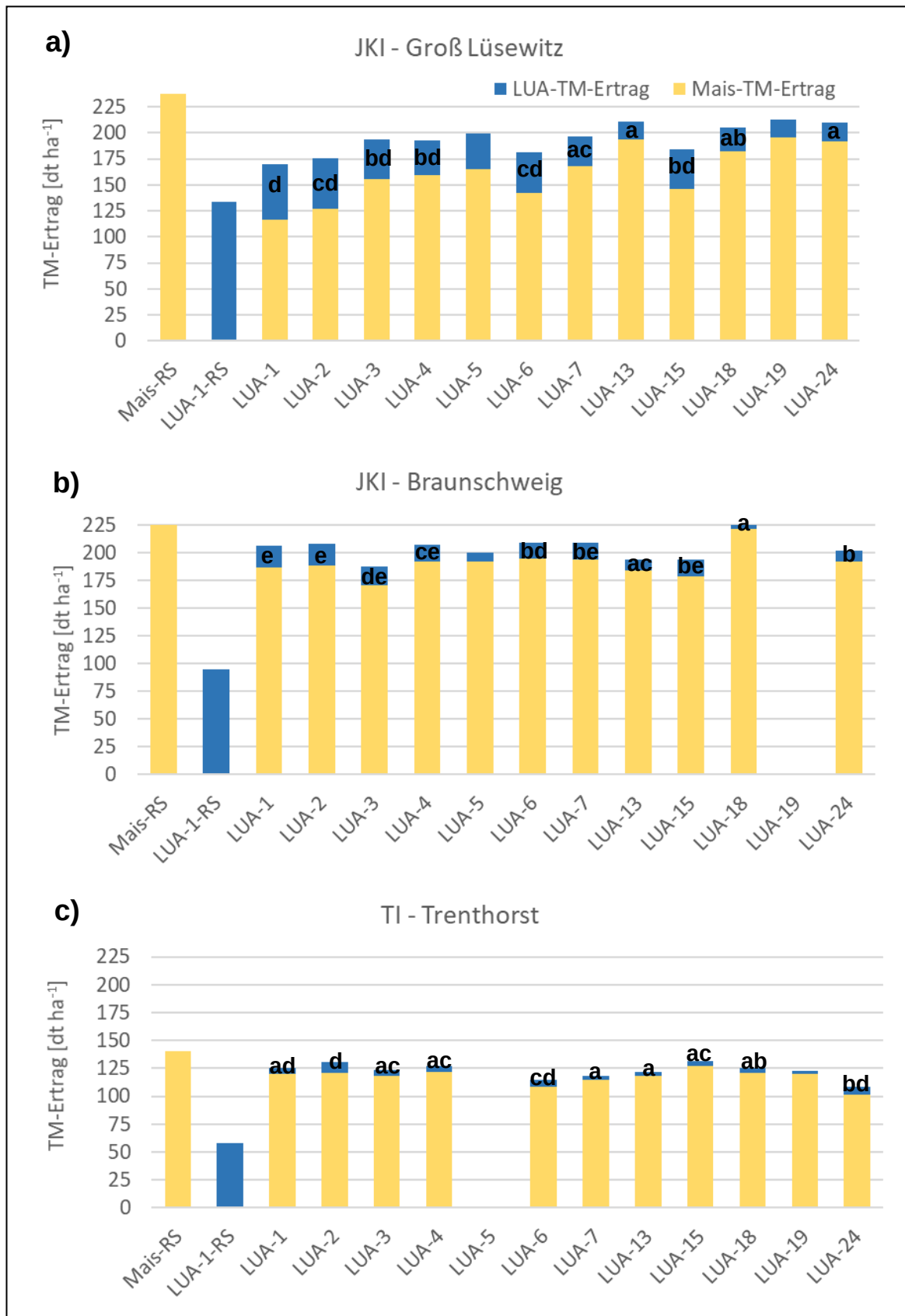


Abbildung 3: TM-Erträge [dt ha⁻¹] von Mais-Andenlupinen-Gemengen im Vergleich zu Mais- und Andenlupinen-Reinsaat an den Standorten JKI-Groß Lüsewitz, JKI-Braunschweig und TI-Trenthorst im Jahr 2021
unterschiedliche Buchstaben in jeder Teilgrafik kennzeichnen signifikante Unterschiede für den Andenlupinen-TM-Ertrag, LUA=Andenlupine, LUA-N=Bezeichnung der LUA-Herkünfte, RS=Reinsaat

Prüfung ausgewählter Gemenge-Kombinationen aus Andenlupine und Mais (LuMi-Best)

Auf Basis der Ergebnisse aus den Jahren 2019 und 2020 erfolgte eine Auswahl von sieben Andenlupinenlinien- und Maissorten-Kombinationen, die als sehr geeignet für den Gemengeanbau identifiziert werden konnten. Diese wurden in insgesamt neun Umwelten mit je zwei Feldwiederholungen geprüft, d.h. im Jahr 2021 an den beiden konventionell bewirtschafteten Standorten Groß Lüsewitz und Braunschweig sowie am ökologisch bewirtschafteten Standort Trenthorst, in 2022 zusätzlich an zwei ökologisch bewirtschafteten Standorten in Groß Lüsewitz und Braunschweig und dem konventionell bewirtschafteten Standort Triesdorf. Vergleichend wurden die Maissorten und Andenlupinenlinien (LUA) in Reinsaat angebaut. Der Gemengeanbau erfolgte in alternierenden Reihen der beiden Gemengepartner. Örtliche Vorgaben hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Aussaattechnik und Vorgaben im Bereich der Unkrautregulierung führten teilweise zu abweichende Reihenabstände von knapp 40 bis 50 cm. Während die LUA-Mais-Gemenge mit einer Saatstärke von 16/8 keimfähigen Körnern (KK) je m² angelegt wurden, kamen in den Reinsaat bei LUA 40 bzw. Mais 10 KK m⁻² zur Aussaat. Als Parameter wurden vegetationsbegleitend Wuchshöhen, BBCH-Stadien sowie zur Ernte die Gesamt-Trockenmasseerträge und die Ertragsanteile von Andenlupinen und Mais erhoben. In Batch-Versuchen wurden zudem die Biogas- und Methanerträge von dem Standort Groß Lüsewitz untersucht.

Die Ergebnisse zeigen deutliche, statistisch abgesicherte Umwelteffekte, die sowohl auf die Witterung bzw. auf die klimatisch unterschiedlichen Gegebenheiten zurückzuführen sind. Im Mittel wurden bei den LUA-Mais-Gemengen 151 dt ha⁻¹ geerntet. Die abnehmende Leistungsfähigkeit der Andenlupine in südlicheren Anbaugebieten des Mais wurde durch eine deutlich geringe Ertragsleistung in der dort gelegenen Umwelt (99 dt ha⁻¹) bestätigt. Der Gemengeertrag lag signifikant unterhalb des mittleren Mais-Reinsaatsertrages (187 dt ha⁻¹).

Bei den geprüften Gemengevarianten zeigten die Varianten mit den Andenlupinenlinien LUA 1, LUA 2 und LUA 24 die höchsten Erträge (Tabelle 11), wobei die LUA-Ertragsanteile in den Gemengen mit LUA 1 und LUA 2 am höchsten und mit LUA 24 am niedrigsten ausfielen (Tabelle 11).

Tabelle 11: Trockenmasseerträge [TME] der Andenlupinen-Maisgemenge [GM], Mais- und Andenlupinen [LUA]-Reinsaat im Mittel der Jahre 2021 und 2022 sowie der 9 Umwelten

	GM-TME [dt ha ⁻¹]					Mais-TME [dt ha ⁻¹]				LUA-TME [dt ha ⁻¹]		
LUA 1-M 1	154,00	b	31,88	d	M 1	187,71	a	LUA 1	94,74	c		
LUA 1-M 5	156,95	b	29,85	d	M 2	184,84	a	LUA 2	81,54	b		
LUA 2-M 2	148,83	ab	23,96	bc	M 5	188,94	a	LUA 3	66,31	a		
LUA 2-M 6	148,86	ab	27,86	cd	M 6	186,56	a	LUA 24	62,07	a		
LUA 3-M 1	138,60	a	22,09	b								
LUA 3-M 5	148,82	ab	22,11	b								
LUA 24-M 2	158,67	b	14,38	a								

Unterschiedliche Buchstaben in einer Spalte kennzeichnen signifikante Unterschiede (p≤0,05)

Tabelle 12: Biogasausbeute [IN-kg-1 oS] und Methananteil im Biogas [Vol.% Methan] für die Andenlupinen-Maisgemenge sowie der Reinsaat von Andenlupine bzw. Mais am Standort Groß Lüsewitz im Mittel der Jahre 2021 und 2022

	Biogasausbeute [IN-kg ⁻¹ oS]		Methangehalt [Vol.%]	
LUA 1-M 1	460,96	ab	53,44	bcd
LUA 1-M 5	522,42	cd	51,76	ab
LUA 2-M 2	515,03	bc	50,90	a
LUA 2-M 6	505,01	bc	50,83	a
LUA 3-M 1	518,43	bc	50,63	a
LUA 3-M 5	528,27	cd	52,05	abc
LUA 24-M 2	580,17	d	51,74	ab
LUA 1	461,33	ab	54,11	cd
LUA 2	431,19	a	55,11	d
LUA 3	424,89	a	57,76	e
LUA 24	431,84	a	55,10	d
M 1	578,60	d	51,79	abc
M 2	563,48	cd	51,08	a

Unterschiedliche Buchstaben in einer Spalte kennzeichnen signifikante Unterschiede (p≤0,05)

Die Biogasausbeute, die von den Ernteproben des konventionell bewirtschafteten Standortes Groß Lüsewitz ermittelt wurde, zeigte die niedrigsten Werte für die LUA-Reinsaat, die gleichzeitig jedoch die höchsten Methangehalte aufwiesen (Tabelle 12). Die Biogasausbeute der Gemengevarianten variierte deutlich mit der niedrigsten Ausbeute für das Gemenge LUA 1-M 1 und der höchsten bei der Variante LUA 24-M 2, die auf gleichem Niveau mit den Mais-Reinsaat lag. Auch zeigte am Standort Groß Lüsewitz das Gemenge LUA 24-M 2 mit 17 % den geringsten LUA-Ertragsanteil im Vergleich zu den höchsten LUA-Anteilen in den Gemengen mit LUA 1 und LUA 2 (49 bzw. 43 %).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Andenlupine im Gemengeanbau mit Mais neue Perspektiven für den Energiepflanzenanbau eröffnet. Dabei sollten moderate Ertragsanteile von 20-30 % Andenlupinen angestrebt werden, damit die Ertragsleistung als auch die Gasausbeute nicht negativ beeinflusst wird.

1.3 Prüfung verschiedener Mais-Hybriden in Kombination mit zwei Andenlupinen (AP 3)

Die Prüfung von insgesamt 7 Maishybriden (vgl. Tabelle 6) in Kombination mit 2 Andenlupinenlinien LUA 1 und LUA 2 wurde in den Jahren 2019 – 2021 an den Standorten JKI-Braunschweig und JKI-Groß Lüsewitz in Feldversuchen mit 2-facher Feldwiederholung durchgeführt. In Tabelle 13 sind die GTM-Erträge für die Gemenge und die Reinsaat sowie die prozentualen Anteile von den Andenlupinen und Mais im Gemenge zusammenfassend dargestellt.

Die Mais-Reinsaat erzielten in allen Jahren und auf allen Standorten stets die höchsten Ertragsleistungen, sodass die GTM-Erträge der Gemenge gegenüber den Mais-Reinsaat um durchschnittlich 21,9 % mit einer Schwankungsbreite von 15,3 – 28,4 %.

Die Gemenge zeigten in Abhängigkeit der beiden Standorte wie auch schon im Kap. 1.2 dargestellt deutliche Unterschiede. So waren die Anteile an Andenlupinen am Standort Groß Lüsewitz stets mit durchschnittlich 43 % deutlich höher als am Standort Braunschweig mit 11,2 %. Die geringeren Ertragsanteile der Andenlupinen am JKI-BS können auf die dort deutlich höheren Maiserträge im Vergleich zum Standort JKI-GL zurückgeführt werden (Tabelle 13).

Tabelle 13: Mittelwerte, Spannweiten und Zusammensetzung der GTM-Erträge im Gemenge aus AP 3.1 im Vergleich zu den Reinsaat (AP 3.2) für die Jahre 2019 - 2021 für die Versuchsstandorte Groß Lüsewitz (JKI-GL) und Braunschweig (JKI-BS)

		Gemenge					Reinsaat	
		GTM (dt/ha)			Anteile (%)		GTM (dt/ha) Mittel	
Jahr	Standort	Mittel	Min	Max	LUA	Mais	LUA	Mais
2019	JKI-GL	121,4	96,9	146,5	56,4	43,6	113,3	154,4
	JKI-BS	169,7	140,7	191,9	11,9	88,1	68,7	215,3
2020	JKI-GL	133,6	109,3	154,7	43,6	56,4	111,7	186,5
	JKI-BS	195,7	173,5	224,7	16,0	84,0	92,1	250,7
2021	JKI-GL	180,6	161,9	197,9	29,6	70,4	131,5	239,4
	JKI-BS	214,0	189,2	232,6	5,8	94,2	84,9	252,5
Mittel	JKI-GL	145,2	96,9	197,9	43,2	56,8	118,8	193,4
	JKI-BS	193,1	140,7	232,6	11,2	88,8	81,9	239,5
Gesamtmittel		169,2	96,9	232,6	27,2	72,8	100,4	216,5

Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse der statistischen Verrechnung der Gemengevarianten aus dem AP 3. Für den GTM-Ertrag liegen signifikante Effekte der Hauptfaktoren Andenlupine (LUA) und Umwelt (bestehend aus Jahr und Standorte, n=6) vor, aber auch eine entsprechende Wechselwirkung, sodass nur diese betrachtet werden kann. Für den LUA- und Mais-TM-Ertrag ergab die statistische Verrechnung nur einen signifikanten Effekt für den Hauptfaktor Umwelt. Dies bedeutet, dass die Maissorte keinen Effekt auf den GTM-Ertrag der Gemenge, noch auf den TM-Ertrag der Andenlupinen bzw. des Mais im Gemenge hatte. Diese Ergebnisse bestätigen somit die Ergebnisse aus dem AP 2.1, wo die beiden ausgewählten Maissorten auch keine signifikanten Effekte auf den Ertrag aufwiesen.

Tabelle 14: F-Werte und p-Werte für den Gesamttrockenmasseertrag (GTM-Ertrag), Andenlupinen (LUA)-TM-Ertrag und Mais-TM-Ertrag der Gemengevarianten, verrechnet über die beiden Standorte Groß Lüsewitz und Braunschweig über die Jahre 2019 - 2021

		GTM-Ertrag		LUA-TM-Ertrag		Mais-TM-Ertrag	
Effekt	FG	F-Wert	p-Wert	F-Wert	p-Wert	F-Wert	p-Wert
LUA	1	6,10	0,0156	3,38	0,0698	0,00	0,9807
Mais [MA]	6	1,34	0,2511	2,03	0,0711	0,83	0,5530
Umwelt [UM]	5	109,46	<,0001	115,17	<,0001	172,98	<,0001
LUA * MA	6	0,66	0,6844	0,18	0,9824	0,63	0,7086
UM * MA	5	3,21	0,0108	1,13	0,3520	0,48	0,7896
UM * LUA	30	0,78	0,7702	0,62	0,9322	0,62	0,9275
UM * LUA * MA	30	0,87	0,6523	0,53	0,9723	0,95	0,5426

FG – Freiheitsgrad

Die Wechselwirkung Andenlupine x Umwelt ist in Abbildung 4 dargestellt und verdeutlicht, dass die GTM-Erträge in GL in den Jahren 2019 und 2020 niedriger ausfielen im Vergleich zu den BS-Umwelten und der Umwelt GL-21, wobei diese nicht zwischen LUA 1- und LUA 2-Gemengen gleichgerichtet war. Zudem lag der GTM-Ertrag in der Umwelt GL-19 der Gemenge mit LUA 1 signifikant höher als derjenige des Gemenges mit LUA 2.

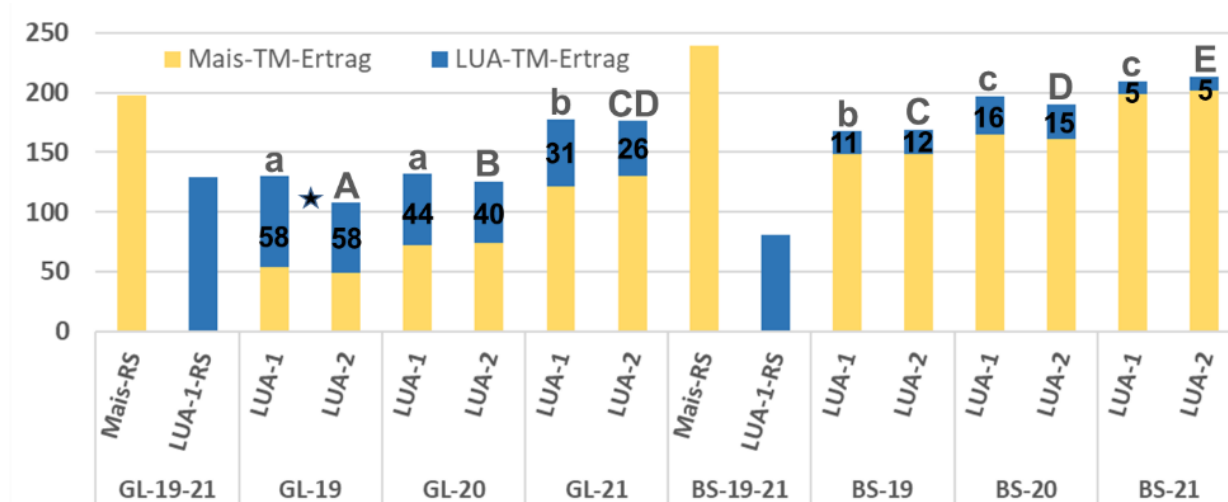


Abbildung 4: Gesamttrockenmasseerträge (GTM-Erträge) getrennt nach Andenlupinen (LUA)-TM-Ertrag und Mais-TM-Ertrag für die Wechselwirkung Andenlupine x Umwelt im Vergleich zu den mittleren TM-Erträgen von Andenlupine und Mais in Reinsaat der Standorte Braunschweig (BS) und Groß Lüsewitz (GL). unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede für den GTM-Ertrag in den Gemengen mit LUA 1, unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede für den GTM-Ertrag in den Gemengen mit LUA 2, * = signifikanter Unterschied zwischen dem GTM-Ertrag der Gemenge von LUA 1 versus LUA 2. Werte in den blau eingefärbten Säulen kennzeichnen den prozentualen Anteil an Andenlupine in den Gemengen.

1.4 Anbautechnische Versuche zum Anbau von Andenlupinen mit Mais (AP 4)

Saatzeitenversuch zum Gemengeanbau von Andenlupine und Mais (AP 4.1)

Im Saatzeitenversuch (AP 4.1), der dreijährig am Standort Groß-Lüsewitz (JKI-GL) in den Jahren 2019 – 2021 durchgeführt wurde, sollte geklärt werden, ob eine vorzeitige Aussaat der Andenlupine höhere Ertragsanteile im Gemenge mit Mais ermöglicht und ob damit höhere Biomasse-Gesamterträge realisiert werden können. Hierzu wurden in den 3 Versuchsjahren jeweils 5 Andenlupinen-Linien mit einer Maissorte kombiniert i) 1 bzw. ii) 2 Wochen vor sowie iii) zeitgleich mit dem Mais ausgesät. Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich eindeutig ableiten, dass die gemeinsame Aussaat beider Partner zu empfehlen ist. Die zeitgleiche Aussaat von Andenlupine und Mais führte zu den höchsten GTM-Erträgen, während die früheren Aussaatzeitpunkte eine Reduzierung der GTM-Erträge zeigten.

Eine ausführliche Betrachtung dieser nur in Groß Lüsewitz angelegten Versuche ist dem Anhang (Teilvorhaben 1) zu entnehmen.

Anbauversuch zu Saatdichten der Andenlupine und Reihenweite von Andenlupine und Mais in Reinsaat und im Gemenge (AP 4.2)

Am Standort TH wurde ein anbautechnischer Versuch in drei Feldwiederholungen durchgeführt, um den Einfluss der Saatstärke der LUA (10, 15 bzw. 20 kf Kö m⁻²) und des Reihenabstands (37,5 bzw. 50 cm) auf den GTM-Ertrag der Gemenge zu prüfen. Dabei wurde MA 1 2019 zunächst nur mit LUA 1 kombiniert. Ab 2020 wurde die in 2019 ertragsstarke LUA 2 ebenfalls in den Versuch aufgenommen.

Im Mittel der GTM-Erträge lag die MA-RS bei 37,5 cm Reihenweite (175,9 dt ha⁻¹) signifikant am höchsten, während MA-RS mit 50 cm Reihenabstand (141,1 dt ha⁻¹) und die Gemenge beider Reihenabstände (132,1 dt ha⁻¹ bei 37,5 cm Reihenabstand, 113,4 dt ha⁻¹ bei 50 cm Reihenabstand) sich nicht signifikant voneinander unterschieden. Die LUA-RS GTM-Erträge lagen mit 59,5 dt ha⁻¹ bei 37,5 cm Reihenabstand und 61,5 dt ha⁻¹ bei 50 cm Reihenabstand signifikant am niedrigsten (Abbildung 5).

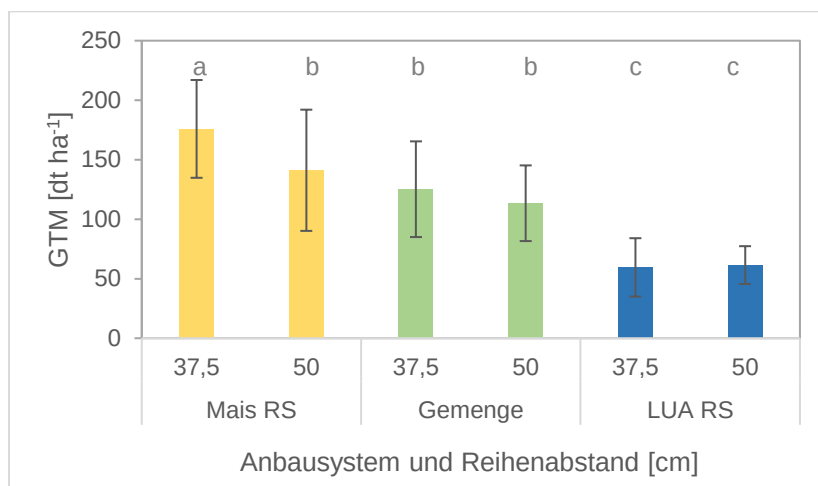


Abbildung 5: Gemittelte Gesamttrockenmasse(GTM)-Erträge des dreijährigen Anbauversuchs 2019-2021 am Standort Trenthorst zu Saatstärke der LUA im Gemenge und Reihenabstand (37,5 und 50 cm). Es wurden eine Mais-sorte und zwei LUA-Sorten zu den Gemengen kombiniert. Verschiedene Buchstaben markieren signifikante Unterschiede (ANOVA, $n = 9$ für MA-RS, $n = 15$ für LUA-RS, $n = 45$ für Gemenge).

In allen drei Jahren war der Versuch von ungünstigen Faktoren betroffen, die die Aussagekraft der Ergebnisse zum Teil einschränken. Im ersten Jahr fiel ein Anteil des Mais Krähnenfraß zum Opfer, und eine zwei Wochen nach der Aussaat erfolgte Nachsaat erbrachte nur bedingt vergleichbare Pflanzenbestände. Im zweiten Versuchsjahr war der Versuch von einem zuvor nicht ersichtlichen Bodengradienten betroffen, der Unterschiede zwischen den Wiederholungen verursachte, die stärkeren Signifikanzen unterlagen als die Effekte der Anbauparameter. Im dritten und letzten Versuchsjahr kam es durch Starkregen zu einer teilweisen Überflutung der Versuchsfläche, die trotz vorhandener Drainierung mehr als eine Woche anhielt. Der Effekt der Staunässe blieb die gesamte Vegetationsperiode sichtbar. Zudem verursachte Rehverbiss Ausfälle der LUA 2. Der Jahreseffekt (ANOVA, $p=5,9e-6^{***}$) überwog aus diesen Gründen alle weiteren Versuchsparameter. Da dennoch in allen Jahren gleichgerichtete Tendenzen festgestellt werden konnten, lassen sich grundsätzliche Empfehlungen zu den Anbauparametern ableiten.

Tabelle 15: Varianzanalyse (Mixed Linear Model ANOVA mit Jahr als random factor) des Effekts der anbautechnischen Einflussgrößen und ihrer Kombinationen auf den GTM-Ertrag im Gemengeanbau der Andenlupinen LUA 1 und LUA 2 mit Mais MA 1 von 2019-2021 am Standort TH, $n = 45$.

Einflussgröße	F-Wert	Pr (>F)
Reihenabstand	2,80	0,098
Saatstärke LUA	0,34	0,713
LUA	5,85	0,018*
Reihenabstand : Saatstärke	0,70	0,499
Reihenabstand : LUA	0,65	0,421
Saatstärke : LUA	2,50	0,089
Reihenabstand : Saatstärke : LUA	0,24	0,784

Es konnte kein signifikanter Einfluss von Saatstärke der LUA oder Reihenabstand auf den GTM-Ertrag im Gemenge festgestellt werden (Tabelle 15). Ein geringer Einfluss durch die LUA-Sorte konnte festgestellt werden und lag u.a. im Verbiss der LUA 2 durch Rehe begründet. Ausgehend von dieser Datenlage kann für den zukünftigen Anbau festgehalten werden, dass die Wahl der Reihenweite die Erträge vermutlich nicht nachteilig beeinflusst. Die Saatstärke der Andenlupine von 10 bis 20 kf Kö m⁻² sollte nach wirtschaftlichen Faktoren gewählt werden. Aufgrund der Saatgutknappheit für LUA und ohne zu erwartenden Mehrertrag bei höherer Saatchichte wäre eine Saatstärke von 10 kf Kö m⁻² in Kombination mit 8 kf Kö m⁻² Mais empfehlenswert.

1.5 Leistungsprüfung der Weißen Lupine am Standort Triesdorf (AP 5)

Im Unterauftrag des Konsortiums wurde im ersten Projektjahr (2019) auf den Versuchsflächen der Landwirtschaftlichen Lehranstalt in Triesdorf mit ausgesuchtem Material der Weißen Lupine (*L. albus*) eine Leistungsprüfung angelegt, durchgeführt, mehrfach bonitiert und beerntet. Die Leistungsprüfung wurde abgeschlossen. Die trotz des extremen Trockenstresses erzielten Ergebnisse erlaubten jedoch in der Gesamtbetrachtung über die beiden Jahre keine Beurteilung der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Prüfglieder.

1.6 Ermittlung der spezifischen Gemeingetauglichkeit ausgewählter Sorten und Linien der Weißen Lupine und verschiedenen Hafergenotypen (AP 6)

Im Rahmen von AP 6 wurden potentiell geeignete Sorten und Linien der Weißen Lupine (*L. albus*) bei den Projektpartnern an den Standorten Groß Lüsewitz, Braunschweig und Trenthorst sowie im Unterauftrag durch die Landwirtschaftlichen Lehranstalten Triesdorf mit Hafer in den Jahren 2019 bis 2021 in zweifacher Feldwiederholung auf ihre Eignung als Biomasselieferant geprüft. Diese unterschiedlichen Gemenge sollten alternativ zur Kombination von Andenlupinen und Mais innerhalb der Projektlaufzeit auf ihre Leistungsfähigkeit zur Gesamttrockenmassebildung geprüft werden. Es wurde davon ausgegangen, dass Gemenge aus Weißer Lupine und Hafer sich auf südlicher gelegenen Standorten, die durch kürzere Tageslängen gekennzeichnet sind, eher als konkurrenzfähig oder gar überlegen erweisen, als solche aus Andenlupine und Mais.

L. mutabilis (Andenlupinen) sind in Südamerika endemisch. Sie decken dabei einen größeren Tageslängenbereich ab. Aufgrund der im Vergleich mit Norddeutschland vorherrschenden kürzeren Tageslängen, treten sie bereits an schwachen Langtagsstandorten früher in die generative Phase ein und sind aus heutiger Sicht dann dort, z.B. in Süddeutschland kaum mehr als Energiepflanzen nutzbar. Mögliche Anbauregionen der alternativen Kombination aus Weißer Lupine und Hafer wurden zu Beginn der Projektarbeiten jeweils dann angenommen, wenn es sich um eine Region handelte, die für einen Biomasseanbau der Andenlupine zu südlich lag oder wenn sich die Region durch eine mittlere europäische Tageslänge, das heißt eine zur Biomassebildung durch den Anbau der Andenlupine zu kurzen Tageslänge, auswies.

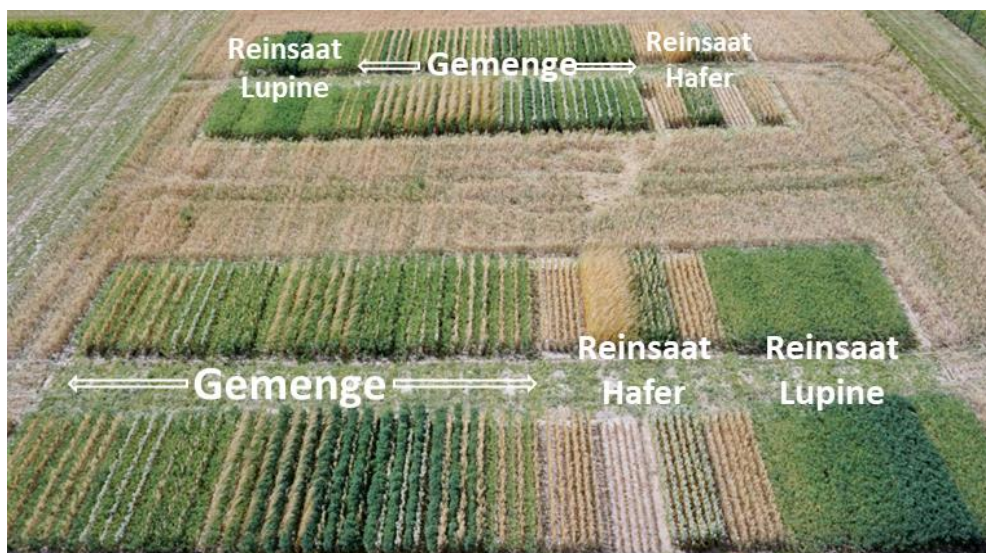


Abbildung 6: Gemengeprüfung am Beispiel von GL2019, Vorderer Block links und hinterer Block zentral = Gemengeprüfung, alternierende Reihen der jeweiligen Gemengepartner. Vorderer Block rechts und hinten beidseitig außen = Leistungsprüfung aller Prüfglieder in Reinsaat

Zur Ermittlung der spezifischen Gemeingeeignung der eingesetzten Weißen Lupine und Hafer wurden 16 Kombinationen aus 4 LUW x 4 Hafer an den 4 Standorten Groß Lüsewitz (GL), Braunschweig (BS), Trenthorst (TH) und Triesdorf (TD) im Vergleich zu den Reinsaaten geprüft. Auf Seiten der Weißen Lupine kamen hierbei eine Sorte (CELINA) und ein wüchsiger Zuchtstamm aus TD sowie die im Rahmen des Vorläuferprojektes (FKZ:22402111) sehr gut bewerteten Sorten ENERGY (Frankreich) und RUMBO (Chile) zum Einsatz. Als

Haferpartner wurden die wüchsigen *Avena-sativa*-Sorten CDC ARBORG (Canada) und EVEREST (Deutschland) sowie die *A.-strigosa*-Sorte CODEX und ein F7-Stamm aus der Kombination von *A. sativa* x *A. byzantina* verwendet. Sowohl bei dem eingesetzten Material der Weißen Lupine, als auch des Hafers wurde angestrebt und erreicht, eine möglichst hohe Variabilität und Diversität unter den ausgesuchten Linien und Stämmen zu haben.

Die Leistungsprüfungen von insgesamt 10 Umwelten aus den Projektjahren 2019, 2020 und 2021 wurden mit dem Statistikprogramm PLABSTAT als Serie verrechnet und ausgewertet. Dazu wurden die Rohdaten nach statistischer Notwendigkeit einer Transformation unterzogen. Die Daten aus den beiden weiteren Umwelten (TD 2019 und TD 2021) wurden aufgrund von extremer Trockenheit an diesem Standort und der damit verbundenen unsicheren Datenlage jedoch nicht in die Gesamtauswertung einbezogen.

Die Mittelwerte und Spannweiten der mittleren GTM-Erträge sowie deren Zusammensetzung im Gemengeanbau und die mittleren GTM-Erträge der Reinsaat sind für die 10 berücksichtigten Umwelten in Tabelle 16 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 16: Mittelwerte, Spannweite und Zusammensetzung der Gesamttrockenmasse (GTM)-Erträge der Gemenge aus AP 6.1 im Vergleich zu den Reinsaat von Weißer Lupine (LUW) und Hafer (AP 6.2) in den 10 Umwelten der Jahre 2019-2021

	Gemenge					Reinsaat	
	GTM-Ertrag (dt ha ⁻¹)			Anteile (%)		GTM-Ertrag (dt ha ⁻¹)	
	Mittel	Min	Max	LUW	Hafer	LUW	HAFER
Mittel über 10 Umwelten	76,91	42,70	143,34	35,93	64,07	82,65	79,87

Die GTM-Erträge blieben an allen Prüferten etwas hinter den Erwartungen zurück. In der Serienverrechnung wurden die 3 durchgehend beteiligten Standorte (GL, BS und TH) zusammen mit dem Einzelergebnis aus Triesdorf betrachtet.

Die Verrechnung der Daten über die 10 Umwelten erbrachte in den für die Fragestellung wichtigen Ertragsmerkmalen Trockensubstanzgehalt der Biomasse und GTM-Ertrag bei hochsignifikanten Genotyp-Effekten auch hochsignifikante Standorteffekte. Die Wiederholungseffekte erwiesen sich bei niedrigeren Werten auch bei dieser höheren Anzahl an berücksichtigten Umwelten als hoch signifikant.

Dies kann eine Auswirkung der in den Prüffahren vorherrschenden ungünstigen Niederschlagsversorgung bzw. Niederschlagsverteilung an allen Standorten sein, die den Effekt bereits kleinster Inhomogenität im Bereich der genutzten Versuchsflächen verstärken und somit zu unerwünschten Effekten geführt haben.

Auch spezifische Genotyp x Standort-Effekte sind zu beobachten. Während am JKI-GL die Gemengekombinationen mit RUMBO bzw. mit CODEX mit zu den leistungsstärksten gehörten, waren diese in Braunschweig, wo Kombinationen mit *A. byzantina* hohe Erträge erzielten, deutlich unterlegen. Die höchste spezifische Gemengeeignung zeigten in der Auswertung der Versuche die Kombinationen ENERGY/EVEREST und RUMBO/CDC ARBORG. Über alle Umwelten betrachtet, zeigten die genannten Sorten aber auch in diesen Fällen keine nachweisbaren Unterschiede ihrer Gemengefähigkeit.

Vergleichbar mit den Ergebnissen des Gemengeanbaus von Andenlupine und Mais (AP 2 und 3), wiesen die 4 untersuchten Weißen Lupinen im Sortiment aller Kombinationen mit 4 Hafer-Prüfgliedern im Gemengeanbau eine hohe Variabilität im Merkmal GTM-Ertrag auf. Die Gemenge erreichten hierbei teilweise höhere GTM-Erträge als den Mittelwert der beiden Reinsaat. Einzelne Kombinationen zeigen hierbei eine besonders hohe spezifische Gemengeeignung mit dem jeweiligen Partner (Abbildung 7).

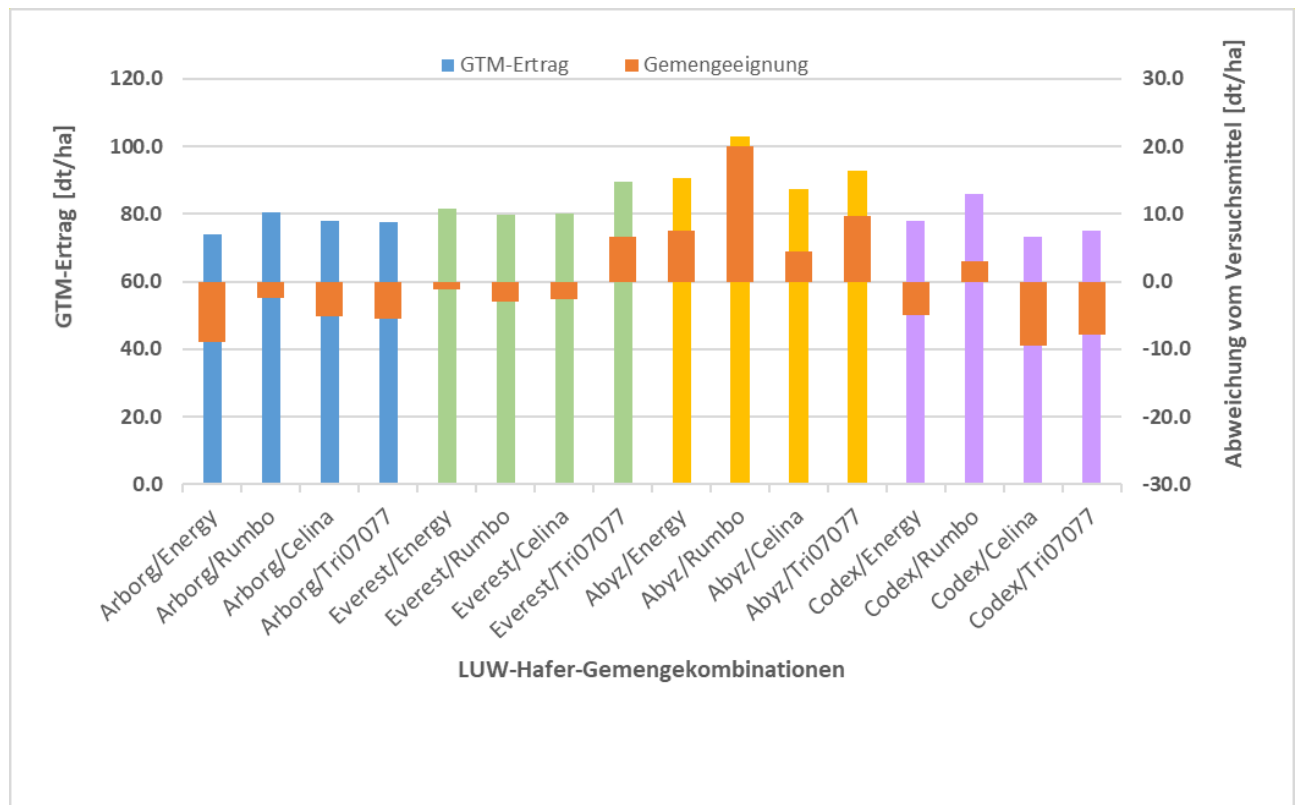


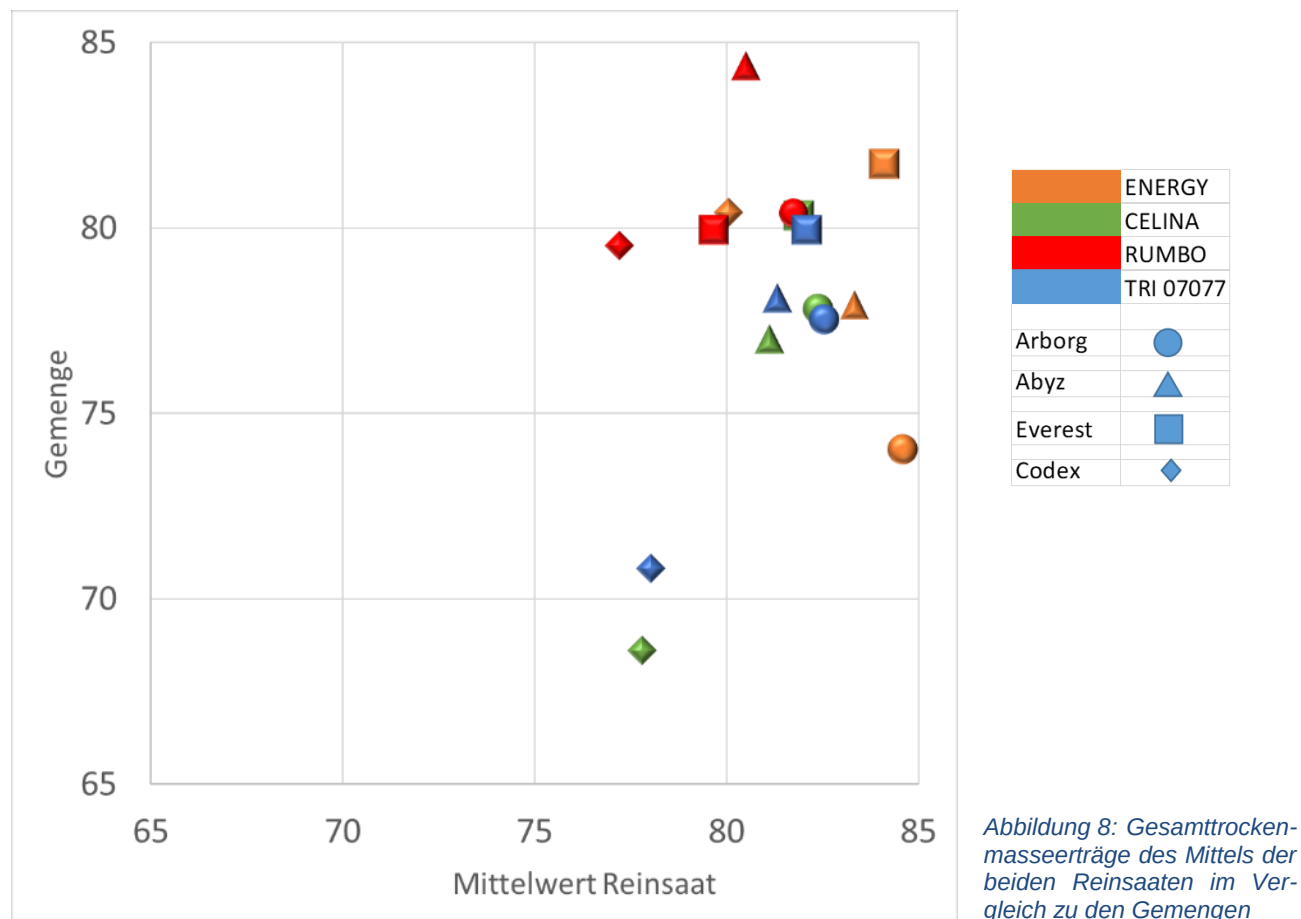
Abbildung 7: GTM-Erträge der einzelnen Kombinationen aus Weißer Lupine und Hafer sowie deren Mehr- bzw. Minderleistung gegenüber dem Ertragsprüfung gemittelt über die Jahre 2019 – 2021 für 10 Umwelten

Die Prüfung dieses Materials in den Feldversuchen der drei Projektjahre zeigte, dass die GTM-Erträge der Kombination Weißer Lupine mit ausgewählten Haferherkünften recht niedrig ausfielen, insbesondere auch im Vergleich zu Mais bzw. den Mais-Andenlupinengemengen und somit hinter den Erwartungen deutlich zurückblieben.

Die weitere Prüfung dieses Materials in den Feldversuchen der beiden folgenden Projektjahre führte zu keiner Stabilisierung der Datenbasis 2020 und 2021 und somit auch zu keiner genaueren Beurteilung der spezifischen Gemengeeignung. Erschwerend kommt hinzu, dass die GTM-Erträge der Kombination Weißer Lupine mit ausgewählten Haferherkünften niedriger ausfielen als erwartet.

Die Hoffnung, dass eine weitere Prüfung dieses Materials in den Feldversuchen der beiden Projektjahre eine Stabilisierung der Datenbasis 2020 und 2021 zur Folge hätte und somit zu einer genaueren Beurteilung der spezifischen Gemengeeignung führen würde, erwies sich als zu optimistisch. Hinzu kommt, dass die GTM-Erträge der Kombination Weißer Lupine mit ausgewählten Haferherkünften niedriger ausfiel als gedacht.

Wie Abbildung 8 deutlich zeigt, lagen die Gemengeerträge über 10 Umwelten nur in 2 Fällen sehr deutlich über den mittleren Reinsaaterträgen. Die genetische Variabilität des Materials mit dem der Versuch in allen 10 Umwelten durchgeführt wurde, wird nicht allein die Ursache dafür sein. Auch kleinste methodische Unterschiede wie ein etwas geringerer Reihenabstand in Trenthorst verursachten zudem Umwelt-Effekte, die im Rahmen der berichteten Arbeiten jedoch nicht quantifiziert wurden. Erhöht wurden diese signifikanten Ortseffekte dann durch die hohe Variabilität des verwendeten Materials.



1.7 Saatstärkenversuch zum Gemengeanbau von Weißer Lupine und Hafer (AP 7)

In diesem Arbeitspaket wurden ausgewählte LUW-Sorten ('TRI', 'Rumbo', 'Energy') in Kombination mit den Hafern *Avena sativa*, Sorte 'Arborg' und einer Linie 'Abyz', hervorgegangen aus seiner Kreuzung von *A. sativa* und *A. byzantina*, im Gemenge sowie in Reinsaat in Parzellen von 9 m² Größe am Standort Trenthorst angebaut. Dabei wurden die Saatstärken der Gemengepartner variiert (Tabelle 17). Untersucht wurde neben den Erträgen der verschiedenen Varianten auch der für den Ökologischen Landbau wichtige Parameter der Unkrautunterdrückung in Form der Unkrautbiomasse zum Zeitpunkt der Ernte in den Gemengen. Es wurde zudem eine betriebsübliche mechanische Unkrautbekämpfung in allen Varianten durchgeführt (striegeln), die angepasst an die Witterung in den Versuchsjahren ein bis drei Mal erfolgte.

Tabelle 17: In AP 7 verwendete Saatstärken der Gemengepartner.

Variante	HA-RS	Gemenge 1	Gemenge 2	Gemenge 3	LUW-RS
Saatstärke HA [%]	100	25	50	75	0
Saatstärke HA [kf Kö m ⁻²]	300	225	150	75	0
Saatstärke LUW [%]	0	75	50	25	100
Saatstärke LUW [kf Kö m ⁻²]	0	45	30	15	60

Insgesamt zeigte der Versuch einen signifikanten Vorteil des Gemengeanbaus in Bezug auf die GTM-Erträge bei der Betrachtung über drei Jahre. Die Gemengevarianten wiesen mit 86,3 dt ha⁻¹ (n = 72) im Mittel die höchsten GTM Erträge auf, die signifikant am höchsten lagen. Die HA-RS mit 76,8 dt ha⁻¹ (n = 24) und LUW-RS mit 68,6 dt ha⁻¹ (n = 36) unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Die GTM-Erträge der Gemengevarianten unterschieden sich nicht in Abhängigkeit von der LUW-Saatstärke (Abbildung 9Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).

Der Parameter des Ertragsgewinns ("Actual Yield Loss", AYL) beschreibt den proportionalen Ertragsgewinn bzw. -verlust eines Gemenges im Vergleich zu den Reinsaaten und ist ein Parameter, der bei der Berechnung die Saatedichte berücksichtigt (Banik, 1996). Daher ist er zur Bewertung von Erträgen in Versuchen mit variierender Saatedichte wie diesem angebracht. Anhand des AYL zeigte sich, dass alle Varianten mit 25 % LUW-Saatstärke bei beiden Kulturen und insgesamt Ertragsverluste aufwiesen (AYL -0,104 im Mittel der Varianten), während alle Varianten mit 75 % LUW -Saatstärke den größten Ertragsgewinn erzielten (AYL

1,199 im Mittel der Varianten). Insgesamt hatten die LUW-Saatstärke, die Wahl der LUW-Sorte und die Kombination von Hafer und Weißer Lupine signifikanten Einfluss auf den Ertragsgewinn durch das Gemenge (Tabelle 18).

Die Unkraut-Unterdrückung zeigte ebenfalls einen signifikanten Zusammenhang mit der Saatstärke der Kulturen. Während in HA-RS die geringste Unkrautbiomasse erfasst wurde und in der LUW-RS die höchste, konnte im Gemenge ein moderates Unkrautauftreten festgestellt werden, dass bei 75 % LUW-Saatstärke signifikant höher ausfiel als bei den Varianten mit 50 % und 25 % LUW-Saatstärke (Abbildung 9).

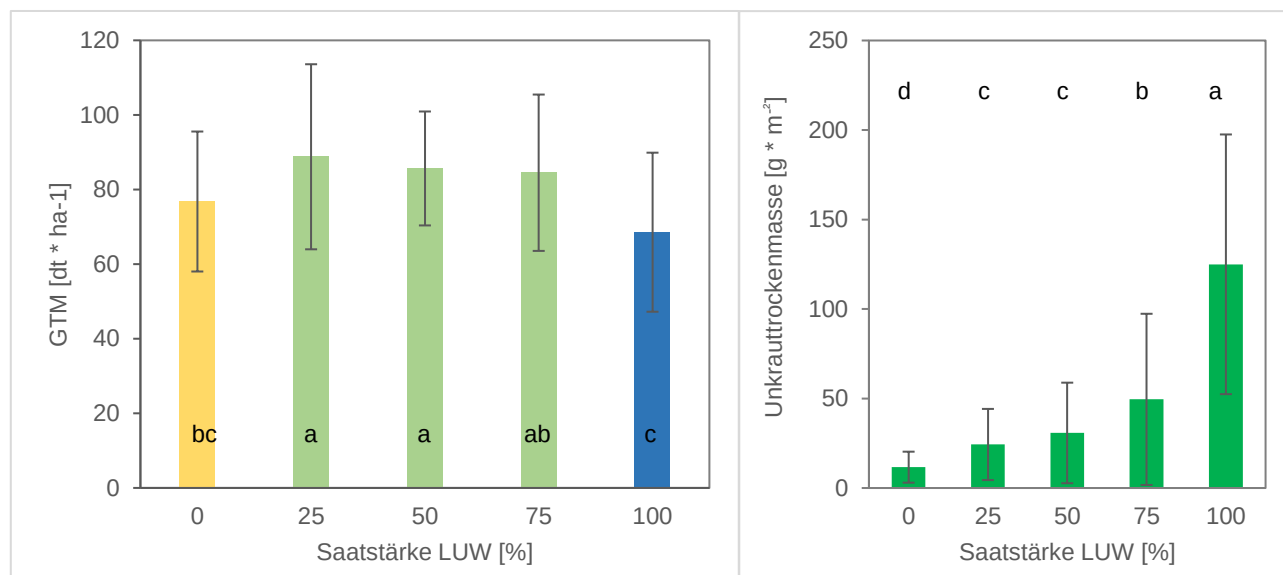


Abbildung 9: Einfluss der LUW-Saatstärke auf den GTM-Ertrag (links) und der Saatstärke auf die Unkrautbiomasse (rechts) in AP 7 in den Jahren 2019-2021 am Standort TH. Unterschiedliche Buchstaben zeigen Gruppenunterschiede an. GTM-Erträge: Chi-Quadrat test mit Kruskal-Wallis-post-hoc, $p < 0,001^{***}$, $n=36$ für LUW-Reinsaat, $n=24$ Jahr für Hafer-Reinsaat, je $n=24$ für Gemenge. Unkrautrockenmasse: rang-transformierte Mixed Model ANOVA mit Jahr als random Factor, $p < 0,001^{***}$, $n=36$ für LUW-Reinsaat, $n=24$ Jahr für Hafer-Reinsaat, $n=24$ für Gemenge.

Somit wäre im Sinne eine Kombination aus Unkrautunterdrückung und Ertragsvorteil ein Gemenge mit 50 % beider Gemengepartner generell empfehlenswert. Unterschiede zwischen den kombinierten Sorten konnten ebenfalls festgestellt werden (siehe Anhang).

Tabelle 18: Varianzanalyse (Rang-transformierte Mixed Linear Model ANOVA mit Jahr und Wiederholung als random factor) des Effekts der anbautechnischen Einflussgrößen und ihrer Kombinationen auf den Ertragsgewinn im Gemengeanbau der Weißen Lupinen-Sorten 'TRI', 'Rumbo', 'Energy' mit den Hafern 'Arborg' und 'Abyz' von 2019-2021 am Standort TH, $n = 72$.

Einflussgröße	F-Wert	Pr (>F)
HA-Sorte	3,10	0,080
LUW-Sorte	3,81	0,024*
Saatstärke LUW	87,28	<2e-16***
HA-Sorte : LUW-Sorte	3,06	0,049*
HA-Sorte : Saatstärke LUW	0,90	0,408
LUW-Sorte : Saatstärke LUW	0,40	0,812
HA-Sorte : Saatstärke LUW : LUW-SorteReihenabstand	0,31	0,871

1.8 Ganzpflanzensilierung mit Silagequalität und Futterwertparameter (AP 8)

Zur Prüfung der Ganzpflanzensilierung hinsichtlich der Silierfähigkeit und Silagequalität des LUA-Mais- als auch LUW-Hafer-Gemengeanbaus wurden Silagen im Labormaßstab (1,5 l Weckgläser, 3 Wiederholungen) erzeugt. Zum Erreichen einer stabilen Silage wurde dem Silierprozess eine Zeit von mindestens 90 Tagen gegeben, bevor die Entnahme zur Qualitätsprüfung erfolgte (DLG, 2013). Wegen der zeitnahen Verarbeitung des Silierguts erfolgte eine Durchführung der Silierversuche exemplarisch anhand des Erntematerials aus den Feldversuchsansätzen AP 2 und AP 6 (LuMi-opt) und LuMi-Best am Prüfort Braunschweig (JKI-BS). In Tabelle 19 sind die dafür ausgewählten Gemengeprüfglieder als auch deren Reinkulturen dargestellt. Um insbesondere bei ungünstigen Gärvoraussetzungen die Qualität der Silagen zu verbessern, kann es von Vorteil sein dem Siliergut ein Siliermittel hinzuzufügen. Hierfür wurden bei den Versuchsansätzen von Lumi-

opt hinsichtlich des Wirkstoffes und der Wirkweise zwei verschiedene Mittel (Zusatz biol. 1 u. Zusatz chem.) eingesetzt, bei Lumi-Best war zusätzlich noch ein weiteres Mittel (Zusatz biol. 2) in der Prüfung, welches vor allem die aerobe Haltbarkeit von Silagen verbessert (Tabelle 20). Die hinzuzufügende Substanz wurde unmittelbar vor dem Einsilieren auf das Siliergut gesprüht. Alle Untersuchungen wurden immer verglichen mit einer Kontrolle (ohne Siliermittel).

Tabelle 19: Prüfglieder für die Silierversuchsansätze

	LuMi-opt (2019-2021)		LuMi-Best (2021/2022)
	LUA-Mais	LUW-Hafer	LUA-Mais
Gemenge	LUA-1/M3	LUW-1/H3	LUA-2/M2
	LUA-2/M3	LUW-2/H3	
	M3	HA3	M2
Reinsaat	LUA-1	LUW-1	
	LUA-2	LUW-2	LUA-2

Tabelle 20: Informationen zu verwendeten Siliermitteln

Siliermittel	Hersteller	Art	Wirkstoff	Wirkweise
LuMi-opt (2019-2021) und LuMi-Best (2021/2022)				
Zusatz biol. 1 Sila bac (1 g t ⁻¹)	Pioneer	biologisch	6 homofermentative Milchsäurebakterienstämme	verbessert Gärqualität
Zusatz chem. Kofasil Stabil*, (2 l t ⁻¹)	Addcon	chemisch	Natriumbenzoat und Kaliumsorbit	effektiv gegen Hefen und Schimmelpilze
LuMi-Best (2021/2022)				
Zusatz biol. 2 Silasil Energy XD, (2 g t ⁻¹)	Schaumann	biologisch	2 homofermentative Milchsäurebakterienstämme 1 heterofermentativer Milchsäurebakterienstamm	verbessert aerobe Haltbarkeit
*keine Zulassung für den ökologischen Landbau				

Gäreigenschaften und Silagequalität von LUA-Mais und LUW-Hafer der Versuchsansätze LuMi-opt und LuMi-Best

Das Siliergut der Gemengesaaten enthielt in den jeweiligen Untersuchungsjahren entsprechend der Bestandesetablierung in den Feldversuchsansätzen verschiedene Lupinenanteile (Tabelle 21). Bei LuMi-opt lagen diese bei LUA-Mais zwischen minimal bei 8,7% (LUA 2/M 3, 2021) und maximal 15,3% (LUA 2/M 3, 2020), bei LUW-Hafer waren die Anteile mit minimal bei 31,1% (LUW 2/H 3, 2020) und maximal 78,1% (LUW 2/H 3, 2021) wesentlich größer, wobei sich 2021 deutlich durch höher realisierte Anteile von den anderen beiden Jahren unterschied. Auch bei LuMi-Best gab es bei LUA-Mais mit 8,7% (2021) und 23% (2022) eine etwas höhere Differenz zu beobachten.

Die Gäreigenschaften des Silierguts lassen sich durch den bei der Ernte erreichten TS-Gehalt, den Quotienten aus wasserlöslichen Kohlenhydraten und Pufferkapazität (Z/PK), den Vergärbarkeitskoeffizienten (VK = TM% + (8 x Z/PK), durch die Keimbelastung von Gärschädlingen wie Hefen und Schimmel als auch den Besatz von Milchsäurebakterien (MSB) beschreiben (Jänicke 2011).

Beim Ansetzen der Silagen hatte in den jeweiligen Untersuchungsjahren das Siliergut der Reinsaat Mais mit maximal 46,0% (LuMi-Best, 2020) und Hafer mit 46,4% (LuMi-opt, 2020) gegenüber allen anderen Prüfgliedern immer den höchsten TS-Gehalt aufzuweisen (Tabelle 21). Sehr niedrige Werte wurden bei den Andenlupinen mit minimal 15,4% (LUA 1, LuMi-opt, 2019) und bei der Weißen Lupine mit minimal 18,1% (LUW 2, LuMi-opt, 2021) vorgefunden. In 2019 und 2020 gab es allerdings bei LUW 1 (LuMi-opt) mit 45,3 bzw. 42,7% sehr hohe Werte, die auf eine frühere Abreife, in 2019 auch krankheitsbedingt, zurückzuführen waren. Alle Gemengeprüfglieder aller Versuchsansätze wiesen in der Regel meist Werte zwischen 30 und 40% auf. Somit wurde durch die Kombination der verschiedenen Pflanzenarten ein TS-Gehalt erreicht, welcher für das Silieren von reinem Mais bei 30–37% liegen sollte (Spiekers 2011) und für die Versuchsansätze angestrebt wurde. Körnerleguminosen in Reinsaat sollten TS-Werte von mindestens 28% aufweisen (Thaysen, 2010). Aufgrund der zeitgleichen Ernte aller Prüfglieder war das Siliergut der Lupinen meist zu feucht.

Der Z/PK-Quotient lag bei der Reinsaat LUA 2 (LuMi-Best) mit 0,3 im Untersuchungsjahr 2022 am niedrigsten und am höchsten mit 3,9 bei der Reinsaat M 3 (LuMi-opt) im Jahr 2021 (

Tabelle 21). Der Mindestzielwert von 2,0 wurde häufig nicht erreicht. Am ehesten überschritten diesen die Reinsaat Mais und die Gemengeprüfglieder mit Andenlupine. Die Pufferkapazität ist im Wesentlichen abhängig von basischen Bestandteilen der Asche und vom Proteingehalt des Ernteguts (Jänicke, 2011). Beide Parameter sind in der Summe bei Leguminosen gegenüber Mais und Hafer dominierender vorhanden (Tabelle 25) und bewirken deshalb eine höhere PK. Insofern ist das Erreichen des Z/PK-Zielwertes insbesondere bei Lupinen sowie Gemengen mit höheren Lupinenanteilen allein schon durch diese Konstellation erschwert. Ein Gegensteuern wäre dann nur durch hohe Zuckergehalte möglich, welche allerdings meist mit weit unter 10% liegend sehr gering ausfielen (Tabelle 25).

Der Vergärbarkeitskoeffizient (VK), bei welchem in die Berechnung der TS-Gehalt und der Z/PK-Quotient einfließen, sollte mindestens den Wert von 45 erreichen. Wenn also der Trockensubstanzgehalt des Siliergutes genügend hoch liegt, kann diese Zielgröße trotz eines ungünstigen Z/PK-Quotienten noch erlangt bzw. übertroffen werden. Mit dem Wert von 67 erzielte M 3 (LuMi-opt) in 2021 den höchsten VK (Tabelle 21). In der Regel konnten in allen Jahren die Reinsaaten Hafer und Mais und deren Gemengeprüfglieder den Zielwert immer überschreiten. Lediglich die Lupinenreinsaaten, insbesondere mit Andenlupine, hatten aufgrund der sehr niedrigen TS-Gehalte zur Ernte fast immer unterhalb des Zielwertes liegende Vergärbarkeitskoeffizienten aufzuweisen.

Der Besatz der natürlich vorkommenden Gärschädlinge Hefen und Schimmel im Siliergut erreichte in allen Untersuchungsjahren bei vielen Prüfgliedern ungünstige Werte, die höher als die Richtwerte $<1,0\text{E}+05$ bzw. $<1,0\text{E}+04$ KbE g⁻¹ FM waren (Tabelle 21). Wenn Werte unterhalb des Richtwertes beider Gärschädlinge beobachtet wurden, so betraf dies in der Regel meist die Reinsaatenprüfglieder beider Lupinenarten. Da die Hefen in Silagen nach Öffnung für eine Nacherwärmung verantwortlich zeichnen und Schimmel generell Gifte enthalten, wären möglichst geringe Keimdichten im Siliergut wünschenswert. Jährliche Maissilagenuntersuchungen verschiedener Labore zeigen jedoch generell in der landwirtschaftlichen Praxis eine oft zu hohe Belastung beider Gärschädlinge im Erntegut (Schaumann ohne Jahr).

Milchsäurebakterien sind in der Umwelt ebenfalls vorhanden und bedeutsam für die Ansäuerung des Siliergutes im Fermentationsprozeß. Es ist üblich, dass deren Keimdichte in einem weiten Bereich schwanken kann (Spiekers et al., 2009). Für eine verlustarme Silierung sollten im Siliergut mindestens eine Keimdichte $1,0\text{E}+04$ KbE g⁻¹ FM vorhanden sein (Pahlow 2011). Der Besatz an Milchsäurebakterien aller Prüfglieder lag in allen Jahren mit minimal $2,3\text{E}+04$ KbE g⁻¹ FM (LUW 2/H 3, LuMi-opt, 2021) und maximal $7,7\text{E}+06$ KbE g⁻¹ FM (LUA 1/M 3, LuMi-opt 2019) schon sehr hoch (Tabelle 21). Mit Beimpfung biologischer Siliermittel war zwar nicht immer, jedoch häufig noch ein Anstieg in der Keimdichte erfolgt.

Zusammenfassend betrachtet konnten in allen Versuchsjahren, ausgenommen einer oft zu hohen Belastung von Gärschädlingen im Siliergut, zumindest die Gäreigenschaften der Gemenge- als auch Maisreinsaatenprüfglieder überwiegend als recht gut bezeichnet werden.

Tabelle 21: Gäreigenschaften des Silierguts der LUA-Mais- und LUW-Hafer-Gemenge sowie deren Reinsaaten der Versuchsjahre 2019-2021/2022 von den Versuchsansätzen LuMi-opt und LuMi-BEST, Kontrolle: ohne Siliermittel, Zusatz: mit Siliermittel

Prüfglied	Anteile LUA	TS	Z/PK	VK	Hefen	Schimmel	MSB Kontrolle + Zusatz chem.	MSB Zusatz biol. 1	MSB Zusatz biol. 2
	[%]	[%]			[KbE g ⁻¹ FM]		[KbE g ⁻¹ FM]		[KbE g ⁻¹ FM]
LUA-Mais, LuMi-opt									
2019									
LUA-1/M3	11,1	34,0	2,2	51	3,6E+05	2,4E+05	7,7E+06	1,3E+06	
LUA-2/M3	11,1	38,3	1,3	48	2,8E+04	4,2E+04	9,5E+04	1,4E+05	
M3	0,0	41,1	1,2	51	1,3E+05	1,5E+04	1,5E+05	3,0E+05	
LUA-1	100,0	15,4	0,6	20	3,0E+04	2,6E+04	2,7E+05	4,6E+05	
LUA-2	100,0	15,6	0,5	20	4,4E+04	3,6E+04	1,3E+05	1,9E+05	
2020									
LUA-1/M3	14,0	34,6	2,8	57	1,3E+05	1,2E+04	1,5E+06	2,2E+06	
LUA-2/M3	15,3	39,1	3,1	64	2,1E+05	1,1E+04	4,5E+05	4,6E+06	
M3	0,0	42,6	2,8	65	5,4E+05	9,7E+03	1,6E+06	1,2E+06	
LUA-1	100,0	18,4	0,7	24	1,3E+05	3,1E+04	1,3E+05	2,2E+05	
LUA-2	100,0	21,8	0,9	29	7,0E+04	8,3E+03	6,9E+04	1,3E+05	
2021									
LUA-1/M3	11,4	35,2	2,8	57	3,3E+05	5,7E+03	1,0E+06	3,5E+05	
LUA-2/M3	8,7	33,6	3,3	60	2,0E+05	4,3E+03	8,3E+05	3,0E+05	
M3	0,0	35,0	3,9	67	6,0E+05	1,2E+04	3,8E+06	5,2E+05	
LUA-1	100,0	16,4	0,7	22	8,0E+03	6,7E+02	9,1E+04	4,7E+05	
LUA-2	100,0	19,4	1,1	28	4,0E+03	<1,0E+03	3,4E+05	1,2E+06	
LUW-Hafer, LuMi-opt									
2019									
LUW-1/H3	39,4	34,0	1,8	48	6,5E+05	3,3E+04	2,9E+05	3,2E+05	
LUW-2/H3	42,1	26,1	2,3	44	1,5E+05	1,6E+04	6,8E+05	1,7E+05	
HA3	0,0	39,5	1,8	54	6,8E+05	8,7E+03	1,3E+05	2,2E+05	
LUW-1	100,0	45,3	1,8	59	5,5E+04	8,3E+03	2,6E+05	2,8E+05	
LUW-2	100,0	19,8	2,5	40	2,9E+04	4,0E+03	1,0E+05	2,6E+05	
2020									
LUW-1/H3	49,2	38,1	1,8	52	2,8E+04	1,4E+04	7,9E+04	6,1E+04	
LUW-2/H3	31,1	39,7	1,7	53	3,2E+04	1,0E+03	1,1E+06	4,7E+05	
HA3	0,0	46,4	1,6	59	3,5E+04	2,6E+04	5,6E+05	1,3E+05	
LUW-1	100,0	42,7	1,9	58	1,0E+04	1,0E+03	3,7E+04	7,1E+04	
LUW-2	100,0	20,3	2,0	36	1,6E+04	1,3E+04	3,2E+04	7,9E+04	
2021									
LUW-1/H3	72,3	25,5	1,7	39	1,8E+05	1,9E+04	7,1E+04	3,2E+05	
LUW-2/H3	78,1	19,9	2,8	42	4,6E+04	1,2E+04	2,3E+04	1,4E+05	
HA3	0,0	35,8	1,0	43	5,2E+05	1,0E+04	8,0E+04	5,5E+04	
LUW-1	100,0	24,7	1,4	36	3,0E+04	5,0E+03	2,8E+04	8,0E+04	
LUW-2	100,0	18,1	1,3	28	1,5E+04	2,7E+03	3,0E+04	8,9E+04	
LUA-Mais, LuMi-BEST									
2021									
LUA-2/M2	8,7	33,3	2,8	55	1,1E+05	7,7E+03	1,5E+05	9,7E+04	9,1E+05
M2	0,0	34,7	2,6	56	3,3E+06	1,0E+04	2,1E+06	2,0E+06	2,2E+06
LUA-2	100,0	19,4	1,1	28	4,0E+03	<1,0E+03	3,4E+05	1,2E+06	1,9E+06
2022									
LUA-2/M2	23,0	37,7	1,3	49	9,0E+04	2,2E+03	4,4E+05	8,7E+05	1,2E+06
M2	0,0	46,0	1,7	60	2,9E+05	2,3E+03	3,4E+05	4,7E+05	2,6E+06
LUA-2	100,0	21,5	0,3	24	1,0E+05	3,0E+03	4,2E+05	3,7E+05	8,3E+05

KbE = Koloniebildende Einheiten

Richtwerte (Jänicke 2011)

Z (Zucker)/PK (Pufferkapazität) Quotient: mind. 2

VK = Vergärbarkeitskoeffizient: mind. 45

Hefen: <1,0E+05

Schimmel: <1,0E+04

In den Silagen stellte sich nach 90-tägigem Silierprozess der pH-Wert aller Prüfglieder der verschiedenen Versuchsansätze einschließlich aller Siliermittelzusätze eindeutig im sauren Milieu ein (Tabelle 22). Im Wesentlichen bewegten sich die Werte zwischen 3,6 (LUA 2/M 3, Zusatz chem., LuMi-opt, 2019) und 4,5 (LUA 1, Kontrolle, LuMi-opt, 2021). Nur bei LUA 2 (LuMi-Best) mit dem Zusatz biol. 2 sank der pH-Wert mit 4,9 bzw. 4,8 weniger tief ab.

Die Gärschädlinge Hefen konnten in den Silagen in allen Untersuchungsjahren häufig nicht ausreichend gut bei vereinzelt Prüfgliedern der Kontrolle als auch bei Zusatz biol. 1 unterdrückt werden (Tabelle 22). Insbesondere war dies bei Prüfgliedern von LUA-Mais in allen Jahren außer in 2019 zu beobachten, bei LUW-Hafer vorwiegend in 2021. In der Regel betraf es in den jeweiligen Jahren die gleichen Gemenge- und Reinsaatenprüfglieder. Dabei lag der Anteil untersuchter Laborsilagen mit einem Hefenbesatz $>1,0E+03$ KbE g^{-1} FM überwiegend bei 100,0%. Die Gärschädlinge Schimmel wurden immer gut unterdrückt. Bei der Kontrolle als auch allen Siliermittelzusätzen lagen alle Prüfglieder in allen Untersuchungsjahren immer unterhalb eines Besatzes von $1,0E+03$ KbE g^{-1} FM, somit alle Anteile bei 0,0%.

Aufgrund des Silierprozesses lassen sich Gärverluste nicht vermeiden. Diese bewegten sich, bezogen auf alle Versuchsansätze, zwischen 3,2% (M 3, LUA-Mais, LuMi-opt, Zusatz biol. 1, 2019) und 8,2% (LUA 2, LUA-Mais, LuMi-BEST, Zusatz biol. 2, 2021) (Tabelle 22). Im Vergleich der Jahre waren die Verluste durchschnittlich aller Prüfglieder und Varianten bei LuMi-opt mit 4,5% (LUA-Mais) und 4,4% (LUW-Hafer) sowie bei LuMi-BEST mit 4,8% (LUA-Mais) jeweils im Jahr 2021 am höchsten. Die Zusätze biol. 1 sowie chem. führten bei LuMi-opt und LuMi-BEST gegenüber der Kontrolle im Schnitt der Prüfglieder und Jahre zu meist minimal geringeren Verlusten. Im Gegensatz dazu waren die Verluste aller Prüfglieder mit Zusatz biol. 2 bei LuMi-BEST gegenüber der Kontrolle um 1,8% höher.

Tabelle 22: Silagequalität nach 90 Tagen Silierdauer der LUA-Mais- und LUW-Hafer-Gemenge sowie deren Reinsaaten der Versuchsjahre 2019-2021/2022 von den Versuchsansätzen LuMi-opt und LuMi-BEST, Kontrolle: ohne Siliermittel, Zusatz: mit Siliermittel

Prüfglied	pH	Hefen* [%]	Schimmel* [%]	Gärverluste [% TM]	pH	Hefen* [%]	Schimmel* [%]	Gärverluste [% TM]	pH	Hefen* [%]	Schimmel* [%]	Gärverluste [% TM]	pH	Hefen* [%]	Schimmel* [%]	Gärverluste [% TM]
		Kontrolle				Zusatz biol. 1				Zusatz chem.				Zusatz biol. 2		
LUA-Mais, LuMi-opt									2019							
LUA-1/M3	3,8	0,0	0,0	4,0	3,8	0,0	0,0	3,7	3,6	0,0	0,0	3,9				
LUA-2/M3	3,9	0,0	0,0	3,9	3,9	0,0	0,0	3,7	3,9	0,0	0,0	3,7				
M3	3,9	0,0	0,0	3,5	3,9	0,0	0,0	3,2	3,9	0,0	0,0	3,4				
LUA-1	4,1	0,0	0,0	4,5	4,1	0,0	0,0	4,4	4,1	0,0	0,0	4,3				
LUA-2	4,1	0,0	0,0	5,2	4,1	0,0	0,0	5,2	4,1	0,0	0,0	5,1				
									2020							
LUA-1/M3	3,9	100,0	0,0	3,9	3,9	100,0	0,0	3,8	3,9	0,0	0,0	3,5				
LUA-2/M3	3,9	100,0	0,0	4,0	3,9	100,0	0,0	4,0	3,9	0,0	0,0	3,4				
M3	3,9	100,0	0,0	3,9	3,9	100,0	0,0	3,9	4,0	0,0	0,0	3,4				
LUA-1	4,3	0,0	0,0	4,0	4,3	0,0	0,0	4,3	4,2	0,0	0,0	3,9				
LUA-2	4,4	0,0	0,0	4,9	4,4	0,0	0,0	4,8	4,3	0,0	0,0	4,5				
									2021							
LUA-1/M3	4,0	0,0	0,0	3,6	3,9	0,0	0,0	3,9	3,9	0,0	0,0	3,5				
LUA-2/M3	3,9	100,0	0,0	3,7	3,8	0,0	0,0	3,9	3,9	0,0	0,0	3,6				
M3	3,8	0,0	0,0	3,6	3,8	0,0	0,0	4,0	3,9	0,0	0,0	3,7				
LUA-1	4,5	0,0	0,0	5,0	4,3	0,0	0,0	4,2	4,3	0,0	0,0	4,7				
LUA-2	4,2	0,0	0,0	5,2	4,3	0,0	0,0	4,3	4,3	0,0	0,0	5,3				
LUW-Hafer, LuMi-opt									2019							
LUW-1/H3	4,0	0,0	0,0	3,5	3,9	0,0	0,0	3,5	4,0	0,0	0,0	3,4				
LUW-2/H3	3,9	0,0	0,0	3,5	3,8	0,0	0,0	3,5	3,9	0,0	0,0	3,4				
HA3	4,0	0,0	0,0	3,6	3,9	0,0	0,0	3,6	4,0	0,0	0,0	3,6				
LUW-1	4,0	0,0	0,0	3,6	3,9	0,0	0,0	3,6	4,1	0,0	0,0	3,5				
LUW-2	3,8	100,0	0,0	4,0	3,7	100,0	0,0	4,0	3,8	0,0	0,0	3,7				
									2020							
LUW-1/H3	4,1	0,0	0,0	3,5	4,0	0,0	0,0	3,4	4,1	0,0	0,0	3,5				
LUW-2/H3	4,2	0,0	0,0	3,8	3,9	0,0	0,0	3,4	4,1	0,0	0,0	3,5				
HA3	4,3	0,0	0,0	3,6	4,1	0,0	0,0	3,5	4,3	0,0	0,0	3,5				
LUW-1	4,2	0,0	0,0	3,9	4,0	0,0	0,0	3,7	4,1	0,0	0,0	3,7				
LUW-2	4,0	0,0	0,0	5,1	3,8	66,7	0,0	4,2	3,9	0,0	0,0	4,3				
									2021							
LUW-1/H3	4,0	100,0	0,0	4,2	4,0	100,0	0,0	3,5	4,0	0,0	0,0	3,8				
LUW-2/H3	3,9	100,0	0,0	5,2	3,7	100,0	0,0	6,1	3,8	0,0	0,0	3,9				
HA3	4,1	0,0	0,0	3,4	4,0	0,0	0,0	3,9	4,1	0,0	0,0	3,4				
LUW-1	3,9	100,0	0,0	5,1	3,9	100,0	0,0	4,3	4,0	0,0	0,0	4,1				
LUW-2	3,8	100,0	0,0	6,1	3,7	100,0	0,0	5,8	3,8	0,0	0,0	4,2				
LUA-Mais, LuMi-BEST									2021							
LUA-2/M2	4,0	100,0	0,0	3,5	3,8	100,0	0,0	3,6	3,9	0,0	0,0	4,3	3,9	0,0	0,0	5,3
M2	3,9	0,0	0,0	3,7	3,9	0,0	0,0	3,5	3,9	0,0	0,0	4,0	4,0	0,0	0,0	5,4
LUA-2	4,2	0,0	0,0	5,2	4,3	0,0	0,0	5,2	4,3	0,0	0,0	5,3	4,9	0,0	0,0	8,2
									2022							
LUA-2/M2	4,2	66,7	0,0	3,8	4,0	0,0	0,0	3,6	4,1	0,0	0,0	3,6	4,3	0,0	0,0	5,2
M2	4,2	0,0	0,0	3,3	4,0	0,0	0,0	3,3	4,1	0,0	0,0	3,2	4,0	0,0	0,0	4,2
LUA-2	4,3	0,0	0,0	4,9	4,3	0,0	0,0	4,9	4,2	0,0	0,0	4,7	4,8	0,0	0,0	6,7

*Anteil untersuchter Laborsilagen mit einer Keimdichte >1,0E+03 KbE g⁻¹ FM

*Anteil untersuchter Laborsilagen mit einer Keimdichte >1,0E+03 KBe g⁻¹ FM

Während des Silierprozesses werden als Gärprodukte verschiedene Gärsäuren und Alkohole gebildet, die nach Siegfried et al. (1984) ermittelt wurden (Tabelle 23). Da Gärprodukte beim Trocknungsprozess von Silagen flüchtig sind, muss die ermittelte Silagentrockensubstanz anschließend um die gemessenen flüchtigen Substanzen korrigiert werden (Weißbach und Kuhla 1995, Weißbach und Strubelt 2008). Dies hat zur Folge, dass auch alle in Silagen gemessenen Substanzen auf die korrigierte Trockensubstanz (TSK) bezogen werden müssen.

Im Vergleich der Gärprodukte wurde in allen Versuchsjahren bei allen Prüfgliedern von LuMi-opt und LuMi-BEST bei Kontrolle, Zusatz biol. 1 und Zusatz chem. ein erwartbar hoher Gehalt an MS vorgefunden. Am höchsten war dieser in der Regel bei den Lupinenreinsaat zu beobachten, welche sich durch niedrigere TS-Gehalte auszeichneten. Dabei erzielte der Zusatz biol. 1 von LUW 2 (LuMi-opt) mit 11,7% in 2020 den höchsten Wert. Die Werte des ES-Gehalts lagen im Schnitt der Prüfglieder in ihrer Höhe an zweiter Stelle. Dabei erzielten die Prüfglieder der Andenlupinenreinsaat meist mehr als 2,0%, während die Reinsaat der Weißen Lupine eher unterhalb von 2,0% lagen. Alle anderen Prüfglieder erreichten oft niedrigere Werte, die oft nur um 1,0% lagen. Bei Zusatz biol. 2, nur LuMi-BEST, ergab sich hingegen ein anderes Bild. Durchschnittlich aller Prüfglieder beider Jahre war gegenüber der Kontrolle der Gehalt an MS um 2,8%

geringer und jener von ES um 2,0% höher. Alle weiteren Gärprodukte PS, ETH, PD und BD lagen im Schnitt aller Prüfglieder der Kontrolle und jeweiligen Siliermittelzusätze deutlich unter einem Prozent bzw. waren teilweise bis gänzlich garnicht vorhanden. Nur in 2021 wich der ETH-Gehalt bei vereinzelt Prüfgliedern von LUW-Hafer teilweise stark vom Durchschnittswert ab. Maximal wurde ein Wert von 3,2% bei LUW 1/H 3 und LUW 2 (Zusatz biol. 1) gemessen. Ausschließlich beim Zusatz biol. 2 (LuMi-BEST) traten in 2021 und 2022 die beiden weiteren Alkohole Propanol, bei fast allen Prüfgliedern, und Butanol bei LUA 2 in Erscheinung. Hervorzuheben ist, dass in allen Jahren bei allen Prüfgliedern der Kontrolle und Siliermittelzusätzen mit 0,0% keine schädliche BS gebildet wurde. Insofern waren keine Clostridien in solch einem Ausmaß vorhanden gewesen, welche eine unerwünschte Buttersäuregärung hätten auslösen können.

Tabelle 23: Gärprodukte in den Silagen nach 90 Tagen Silierdauer der LUA-Mais- und LUW-Hafer-Gemenge sowie deren Reinsaaten der Versuchsjahre 2019-2021/2022 von den Versuchsansätzen LuMi-opt und LuMi-BEST, (MS=Milchsäure, ES=Essigsäure, PS=Propionsäure, ETH=Ethanol, PD=1,2-Propandiol, BD=2,3-Butandiol, BS=Buttersäure, PA=Propanol, BA=Butanol), Kontrolle: ohne Siliermittel, Zusatz: mit Siliermittel

Prüf glied	MS	ES	PS	ETH	PD	BD	BS	MS	ES	PS	ETH	PD	BD	BS	MS	ES	PS	ETH	PD	BD	BS	MS	ES	PS	ETH	PD	BD	BS	PA*	BA*		
	[% TSK]							[% TSK]							[% TSK]							[% TSK]										
	Kontrolle							Zusatz biol. 1							Zusatz chem.							Zusatz biol. 2										
LUA-Mais, LuMi-opt																																
2019																																
LUA-1/M3	5,7	1,2	0,0	0,7	0,0	0,1	0,0	5,3	1,1	0,0	0,6	0,0	0,1	0,0	5,8	1,2	0,0	0,6	0,0	0,1	0,0	5,3	1,0	0,0	0,6	0,0	0,1	0,0				
LUA-2/M3	5,3	1,0	0,0	0,6	0,0	0,1	0,0	5,1	0,9	0,0	0,6	0,0	0,1	0,0	4,8	1,0	0,0	0,5	0,0	0,1	0,0	5,3	1,0	0,0	0,5	0,0	0,1	0,0				
M3	4,6	1,2	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	4,2	0,9	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	4,4	1,1	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	4,6	1,2	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0				
LUA-1	8,6	1,9	0,1	0,6	0,0	0,2	0,0	9,2	2,0	0,1	0,6	0,0	0,1	0,0	9,1	1,9	0,1	0,5	0,1	0,1	0,0	9,6	2,3	0,1	0,8	0,0	0,2	0,0				
LUA-2	11,1	2,6	0,2	1,0	0,0	0,3	0,0	9,8	2,3	0,1	0,8	0,0	0,3	0,0	9,6	2,3	0,1	0,8	0,0	0,2	0,0											
2020																																
LUA-1/M3	5,4	0,9	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	5,6	0,9	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	5,4	0,9	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	5,4	0,9	0,0	0,4	0,0	0,1	0,0				
LUA-2/M3	5,4	1,0	0,0	0,9	0,0	0,1	0,0	4,9	0,9	0,0	1,0	0,0	0,1	0,0	5,0	0,9	0,0	0,4	0,0	0,1	0,0	5,4	1,0	0,0	0,9	0,0	0,1	0,0				
M3	4,8	1,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	4,4	0,9	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	4,1	0,8	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	4,8	1,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0				
LUA-1	7,0	1,9	0,0	0,5	0,0	0,1	0,0	6,8	1,9	0,0	0,5	0,0	0,1	0,0	7,0	1,8	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	7,0	1,9	0,0	0,5	0,0	0,1	0,0				
LUA-2	7,0	2,0	0,0	0,8	0,0	0,1	0,0	7,0	2,0	0,0	0,8	0,0	0,1	0,0	6,6	1,8	0,0	0,9	0,0	0,1	0,0											
2021																																
LUA-1/M3	5,4	1,2	0,1	0,4	0,0	0,1	0,0	5,2	1,1	0,2	0,4	0,0	0,2	0,0	5,6	1,2	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	5,4	1,2	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0				
LUA-2/M3	5,4	1,2	0,1	0,4	0,0	0,1	0,0	4,8	1,0	0,1	0,3	0,0	0,1	0,0	5,4	1,1	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	5,4	1,2	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0				
M3	4,8	1,2	0,1	0,4	0,0	0,0	0,0	4,9	1,1	0,1	0,4	0,0	0,1	0,0	4,6	1,2	0,1	0,4	0,0	0,0	0,0	4,8	1,2	0,1	0,4	0,0	0,0	0,0				
LUA-1	6,9	2,6	0,0	0,7	0,0	0,2	0,0	8,1	2,4	0,0	0,6	0,0	0,3	0,0	7,9	2,2	0,0	0,8	0,0	0,3	0,0	8,1	2,4	0,0	0,7	0,0	0,2	0,0				
LUA-2	8,4	2,3	0,3	0,6	0,0	0,3	0,0	8,3	2,5	0,2	0,6	0,0	0,2	0,0	8,8	2,5	0,2	0,4	0,0	0,2	0,0											
Luw-Hafer, LuMi-opt																																
2019																																
LUW-1/H3	5,4	1,3	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	6,3	1,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	5,1	1,5	0,1	0,3	0,0	0,1	0,0	5,4	1,3	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0				
LUW-2/H3	6,8	1,3	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	7,4	1,2	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	6,4	1,5	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	6,8	1,3	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0				
HA3	4,9	1,0	0,1	0,2	0,0	0,2	0,0	5,7	0,9	0,1	0,3	0,0	0,2	0,0	3,9	1,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	4,9	1,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0				
LUW-1	3,8	0,9	0,1	0,4	0,0	0,1	0,0	4,1	0,7	0,1	0,4	0,0	0,1	0,0	4,1	0,9	0,1	0,4	0,0	0,1	0,0	3,8	0,9	0,1	0,4	0,0	0,1	0,0				
LUW-2	8,3	1,6	0,2	1,0	0,0	0,2	0,0	8,9	1,3	0,2	1,0	0,0	0,2	0,0	7,7	1,8	0,2	0,5	0,0	0,2	0,0											
2020																																
LUW-1/H3	5,7	0,9	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	7,0	0,7	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	5,2	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	5,7	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0				
LUW-2/H3	4,8	1,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	7,0	0,9	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	4,9	1,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	4,8	1,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0				
HA3	4,1	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	7,3	0,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	4,2	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	4,1	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0				
LUW-1	3,7	0,9	0,1	0,8	0,0	0,0	0,0	5,0	0,7	0,1	0,6	0,0	0,0	0,0	3,8	0,9	0,1	0,5	0,0	0,0	0,0	3,7	0,9	0,1	0,8	0,0	0,0	0,0				
LUW-2	9,5	1,7	0,2	1,2	0,0	0,0	0,0	9,0	0,8	0,2	1,1	0,0	0,0	0,0	8,8	1,3	0,2	0,9	0,0	0,0	0,0											
2021																																
LUW-1/H3	8,5	2,0	0,1	0,6	0,2	0,1	0,0	7,7	0,9	0,1	0,4	0,0	0,1	0,0	6,6	1,7	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	8,5	2,0	0,1	0,6	0,2	0,1	0,0				
LUW-2/H3	9,2	2,2	0,2	1,6	0,2	0,1	0,0	11,3	1,0	0,2	3,2	0,0	0,1	0,0	9,6	1,7	0,2	0,7	0,0	0,1	0,0	9,2	2,2	0,2	1,6	0,2	0,1	0,0				
HA3	5,6	0,9	0,4	0,1	0,0	0,1	0,0	6,1	0,9	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0	5,2	1,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	5,6	0,9	0,4	0,1	0,0	0,1	0,0				
LUW-1	8,7	1,8	0,2	2,0	0,0	0,2	0,0	8,3	1,1	0,2	1,8	0,0	0,2	0,0	7,6	1,7	0,2	1,4	0,0	0,2	0,0	8,7	1,8	0,2	2,0	0,0	0,2	0,0				
LUW-2	9,3	2,1	0,2	3,1	0,0	0,3	0,0	11,7	1,2	0,2	3,2	0,0	0,3	0,0	9,0	1,9	0,2	1,2	0,0	0,2	0,0											
LUA-Mais, LuMi-BEST																																
2021																																
LUA-2/M2	5,7	1,1	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	5,6	0,7	0,0	0,8	0,0	0,1	0,0	4,5	2,5	0,0	0,4	1,1	0,0	0,0	3,9	3,6	0,0	0,7	0,0	0,2	0,0	1,3	0,0		
M2	4,8	1,4	0,1	0,4	0,2	0,0	0,0	5,1	0,9	0,1	0,4	0,0	0,0	0,0	4,5	1,3	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	3,4	3,0	0,1	1,0	0,0	0,2	0,0	1,1	0,0		
LUA-2	8,4	2,3	0,3	0,6	0,0	0,3	0,0	8,3	2,5	0,2	0,6	0,0	0,2	0,0	8,8	2,5	0,2	0,4	0,0	0,2	0,0	2,0	5,6	0,3	1,1	0,0	0,3	0,0	0,0	1,3		
2022																																
LUA-2/M2	4,9	1,8	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	5,4	1,3	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	4,4	1,4	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	2,5	3,0	0,2	0,4	0,0	0,2	0,0	1,0	0,0		
M2	3,5	1,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	4,4	1,1	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	3,4	1,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	3,0	2,2	0,0	0,3	0,0	0,2	0,0	0,7	0,0		
LUA-2	7,0	2,5	0,5	0,5	0,0	0,2	0,0	6,3	2,4	0,4	0,5	0,0	0,1	0,1	7,6	2,6	0,3	0,4	0,0	0,1	0,1	2,8	4,7	0,4	0,7	0,0	0,2	0,0	1,2	0,0		

der Silageentnahme vorhanden waren (Tabelle 22). Bis auf wenige Ausnahmen erfolgte die Erwärmung recht zügig. Schon innerhalb der ersten drei Messtage setzte der Temperaturanstieg ein, am frühesten mit 1,6 Tagen bei Prüfglied LUW 2/H 3 (LuMi-opt, Zusatz biol. 1) in 2021 (Tabelle 24). Damit verbunden traten Hefen in Erscheinung, der pH-Wert und der Stoffverlust dieser Prüfglieder stieg an. Nur wenn die ASTA, wie bei Prüfglied LUW 2 (LuMi-opt, Kontrolle) in 2020, erst kurz vor dem Prüfdauerende abbrach, waren bei Hefen, Schimmel, pH-Wert und Verlusten erst geringe Folgeeffekte zu beobachten. Eine ausschließlich sehr gute ASTA konnte in allen Jahren bei fast allen Prüfgliedern mit Zusatz chem. und Zusatz biol. 2 beobachtet werden. Nur jeweils eine LUW 2-Silage (LuMi-opt) in 2019 und 2020 zeigten bei Zusatz chem. erst eine vernachlässigbar sehr späte Erwärmung. Hefen und Schimmel waren noch nicht beobachtet worden und der pH-Wert war ebenfalls noch nicht erhöht. Bei den Leguminosenreinsaatsilagen war auffällig, dass sowohl bei der Kontrolle als auch den den Siliermittelzusätzen in allen Jahren oft recht hohe Trockenmasseverluste auftraten, auch wenn deren ASTA über den gesamten Messzeitraum gegeben war. Bedingt durch die sehr niedrigen TS-Gehalte im Siliergut dieser Prüfglieder wurden beim Silierprozess besonders viel Gärsäfte gebildet (Spiekers 2009, Pieper 2014), welche bei ASTA-Messung austraten und damit als Auslöser für die hohen Verluste zu werten sind. Wenn dennoch zusätzlich eine Erwärmung beobachtet wurde, wie es insbesondere bei Prüfgliedern von LUW-Hafer in 2021 der Fall war, so ergaben sich die hohen Stoffverluste meist aus der Kombination von Hefenaktivität und Gärsaftaustritt.

Tabelle 24: Aerobe Stabilität (ASTA) von Silagen nach 90 Tagen Silierdauer der LUA-Mais- und LUW-Hafer-Gemenge sowie deren Reinsaaten der Versuchsjahre 2019-2021/2022 von den Versuchsansätzen LuMi-opt und LuMi-BEST sowie deren Qualitätsbewertung nach ASTA, Kontrolle: ohne Siliermittel, Zusatz: mit Siliermittel

Prüfglied	ASTA	pH	Hefen	Schimmel	Verluste	ASTA	pH	Hefen	Schimmel	Verluste	ASTA	pH	Hefen	Schimmel	Verluste	ASTA	pH	Hefen	Schimmel	Verluste
	[Tage]		[Bonitur*]		[% TM]	[Tage]		[Bonitur*]		[% TM]	[Tage]		[Bonitur*]		[% TM]	[Tage]		[Bonitur*]		[% TM]
			Kontrolle					Zusatz biol. 1					Zusatz chem.					Zusatz biol. 2		
LUA-Mais, LuMi-opt																				
2019																				
LUA-1/M3	7,0	n.e.	0,0	0,5	7,3	7,0	n.e.	0,0	0,0	7,1	7,0	n.e.	0,0	0,0	6,9					
LUA-2/M3	7,0	n.e.	0,0	0,0	5,7	7,0	n.e.	0,0	0,5	5,9	7,0	n.e.	0,0	0,0	6,0					
M3	7,0	n.e.	0,0	0,0	6,5	7,0	n.e.	0,0	0,0	6,1	7,0	n.e.	0,0	0,0	5,2					
LUA-1	7,0	n.e.	0,0	0,0	78,7	7,0	n.e.	0,0	0,2	74,5	7,0	n.e.	0,0	0,2	67,9					
LUA-2	7,0	n.e.	0,0	0,3	60,2	7,0	n.e.	0,0	0,0	53,7	7,0	n.e.	0,0	0,0	59,2					
2020																				
LUA-1/M3	1,8	7,1	2,0	1,0	13,4	2,2	7,1	2,0	0,3	11,2	7,0	4,0	0,0	0,0	5,6					
LUA-2/M3	2,5	6,9	2,0	0,3	10,3	2,0	6,9	2,0	0,8	11,3	7,0	4,1	0,0	0,0	5,0					
M3	2,9	6,0	1,0	0,5	10,6	2,8	6,1	1,0	0,2	9,8	7,0	4,1	0,0	0,0	4,7					
LUA-1	7,0	4,4	0,0	0,0	32,2	7,0	4,3	0,0	0,0	22,0	7,0	4,3	0,0	0,0	20,2					
LUA-2	7,0	4,5	0,0	0,7	8,4	7,0	4,5	0,0	0,5	7,9	7,0	4,4	0,0	0,2	8,1					
2021																				
LUA-1/M3	7,0	3,9	0,0	0,2	4,7	7,0	3,9	0,0	0,3	4,9	7,0	3,9	0,0	0,0	5,4					
LUA-2/M3	4,6	4,2	1,7	0,0	7,0	7,0	3,9	0,0	0,3	6,1	7,0	3,9	0,0	0,0	4,0					
M3	7,0	3,9	0,0	0,0	4,1	7,0	3,9	0,0	0,2	5,0	7,0	3,9	0,0	0,2	3,9					
LUA-1	7,0	4,4	0,0	0,0	39,4	7,0	4,3	0,0	0,3	47,1	7,0	4,3	0,0	0,2	37,1					
LUA-2	7,0	4,2	0,0	0,3	9,8	7,0	4,2	0,0	0,0	12,8	7,0	4,2	0,0	0,0	11,2					
Luw-Hafer, LuMi-opt																				
2019																				
LUW-1/H3	7,0	n.e.	0,0	0,5	7,8	7,0	n.e.	0,0	0,0	6,3	7,0	n.e.	0,0	0,0	7,7					
LUW-2/H3	7,0	n.e.	0,0	0,0	7,1	7,0	n.e.	0,0	0,5	6,2	7,0	n.e.	0,0	0,0	6,7					
HA3	7,0	n.e.	0,0	0,0	5,9	7,0	n.e.	0,0	0,0	5,4	7,0	n.e.	0,0	0,0	5,8					
LUW-1	7,0	n.e.	0,0	0,0	6,3	7,0	n.e.	0,0	0,0	4,2	7,0	n.e.	0,0	0,0	4,4					
LUW-2	2,4	n.e.	4,0	0,0	47,9	2,8	n.e.	4,0	0,0	52,1	5,8	n.e.	0,0	0,0	28,1					
2020																				
LUW-1/H3	7,0	4,2	0,0	0,5	8,6	7,0	4,1	0,0	0,0	6,5	7,0	4,2	0,0	0,0	6,0					
LUW-2/H3	7,0	4,2	0,0	0,0	6,0	7,0	4,0	0,0	0,5	6,8	7,0	4,2	0,0	0,0	5,7					
HA3	7,0	4,4	0,0	0,0	4,5	7,0	4,1	0,0	0,0	4,1	7,0	4,4	0,0	0,0	4,0					
LUW-1	7,0	4,2	0,0	0,0	4,6	7,0	4,0	0,0	0,0	4,1	7,0	4,2	0,0	0,0	4,0					
LUW-2	6,5	4,2	0,7	0,5	10,2	3,7	7,1	3,8	0,0	19,0	7,0	4,0	0,0	0,2	9,0					
2021																				
LUW-1/H3	2,4	8,3	3,0	0,0	14,9	1,8	8,6	2,3	0,0	32,4	7,0	4,2	0,0	0,0	6,6					
LUW-2/H3	2,2	8,1	1,3	0,0	39,0	1,6	8,1	2,0	0,0	70,5	7,0	3,9	0,0	0,0	34,8					
HA3	7,0	4,2	0,0	0,0	7,6	7,0	4,1	0,0	0,0	7,4	7,0	4,1	0,0	0,0	6,2					
LUW-1	2,3	8,0	2,7	0,0	38,0	1,8	8,2	2,3	0,0	36,9	7,0	4,1	0,0	0,0	8,3					
LUW-2	3,5	6,0	1,3	0,5	67,5	2,4	7,8	4,0	0,0	65,4	6,0	4,0	0,0	0,0	54,5					
LUA-Mais, LuMi-BEST																				
2021																				
LUA-2/M2	3,0	5,0	1,5	0,2	9,6	1,4	6,6	2,0	0,3	12,4	7,0	3,9	0,0	0,0	4,3	7,0	4,1	0,0	0,0	4,6
M2	7,0	3,9	0,0	0,0	3,7	7,0	3,9	0,0	0,0	4,0	7,0	3,9	0,0	0,0	4,0	7,0	4,1	0,0	0,0	4,4
LUA-2	7,0	4,2	0,0	0,3	9,8	7,0	4,2	0,0	0,0	12,8	7,0	4,2	0,0	0,0	11,2	7,0	4,9	0,0	0,0	11,5
2022																				
LUA-2/M2	5,0	4,7	0,8	0,0	7,1	7,0	4,0	0,0	0,2	5,2	7,0	4,1	0,0	0,0	4,8	7,0	4,4	0,0	0,0	5,3
M2	7,0	4,2	0,0	0,0	5,6	7,0	4,0	0,0	0,0	4,9	7,0	4,2	0,0	0,0	4,8	7,0	4,1	0,0	0,0	5,3
LUA-2	7,0	4,3	0,0	0,0	8,0	7,0	4,3	0,0	0,0	7,2	7,0	4,3	0,0	0,0	7,6	7,0	4,8	0,0	0,0	8,7

n.e. = nicht ermittelt, *Bonitur: 0 (keine) bis 4 (sehr hoch)

Für einen erfolgreichen Silierprozess ist erwünscht, dass MSB den vergärbaren Zucker zur stark säurebildenden Milchsäure vergären. Milchsäure ist eine starke Säure, senkt den pH-Wert und wirkt somit

konservierend. In feuchten Silagen (TS-Gehalt: 20%) sollte der pH-Wert unter 4,0, in trockenen Silagen (TS-Gehalt: >45%) unter 5,0 liegen (Spiekers et al., 2009). In der Natur kommen homofermentative und heterofermentative MSB (z.B. *Lactobacillus buchneri*) vor. Homofermentative MSB vergären den Zucker relativ schnell mit geringen Trockenmasseverlusten. Bei der heterofermentativen Gärung entstehen neben der Milchsäure vermehrt Essigsäure, verschiedene Alkohole und CO₂. Die Essigsäurebildung erfolgt aus einem Umbau der Milchsäure und entsteht verstärkt erst im späteren Verlauf der Silierung (Driehus et al. 1999, Oude Elfering 2001). 1,2-Propandiol trat nicht auf, welches bei einer gut gelungenen Essigsäuregärung in einem Mengenbereich bis zu 5% vertreten sein kann (Nishino 2003), es sei, der gebildete Alkohol wird von *Lactobacillus diolivorans* zu Propionsäure und Propanol umgesetzt (Krooneman et al. 2002), was hier zumindest für Propanol weitgehend zu beobachten war. Es ist dann beim Silierprozeß mit leicht höheren Gewichtsverlusten zu rechnen, insbesondere auch dann, wenn darüber hinaus noch weitere Säuren auftreten. Die Essigsäure wirkt bei einem ausreichend sauren pH-Wert-Milieu insbesondere hemmend auf die Hefepilze. Auch die aerobe Stabilität von Silagen wird verbessert. Der Essigsäuregehalt sollte 2-3% betragen (Spiekers et al., 2009; Kalzendorf und Staudacher, 2011). Gerade bei Zusatz biol. 2 (LuMi-BEST) wurde durch Zugabe von heterofermentativen MSB in 2021 und 2022 bei den Prüfgliedern die heterofermentative Gärung befördert. Somit lassen sich in den Silagen die gegenüber der Kontrolle und den anderen verwendeten Siliermitteln erzielten Ergebnisse mit der veränderten Gärobiologie gegenüber homofermentativer Gärung erklären: Geringere Milchsäuregehalte verursachten höhere pH-Werte und die unvermeidbaren Gärverluste erhöhten sich maximal um 3%, die damit immer noch auf einem geringen Niveau lagen. Mögliche Verlustzuwächse von 3 bis 5% bei heterofermentativer Gärung hatte auch Pahlow (2004) gefunden. Eine in feuchten gegenüber trockenen Siliergütern insbesondere erhöhte Milch- und Essigsäurebildung haben auch Wyss und Arrigo (2015) schon festgestellt. Das die Gärschädlinge Hefen in allen Jahren bei einigen Prüfgliedern der Kontrolle und Zusatz biol. 1 nicht gut unterdrückt wurden (Tabelle 22) kann daran gelegen haben, dass die Milchsäure nicht ausreichend wirksam gegen die Hefen war (Muck und Kung Jr 1997). Weinberg et al. (1993) kamen in ihren Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass selbst gut fermentierte Silagen mit hohem Milchsäuregehalt zu aerober Instabilität neigen. Dagegen war bei Silagen mit Zusatz biol. 2 (LuMi-BEST) eine gute Unterdrückung der Hefen erfolgt. Ein stärkere Depression der Hefen bei heterofermentativer Gärung ermittelten auch Kleinschmidt und Kung Jr (2006) im Rahmen einer Metaanalyse. Aufgrund der bei den Silagen der Kontrolle und mit Zusatz biol. 1 in allen Jahren teilweise noch hohen Hefenkeimdichte war dann die aerobe Stabilität sowohl bei Gemenge- als Reinsaatensilagen nicht ausreichend gegeben. Sie erwärmten sich überwiegend rasch in einem Zeitraum von knapp 2 bis 4 Tagen nach der Öffnung. Während der aeroben Exposition kam es zu einer Vermehrung des epiphytischen Hefenbesatzes, welcher innerhalb von 2 Tagen um den Faktor 1000 ansteigen kann (Pahlow 1985; Ranjit et al. 2006). Folglich ergab sich ein Anstieg beim pH-Wert und der Trockenmasseverluste (Tabelle 24). Das die Leguminosenreinsaatensilagen trotz ungünstiger Siliervoraussetzungen meist ein gute ASTA aufwiesen, kann mit daran gelegen haben, dass Hülsenfrüchte scheinbar eine natürliche Verbindung enthalten, die das Wachstum von verderblichen Mikroorganismen hemmen kann (Wilkinson und Davies, 2013), welches während des Silierens entwickelt wird (Muck und O'kiely 1992).

Futterwertparameter von LUA-Mais und LUW-Hafer der Versuchsansätze LuMi-opt und LuMi-Best

Alle Rohnährstoffe, Stärke, die enzymlösliche organische Substanz (ELOS) und die Gerüstsubstanzen ADFom und aNDFom wurden nach VDLUFA (2012) sowohl im Siliergut vor der Silierung als auch in allen Prüfgliedern der Kontrollsilagen und Silagen mit Siliermittel bestimmt (Tabelle 25 u. Tabelle 26). Bei allen untersuchten Parametern gab es bei den jeweiligen Versuchsansätzen eine signifikante 3-fache Wechselwirkung zwischen Jahr, Prüfglied und Kontrolle/Siliermittelbehandlung (Tabelle 27). Somit unterlagen alle gemessenen Parameter keiner gerichteten Veränderung.

Die Rohprotein (XP)-Gehalte waren bei den Leguminosenreinsaatensilagen mit maximal 20,7% im Siliergut von LUW 2 (LUW-Hafer, LuMi-opt, 2021) am höchsten. Dabei waren die LUW fast immer den LUA überlegen, weil sie zur Ernte einen höheren Kornansatz mit ausgeprägter Abreife aufwiesen. Die Reinsaat Mais hatte die geringsten Rohasche (XA)-Gehalte. Dagegen waren diese bei Leguminosenreinsaatensilagen bedingt durch höhere Mineralstoffgehalte immer höher (Qu et al. 2013 Anil et al. 2000). Bei mehrfach beobachteten Gehalten mit insbesondere mehr als 10% kann davon ausgegangen werden, dass vermutlich vermehrt Bodenbestandteile dem Siliergut angehaftet haben (Resch et al. 2010; Ward und Ondarza 2008). Die Rohfaser (RF)-gehalte waren bei den Reinsaatensilagen der Andenlupinen mit bis zu 47,1% (LUA 1, LUA-Mais, LuMi-opt, Kontrolle, 2020) am höchsten. Dagegen wurde bei allen Lupinen erwartungsgemäß kaum Stärke, minimal 1,5% (LUA 2, LuMi-BEST, Siliergut 2022) bis maximal 3,3% (LUW 2, LuMi-opt, Siliergut, 2022), vorgefunden. Auch die Reinsaat Hafer hatte gegenüber der Reinsaat Mais wesentlich geringere Gehalte aufzuweisen. Die Gehalte an enzymlöslicher organischer Substanz (ELOS), welche einen Hinweis auf den Energiegehalt geben, lagen zwischen 37,1 und 68,5% und waren bei den Maisreinsaatensilagen (M 2, Kontrolle und Zusatz chem., LuMi-Best, 2021) und LUA-Mais Gemengesilage (LUA 2/M 3, LuMi-opt, 2021) am höchsten. Höchste ADFom und aNDFom-Gehalte erzielten die Reinsaatensilagen der Andenlupine, dabei maximale Werte das Siliergut mit 53,6 bzw. 66,2% von LUA 1 (LuMi-opt) in 2021. Alle Prüfglieder der Gemengesaatensilagen orientierten sich in ihren Gehalten an den Werten der jeweilig beteiligten Kombinationspartner und waren beeinflusst von deren Gehaltsunterschieden als auch der Höhe des pflanzlichen Trockenmasseanteils, welcher jeder Partner in das

Gemenge mit einbrachte (Tabelle 21). Insbesondere die LUA-Mais-Gemenge hatten aufgrund des in das Gemenge gering eingebrachten Trockenmasseanteils der Andenlupine in ihrer Höhe vergleichbare Inhaltsstoffgehalte mit der Reinsaat Mais aufzuweisen. Zwischen dem Siliergut, der Kontrolle und den Siliermittelbehandlungen waren bei den jeweiligen Prüfgliedern in den einzelnen Versuchsjahren meist nur geringe Unterschiede gegeben.

Tabelle 25: Rohnährstoffe inkl. Stärke von Siliergut (Ernte) und Silagen (Kontrolle und mit Siliermitteln) nach 90 Tagen Silierdauer der LUA-Mais- und LUW-Hafer-Gemenge sowie deren Reinsaat der Versuchsjahre 2019-2021/2022 (XP=Rohprotein, XA=Rohasche, XF=Rohfaser, XS=Stärke, XZ=Zucker) von den Versuchsansätzen LuMi-opt und LuMi-BEST

Prüfglied	XP	XA	XF [% TS]	XS	XZ*	XP	XA	XF	XS	XP	XA	XF	XS	XP	XA	XF	XS	XP	XA	XF	XS
	Siliergut					Kontrolle				Zusatz biol. 1				Zusatz chem.				Zusatz biol. 2			
LUA-Mais, LuMi-opt										2019											
LUA-1/M3	7,4	4,6	22,0	28,5	6,5	7,6	4,6	20,4	29,7	7,6	4,8	19,7	30,1	7,6	4,9	18,9	28,9				
LUA-2/M3	6,8	4,7	25,4	25,1	4,6	8,1	4,5	19,6	27,8	8,3	4,2	17,7	30,5	8,0	4,2	19,1	31,3				
M3	6,6	4,2	21,1	27,6	4,5	7,5	3,9	21,8	27,1	7,5	3,8	20,7	28,9	7,4	4,1	22,6	25,3				
LUA-1	11,1	8,9	45,6	2,7	2,9	11,5	9,1	45,6	2,1	11,5	9,3	44,6	2,0	11,9	9,9	43,5	2,0				
LUA-2	11,7	11,9	41,1	3,0	2,9	13,2	12,5	37,2	2,2	13,5	12,4	37,0	2,0	13,6	12,8	35,8	2,2				
										2020											
LUA-1/M3	7,1	4,3	21,5	29,5	7,3	7,2	4,3	21,1	31,4	7,1	4,4	21,8	30,1	7,0	4,3	22,8	30,1				
LUA-2/M3	7,2	4,1	19,6	30,4	7,8	7,7	4,7	21,2	28,1	7,5	4,4	21,2	29,6	7,5	4,5	20,6	31,6				
M3	7,2	3,9	18,6	34,9	7,1	7,2	3,7	18,9	36,0	7,2	3,9	19,6	34,0	7,2	3,7	18,9	36,9				
LUA-1	12,8	8,9	44,8	1,8	3,1	10,4	8,3	47,1	1,7	10,4	8,5	45,4	1,6	10,4	8,7	45,4	1,7				
LUA-2	14,4	8,8	40,2	1,8	3,7	15,0	9,0	41,2	1,7	15,6	8,7	41,2	1,3	13,9	8,9	41,8	2,0				
										2021											
LUA-1/M3	7,4	4,3	20,4	33,0	8,8	7,4	4,0	20,1	32,5	7,2	3,7	18,8	35,1	7,2	4,3	20,8	32,1				
LUA-2/M3	7,2	4,2	20,9	30,4	9,3	7,3	3,9	18,4	35,3	7,3	4,3	19,8	32,9	7,3	4,2	19,9	32,9				
M3	6,7	3,5	19,1	32,2	10,2	6,7	3,3	19,3	34,9	6,7	3,4	19,0	33,1	6,8	3,5	19,2	29,7				
LUA-1	11,9	7,7	45,4	2,9	3,5	12,7	8,1	42,0	2,4	13,5	8,0	41,6	2,6	13,4	8,3	40,9	2,5				
LUA-2	16,0	7,8	37,2	2,7	5,2	13,8	9,3	40,2	2,7	14,9	8,3	39,1	2,6	16,4	8,4	37,4	2,3				
LUW-Hafer, LuMi-opt										2019											
LUW-1/H3	14,7	7,5	29,0	6,5	6,3	14,0	8,1	34,8	5,0	13,5	8,0	30,4	4,8	13,7	8,0	30,8	4,3				
LUW-2/H3	12,4	8,3	30,2	6,5	7,3	13,0	8,1	30,6	4,8	13,3	8,2	30,9	5,3	13,1	8,2	30,8	5,1				
HA3	8,5	8,5	30,3	9,5	5,5	9,2	7,6	30,7	7,6	9,5	7,8	29,9	8,5	9,1	7,9	29,8	8,6				
LUW-1	20,2	6,2	31,9	1,6	6,6	13,7	6,7	36,3	2,1	17,6	6,3	29,8	2,1	18,2	6,4	28,7	2,1				
LUW-2	17,1	6,4	30,2	2,3	8,6	17,4	7,1	28,7	2,9	18,5	7,1	28,9	3,3	18,3	7,2	30,5	3,1				
										2020											
LUW-1/H3	16,0	9,2	28,7	3,3	6,9	14,8	8,8	30,9	3,8	15,7	9,1	30,4	3,8	15,1	9,0	32,4	3,2				
LUW-2/H3	10,3	11,5	26,8	3,5	4,9	10,8	18,1	30,3	3,5	11,8	11,3	32,4	5,1	11,1	15,1	31,6	4,5				
HA3	11,8	11,8	29,9	4,1	6,5	9,9	10,6	30,1	7,7	11,7	11,1	29,9	6,0	10,7	12,7	30,3	6,1				
LUW-1	20,7	5,6	30,9	2,2	7,1	18,9	6,1	32,9	2,0	19,1	5,9	32,9	2,4	20,0	5,8	30,6	2,4				
LUW-2	15,8	8,2	34,6	2,0	6,6	15,4	8,8	34,7	2,3	16,1	9,4	33,7	2,8	16,1	8,8	33,8	2,7				
										2021											
LUW-1/H3	16,6	7,9	30,5	3,5	5,8	15,8	9,1	33,4	4,2	16,7	8,5	31,7	5,7	17,2	7,6	31,3	5,6				
LUW-2/H3	15,7	7,1	33,8	6,8	10,9	16,7	7,0	33,2	4,4	16,9	7,3	33,8	3,6	15,4	7,9	36,2	3,8				
HA3	11,1	8,6	29,8	12,3	3,0	10,6	9,9	26,9	12,4	10,1	7,9	28,0	12,7	10,6	8,1	27,8	12,9				
LUW-1	19,7	5,7	32,1	3,3	6,0	18,5	5,9	36,0	2,9	19,1	5,6	34,2	3,2	19,3	6,0	32,8	3,2				
LUW-2	15,5	7,4	36,8	2,9	6,7	16,2	6,3	35,3	2,7	17,6	7,0	34,3	2,9	17,6	6,9	32,7	3,0				
LUA-Mais, LuMi-BEST										2021											
LUA-2/M2	5,8	4,8	20,6	26,7	8,7	6,5	4,8	20,8	28,8	6,7	4,6	20,3	27,7	6,5	4,7	19,7	29,4	6,6	5,5	19,7	29,0
M2	6,4	4,3	20,3	30,6	4,9	6,6	3,9	19,0	31,8	7,0	4,2	20,9	25,5	7,0	4,1	19,5	31,0	6,7	4,3	21,0	30,8
LUA-2	16,0	8,2	39,8	2,7	5,2	13,8	9,3	40,2	2,7	14,9	8,3	39,1	2,6	16,4	8,4	37,4	2,3	15,7	8,2	37,5	2,1
										2022											
LUA-2/M2	9,5	6,1	27,5	29,6	4,4	8,8	7,0	23,5	22,9	8,7	7,2	23,2	24,2	8,5	7,5	25,5	20,9	8,5	7,3	24,7	22,4
M2	8,3	4,0	18,4	33,9	4,4	7,5	4,8	19,4	33,4	7,7	4,5	17,4	36,6	7,6	5,0	20,7	30,3	7,4	4,3	17,9	36,6
LUA-2	12,1	11,2	40,4	1,5	1,8	13,1	12,0	37,9	2,7	12,3	12,5	38,0	2,8	12,8	13,3	37,2	2,8	12,0	12,6	37,7	3,0
*wasserlösliche Kohlenhydrate, nur im Siliergut analysiert																					

*wasserlösliche Kohlenhydrate, nur im Siliergut analysiert

Tabelle 26: ELOS und Gerüstsubstanzen von Siliergut (Ernte) und Silagen (Kontrolle und mit Siliermitteln) nach 90 Tagen
 Silierdauer der LUA-Mais- und LUW-Hafer-Gemenge sowie deren Reinsaaten der Versuchsjahre 2019-2021/2022 (ELOS=Enzymlösliche Organische Substanz, ADFom=Säure-Detergentien-Faser, aNDFom=Neutrale-Detergentien-Faser) von den Versuchsansätzen LuMi-opt und LuMi-BEST

Prüfglied	ELOS	ADFom aNDFom			ELOS	ADFom aNDFom			ELOS	ADFom aNDFom			ELOS	ADFom aNDFom		
		[% TS]				[% TSk]				[% TSK]				[% TSk]		
		Siliergut				Kontrolle				Zusatz biol. 1				Zusatz chem.		
LUA-Mais, LuMi-opt									2019							
LUA-1/M3	63,2	26,5	47,3	65,5	23,8	45,6	65,0	24,2	41,8	64,1	24,5	40,5				
LUA-2/M3	62,0	24,9	45,8	62,4	25,5	43,0	66,3	23,1	40,4	66,2	22,8	39,7				
M3	62,6	25,2	49,5	60,9	25,2	45,7	62,7	23,5	43,7	59,0	25,2	47,1				
LUA-1	38,9	53,6	66,2	37,1	51,0	59,5	37,5	50,7	58,9	39,3	50,3	58,5				
LUA-2	38,5	47,5	58,0	41,8	41,9	49,3	44,7	41,5	49,4	45,1	42,1	49,0				
									2020							
LUA-1/M3	65,8	25,6	43,6	65,0	24,3	40,8	64,9	25,6	41,7	63,6	27,8	43,5				
LUA-2/M3	66,0	23,9	43,5	62,4	24,7	42,4	63,5	24,9	42,0	64,6	24,3	40,0				
M3	67,9	24,3	40,2	65,9	21,7	39,2	64,3	22,7	40,9	66,5	22,0	39,1				
LUA-1	39,7	51,2	62,8	37,3	52,9	62,2	39,5	52,4	61,5	39,8	51,8	61,5				
LUA-2	43,3	48,8	56,7	43,9	47,1	54,5	44,5	47,0	54,5	41,1	48,1	56,3				
									2021							
LUA-1/M3	67,3	23,5	40,2	65,7	23,0	38,5	67,4	21,5	37,6	65,4	23,9	39,6				
LUA-2/M3	67,8	23,9	42,3	68,5	21,0	36,1	66,2	22,2	38,8	67,1	23,0	38,4				
M3	65,3	22,7	42,0	66,5	21,8	38,7	66,8	21,8	38,7	66,3	22,0	39,7				
LUA-1	41,6	50,9	62,3	41,6	47,3	54,7	41,6	46,1	53,3	42,8	46,8	53,9				
LUA-2	47,7	42,4	51,3	42,8	44,5	52,6	44,1	43,3	51,6	48,6	41,4	48,2				
LUW-Hafer, LuMi-opt									2019							
LUW-1/H3	55,0	33,9	50,4	51,0	34,6	51,2	48,2	35,6	53,0	49,9	35,9	52,2				
LUW-2/H3	50,7	35,3	54,3	46,1	36,5	53,2	50,1	36,7	53,2	49,8	36,2	53,3				
HA3	44,1	34,2	59,9	44,1	35,0	59,0	44,5	34,8	58,6	45,8	35,2	58,6				
LUW-1	58,7	37,6	46,6	56,1	41,1	51,0	59,6	36,0	44,7	59,8	35,4	43,7				
LUW-2	58,9	35,7	44,9	55,8	37,2	45,4	59,2	35,4	43,7	58,7	35,4	43,7				
									2020							
LUW-1/H3	57,2	34,5	48,9	54,2	36,4	48,0	54,1	35,9	46,9	53,9	37,1	47,5				
LUW-2/H3	42,4	31,2	48,7	42,6	34,8	50,8	45,9	37,5	54,5	42,3	36,0	52,4				
HA3	44,9	35,2	59,2	43,5	33,5	55,7	44,5	33,8	56,5	44,5	33,4	54,6				
LUW-1	62,5	37,4	44,0	62,1	36,8	42,3	62,5	36,3	43,3	64,1	34,8	40,9				
LUW-2	54,4	42,7	50,3	50,5	44,4	49,6	54,4	41,5	47,6	53,8	43,0	47,5				
									2021							
LUW-1/H3	56,8	34,9	48,2	48,9	37,9	48,4	51,8	36,0	47,6	53,3	35,9	46,8				
LUW-2/H3	55,1	39,0	50,0	50,4	38,1	47,8	48,3	39,5	47,8	48,9	39,9	48,8				
HA3	42,7	33,4	57,4	44,7	31,8	51,2	44,2	32,4	53,2	44,6	32,5	53,1				
LUW-1	61,3	37,5	45,1	53,7	41,5	47,0	57,1	38,7	44,0	58,4	37,8	43,3				
LUW-2	51,9	40,0	47,8	50,2	40,3	47,5	50,7	39,0	45,6	55,6	38,2	44,0				
LUA-Mais, LuMi-BEST									2021							
LUA-2/M2	65,9	24,0	42,5	66,9	23,3	38,9	67,1	23,1	39,0	65,7	23,4	38,5	62,8	22,8	38,3	
M2	65,8	23,2	44,1	68,5	22,1	37,8	65,8	24,1	41,3	68,5	21,4	37,6	62,4	22,9	39,5	
LUA-2	47,0	42,4	51,3	42,8	44,5	52,6	44,1	43,3	51,6	48,6	41,4	48,2	40,8	42,1	48,1	
									2022							
LUA-2/M2	67,2	29,9	52,2	61,8	26,3	42,2	62,0	25,9	41,7	60,5	28,2	44,8	56,2	27,5	44,6	
M2	66,8	21,9	44,3	65,3	21,7	39,2	67,1	20,2	36,9	63,8	23,7	42,6	64,8	20,9	38,3	
LUA-2	41,6	47,1	57,5	41,8	42,1	49,9	42,3	42,1	50,4	43,2	41,1	51,2	38,4	41,9	51,1	

Tabelle 27: Signikanztabelle für Rohnnährstoffe inkl. Stärke, ELOS und Gerüstsubstanzen der 3-fachen Wechselwirkung
 Jahr $\times$ Prüfglied $\times$ Kontrolle/Silierungsmittelbehandlung der Versuchsansätze LuMi-opt und LuMi-BEST (SAS 9.4, ($p < 0,05$))

Versuchsansatz	XP	XA	XF	XS	ELOS	ADFom	aNDFom
	PR > F						
LUA-Mais, LuMi-opt	<0,0001	<0,0001	0,0008	0,0160	<0,0001	0,0014	<0,0001
LUW-Hafer, LuMi-opt	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0072	0,0006	0,0081	0,0002
LUA-Mais, LuMi-BEST	0,0003	<0,0001	0,0061	0,0275	0,0353	0,0391	0,0199

1.9 Biogas- und Methanausbeute (AP 9)

Die Universität Rostock, Professur Agrartechnologie und Verfahrenstechnik hatte im Teilvorhaben III die Aufgabe von Biomassen der Ernte 2019 bis 2022 vom Standort Groß Lüsewitz die Biogas- und Methanausbeuten mittels Batchversuchen zu bestimmen. Weiterhin wurden silierte Biomassen aus dem Erntejahr 2021 und 2022 vom Standort Braunschweig untersucht. Daneben sollten mit ausgewählten Biomassen der Ernte 2020 aus Groß Lüsewitz und 2021 aus Braunschweig kontinuierliche Versuche durchgeführt werden.

Das Probenmaterial war bereits durch die Erntetechnik sehr gut aufbereitet und entsprach den Anforderungen für Batchversuche. Eine separate Aufbereitung der Biomassen durch einen zusätzlichen Arbeitsgang, wie z.B. mit einem Häcksler, war nicht erforderlich.

Batchversuch

Die Durchführung der Batchversuche erfolgte nach der Richtlinie 4630 (VDI, 2009). Dadurch werden einheitliche Rahmenbedingungen geschaffen, die einen Vergleich mit anderen Ergebnissen ermöglichen. Bei der Ermittlung von Biogasausbeuten haben sich Batch-Versuche unter Zusatz eines Überschusses von Impfschlamm (ausgefaulter Ablauf/ Gärrest einer Biogasanlage) bewährt. Für die Untersuchung wurde eine Laboranlage genutzt, die aus gasdichten Faulflaschen (PE), Kondensatfallen, Gassäcken und einem thermostatisierbaren Wasserbad (38 °C) besteht (Abbildung 10).

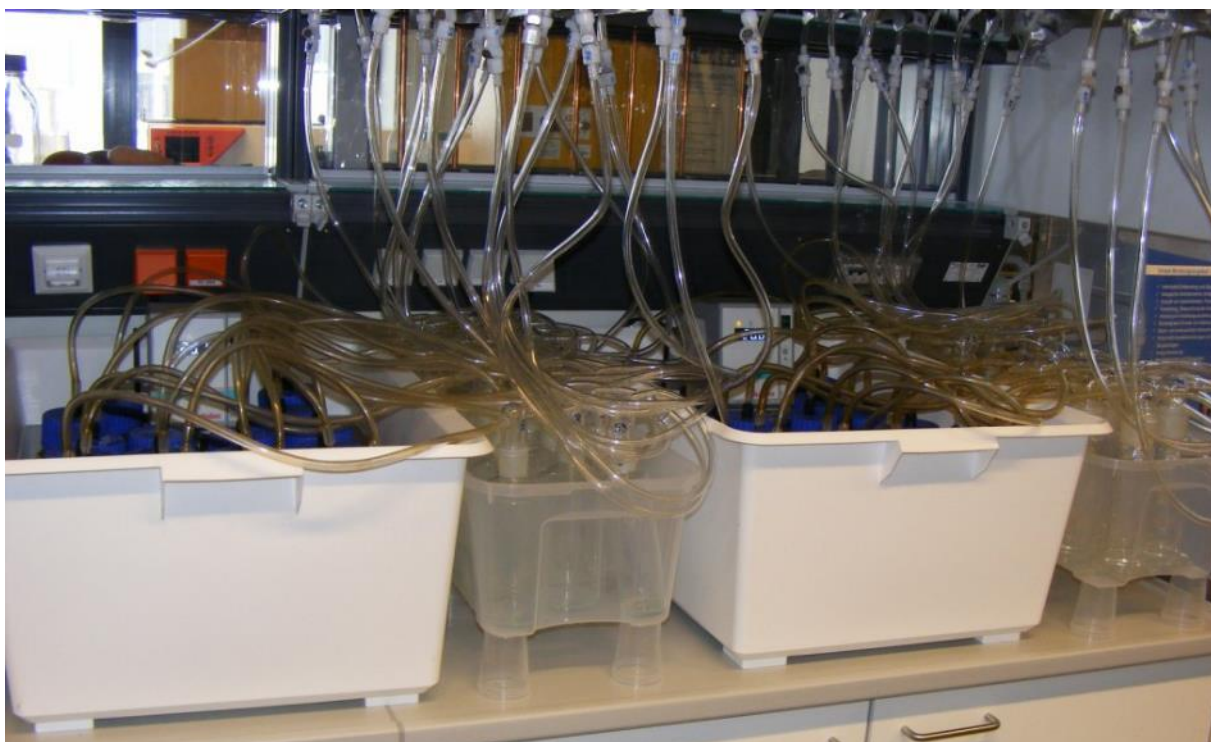


Abbildung 10: Darstellung des Batchversuchstandes

Neben den zu untersuchenden Varianten wurde auch eine aus Impfgülle bestehende Kontrollvariante angesetzt, um diese später von den ermittelten Biogasmengen abzuziehen. Die Menge des täglich produzierten Biogases wurde über einen Trommelgaszähler mengenmäßig erfasst und anschließend verbrannt. Die Summe der im Versuchszeitraum ermittelten Biogasmengen diente zur Berechnung der Biogasausbeute.

Als Bezugsgröße wurden die eingesetzte Frischmasse (FM), die oTS-Masse und für den Fall eines hohen Gehaltes an wasserdampfgefährlichen Säuren im Substrat, die organische Substanz gewählt. Die gemessene Methankonzentration diente zur Berechnung der Methanausbeute. Die qualitative Zusammensetzung des entstandenen Biogases wurde mit einem Gasanalysegerät BM 2000 der Firma Ansyco bestimmt.

Ergebnisse

Substratanalysen – Trockensubstanz und organische Trockensubstanz

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Biomassen der einzelnen Arbeitspakete für die einzelnen Untersuchungsjahre als Mittelwerte dargestellt.

In Tabelle 28 sind der Trockensubstanzgehalt (TS bei 105 °C; DIN EN 12880), der organische Trockensubstanzgehalt (Glühverlust bei 550 °C; DIN EN 12879), der Gehalt an organischen Säuren und die organische Substanz für die Biomassen aus AP 6.1 der Ernten 2019 bis 2021 dargestellt.

Tabelle 28: Gemittelte Analysenergebnisse der Substrate von AP 6.1 (Weiße Lupine und Hafer) vom Standort Groß Lüsewitz der Ernte 2019 bis 2021 sowie der Reinsaat der Ernte 2021 (TS: Trockensubstanz, oTS: organische Trockensubstanz, oS: organische Substanz)

Jahr	TS - Gehalt % FM	oTS in g·kg ⁻¹ FM	organ. Säuren g·kg ⁻¹ FM	oS=oTS+Sr % FM
2019	29,7	260,2	1,078	26,1
2020	35,9	324,1	0,763	32,5
2021	36,3	324,5	1,069	32,6
w. Lupine Reinsaat	22,7	206,7	0,797	20,8
Hafer Reinsaat	65,8	598,4	4,360	60,3

Aus Tabelle 28 wird deutlich, dass der Hafer aufgrund seiner früheren Aussaat und damit auch der Reife, nur im Jahr 2019 von der Vorsommertrockenheit betroffen war. Gegenüber den AP 2.4 und 3.1 (Andenlupine und Mais) war dieser Effekt jedoch nicht so stark ausgeprägt. 2020 konnten mit 35,9 % TS ähnlich gute Trockensubstanzgehalte ermittelt werden wie 2021 mit 36,3. Gleiches gilt für die Gehalte an organischer Substanz.

Mit 35 und 36 % TS werden Trockensubstanzgehalte erreicht, die in der Praxis als optimal für eine spätere Silierung angesehen werden. Auch für den Einsatz als Biogassubstrat ist dieser Trockensubstanzgehalt anzustreben. Die Trockensubstanzgehalte der Weißen Lupine mit 22 % TS und vom Hafer mit 65 % TS sind nicht optimal. Für die Weiße Lupine war der Erntetermin zu früh und damit der Trockensubstanzgehalt zu niedrig. Für den Hafer erfolgte die Ernte zu spät und das Substrat wies damit einen sehr hohen Trockensubstanzgehalt auf, der unter Stroh liegt. Für beide Substrate wäre unter diesen Bedingungen eine Silierung schwer möglich gewesen und damit eine Praxistauglichkeit nicht gegeben. Dennoch ist sehr schön zu erkennen, dass der Gemengeanbau einen guten Kompromiss mit einem Trockensubstanzgehalt von 36 % darstellt und damit eine sehr gute Ausgangsbasis für eine nachfolgende Silierung und den Einsatz als Biogassubstrat darstellt.

Die Ergebnisse der Substratanalysen für das Arbeitspaket 2.4 (Andenlupine und Mais) zeigt Tabelle 29.

Tabelle 29: Gemittelte Analysenergebnisse der Substrate von AP 2.4 (Andenlupine und Mais) vom Standort Groß Lüsewitz der Ernte 2019 bis 2021 (TS: Trockensubstanz, oTS: organische Trockensubstanz, oS: organische Substanz)

Jahr	TS - Gehalt % FM	oTS in g·kg ⁻¹ FM	organ. Säuren g·kg ⁻¹ FM	oS=oTS+Sr % FM
2019	29,5	265,9	0,840	26,7
2020	31,1	286,1	0,712	28,7
2021	36,6	335,0	0,895	33,6

Da in AP 2.4 und 3.1 jeweils Biomassen aus Andenlupinen und Mais untersucht wurden, soll die Interpretation nach den Ergebnissen von AP 3.1 aus Tabelle 30 erfolgen.

Tabelle 30: Gemittelte Analysenergebnisse der Substrate von AP 3.1 (Andenlupine und Mais) vom Standort Groß Lüsewitz der Ernte 2019 bis 2021 sowie der Reinsaat von Andenlupinen (AL) und Mais der Ernte 2021 (TS: Trockensubstanz, oTS: organische Trockensubstanz, oS: organische Substanz)

Jahr	TS - Gehalt % FM	oTS in g·kg ⁻¹ FM	organ. Säuren g·kg ⁻¹ FM	oS=oTS+Sr % FM
2019	26,6	240,0	0,798	24,1
2020	27,4	244,9	0,647	24,6
2021	35,3	321,6	0,829	32,2
AL Reinsaat	16,9	148,1	0,571	14,9
Mais Reinsaat	37,9	354,2	0,650	35,5

Es ist zu erkennen, dass sich die Trockensubstanzgehalte in den einzelnen Arbeitspaketen AP 2.4 und 3.1 (Andenlupine und Mais) im Erntejahr 2021 ähneln. Mit 35 und 36 % TS werden Trockensubstanzgehalte

erreicht, die in der Praxis als optimal für eine spätere Silierung angesehen werden. Auch für den Einsatz als Biogassubstrat ist dieser Trockensubstanzgehalt anzustreben. Die Trockensubstanzgehalte der Andenlupine mit 16 % TS sind nicht optimal. Für die Andenlupine, welche eine sehr lange Vegetationszeit aufweist, war der Erntetermin zu früh und damit der Trockensubstanzgehalt zu niedrig. Unter diesen Bedingungen wäre eine Silierung schwer möglich gewesen und damit eine Praxistauglichkeit nicht gegeben. Der Mais in Reinsaat wurde mit 37 % TS etwas zu spät geerntet, befindet sich aber noch in einem tolerierbaren Bereich. Dennoch ist sehr schön zu erkennen, dass der Gemengeanbau einen guten Kompromiss mit einem Trockensubstanzgehalt von 35 und 36 % darstellt und damit eine sehr gute Ausgangsbasis für eine nachfolgende Silierung und den Einsatz als Biogassubstrat sein kann.

Die Gehalte an organischen Säuren in dem Gemenge von AP 2.4 und 3.1 sind als normal einzustufen und unterscheiden sich nur geringfügig. Gleiches gilt für den Gehalt an organischer Substanz (oS) mit 33 % FM für die Biomassen aus AP 2.4 und 32 % FM für AP 3.1. Die organische Substanz der Andenlupine in Reinsaat war mit 14 % FM am geringsten und die der Mais Reinsaat mit 35 % FM am höchsten. Die organische Substanz bildet die Grundlage für die Berechnung der Versuchsansätze und den späteren Bezug der Biogas- und Methanausbeuten. Für einen besseren Vergleich der Erntejahre untereinander wurde in Tabelle 2 und 3 die Analysenergebnisse für die Erntejahre von 2019 bis 2021 für die Biomassen aus AP 2.4 und 3.1 jeweils getrennt dargestellt. Dabei ist in Tabelle 29 für die Biomassen aus dem AP 2.4 (Andenlupine und Mais) zu erkennen, dass die Trockensubstanzgehalte in den Erntejahren 2019 und 2020 bedingt durch die Vorsommertrockenheit, mit 29 und 31 % TS niedriger waren als im Erntejahr 2021. Diese niedrigeren Trockensubstanzgehalte spiegeln sich auch in den Gehalten an organischer Substanz wider.

Bei einem Vergleich der Erntejahre untereinander zeigt sich für das Arbeitspaket 3.1 (Andenlupine und Mais) in Tabelle 30, dass auch dieses Gemenge im Jahr 2019 und 2020 von der Vorsommertrockenheit betroffen war. Gegenüber dem AP 2.4 war dieser Effekt jedoch auch im Jahr 2020 stark ausgeprägt. 2019 und 2020 konnten mit 26 und 27 % TS ähnliche Trockensubstanzgehalte ermittelt werden. 2021 wurden mit 35 % TS bessere Trockensubstanzgehalte erreicht. Gleiches gilt für die Gehalte an organischer Substanz.

Im Erntejahr 2022 wurden die Biogas- und Methanausbeuten von 14 Andenlupinen-Mais-Gemengen (LuMi-Best) sowie 6 Andenlupinen in Reinsaat und 6 Maissorten in Reinsaat aus dem Ernte 2022 vom Standort Groß Lüsewitz untersucht. Weiterhin wurde von der Biomasse der LuMi-Best-Varianten der Ernte 2022 vom Standort Braunschweig in Braunschweig Silagen erstellt. In Tabelle 31 sind die Ergebnisse der Silagen der Biomassen der Ernte 2022 vom Standort Braunschweig denen der unislierten LuMi-Best-Varianten und der Reinsaat vom Standort Groß Lüsewitz gegenübergestellt.

Tabelle 31: Gemittelte Analysenergebnisse der LuMi-Best-Varianten (Andenlupine und Mais) sowie der Reinsaat von Andenlupinen (AL) und Mais vom Standort Groß Lüsewitz sowie Silagen aus Braunschweig der Ernte 2022 (TS: Trockensubstanz, oTS: organische Trockensubstanz, oS: organische Substanz)

Jahr	TS - Gehalt	oTS in	organ. Säuren	oS=oTS+Sr
	% FM	g·kg ⁻¹ FM	g·kg ⁻¹ FM	% FM
LuMi-Best	25,6	242,5	0,802	24,3
AL Reinsaat	22,1	196,7	0,802	19,8
Mais Reinsaat	37,9	354,2	0,650	35,5
LuMi-Best-Silagen	33,7	302,1	5,069	30,7

Die gemittelten Trockensubstanzgehalte der LuMi-Best-Gemenge mit 25 % FM sind zu gering, stimmen aber mit den Ergebnissen von 2019 und 2020 von AP 3.1 überein und weichen von den Ergebnissen aus dem Erntejahr 2021 ab. Die Andenlupine in Reinsaat erreichte einen Trockensubstanzgehalt von 22 % FM und liegt damit über den Ergebnissen von 2021. Jedoch sind die Werte immer noch zu gering. Der Mais in Reinsaat wies 2022 einen Trockensubstanzgehalt von 37 % FM auf und stimmt damit mit den Ergebnissen von 2021 überein. Jedoch konnte im Erntejahr 2022 nicht der positive Einfluss des Gemengeanbaus nachgewiesen werden, wie er noch 2021 vorlag. Der TS-Gehalt des Gemenges mit 25 % FM ist zu gering und keine gute Ausgangsbasis für die anschließende Silierung. Die silierten Biomassen wurden in Braunschweig erstellt. Die Gemenge wiesen dort einen höheren TS Gehalt als in Groß Lüsewitz auf. Das silierte LuMi-Best-Gemenge erreicht mit 33,7 % TS einen optimalen Trockensubstanzgehalt, was sich auch in den Gehalten an organischer Substanz widerspiegelt.

Biogas- und Methanausbeuten

Dargestellt sind die Ergebnisse zu den Biogas- und Methanausbeuten von Arbeitspaket 6.1 (Weiße Lupine und Hafer) sowie 2.4 und 3.1 (Andenlupine und Mais) der entsprechenden Erntejahre sowie die Reinsaat. Weiterhin wurde aus der Ernte 2022 die LuMi-Best-Varianten und deren Silagen und Reinsaat untersucht. Dabei wurde die täglich ermittelte Gasproduktion aufsummiert und der Anteil an Gas aus dem Impfschlamm (Kontrolle) vom Ertrag des zu untersuchenden Substrates abgezogen. Nach ca. 35 Tagen, mit Erreichen der 1 % Regel, wurde die Gaserfassung abgebrochen. Als Bezugsgröße wurde die eingesetzte Frischmasse (FM)

und die organische Substanz (oS) gewählt. Die Biogas- und Methanerträge der Erntejahre 2019 bis 2021 für die Gemenge des Arbeitspaketes 6.1 (Weiße Lupine und Hafer) und den Reinsaaten sind gemittelt in Tabelle 32 dargestellt.

Tabelle 32: Biogas- und Methanausbeuten der Substrate von AP 6.1 (Weiße Lupine und Hafer) vom Standort Groß Lüsewitz der Ernten 2019 bis 2021 sowie der Reinsaaten (RS) der Ernte 2021 (I_N: Normliter, FM: Frischmasse, oS: organische Substanz)

Jahr	I _N ·kg ⁻¹ FM	I _N Methan·kg ⁻¹ FM	I _N ·kg ⁻¹ oS	I _N Methan·kg ⁻¹ oS	Vol.% Methan
2019	130,5	71,0	489,2	265,5	54,2
2020	160,7	91,0	489,0	276,9	56,6
2021	164,1	91,6	502,8	280,3	55,7
W. Lupine RS	121,7	65,1	587,0	314,0	53,5
Hafer RS	318,7	179,9	527,4	297,2	56,3

Es fällt auf, dass 2021 höhere Ausbeuten generiert wurden, was auf den höheren Gehalten an organischer Substanz zurückzuführen ist. Dennoch werden im Mittel immer noch geringere Werte im Vergleich zu Maissilage (600 bis 650 I_N·kg⁻¹ oS) erreicht (KTBL, 2013). Die beiden Erntejahre 2019 und 2020 waren gekennzeichnet durch hohe Temperaturen und geringe Niederschlagsmengen, sodass keine optimalen Voraussetzungen für ein Pflanzenwachstum gegeben waren. 2021 waren deutliche bessere Bedingung für das Pflanzenwachstum und hätten eigentlich einen höheren Biogas- und Methanertrag gegenüber 2019 und 2020 und zu den Literaturangaben erwarten lassen.

Die mittleren Biogaserträge bezogen auf die Frischmasse (FM) lagen im Erntejahr 2021 bei dem Gemenge bei 164,14 I_N·kg⁻¹ FM. Die Biogasausbeuten bezogen auf die organische Substanz (oS) liegt im Mittel bei 502,83 I_N·kg⁻¹ oS. Der Methangehalt befindet sich bei 55,7 Vol. % (Tabelle 32). Die Weiße Lupine in Reinsaaten befand sich mit 121 I_N·kg⁻¹ FM, 585,03 I_N·kg⁻¹ oS sowie 53,5 Vol. % Methan in einem Bereich, der auch im Projekt „Züchterische Evaluierung der Andenlupine im Vergleich zur Weißen und zur blauen Lupine; Teilvorhaben 2: Ermittlung der Methanausbeuten“; FKZ 22407312, für diese Sorte nachgewiesen wurde. Die Biogas- und Methanerträge für den Hafer betragen 318 I_N·kg⁻¹ FM, 527,35 I_N·kg⁻¹ oS sowie 56,3 Vol. % Methan. Angaben zu Ganzpflanzenhafer mit einem TS- Gehalt von 65 % gibt es derzeit nicht. Es kann daher nur ein Vergleich mit Haferstroh, Haferkorn und Hafer Ganzpflanzensilage (GPS) in der Blüte erfolgen. Die LFL Bayern (2022) weist für Haferstroh mit einem TS- Gehalt von 86 % 390 I_N·kg⁻¹ oTS, 313 I_N·kg⁻¹ FM und 50,7 Vol. % Methan aus. Für Haferkörner mit 86 % TS gibt die LFL Bayern (2022) 595 I_N·kg⁻¹ oTS, 501 I_N·kg⁻¹ FM bei 54,1 Vol. % Methan an. Weiterhin werden auch noch Biogaserträge für Hafer als Ganzpflanze in der Blüte mit einem TS-Gehalt von 24 % TS mit 550 I_N·kg⁻¹ oTS, 120 I_N·kg⁻¹ FM und 53 Vol % Methan ausgewiesen. Damit wird deutlich, dass die ermittelten Biogas- und Methanerträge für den Hafer in Reinsaat zu den Angaben der LFL Bayern (2022) passen.

Die Biogas- und Methanausbeuten von dem Arbeitspaket 2.4 und 3.1 (Andenlupine und Mais) sind in Tabelle 33 und Tabelle 34 dargestellt. Dabei zeigt Tabelle 33 die Ergebnisse für die Erntejahre 2019 bis 2021 vom Arbeitspaket 2.4 und die Tabelle 34 die Ergebnisse vom Arbeitspaket 3.1 sowie zusätzlich die Ergebnisse der Reinsaaten aus dem Erntejahr 2021

Tabelle 33: Biogas- und Methanausbeuten der Andenlupinen-Mais-Gemenge von AP 2.4 vom Standort Groß Lüsewitz der Ernten 2019 bis 2021 (I_N: Normliter, FM: Frischmasse, oS: organische Substanz)

Jahr	I _N ·kg ⁻¹ FM	I _N Methan·kg ⁻¹ FM	I _N ·kg ⁻¹ oS	I _N Methan·kg ⁻¹ oS	Vol.% Methan
2019	133,9	71,6	499,0	266,4	53,4
2020	164,5	87,1	571,1	302,4	52,9
2021	192,8	105,2	572,0	312,0	54,5

Tabelle 34: Biogas- und Methanausbeuten der Andenlupinen-Mais-Gemenge von AP 3.1 vom Standort Groß Lüsewitz der Ernten 2019 bis 2021 sowie der Reinsaaten der Ernte 2021 (I_N: Normliter, FM: Frischmasse, oS: organische Substanz)

Jahr	I _N ·kg ⁻¹ FM	I _N Methan·kg ⁻¹ FM	I _N ·kg ⁻¹ oS	I _N Methan·kg ⁻¹ oS	Vol.% Methan
2019	113,9	61,1	473,3	254,1	53,7
2020	136,1	73,7	553,8	300,7	54,3
2021	179,9	98,9	556,1	305,7	54,9
AL Reinsaat	67,7	37,5	455,6	252,4	55,5
Mais Reinsaat	207,8	108,1	586,1	304,8	52,0

Die mittleren Biogaserträge bezogen auf die Frischmasse (FM) lagen bei den Gemengen bei 192,82 bzw. 179,91 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ FM. Die Biogasausbeuten bezogen auf die organische Substanz (oS) liegt im Mittel bei 556,09 und 572,02 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ oS. Der Methangehalt befindet sich bei 54 Vol. % (Tabelle 5). Die Andenlupine in Reinsaat befand sich mit 67,66 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ FM, 455,58 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ oS sowie 55 Vol. % Methan in einem Bereich, der auch im Projekt „Züchterische Evaluierung der Andenlupine im Vergleich zur Weißen und zur blauen Lupine; Teilvorhaben 2: Ermittlung der Methanausbeuten“; FKZ 22407312, für diese Sorte nachgewiesen wurde. Die Biogas- und Methanerträge für den Mais betragen 207,76 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ FM, 586,13 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ oS sowie 52 Vol. % Methan. In der Literatur werden für Maissilagen mit einem TS-Gehalt von 28,0 bis 40,3 % eine Schwankungsbreite von 578 bis 593 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ oTS bzw. 312 bis 408 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{CH}_4\cdot\text{kg}^{-1}$ oTS (Biogasertrag 170 bis 230 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ FM bzw. Methanertrag 78 bis 122 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{CH}_4\cdot\text{kg}^{-1}$ FM) beschrieben (Friehe et al., 2016; KTBL 2013; FNR 2010; KTBL 2010; Eder und Eder 2009; KTBL 2005). Damit befindet sich der Mais in Reinsaat hinsichtlich der Biogas- und Methanpotenziale, bezogen auf die organische Substanz und auf Frischmasse in den angegebenen Spannen der Literatur.

Es fällt auf, dass 2021 höhere Ausbeuten generiert wurden, was auf den höheren Gehalten an organischer Substanz zurückzuführen ist. Dennoch werden im Mittel immer noch geringere Werte im Vergleich zu Maissilage (600 bis 650 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ oS) erreicht (KTBL, 2013). Die beiden Erntejahre 2019 und 2020 waren gekennzeichnet durch hohe Temperaturen und geringe Niederschlagsmengen, sodass keine optimalen Voraussetzungen für ein Pflanzenwachstum gegeben waren. 2021 waren deutliche bessere Bedingungen für das Pflanzenwachstum und hätten eigentlich einen höheren Biogas- und Methanertrag gegenüber 2019 und 2020 und zu den Literaturangaben erwarten lassen.

Im Erntejahr 2022 wurden am Standort Groß Lüsewitz neben 14 Gemengen aus Andenlupinen und Mais (LuMi-Best) auch jeweils 6 Reinsaat der Andenlupinen und vom Mais angebaut sowie Silagen von den Gemengen erstellt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 35.

Tabelle 35: Biogas- und Methanausbeuten der Andenlupinen-Mais-Gemenge (LuMi-Best) und der Reinsaat vom Standort Groß Lüsewitz der Ernte 2022 sowie der Silagen von Braunschweig (I_N : Normliter, FM: Frischmasse, oS: organische Substanz)

Variante	$\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ FM	I_N Methan· kg^{-1} FM	$\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ oS	I_N Methan· kg^{-1} oS	Vol.% Methan
LuMi-Best	115,8	57,5	474,0	235,6	49,8
AL Reinsaat	82,1	45,6	419,0	232,6	55,6
Mais Reinsaat	188,8	95,3	533,2	269,0	50,3
LuMi-Best-Silagen	162,5	90,2	507,2	282,8	55,8

Aus den Biomassen aus dem Erntejahr 2022 wurden generell geringere Biogas- und Methanausbeuten als 2021 generiert. Auffällig sind dabei die niedrigeren Ausbeuten bei den Gemengen (115 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ FM und 474 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ oS) und bei dem Mais in Reinsaat (188 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ FM und 533 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ oS). Die Andenlupine in Reinsaat erreichte nur bezogen auf die Frischmasse mit 82 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ FM höhere Biogas- und Methanausbeuten. Bezogen auf die organische Substanz wurden ebenfalls geringere Ausbeuten (419 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ oS) als im Jahr 2021 nachgewiesen. Die Werte für die das Gemenge und für den Mais in Einsaat befinden sich alle unter den Literaturangaben zu Mais (600 bis 650 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ oS) (KTBL, 2013). Die Andenlupine in Reinsaat liegt in einem Bereich, wie er auch im Projekt „Züchterische Evaluierung der Andenlupine im Vergleich zur Weißen und zur blauen Lupine; Teilvorhaben 2: Ermittlung der Methanausbeuten“; FKZ 22407312, ermittelt wurde. Die untersuchte LuMi-Best-Silage lag mit 507 $\text{I}_\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ oS etwas unter den Werten von Mais in Reinsaat und sind damit als gut zu bewerten.

Erster kontinuierlicher Versuch mit Gemengen (frisch) aus Andenlupinen und Mais

Für die Beurteilung der Andenlupinen Mais Gemenge als Substrat für die Biogasproduktion wurden 3 speziell für die Vergärung von proteinreichen Substraten konzipierte Fermenter entwickelt und konstruiert. Die Fermenter wurden in das vorhandene Gaserfassungssystem der Universität Rostock eingebunden. Das heißt, es wurde jeder Fermenter mit einem Trommelgaszähler (TG 05; Firma Ritter Apparatebau) zur Bestimmung der Gasmenge und an das Gasanalysegerät (Firma Awite 1795) zu Bestimmung der Biogaszusammensetzung (CH_4 , CO_2 , O_2 sowie H_2S) angeschlossen. Weiterhin wurden die Fermenter mit einem Rührwerk (Firma Heidolph 2102) ausgestattet und in ein automatisches Rührwerkssteuerungssystem eingebunden. In die Fermenterdeckel wurden pH-Elektroden und Temperaturfühler integriert. Der Gesamtaufbau der 3 kontinuierlichen Fermenter ist in Abbildung 11 dargestellt. Nach der Inbetriebnahme der Fermenter und der Einbindung ins Gaserfassungssystem wurden die Fermenter mit jeweils 10 Liter Gärrest aus einer Biogasanlage befüllt. Die gesamte Versuchszeit betrug 162 Tage. Davon wurden 50 Tage für das Hochfahren der Fermenter benötigt und weitere 77 Tage als reine Versuchszeit. An diese schloss sich die Ausgasungsphase an. In der Hochfahrphase wurden die Raumlasten der Fermenter langsam hochgefahren und wöchentlich die Faulraumbelastung um 0,25 $\text{g oS}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ gesteigert. In der Versuchsphase wurde die Raumlast weiter

angehoben. In beiden Phasen wurde der Biogasprozess wöchentlich mit den in Tabelle 36 dargestellten Parametern überwacht.



Abbildung 11: Vorderansicht des kontinuierlichen Versuchsstandes mit der Einbindung ins Gasfassungssystem und den Rührwerken

Tabelle 36: Prozessparameter und chemische Analysengrößen während der Versuchszeit

Parameter	Einheit	Rhythmus	Vorschrift
Raumbelastung	$\text{g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$	täglich	VDI 4630
Biogasrate	$\text{l}_\text{N} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$	täglich	VDI 4630
Biogasausbeute	$\text{l}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$	täglich	VDI 4630
Biogasqualität	Vol.%, ppm	täglich	VDI 4630
Analysengrößen	Einheit	Rhythmus	Vorschrift
pH-Wert (Mittelwert)	–	täglich	DIN 38404 C-5
Trockensubstanzgehalt (TS)	%	wöchentlich	DIN 12880
org. Trockensubstanzgehalt (oTS)	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ FM, % TS, % FM	wöchentlich	DIN 12879
org. Säuren (Sr)	$\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	wöchentlich	DIN 38414 S-19
org. Substanz (oS)	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ FM, % FM	wöchentlich	DIN 12880/ 12879/ 38414 S-19
FOS/ TAC	–	wöchentlich	Nordmann-Methode
NH ₃ -N	$\text{g NH}_3\text{-N} \cdot \text{kg}^{-1}$ FM	wöchentlich	nach Conway
NH ₃ -N (photometrisch)	$\text{mg NH}_3\text{-N} \cdot \text{l}^{-1}$	täglich	DIN 38406-5

l_N : Normliter, FM: Frischmasse, FOS/ TAC: Verhältnis flüchtiger organischer Säuren zum totalen anorganischen Carbonatanteil; NH₃-N: Ammoniak-Stickstoff, Vol.%: Volumenprozent, ppm: parts per million

Bei der Auswahl der Biomassen für den kontinuierlichen Versuch wurde sich für Varianten entschieden, die besonders viele Hülsen (Gemeinde 6510) und einen durchschnittlichen Hülsenbestand (Gemeinde 6503 und

6519) aufwiesen. Von jeder Variante wurden ca. 60 kg Frischmasse nach dem Häckseln in Fässern geborgen und eingefroren. Für die kontinuierlichen Versuche war eine tägliche Fütterung mit den Biomassen vorgesehen. Dazu wurde das Material im gefrorenen Zustand mit einem Fleischwolf gemust und anschließend in täglichen Rationen zu wochenweisen Fütterungsportionen abgepackt und wieder eingefroren. Neben den Futtermengen wurde auch ein wöchentlicher Analysenbeutel erstellt. Dieser dient zur wöchentlichen Untersuchung der Futtersubstrate auf die Trockensubstanz, organische Trockensubstanz und der organischen Säuren. Auf Basis dieser Untersuchungen erfolgt eine wöchentliche Anpassung der täglichen Futtermengen für die kommende Versuchswoche.

Auswertung der Versuchsphase

Für den kontinuierlichen Versuch wurden Biomassen der Gemengevarianten 6503 im Fermenter 1, 6510 im Fermenter F2 und 6519 im Fermenter 3 genutzt. Diese zeichneten sich durch unterschiedliche Hülsenanteile unmittelbar vor der Ernte aus. Aus vorangegangenen Versuchen mit Steinklee hat sich gezeigt, dass der Einsatz von Leguminosen zur verstärkten Schaumbildung im Fermenter führt. Da dieses für eine spätere Verwendung als Biogassubstrat entscheidend ist, wurde sich an den Hülsenbesatz orientiert. In Tabelle 37 sind die Analysenwerte der drei Gemenge, wie sie für die Berechnung der täglichen Fütterungsmengen genutzt wurden, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Varianten 6503 und 6519 in den Trockensubstanzgehalten (26,72 und 25,39 % TS) und den Gehalten an organischer Substanz (24,72 und 23,63 % TS) ähnlich sind. Die Variante 6510 weicht mit einem Trockensubstanzgehalt von 33 % TS und einem Gehalt an organischer Substanz von 30 % FM etwas ab.

Tabelle 37: Analysenergebnisse der drei verwendeten Gemenge (frisch) aus Andenlupine und Mais im kontinuierlichen Versuch

Variante	TS - Gehalt % FM	oTS g·kg ⁻¹ FM	org. Säuren g·kg ⁻¹ FM	oS=oTS+Sr % FM
6503 (F1)	26,72	246,57	0,61	24,72
6510 (F2)	33,19	304,66	0,95	30,56
6519 (F3)	25,39	235,72	0,62	23,63

Im Folgenden werden die einzelnen Fermenter mit Ihrem Futtersubstrat und ihrer Eignung als Biogassubstrat bei entsprechender Raumlaststeigerung anhand verschiedener Parameter in der Versuchs- und Hochfahrphase über 120 Tagen Versuchsdauer näher beschrieben.

Fermenter 1

Ausgangspunkt für die wöchentliche Steigerung der Raumlast ist die Analyse der Inputbiomasse. Für den Fermenter 1 wurde die Gemengevariante 6503 verwendet. Die Analysenwerte für den 50. bis 120. Versuchstag während der Versuchsphase zeigt Tabelle 38.

Tabelle 38: Wöchentliche Analysenergebnisse des verwendeten Gemenges (frisch) der Variante 6503 vom 50. bis zum 120. Versuchstag im Fermenter 1 während der Versuchsphase

Versuchstag	TS in % FM	oTS in % FM	oTS in % TS	org. Säuren % FM	oS in % FM
50.	26,65	24,26	95,07	0,07	24,33
57.	26,15	24,02	95,53	0,08	24,10
64.	26,62	24,63	95,25	0,07	24,70
71.	26,83	24,70	95,27	0,08	24,77
78.	26,32	24,11	95,12	0,07	24,18
85.	26,30	24,23	95,29	0,07	24,30
92.	26,05	23,96	95,01	0,08	24,04
99.	26,24	24,28	95,26	0,08	24,36
106.	25,73	23,96	95,49	0,07	24,04
113.	26,23	23,96	94,92	0,08	24,03
120.	25,77	23,83	94,75	0,07	23,90

TS: Trockensubstanz, oTS: org. Trockensubstanz, oS: organische Substanz, FM: Frischmasse

Vom 50. bis zum 120. Versuchstag der Versuchsphase schwankt der Trockensubstanzgehalt zwischen 25,73 bis 26,83 %TS und der organische Trockensubstanzgehalt zwischen 94,75 bis 95,53 % TS. Die organischen Säuren befinden sich auf einem niedrigen Niveau bei 0,07 bis 0,08 % FM. Dementsprechend wenig schwankt auch der Gehalt an organischer Substanz (23,90 bis 24,77 % FM). Die Analysen wurden immer zum Wochenbeginn durchgeführt und somit konnte für die darauffolgende Woche die Fütterung der Fermenter entsprechend angepasst werden.

Ziel der Hochfahr- und Versuchsphase war eine wöchentliche Steigerung der Raumbelastung im Fermenter von $0,25 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Diese wurde umgesetzt und im Ergebnis wöchentlich der Fermenterinhalt auf verschiedene Parameter untersucht (Tabelle 12).

Aus Tabelle 39 ist ersichtlich, dass der pH-Wert während der Versuchszeit geringfügig schwankte und einen Anfangswert in der Hochfahrphase von 8,08 und am Ende der Versuchsphase einen Wert von 7,33 aufwies. Diese Abnahme ist unkritisch und nach einer Fütterungssteigerung als normal zu werten.

Die Gehalte an Trockensubstanz, organischer Trockensubstanz und organische Substanz unterliegen ebenfalls einer Schwankung und nehmen in der Hochfahrphase vom 8. Versuchstag ab und mit dem 43. Versuchstag wieder etwas zu.

In der Versuchsphase kommt es zum Ende hin zu einer verstärkten Zunahme bis auf $63,03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ am 127. Versuchstag. Dennoch sind diese Schwankungen gering und unproblematisch. Die organischen Säuren befinden sich in einem Bereich von $0,97$ bis $2,42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$. Günstig sind Gehalte von organischen Säuren um $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$. Diese werden nur am 29., 36., 99 und 106 Versuchstag erreicht. Die hohen Werte zu Beginn der Hochfahrphase resultieren aus dem Gärrest, welcher für den kontinuierlichen Versuch genutzt wurde. Dennoch sind die Gehalte an organischen Säuren über die Versuchszeit als normal einzustufen. Die hohen Gehalte am 127. Versuchstag könnten eine langsame Anreicherung andeuten, welche auch im FOS/TAC-Wert und den Biogas- und Methanwerten zu erkennen waren. Hemmungen sind nach Lemmer und Oechsner (2013) erst ab Gehalten von $> 4,0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ zu erwarten.

Der FOS/TAC-Wert ist der Quotient aus den flüchtigen organischen Säuren im Verhältnis zu dem totalen anorganischen Carbonatanteil. Der FOS/TAC Wert sollte nach Hölker (2013) in einer Spanne von 0,11 bis 0,55 liegen. Probleme können erst bei FOS/TAC-Werten oberhalb des Bereiches auftreten. Der Optimalbereich wird von Hölker (2013) mit 0,3 angegeben. Die in Fermenter 1 erreichten FOS/TAC-Werte befinden sich bis zum 120. Versuchstag im unteren Bereich der angegebenen Spanne und sind damit stabil und unkritisch. Die leichte Zunahme am 127. Versuchstag auf 0,55 kann, wie bei den organischen Säuren, auf eine Anreicherung dieser hindeuten und eine beginnende Prozessstörung anzeigen. Die Fütterung wurde wöchentlich nach der Analyse der Inputstoffe entsprechend der vorgegebenen Raumlasterhöhung von $0,25 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ angepasst und ist ebenfalls in Tabelle 39 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die vorgegebene Raumlasterhöhung nahezu eingehalten werden konnte.

Weiterhin sind in Tabelle 39 die wöchentliche Biogasrate und die Biogasausbeute abgebildet, die erwartungsgemäß mit der Erhöhung der Raumlasterhöhung zunehmen. Im Verlauf der Hochfahrphase erhöht sich die Biogasausbeute von $0,070$ auf $0,924 \text{ Nm}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$ und in der Versuchsphase auf $1,92 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oS}$. Die Biogasausbeute konnte von $0,297$ auf $0,486 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oS}$ am 127. Versuchstag gesteigert werden. Die Tagesgasmengen und die Biogasgehalte des Fermenters 1 während der Hochfahr- und Versuchsphase zeigt die Abbildung 12. Die Biogasausbeute nimmt täglich kontinuierlich mit der Erhöhung der Fütterungsmenge zu. Dadurch dass der Fermenter auch an den Wochenenden kontinuierlich mit Inputsubstrat versorgt wurde, sind in der Biogasausbeute wenig Schwankungen zu verzeichnen. Gut zu erkennen ist eine beginnende Prozessstörung ab dem 120. Versuchstag, die sich in einer Abnahme der Biogasausbeute und der Methangehaltes und einer Zunahme der Kohlendioxidgehalte zeigt.

Tabelle 39: Wöchentliche Analysenergebnisse vom Fermenter 1 während der Hochfahr- und Versuchsphase

Versuchstag d	pH-Wert	TS - Gehalt % TS ₁₀₅	oTS g·kg ⁻¹ FM	org. Säuren g·kg ⁻¹ FM	org Substanz g·kg ⁻¹ FM	org. Substanz % FM	FOS/TAC	Raumbelastung g·oS l ⁻¹ ·d	Biogasrate Nm ³ ·m ⁻³ ·d	Biogasausbeute Nm ³ ·kg ⁻¹ oS
1	8,08	5,93	43,06	1,38	44,44	4,44	0,16	-	-	-
8	8,01	5,84	44,22	1,86	46,08	4,61	0,21	0,24	0,07	0,297
15	7,96	5,35	39,24	1,56	40,80	4,08	0,19	0,51	0,21	0,404
22	7,98	5,21	38,58	1,35	39,92	3,99	0,18	0,74	0,37	0,494
29	8,06	5,17	39,08	0,97	40,05	4,01	0,16	0,98	0,52	0,534
36	7,93	5,05	37,94	1,07	39,02	3,90	0,16	1,21	0,63	0,522
43	7,83	5,46	42,61	1,33	43,94	4,39	0,16	1,44	0,78	0,540
50	7,85	5,34	41,76	1,26	43,03	4,30	0,17	1,67	0,92	0,553
57	7,72	6,15	49,63	1,25	50,88	5,09	0,15	1,90	1,05	0,552
64	7,79	5,68	45,79	1,30	47,09	4,71	0,14	2,13	1,11	0,523
71	7,63	5,83	47,17	1,25	48,42	4,84	0,16	2,36	1,23	0,519
78	7,66	5,98	48,42	1,11	49,53	4,95	0,16	2,60	1,35	0,521
85	7,66	6,33	52,35	1,33	53,67	5,37	0,15	2,83	1,48	0,523
92	7,68	5,99	48,83	1,25	50,08	5,01	0,16	3,06	1,55	0,508
99	7,96	6,41	53,14	1,00	54,14	5,41	0,17	3,05	1,61	0,527
106	7,87	6,91	57,87	1,09	58,96	5,90	0,17	3,29	1,68	0,511
113	8,01	6,90	56,82	1,20	58,02	5,80	0,18	3,51	1,90	0,542
120	7,86	6,80	56,11	1,11	57,21	5,72	0,19	3,74	1,96	0,523
127	7,33	7,51	63,06	2,42	65,47	6,55	0,55	3,97	1,93	0,486

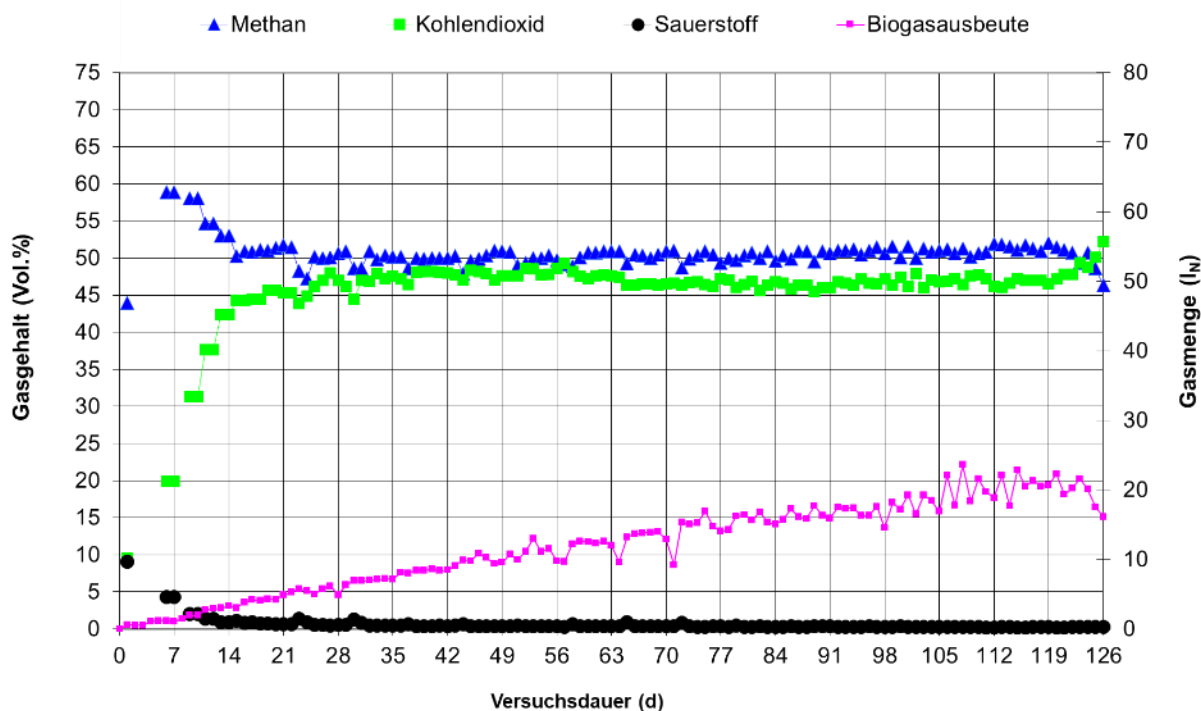


Abbildung 12: Gasmengen und Gasqualitäten vom Fermenter 1 während der Hochfahr- und Versuchsphase

Aus Abbildung 12 ist weiterhin zu erkennen, dass sich zu Beginn der Hochfahrphase Sauerstoff in dem Fermenter befand. Das sollte eigentlich durch die vorgeschaltete Ausgasungsphase vermieden werden. Mögliche Ursachen für diesen Sauerstoffeintrag können in der ersten Fütterung des Fermenters 1 mit dem Inputmaterial liegen. Von Friehe et al. (2013) und Döhler et al. (2013) wird ein optimaler Sauerstoffgehalt im Fermenter von $< 0,1$ Vol. % beschrieben. Ab dem 7. Versuchstag konnte der Sauerstoffeintrag verringert und ab dem 14. Versuchstag auf < 1 Vol. % reduziert werden. Die größeren Lücken in den ersten 7 Tagen resultieren aus der Adaptation der Mikroorganismen und der geringen Biogasausbeute, die keine Erfassung der Biogaszusammensetzung ermöglichte. Ab dem 9. Versuchstag war eine tägliche Bestimmung der Gasgehalte möglich. Sehr schön erkennbar ist in Abbildung 2 die langsame Annäherung der Kohlendioxid- und der Methangehalte in den ersten 14 Versuchstagen. Ab dem 15. Versuchstag befinden sich die Methangehalte um 50 Vol. %. Die Kohlendioxidgehalte liegen ab dem 15. Versuchstag bei 45 Vol. % und nehmen bis zum Ende der Hochfahrphase bis auf 49 Vol. % zu. Die Einbrüche an Methan und Kohlendioxid am 23., 30., 44. und 50. Versuchstag sind jeweils fütterungsbedingt auf die erhöhte Raumlast jeder neuen Versuchswoche zurückzuführen. Für die erhöhte Menge an Inputsubstrat benötigen die Bakterien wieder eine einige Tage zur Verstoffwechselung. Dennoch ist beim Fermenter 1 während der Hochfahr- und Versuchsphase bis zum 120. Versuchstag keine Prozessstörung zu erkennen.

In Tabelle 40 ist dazu noch einmal ein Auszug der wichtigsten Gärssäuren und der Gesamtstickstoff- und der Ammoniumstickstoffgehalt für 4 Untersuchungstermine während der Hochfahr- und Versuchsphase dargestellt.

Tabelle 40: Essigsäure, Buttersäure, Essigsäureäquivalent (ES äq.), Gesamtstickstoff (N_{gesamt}) und Ammoniumstickstoff (NH₄-N) in der Hochfahr- und Versuchsphase von Fermenter 1

Versuchstag	Essigsäure g·kg ⁻¹ FM	Buttersäure g·kg ⁻¹ FM	ES äq. g·kg ⁻¹ FM	N _{gesamt} kg·m ³	NH ₄ -N kg·m ³
1. VT	0,06	< 0,05	< 0,18	4,96	2,93
50. VT	0,15	< 0,05	< 0,26	3,40	1,65
85. VT	0,18	< 0,05	< 0,30	3,08	1,10
116. VT	0,18	< 0,05	< 0,29	3,06	0,89

Tabelle 40 zeigt, dass es bei den Gehalten an Essigsäure während der Versuchszeit zu einer Zunahme von 0,06 auf 0,18 g·kg⁻¹ FM kam. Dennoch sind die Essigsäuregehalte als gering zu bewerten. Nach Kaiser et al. (2008) sind Hemmungen ab 3.000 mg·l⁻¹ FM zu erwarten. Die Gehalte an Buttersäure blieben unverändert unter 0,05 g·kg⁻¹ FM und nach Kaiser et al. (2008) ebenfalls unbedenklich. Das Essigsäureäquivalent ist von $< 0,18$ auf $< 0,29$ angestiegen und ist ebenfalls unproblematisch nach Kaiser et al. (2008), der als Grenzwert

4.000 mg·l⁻¹ FM angibt. Der Gesamtstickstoffgehalt und der Ammoniumstickstoff haben während der Hochfahr- und Versuchsphase in Fermenter 1 abgenommen und es kam zu keiner Anreicherung von Stickstoff und Ammonium, was zu erwarten gewesen wäre.

Damit zeigt sich, dass der Fermenter 1 mit dem Substrat 6503 ohne Probleme auf eine Raumlast von 3,51 g oS l⁻¹ d gefahren werden kann, ohne dass es zu Prozessstörungen kam.

Fermenter 2

Analog zu Fermenter 1 soll im Folgenden der Fermenter 2 näher hinsichtlich seiner Prozessparameter in der Hochfahr- und Versuchsphase mit dem Substrat 6510 beschrieben werden. Dabei wird jedoch nur noch auf die auffälligsten Parameter eingegangen, da sich viele Sachverhalte mit Fermenter 1 ähneln und bereits dort erklärt wurden.

Ausgangspunkt für die Raumlaststeigerung bildete die wöchentliche Analyse des Inputsubstrates 6510, welche in Tabelle 41 vom 50. bis zum 120. Versuchstag zu sehen ist.

Tabelle 41: Wöchentliche Analysenergebnisse des verwendeten Gemenges (frisch) der Variante 6510 vom 50. bis zum 120. Versuchstag im Fermenter 2 während der Versuchsphase

Versuchstag	TS in % FM	oTS in % FM	oTS in % TS	org. Säuren in % FM	oS in % FM
50.	33,01	30,10	94,83	0,10	30,20
57.	32,82	29,96	94,97	0,11	30,06
64.	33,18	30,31	94,32	0,11	30,42
71.	33,01	30,29	95,02	0,11	30,39
78.	32,94	30,22	95,13	0,10	30,32
85.	32,42	29,86	95,11	0,11	29,96
92.	32,54	30,03	95,13	0,11	30,13
99.	32,00	29,70	95,48	0,10	29,80
106.	32,18	29,93	95,46	0,10	30,04
113.	32,44	29,83	95,52	0,11	29,94
120.	32,87	30,66	95,44	0,10	30,76

TS: Trockensubstanz, oTS: org. Trockensubstanz, oS: organische Substanz, FM: Frischmasse

Alle in Tabelle 41 dargestellten Parameter unterliegen über die Versuchsphase nur einer geringen Schwankung und sind als normal einzuordnen. Auffällig ist, dass sich alle Parameter auf einem etwas höheren Niveau befinden, gegenüber dem Substrat 6503 vom Fermenter 1. Nach dem Einsatz des Substrates in den Fermenter 2 und der wöchentlichen Steigerung der Raumlast ergaben sich die in Tabelle 42 gezeigten Prozessparameter.

Tabelle 42: Wöchentliche Analyseergebnisse vom Fermenter 2 während der Hochfahr- und Versuchsphase

Versuchszeit d	pH-Wert	TS - Gehalt % TS ₁₀₅	oTS g·kg ⁻¹ FM	org. Säuren g·kg ⁻¹ FM	org Substanz g·kg ⁻¹ FM	org. Substanz % FM	FOS/TAC	Raumbelastung g·oS l ⁻¹ ·d	Biogasrate Nm ³ ·m ⁻³ ·d	Biogasausbeute Nm ³ ·kg ⁻¹ oS
1	8,09	5,77	41,61	1,43	43,04	4,30	0,15	-	-	-
8	8,03	5,73	43,69	1,58	45,27	4,53	0,20	0,24	0,06	0,237
15	8,03	5,24	37,39	1,63	39,02	3,90	0,18	0,47	0,18	0,374
22	8,06	5,19	38,04	1,45	39,49	3,95	0,16	0,71	0,33	0,467
29	8,14	5,28	39,90	1,05	40,96	4,10	0,16	0,95	0,50	0,523
36	7,99	5,28	39,75	1,25	41,00	4,10	0,18	1,19	0,62	0,519
43	7,99	5,97	46,85	1,44	48,29	4,83	0,16	1,42	0,78	0,552
50	7,74	6,03	47,64	1,45	49,09	4,91	0,18	1,65	0,93	0,561
57	7,81	6,80	55,20	1,28	56,49	5,65	0,15	1,89	1,04	0,553
64	7,91	6,23	49,75	1,29	51,03	5,10	0,16	2,12	1,12	0,530
71	7,73	6,84	55,74	1,47	57,22	5,72	0,15	2,36	1,10	0,464
78	7,84	6,65	53,48	1,08	54,57	5,46	0,14	2,60	1,36	0,523
85	7,87	7,06	58,11	1,42	59,53	5,95	0,16	2,84	1,47	0,519
92	7,78	6,74	54,12	1,21	55,34	5,53	0,16	3,07	1,27	0,414
99	8,05	7,03	56,88	1,27	58,14	5,81	0,18	3,07	1,79	0,582
106	8,04	7,37	60,10	1,36	61,46	6,15	0,18	3,30	1,84	0,556
113	8,10	7,39	59,82	1,53	61,35	6,13	0,24	3,54	1,98	0,558
120	7,69	7,73	63,19	5,48	68,67	6,87	0,90	3,57	1,80	0,503
127	7,51	7,42	59,69	4,91	64,60	6,46	0,88	0,44	0,83	1,892

Der Verlauf aller Parameter von Tabelle 42 ähnelt bis zum 113. Versuchstag denen von Fermenter 1 aus Tabelle 39. Ab dem 120. Versuchstag ist eine Zunahme der organischen Säuren von 1,53 auf 5,48 g·kg⁻¹ FM und des FOS/TAC-Wertes von 0,24 auf 0,90 zu verzeichnen. Es wurde wieder eine wöchentliche Raumlaststeigerung von 0,25 g oS·l⁻¹·d⁻¹ realisiert. Die daraus resultierende Steigerung der Biogasrate und der Biogasausbeute entspricht dabei der von Fermenter 1 bis zum 112. Versuchstag (Abbildung 12 und Abbildung 13). Ab dem 113. Versuchstag zeigen sich auch die Veränderungen der organischen Säuren und des FOS/TAC-Wertes in der verringerten Biogasausbeute und des Methangehaltes sowie in der Zunahme des Gehaltes an Kohlendioxid.

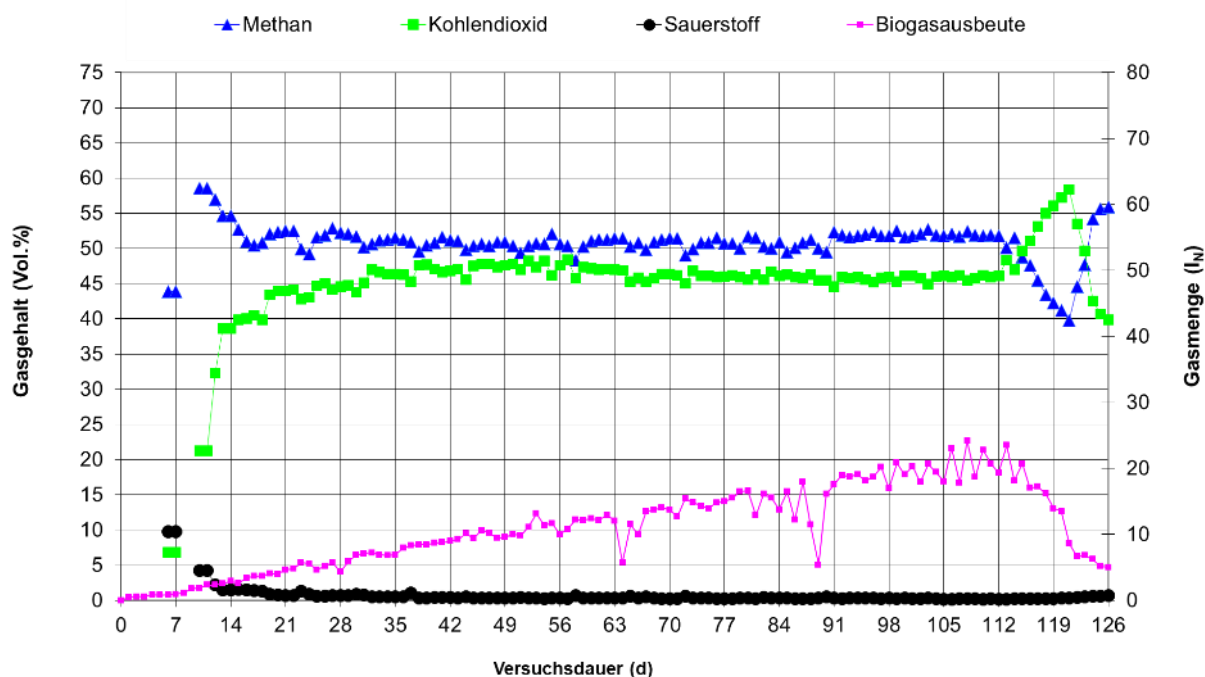


Abbildung 13: Gasmengen und Gasqualitäten vom Fermenter 2 während der Hochfahr- und Versuchsphase

Aus Abbildung 13 ist ersichtlich, dass die Biogasrate leichte Schwankungen im Verlauf der Hochfahr- und Versuchsphase aufweist, die auf die jeweilige Raumlaststeigerung zu jedem Wochenbeginn zurückzuführen sind. Gegenüber Fermenter 1 schwanken auch die Gehalte an Methan und Kohlendioxid etwas mehr ab dem 14. Versuchstag. Auch hier zeigt sich die wöchentliche Raumlaststeigerung und die verzögerte Adaptivität der Mikroorganismen über die jeweilige Versuchswoche. Dennoch sind diese Schwankungen normal und auch in der Praxis anzutreffen. Von Vorteil erwies sich wieder die 7-tägige Fütterung. Eine Prozessstörung zeigt sich ab dem 113. Versuchstag. Ein Fütterungstop ab diesem Tag führte zu einer leichten Erholung des Systems, in deren Folge es wieder zu einem Anstieg der Methan- und einer Abnahme der Kohlendioxidgehalte kam. Nach dem Wiederbeginn der Fütterung ab dem 120. Versuchstag kam es erneut zu einer Prozessstörung, die bis zum Versuchsende anhielt.

Um die zuvor beschriebene Prozessstörung genauer beurteilen zu können, wurden an ausgewählten Versuchstagen die Gärssäuren im Gärrest untersucht. Die Wichtigsten Gärssäuren sowie die Stickstoffgehalte für den Gärrest von Fermenter sind in Tabelle 43 dargestellt.

Tabelle 43: Essigsäure, Buttersäure, Essigsäureäquivalent (ES äq.), Gesamtstickstoff (N gesamt) und Ammoniumstickstoff (NH₄-N) in der Hochfahr- und Versuchsphase von Fermenter 2

Versuchstag	Essigsäure g·kg ⁻¹ FM	Buttersäure g·kg ⁻¹ FM	ES äq. g·kg ⁻¹ FM	N gesamt kg·m ³	NH ₄ -N kg·m ³
1. VT	0,06	< 0,05	< 0,18	4,96	2,93
50. VT	0,25	< 0,05	0,37	3,57	1,79
85. VT	0,13	< 0,05	0,24	3,54	1,34
116. VT	0,84	< 0,05	0,96	3,66	1,22

Tabelle 43 zeigt, dass es nach 50 Versuchstagen zu einem Anstieg bei der Essigsäure gekommen ist. Dieser Anstieg ist höher als bei Fermenter 1, jedoch immer noch in einem unkritischen Bereich. Am 85. Versuchstag wurden mit 0,13 g·kg⁻¹ FM geringere Essigsäuregehalte ermittelt. Am 116. Versuchstag zeigten sich die zuvor beschriebenen Prozessstörungen auch in den Essigsäuregehalten mit 0,84 g·kg⁻¹ FM, welche als kritisch zu

werten sind. Gleiches gilt für das Essigsäureäquivalent, was ebenfalls zunahm, und mit $0,96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$, sich weit über dem Grenzwert von $4.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{ FM}$ nach Kaiser et al. (2008) befindet. Positiv ist hervorzuheben, dass im Laufe der Hochfahr- und Versuchsphase der Gesamtstickstoff- und der Ammoniumgehalt abnahmen.

Damit konnte für Fermenter 2 mit dem Inputsubstrat 6510 während Hochfahrphase eine Endraumlast von $3,30 \text{ g oS l}^{-1} \cdot \text{d}$ bei stabilen Prozessbedingungen erreicht werden.

Fermenter 3

Die Analysenergebnisse für das Inputsubstrat 6519, welches in Fermenter 3 verwendet wurde, zeigt Tabelle 44. Dabei fällt auf, dass alle untersuchten Parameter in ihrem Niveau etwas unter dem Gemenge 6510 von Fermenter 2 liegen, jedoch dem Substrat vom Gemenge 6503 aus Fermenter 1 ähneln. Alle Parameter sind als gemengetypisch zu bewerten. Die wöchentlichen Schwankungen innerhalb der Versuchsphase sind gering.

Tabelle 44: Wöchentliche Analysenergebnisse des verwendeten Gemenges (frisch) der Variante 6519 vom 50. bis zum 120. Versuchstag im Fermenter 3 während der Versuchsphase

Versuchstag	TS in % FM	oTS in % FM	oTS in % TS	FFS in % FM	oS in % FM
50.	26,09	23,77	95,42	0,08	23,85
57.	25,99	23,88	96,01	0,09	23,97
64.	25,81	23,73	95,36	0,09	23,82
71.	25,85	23,66	95,35	0,09	23,74
78.	25,66	23,39	95,27	0,09	23,48
85.	25,60	23,51	95,31	0,09	23,59
92.	25,37	23,36	95,47	0,08	23,44
99.	25,60	23,58	95,24	0,08	23,65
106.	25,21	23,02	95,62	0,07	23,09
113.	25,19	22,90	95,12	0,08	22,98
120.	25,20	23,34	95,26	0,07	23,41

Entsprechend den wöchentlichen Analysen wurde die Fütterung der jeweiligen Raumlaststeigerung angepasst. Die Ergebnisse auf die prozessbiologischen Parameter sind in Tabelle 45 dargestellt.

Tabelle 45: wöchentliche Analysenergebnisse vom Fermenter 3 während der Hochfahr- und Versuchsphase

Versuchszeit d	pH-Wert	TS - Gehalt % TS ₁₀₅	oTS g·kg ⁻¹ FM	org. Säuren g·kg ⁻¹ FM	org Substanz g·kg ⁻¹ FM	org. Substanz %FM	FOS/TAC	Raumbelastung g·l ⁻¹ ·d	Biogasrate Nm ³ ·m ⁻³ ·d	Biogasausbeute Nm ³ ·kg ⁻¹ oS
1	8,11	5,86	42,25	1,32	43,57	4,36	0,18	-	-	-
8	8,14	5,35	39,14	1,69	40,83	4,08	0,17	0,25	0,06	0,253
15	8,03	5,12	37,51	1,56	39,08	3,91	0,19	0,47	0,18	0,384
22	8,05	5,23	38,77	1,53	40,30	4,03	0,18	0,72	0,33	0,453
29	8,19	5,01	37,49	0,90	38,39	3,84	0,16	0,98	0,50	0,514
36	7,92	5,33	40,97	1,11	42,09	4,21	0,17	1,23	0,61	0,499
43	7,94	5,23	40,97	1,33	42,29	4,23	0,16	1,47	0,79	0,533
50	7,91	5,31	42,00	1,19	43,19	4,32	0,17	1,72	0,92	0,536
57	7,83	5,71	45,98	1,26	47,24	4,72	0,17	1,97	1,08	0,550
64	7,87	5,89	47,60	1,26	48,86	4,89	0,15	2,22	1,21	0,546
71	7,81	6,18	50,63	1,38	52,02	5,20	0,17	2,47	1,32	0,536
78	7,78	6,28	51,36	0,95	52,31	5,23	0,17	2,71	1,46	0,536
85	7,67	6,58	54,83	3,80	58,62	5,86	0,62	2,96	1,45	0,488
92	7,02	6,75	56,46	7,78	64,25	6,42	2,29	3,21	1,31	0,409
99	6,49	6,89	58,06	9,30	67,36	6,74	3,15	2,56	1,00	0,390
106	6,16	6,04	49,83	10,84	60,67	6,07	3,46	0,76	0,25	0,326
113	6,14	5,74	46,49	11,65	58,15	5,81	3,82	0,25	0,02	0,074
120	7,51	6,52	53,49	8,68	62,17	6,22	1,81	0,51	0,11	0,211
127	7,93	5,89	47,08	2,42	49,49	4,95	0,32	0,82	0,83	1,015

Der Verlauf aller Parameter von Tabelle 43 ähnelt wieder dem der von Fermenter 1 aus Tabelle 39 und Fermenter 2 aus Tabelle 42 bis zum 78. Versuchstag. Es konnte bis zu diesem Tag wieder eine wöchentliche Raumlaststeigerung von $0,25 \text{ g O}_2 \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ erreicht werden. Ab dem 85. Versuchstag kommt es zu einer Zunahme der organischen Säuren von $0,95$ auf $3,80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ und des FOS/TAC-Wertes von $0,17$ auf $0,62$. Im weiteren Verlauf wurde der Maximalwert an organischen Säuren am 113. Versuchstag mit $11,65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ und einem FOS/TAC-Wert von $3,82$ ermittelt. Von dieser massiven Prozessstörung erholte sich der Fermenter 3, trotz Einstellen der Fütterung, bis zum Versuchsende nicht mehr. Die beschriebene Prozessstörung zeigt sich auch in der täglichen Biogasrate und den Biogasausbeuten von Fermenter 3 in Abbildung 14.

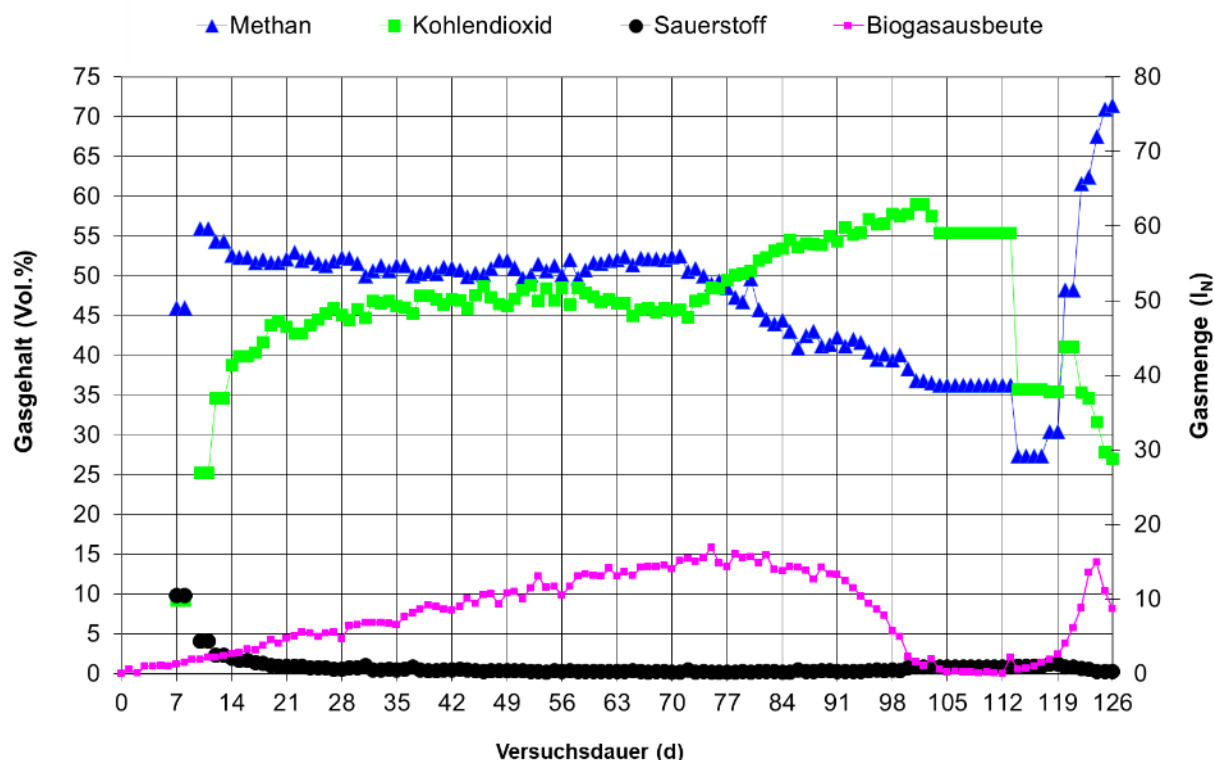


Abbildung 14: Gasmengen und Gasqualitäten vom Fermenter 3 während der Hochfahr- und Versuchsphase

Die anfänglich hohen Gehalte an Sauerstoff konnten ab dem 14. Versuchstag auf $< 1 \text{ Vol. \%}$ reduziert werden. Gleichzeitig näherten sich die Gehalte von Methan und Kohlendioxid ab diesem Tag langsam an. Die Schwankungen im Methangehalt nach der jeweiligen Raumlaststeigerung zum Wochenbeginn sind weniger stark ausgeprägt als bei Fermenter 2 und entsprechen mehr denen von Fermenter 1. Die Höhe der Methangehalte bis zum 70. Versuchstag befindet sich auf dem Niveau von Fermenter 1 und 2. Ab dem 72. Versuchstag ist eine Abnahme der Methan- und eine Zunahme der Kohlendioxidgehalte zu erkennen. Die Biogasausbeuten sind zu diesem Zeitpunkt noch stabil und nehmen erst vom 80. Versuchstag ab. Diese Prozessstörung hält bis zum 117. Versuchstag an. Ab diesem Tag kommt es zur langsamen Verstoffwechselung der angereicherten organischen Säuren in deren Folge die Biogasausbeute und der Methangehalt zunehmen. Der Gehalt an Kohlendioxid reduziert sich vom 112. Versuchstag. Zum besseren Verständnis der Prozessstörung wurden wieder an ausgewählten Tagen die Gärsäuren und der Stickstoff- und Ammoniumgehalt bestimmt (Tabelle 46).

Tabelle 46: Essigsäure, Buttersäure, Essigsäureäquivalent (ES äq.), Gesamtstickstoff (N gesamt) und Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) in der Hochfahr- und Versuchsphase von Fermenter 3

Versuchstag	Essigsäure $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$	Buttersäure $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$	ES äq. $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$	N gesamt $\text{kg} \cdot \text{m}^3$	$\text{NH}_4\text{-N}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^3$
1. VT	0,06	$< 0,05$	$< 0,18$	4,96	2,93
50. VT	0,14	$< 0,05$	0,25	3,21	1,64
85. VT	1,94	$< 0,05$	2,09	3,21	1,19
116. VT	7,53	1,22	9,39	3,33	1,52

Wie bei Fermenter 1 und 2 kam es nach 50 Versuchstagen zu einem Anstieg bei der Essigsäure, der jedoch am 85. Versuchstag deutlich und am 116. Versuchstag noch stärker zunahm. Das gleiche Bild zeigte sich beim Essigsäureäquivalent, welches ebenfalls bis zum 116. Versuchstag auf $9,39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ anstieg und damit

weit über dem Grenzwert von 4.000 mg·l⁻¹ FM nach Kaiser et al. (2008) lag. Der Gesamtstickstoff- und der Ammoniumgehalt nahm wie bei Fermenter 1 und 2 über die gesamte Versuchszeit ab und es kam zu keiner Anreicherung.

Aufgrund der sehr frühzeitig aufgetretenen Prozessstörung konnte für Fermenter 3 mit dem Inputsubstrat 6519 nur eine Endraumlast von 2,71 g·l⁻¹·d erreicht werden.

Zusammenfassung kontinuierlicher Versuch mit Gemenge (frisch) aus Andenlupinen und Mais

Das Ziel der Hochfahr- und Versuchsphase war eine wöchentliche Raumlaststeigerung von 0,25 g·l⁻¹·d mit allen 3 untersuchten Gemengesubstraten, bis zum Eintreten einer Prozessstörung. Dabei kam es bei Fermenter 3 als erstes zu Problemen ab einer Raumlast von 2,71 g·l⁻¹·d. Fermenter 2 zeigte erste Prozessstörungen ab einer Raumlast von 3,30 g·l⁻¹·d. Fermenter 1 lief bis zum 120. Versuchstag störungsfrei durch und erreichte damit eine Raumlast von 3,51 g·l⁻¹·d. Döhler et al. (2013) beschreibt eine optimale Raumlast von Gülle-NawaRo-Anlagen mit 2,5 g·l⁻¹·d. Diese Raumlast konnte mit dem Substrat von Fermenter 1 und 2 problemlos erreicht werden. Weiterhin ist positiv zu beurteilen, dass es in keinem Fermenter zur Schaumbildung und keiner Anreicherung von Stickstoff und Ammonium gekommen ist. Damit konnte die Gemegetauglichkeit als Substrat für die Biogasproduktion für die eingesetzten Substrate in Fermenter 1 und 2 nachgewiesen werden.

Zweiter kontinuierlicher Versuch mit Silagen aus Andenlupinen und Mais

Zur Analyse der Silagen aus Andenlupinen und Mais wurden die modifizierten Fermenter aus dem ersten kontinuierlichen Versuch zur Vergärung von frischen Andenlupinen und Mais Gemengen verwendet. Das Untersuchungsdesign entsprach ebenfalls dem kontinuierlichen Versuch mit Gemengen aus Andenlupinen und Mais (siehe Tabelle 36). Dazu wurden ebenfalls 3 Fermenter genutzt (siehe Abbildung 11). Als Substrate wurden die Andenlupine L265 und die Maissorte Smoothi frisch, siliert und siliert mit einem Siliermittel verwendet. Die Analysenergebnisse der 3 eingesetzten Substrate ist in Tabelle 47 dargestellt.

Tabelle 47: Analysenergebnisse der drei verwendeten Gemenge aus Andenlupine und Mais im zweiten kontinuierlichen Versuch

Variante	TS - Gehalt % FM	oTS g·kg ⁻¹ FM	org. Säuren g·kg ⁻¹ FM	oS=oTS+Sr % FM
F1 L265/ Smoothi frisch	39,26	355,80	0,91	35,67
F2 L265/ Smoothi siliert	36,88	336,37	6,72	34,31
F3 L265/ Smoothi siliert +	36,31	327,34	16,62	34,40

Siliert +: siliert mit Zugabe eines Siliermittels

Auffällig aus Tabelle 47 ist, dass sich die Trockensubstanzgehalte der silierten Varianten von dem Gemenge frisch um im Mittel 2,66 % TS unterscheiden und niedriger sind. Weiterhin weist die silierte Variante mit 6,72 g·kg⁻¹ FM organische Säuren hohe Gehalte und die silierte Variante plus Siliermittelzusatz mit 16,62 g·kg⁻¹ FM die höchsten Gehalte an organischen Säuren auf.

Die gesamte Versuchszeit des zweiten kontinuierlichen Versuches betrug 154 Versuchstage. Daran schloss sich eine 40 tägige Ausgasungsphase an. In der Hochfahrphase wurden die Raumlasten der Fermenter langsam hochgefahren und wöchentlich die Faulraumbelastung um ca. 0,25 g oS·l⁻¹·d⁻¹ gesteigert. In der Versuchsphase wurde die Raumlast weiter angehoben. In beiden Phasen wurde der Biogasprozess wöchentlich mit den in Tabelle Tabelle 36 dargestellten Parametern überwacht.

Für den zweiten kontinuierlichen Versuch war wieder eine tägliche Fütterung mit den Biomassen vorgesehen. Dazu wurde das Material im gefrorenen Zustand mit einem Fleischwolf gemust und anschließend in täglichen Rationen zu wochenweisen Fütterungsportionen abgepackt und wieder eingefroren. Neben den Futtermengen wurde auch ein wöchentlicher Analysenbeutel erstellt. Dieser dient zur wöchentlichen Untersuchung der Futtersubstrate auf die Trockensubstanz, organische Trockensubstanz und der organischen Säuren. Auf Basis dieser Untersuchungen erfolgt eine wöchentliche Anpassung der täglichen Futtermengen für die kommende Versuchswoche.

Im Folgenden werden die einzelnen Fermenter ausgewertet.

Fermenter 1

Ausgangspunkt für die wöchentliche Steigerung der Raumlast ist die Analyse der Inputbiomasse. Für den Fermenter 1 wurde die Gemengevariante L265/ Smoothi frisch verwendet. Die Analysenwerte für die 154 Versuchstage zeigt Tabelle 48.

Tabelle 48: wöchentliche Analyseergebnisse des verwendeten Gemenges der Variante L265/ Smoothi frisch im Fermenter 1 während der Versuchsphase

Versuchstag	TS in % FM	oTS in % FM	oTS in % TS	org. Säuren % FM	oS in %FM
1	38,51	33,35	92,17	0,13	33,48
7	38,54	33,78	93,39	0,13	33,91
14	39,39	34,82	92,84	0,15	34,97
21	39,38	33,58	93,07	0,12	33,70
28	39,55	33,84	93,15	0,13	33,97
35	39,66	35,88	93,26	0,12	36,00
42	39,28	33,53	93,15	0,13	33,65
49	37,86	32,24	92,60	0,13	32,37
56	37,40	33,16	92,28	0,11	33,28
63	37,86	33,45	92,84	0,11	33,56
70	38,07	33,98	93,46	0,11	34,09
77	38,00	33,94	92,74	0,12	34,06
84	38,53	34,69	93,10	0,13	34,82
91	38,89	34,55	92,98	0,13	34,67
98	37,67	31,35	93,15	0,14	31,49
105	37,97	33,76	92,67	0,13	33,88
112	38,52	34,43	93,23	0,10	34,52
119	39,37	35,40	93,06	0,11	35,51
126	39,49	35,60	93,33	0,12	35,72
133	38,66	34,41	93,38	0,14	34,55
140	37,61	34,00	93,32	0,12	34,12
147	38,31	34,96	93,17	0,12	35,08
154	36,71	33,66	92,56	0,13	33,79

Im Mittel wurden über die 154 Versuchstage ein TS-Gehalt von 38,52 % der Frischmasse (FM), einen oTS-Gehalt von 34,08 % FM, einen oTS-Gehalt von 93,00 % der Trockensubstanz (TS) sowie organische Säuregehalte von 0,12 % FM und eine organische Substanz von 34,20 % FM eingesetzt.

Ziel der Versuchsphase war für alle 3 Fermenter eine wöchentliche Steigerung der Raumbelastung im Fermenter von $0,25 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ und ab dem 133. Versuchstag eine 14 tägige Steigerung der Raumlast. Diese wurde umgesetzt und im Ergebnis wöchentlich der Fermenterinhalt auf verschiedene Parameter untersucht (Tabelle 36).

Aus Tabelle 49 ist ersichtlich, dass der pH-Wert während der Versuchszeit geringfügig schwankte und einen Anfangswert von 7,93 und am Ende der Versuchsphase einen Wert von 7,52 aufwies. Diese Abnahme ist unkritisch und nach einer Fütterungssteigerung als normal zu werten. Dennoch sind innerhalb der Versuchszeit Auffälligkeiten ersichtlich. Als erstes ist eine Abnahme am 14. Versuchstag zu erkennen. Ursache dafür war der Fütterungsbeginn und damit eine Steigerung der Raumlast, an welche sich die Biozönose erst adaptieren musste. Die pH-Werte erholten sich wieder bis zum 126. Versuchstag, bedingt durch die hohe Raumbelastung ($4,29 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}$) und geringe Adaptationszeit bis zur nächsten Raumlaststeigerung über die Zeit. Der Tiefpunkt wurde am 133. Versuchstag mit einem pH-Wert von 7,06 erreicht. Daraufhin wurde die Raumbelastungssteigerung 14 täglich durchgeführt, was zu einer Erholung des Systems führte. Der pH-Wert normalisierte sich zum Ende der Versuchsphase auf 7,52.

Die Gehalte an Trockensubstanz, organischer Trockensubstanz und organische Substanz nahmen über die Versuchszeit zu. Mit 13,6 % TS wurde zum Ende des Versuchs ein TS-Gehalt erreicht, der als hoch, jedoch

noch unbedenklich einzustufen ist. Anders ist der Sachverhalt beim oTS-Gehalt einzuschätzen. Dort wurden bis zum 119. Versuchstag mit $78,14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ FM noch ein empfohlener Bereich nachgewiesen. Ab dem 126. Versuchstag nahm der oTS-Gehalt bis zum 154. Versuchstag auf $109,13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ FM zu. Dieser Bereich ist als zu hoch einzuschätzen.

Die organischen Säuren befinden sich in einem Bereich von $1,13$ bis $5,56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ FM. Günstig sind Gehalte von organischen Säuren um $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ FM. Diese werden nur am 35. bis 98. Versuchstag erreicht. Die organischen Säuren spiegeln sich in der Zu- bzw. Abnahme des pH-Wertes wider. Die hohen Gehalte am 14. und am 126 bis 154. Versuchstag deuten auf eine langsame Anreicherung hin, welche auch im FOS/TAC-Wert und den Biogas- und Methanwerten zu erkennen sind. Hemmungen sind nach Lemmer und Oechsner (2013) erst ab Gehalten von $> 4,0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ FM zu erwarten.

Der FOS/TAC-Wert ist der Quotient aus den flüchtigen organischen Säuren im Verhältnis zu dem totalen anorganischen Carbonatanteil. Der FOS/TAC-Wert sollte nach Hölker (2013) in einer Spanne von $0,11$ bis $0,55$ liegen. Probleme können erst bei FOS/TAC-Werten oberhalb des Bereiches auftreten. Der Optimalbereich wird von Hölker (2013) mit $0,3$ angegeben. Die in Fermenter 1 erreichten FOS/TAC-Werte befinden sich bis zum 119. Versuchstag im Bereich der angegebenen Spanne und sind damit stabil und unkritisch. Die Zunahme ab dem 126. Versuchstag auf $1,11$ deutet, wie bei den organischen Säuren, auf eine Anreicherung hin und zeigen eine beginnende Prozessstörung an.

Die Fütterung wurde wöchentlich nach der Analyse der Inputstoffe entsprechend der vorgegebenen Raumlaststeigerung von ca. $0,25 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ angepasst und ist ebenfalls in Tabelle 49 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die vorgegebene Raumlaststeigerung nahezu eingehalten werden konnte.

Weiterhin sind in Tabelle 49 die wöchentliche Biogasrate und die Biogasausbeute abgebildet, die erwartungsgemäß mit der Erhöhung der Raumlaststeigerung zunehmen. Im Verlauf der Versuchsphase erhöht sich die Biogasausbeute von $0,077$ auf $0,583 \text{ Nm}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$. Ableitend aus den Ergebnissen aus Tabelle 49 kann vom 84. bis zum 98. Versuchstag ein stabiler und effizienter Biogasprozess nachgewiesen werden. Ab dem 105. bis 112. Versuchstag zeigte sich ein noch vertretbarer Grenzlastbetrieb, der ab dem 119. bis 154. Versuchstag in eine Überlastung des Systems mündete. Die Reaktion daraufhin war eine Verlängerung der Raumlast auf 14 Tage, was zu einer Erholung der Prozessbiologie führte.

Tabelle 49: wöchentliche Analysenergebnisse vom Fermenter 1 während der Versuchsphase

Versuchszeit d	pH-Wert	TS - gehalt % TS ₁₀₅	oTS g·kg ⁻¹ FM	org. Säuren g·kg ⁻¹ FM	org Substanz g·kg ⁻¹ FM	FOS/TAC	Raumbelastung g oS·l ⁻¹ ·d	Biogasrate Nm ³ ·m ⁻³ ·d	Biogasausbeute Nm ³ ·kg ⁻¹ oS
1	7,93	5,57	40,43	1,80	42,23	0,16	-	-	-
7	7,81	5,84	42,44	1,74	44,18	0,17	0,25	0,02	0,077
14	7,54	5,87	43,40	2,37	45,77	0,24	0,41	0,10	0,239
21	7,63	5,84	42,47	1,84	44,31	0,18	0,65	0,28	0,429
28	7,78	5,46	40,05	1,72	41,77	0,17	0,90	0,46	0,505
35	7,67	6,09	44,89	1,43	46,32	0,15	1,14	0,64	0,556
42	7,68	6,44	48,27	1,33	49,60	0,15	1,39	0,77	0,556
49	7,64	6,83	51,93	1,39	53,32	0,15	1,64	0,92	0,557
56	7,75	7,31	56,61	1,35	57,96	0,11	1,88	1,04	0,551
63	7,48	7,37	56,13	1,34	57,47	0,15	2,12	1,13	0,533
70	7,51	7,95	61,48	1,39	62,87	0,13	2,35	1,29	0,548
77	7,45	8,11	62,30	1,13	63,44	0,15	2,59	1,45	0,559
84	7,86	8,36	63,69	1,30	64,99	0,12	2,84	1,68	0,591
91	7,59	8,97	69,25	1,28	70,53	0,16	3,08	1,79	0,582
98	7,81	9,28	70,97	1,24	72,21	0,15	3,33	1,94	0,583
105	7,80	9,43	72,14	1,55	73,69	0,17	3,58	1,99	0,556
112	8,02	9,93	76,48	1,21	77,68	0,16	3,80	2,09	0,550
119	7,86	10,30	78,14	1,79	79,93	0,23	4,04	2,27	0,560
126	7,14	11,15	86,55	5,56	92,11	1,11	4,29	2,02	0,471
133	7,06	12,62	100,34	4,33	104,67	1,27	4,54	1,93	0,425
140	7,54	12,74	102,42	2,60	105,03	0,74	4,56	2,38	0,523
147	7,47	13,04	104,93	2,98	107,91	0,54	4,80	2,26	0,470
154	7,52	13,60	109,13	2,59	111,72	0,41	4,80	2,38	0,496

Die Tagesgasmengen und die Biogasgehalte des Fermenters 1 während der Versuchsphase zeigt die Abbildung 14. Die Biogasausbeute nimmt täglich kontinuierlich mit der Erhöhung der Fütterungsmenge zu. Dadurch dass der Fermenter auch an den Wochenenden kontinuierlich mit Inputsubstrat versorgt wurde, sind in der Biogasausbeute wenig Schwankungen zu verzeichnen. Gut zu erkennen ist eine beginnende Prozessstörung ab dem 119. Versuchstag, die sich in einer Abnahme der Biogasausbeute und des Methangehaltes und einer Zunahme der Kohlendioxidgehalte zeigt.

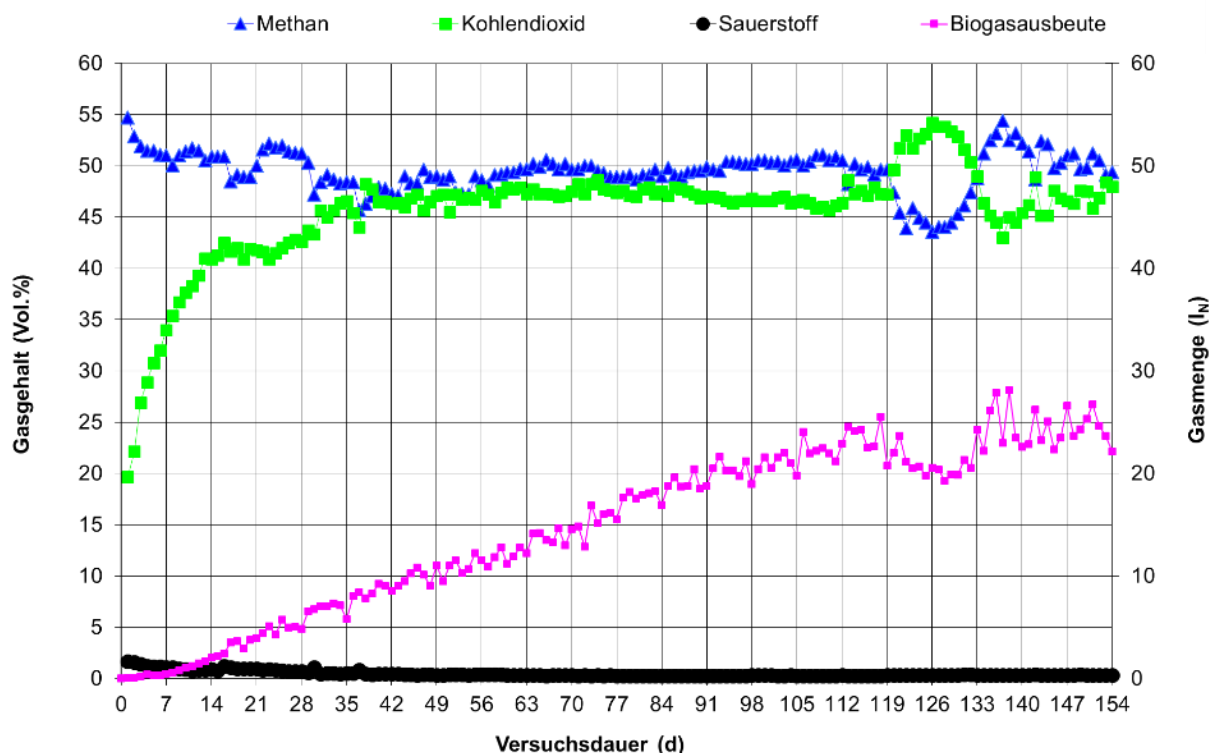


Abbildung 15: Gasmengen und Gasqualitäten vom Fermenter 1 während der Versuchsphase

Aus Abbildung 15 ist weiterhin zu erkennen, dass sich zu Beginn der Versuchsphase Sauerstoff in dem Fermenter befand. Ab dem 10. Versuchstag konnte der Sauerstoffeintrag auf < 1 Vol. % reduziert werden. Sehr schön erkennbar ist in Abbildung 15 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** die langsame Annäherung der Kohlendioxid- und der Methangehalte in den ersten 35 Versuchstagen. Ab dem 7. bis 28. Versuchstag befinden sich die Methangehalte um ca. 51 Vol. %. Anschließend nehmen Sie bis zum 63. Versuchstag auf unter 48 Vol. % ab und danach wieder auf 50 Vol. % zu. Ab dem 119. Versuchstag kommt es zum Einbruch der Methangehalte bedingt durch die Anreicherung von organischen Säuren, aufgrund einer zu hohen Raumlast. Dieser Sachverhalt wird auch in den abnehmenden Biogasausbeuten vom 119. bis zum 134. Versuchstag deutlich.

Die Kohlendioxidgehalte verhalten sich entgegengesetzt proportional zu den Methangehalten und beschreiben einen typischen Verlauf bei einer Versäuerung. Dennoch ist ab dem 133. bis zum 154. Versuchstag durch die Streckung der Raumlast auf 14 Tage eine Erhöhung der Biogasausbeute bei steigenden Methan- und abnehmenden Kohlendioxidgehalten zu erkennen.

In Tabelle 50 ist dazu noch einmal ein Auszug der wichtigsten Gärsäuren und der Gesamtstickstoff- und der Ammoniumstickstoffgehalt für 4 Untersuchungstermine während der Versuchsphase für Fermenter 1 dargestellt.

Tabelle 50: Essigsäure, Buttersäure, Essigsäureäquivalent (ES äq.), Gesamtstickstoff (N gesamt) und Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) in der Versuchsphase von Fermenter 1

Versuchstag	Essigsäure $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ FM	Buttersäure $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ FM	ES äq. $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ FM	N gesamt $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{NH}_4\text{-N}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
1. VT	0,10	$< 0,03$	0,21	3,01	2,45
63. VT	0,09	$< 0,03$	0,21	3,26	1,84
112. VT	0,25	$< 0,03$	0,36	4,32	1,43
133. VT	-	-	-	4,77	1,32

154. VT 1,85 0,09 2,66 4,97 1,59

Tabelle 50 zeigt, dass es bei den Gehalten an Essigsäure während der Versuchszeit zu einer Zunahme von 0,10 auf 1,85 g·kg⁻¹ FM kam. Dennoch sind die Essigsäuregehalte als gering zu bewerten. Nach Kaiser et al. (2008) sind Hemmungen ab 3.000 mg·l⁻¹ FM zu erwarten. Die Gehalte an Buttersäure blieben unverändert unter 0,09 g·kg⁻¹ FM und nach Kaiser et al. (2008) ebenfalls unbedenklich. Das Essigsäureäquivalent ist von 0,21 auf 2,66 angestiegen und ist ebenfalls unproblematisch nach Kaiser et al. (2008), der als Grenzwert 4.000 mg·l⁻¹ FM angibt. Der Gesamtstickstoffgehalt nimmt während der Versuchsphase in Fermenter 1 von 3,01 auf 4,97 kg·m⁻³ zu. Beim Ammoniumstickstoff kam es zu einer Abnahme von 2,45 auf 1,59 kg·m⁻³.

Damit zeigt sich, dass der Fermenter 1 mit dem Substrat L265/ Smoothi Gemenge frisch ohne Probleme auf eine Raumlast von 3,33 bis 3,80 g oS·l⁻¹·d gefahren werden kann, ohne dass es zu Prozessstörungen kam.

Fermenter 2

Der Startpunkt für die wöchentliche Steigerung der Raumlast im Fermenter 2 war die Analyse der Inputbiomasse der Gemengevariante L265/ Smoothi siliert. Die Analysenwerte für die 154 Versuchstage zeigt Tabelle 51.

Tabelle 51: wöchentliche Analysenergebnisse des verwendeten Gemenges der Variante L265/ Smoothi siliert im Fermenter 2 während der Versuchsphase

Versuchstag	TS in % FM	oTS in % FM	oTS in % TS	org. Säuren % FM	oS in %FM
1	38,79	33,92	93,40	0,78	34,70
7	38,78	33,78	93,31	0,80	34,58
14	39,07	34,78	93,61	0,78	35,57
21	39,05	33,35	93,50	0,72	34,08
28	37,95	33,39	93,16	0,74	34,13
35	38,07	34,27	93,22	0,72	34,99
42	38,08	32,34	92,89	0,70	33,04
49	37,64	32,09	92,87	0,69	32,78
56	38,14	34,22	93,24	0,61	34,83
63	39,07	34,42	93,54	0,59	35,01
70	38,65	34,23	93,53	0,58	34,81
77	38,96	34,49	93,46	0,58	35,07
84	40,04	35,92	93,04	0,56	36,49
91	39,15	34,80	93,31	0,58	35,38
98	39,50	32,73	93,06	0,58	33,31
105	39,36	35,22	93,56	0,53	35,75
112	38,47	34,50	93,23	0,51	35,01
119	39,25	35,51	93,31	0,55	36,06
126	39,75	35,89	93,82	0,54	36,43
133	38,81	34,34	93,31	0,59	34,93
140	38,46	35,56	94,65	0,55	36,11
147	38,48	35,27	93,41	0,59	35,86
154	38,33	35,24	93,39	0,59	35,84

Über die 154 Versuchstage wurde im Mittel ein TS-Gehalt von 38,70 % der Frischmasse (FM), einen oTS-Gehalt von 34,33 % FM, einen oTS-Gehalt von 93,38 % der Trockensubstanz (TS) sowie organische Säuregehalte von 0,63 % FM und eine organische Substanz von 34,96 % FM eingesetzt.

Aus Tabelle 52 ist ersichtlich, dass der pH-Wert während der Versuchszeit geringfügig schwankte und einen Anfangswert von 7,89 und am Ende der Versuchsphase einen Wert von 7,41 aufwies. Es sind innerhalb der

Versuchszeit Auffälligkeiten zuerkennen. Im Gegensatz zu Fermenter 1 ist eine geringere Abnahme des pH-Wertes am 14. Versuchstag ersichtlich, die sich in keiner biologischen Beeinträchtigung äußert. Eine kritische Abnahme des pH-Wertes ist ab dem 133. Versuchstag (7,13) zu erkennen. Daraufhin wurde die Raumbelastungssteigerung 14 täglich durchgeführt, was zu einer Erholung des Systems führte. Der pH-Wert normalisierte sich zum Ende der Versuchsphase auf 7,41.

Wie bei Fermenter 1 nahmen die Gehalte an Trockensubstanz, organischer Trockensubstanz und organische Substanz über die Versuchszeit zu. Mit 12,97 % TS wurde zum Ende des Versuchs ein TS-Gehalt erreicht, der als hoch, jedoch noch unbedenklich einzustufen ist. Ursache für den geringeren TS-Gehalt gegenüber Fermenter 1 sind die TS-Gehalte der Ausgangsbiomassen (Tabelle 47).

Beim oTS-Gehalt wurden erstmals kritische Werte ab dem 140. Versuchstag mit $91,57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ erreicht. Dieser Bereich ist wieder als zu hoch einzuschätzen und steigt bis zum 154. Versuchstag auf $102,14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ an.

Die organischen Säuren befinden sich in einem Bereich von 1,11 bis $3,41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$. Günstig sind Gehalte von organischen Säuren um $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$. Diese werden nur am 35. bis 133. Versuchstag erreicht. Die organischen Säuren spiegeln sich in der Zu- bzw. Abnahme des pH-Wertes wider. Die hohen Gehalte am 14. und am 140. bis 154. Versuchstag deuten wie bei Fermenter 1 auf eine langsame Anreicherung hin, welche auch im FOS/TAC-Wert und den Biogas- und Methanwerten zu erkennen sind. Hemmungen sind nach Lemmer und Oechsner (2013) erst ab Gehalten von $> 4,0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ zu erwarten.

Die FOS/TAC-Werte in Fermenter 2 befinden sich bis zum 133. Versuchstag im Bereich der angegebenen Spanne und sind damit stabil und unkritisch zu bewerten. Die Zunahme ab dem 140. Versuchstag auf 0,68 deutet, wie bei den organischen Säuren, auf eine Anreicherung hin und zeigen eine beginnende Prozessstörung an.

Die Raumlasterhöhung von ca. $0,25 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}$ konnte wie bei Fermenter 1 nahezu eingehalten werden (Tabelle 52).

Im Verlauf der Versuchsphase erhöht sich die Biogasausbeute von 0,093 auf $0,614 \text{ Nm}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$. Wie bei Fermenter 1 kann vom 84. bis zum 98. Versuchstag ein stabiler und effizienter Biogasprozess nachgewiesen werden. Ab dem 105 bis 112. Versuchstag zeigte sich ebenfalls ein noch vertretbarer Grenzlastbetrieb, der ab dem 119. bis 154. Versuchstag in eine Überlastung des Systems mündete.

Tabelle 52: wöchentliche Analysenergebnisse vom Fermenter 2 während der Versuchsphase

Versuchszeit d	pH-Wert	TS - gehalt % TS ₁₀₅	oTS g·kg ⁻¹ FM	org. Säuren g·kg ⁻¹ FM	org Substanz g·kg ⁻¹ FM	FOS/TAC	Raumbelastung g oS·l ⁻¹ ·d	Biogasrate Nm ³ ·m ⁻³ ·d	Biogasausbeute Nm ³ ·kg ⁻¹ oS
1	7,89	5,61	40,52	1,83	42,35	0,14	-	-	-
7	7,79	5,86	42,81	1,61	44,42	0,18	0,25	0,02	0,093
14	7,49	6,01	44,78	2,98	47,75	0,32	0,49	0,11	0,220
21	7,66	6,00	44,06	2,29	46,35	0,21	0,74	0,31	0,415
28	7,70	5,63	41,46	2,05	43,51	0,18	0,99	0,53	0,531
35	7,79	6,09	45,06	1,56	46,62	0,15	1,22	0,66	0,540
42	7,63	6,08	45,03	1,38	46,41	0,16	1,48	0,83	0,558
49	7,63	6,43	47,96	1,33	49,28	0,15	1,73	0,97	0,559
56	8,17	7,00	53,21	1,28	54,50	0,13	1,97	1,11	0,565
63	7,61	7,33	55,51	1,41	56,92	0,15	2,20	1,25	0,566
70	7,51	7,70	58,66	1,46	60,12	0,13	2,45	1,49	0,609
77	7,43	7,76	58,96	1,53	60,48	0,14	2,70	1,59	0,588
84	8,07	8,24	62,20	1,11	63,31	0,14	2,95	1,85	0,627
91	7,59	8,83	68,17	1,39	69,56	0,16	3,20	1,96	0,614
98	8,02	8,96	67,63	1,48	69,11	0,15	3,46	2,12	0,612
105	8,06	9,45	72,37	1,56	73,92	0,16	3,71	2,23	0,601
112	7,84	9,89	76,00	1,27	77,27	0,17	3,95	2,42	0,612
119	8,03	10,27	77,96	1,37	79,33	0,16	4,21	2,49	0,592
126	7,50	10,34	77,95	1,33	79,29	0,27	4,46	2,55	0,572
133	7,13	11,00	84,46	1,30	85,75	0,44	4,71	2,52	0,536
140	7,25	11,80	91,57	3,27	94,83	0,68	4,73	1,76	0,373
147	7,27	12,40	97,52	3,41	100,93	0,59	4,97	2,35	0,472
154	7,41	12,97	102,14	2,84	104,98	0,36	4,98	2,55	0,512

In Abbildung 16 sind die Tagesgasmengen und die Biogasgehalte des Fermenters 2 während der Versuchsphase dargestellt. Die Biogasausbeute nimmt täglich kontinuierlich mit der Erhöhung der Fütterungsmenge zu. Ähnlich wie bei Fermenter 1 ist ab dem 126. Versuchstag, eine beginnende Prozessstörung mit einer deutlichen Abnahme der Biogasausbeute und des Methangehaltes und einer Zunahme der Kohlendioxidgehalte zu erkennen.

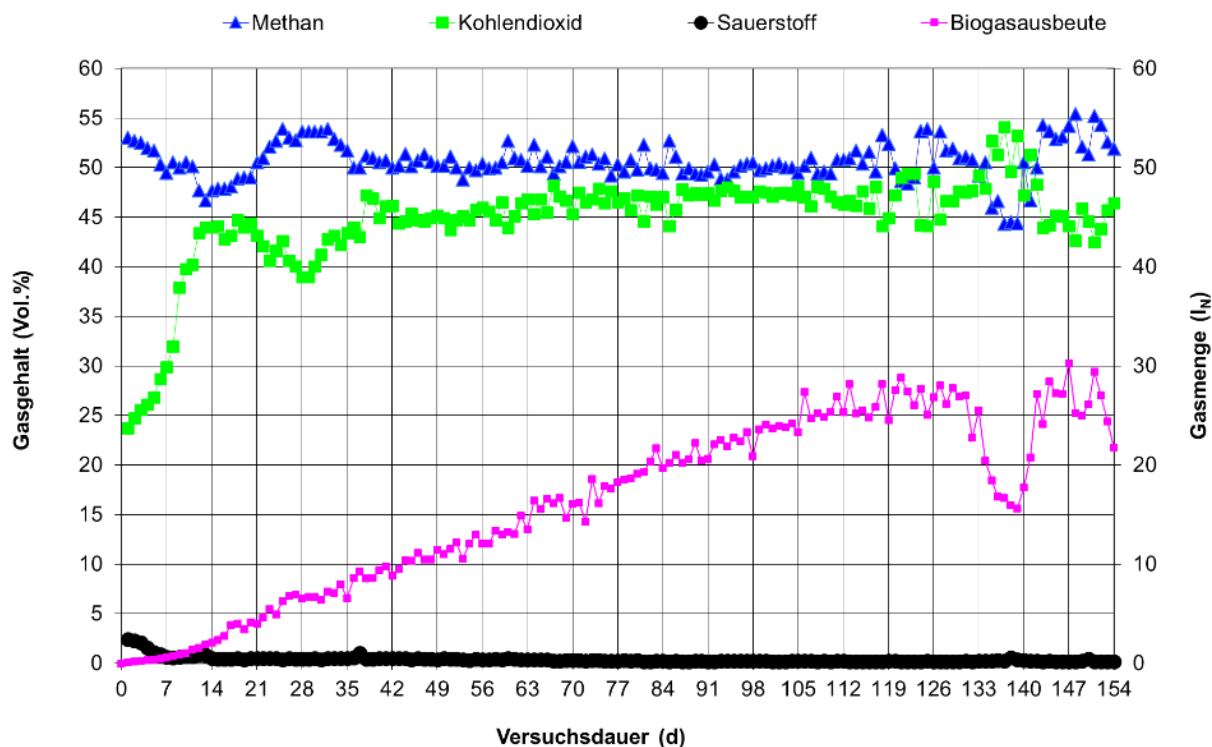


Abbildung 16: Gasmengen und Gasqualitäten vom Fermenter 2 während der Versuchsphase

Sauerstoff konnte wie bei Fermenter 1 ab dem 7. Versuchstag auf < 1 Vol. % reduziert werden. Eine langsame Annäherung der Kohlendioxid- und der Methangehalte ist in den ersten 35 Versuchstagen und ab dem 133. Versuchstag erkennbar. Die Methangehalte befinden sich lange Zeit auf einem stabilen Niveau um ca. 51 Vol. % bis zum 133. Versuchstag. Ab dem 142. Versuchstag nehmen sie wieder auf über 53 Vol. % zu. Dieser Sachverhalt wird auch in den abnehmenden Biogasausbeuten vom 126. bis zum 142. Versuchstag deutlich.

Die Kohlendioxidgehalte verhalten sich wie bei Fermenter 1 entgegengesetzt proportional zu den Methangehalten und beschreiben einen typischen Verlauf.

Unterstützend zu den aufgeführten Sachverhalten ist in Tabelle 53 ein Auszug der wichtigsten Gärssäuren und der Gesamtstickstoff- und der Ammoniumstickstoffgehalt für 4 Untersuchungstermine während der Versuchsphase für Fermenter 2 dargestellt.

Tabelle 53: Essigsäure, Buttersäure, Essigsäureäquivalent (ES äq.), Gesamtstickstoff (N gesamt) und Ammoniumstickstoff (NH₄-N) in der Versuchsphase von Fermenter 2

Versuchstag	Essigsäure g·kg ⁻¹ FM	Buttersäure g·kg ⁻¹ FM	ES äq. g·kg ⁻¹ FM	N gesamt kg·m ³	NH ₄ -N kg·m ³
1. VT	0,10	< 0,03	0,21	3,01	2,45
63. VT	0,10	< 0,03	0,21	3,43	1,96
112. VT	0,24	< 0,03	0,35	4,75	1,64
133. VT	-	-	-	4,95	1,62
154. VT	1,76	0,09	2,91	5,51	1,85

Aus Tabelle 53 wird deutlich, dass es bei den Gehalten an Essigsäure während der Versuchszeit zu einer Zunahme von 0,10 auf 1,76 g·kg⁻¹ FM kam. Dennoch sind die Essigsäuregehalte als gering zu bewerten. Nach Kaiser et al. (2008) sind Hemmungen ab 3.000 mg·l⁻¹ FM zu erwarten. Die Gehalte an Buttersäure blieben unverändert unter 0,09 g·kg⁻¹ FM und nach Kaiser et al. (2008) ebenfalls unbedenklich. Das Essigsäureäquivalent ist von 0,21 auf 2,91 angestiegen und ist ebenfalls unproblematisch nach Kaiser et al. (2008), der als Grenzwert 4.000 mg·l⁻¹ FM angibt. Der Gesamtstickstoffgehalt nimmt während der

Versuchsphase in Fermenter 1 von 3,01 auf 5,51 kg·m⁻³ zu. Beim Ammoniumstickstoff kam es zu einer Abnahme von 2,45 auf 1,85 kg·m⁻³.

Wie bei Fermenter 1 zeigt sich, dass mit dem Substrat L265/ Smoothi Gemenge siliert ohne Probleme auf eine Raumlast von 2,95 bis 3,95 g oS·l⁻¹·d gefahren werden kann, ohne dass es zu Prozessstörungen kam. Weiterhin ist ersichtlich, dass mit dem Substrat aus Fermenter 2 deutlich höhere Biogasausbeuten im Vergleich zu Fermenter 1 kontinuierlich erzielt wurden.

Fermenter 3

Die wöchentliche Steigerung der Raumlast wurde wie bei Fermenter 1 und 2 angehoben. Dazu wurde im Fermenter 3 die Inputbiomasse der Gemengevariante L265/ Smoothi siliert mit einem Siliermittel eingesetzt und zuvor analysiert. Die Ergebnisse für die 154 Versuchstage sind in Tabelle 54 dargestellt.

Tabelle 54: wöchentliche Analyseergebnisse des verwendeten Gemenges der Variante L265/ Smoothi siliert mit einem Siliermittel im Fermenter 3 während der Versuchsphase

Versuchstag	TS in % FM	oTS in % FM	oTS in % TS	org. Säuren % FM	oS in %FM
1	36,87	32,04	93,02	1,76	33,80
7	37,40	32,49	93,34	1,95	34,44
14	37,34	32,89	93,13	1,84	34,73
21	37,69	31,83	92,67	1,73	33,56
28	37,35	33,26	93,51	1,64	34,90
35	37,38	33,51	93,02	1,49	35,00
42	37,46	31,81	92,92	1,53	33,34
49	36,88	31,48	92,91	1,49	32,96
56	37,18	33,35	93,29	1,33	34,68
63	38,10	33,78	93,49	1,25	35,03
70	38,27	34,06	93,64	1,30	35,35
77	38,25	33,55	93,33	1,16	34,71
84	38,51	34,38	93,15	1,20	35,58
91	37,77	33,60	93,30	1,16	34,75
98	37,67	31,20	92,64	1,17	32,37
105	37,65	33,78	93,52	1,11	34,89
112	37,65	33,84	93,12	1,08	34,92
119	36,95	33,54	93,15	1,13	34,67
126	37,61	33,94	93,26	1,18	35,11
133	37,88	33,70	93,49	1,15	34,85
140	37,22	33,86	93,14	1,16	35,02
147	37,39	33,71	93,06	1,29	35,01
154	37,54	34,43	93,36	1,34	35,77

Die durchschnittlichen Analysenwerte des eingesetzten Inputsubstrates von Fermenter 3 über die 154 Versuchstage liegen bei einem TS-Gehalt von 37,51 % der Frischmasse (FM), einen oTS-Gehalt von 33,20 % FM, einen oTS-Gehalt von 93,17 % der Trockensubstanz (TS) sowie organische Säuregehalte von 1,38 % FM und eine organische Substanz von 34,58 % FM.

Tabelle 55 zeigt einen Anfangs-pH-Wert von 7,77 und am Ende der Versuchsphase einen pH-Wert von 7,69. Wie bei Fermenter 1 und 2 ist eine erste Abnahme des pH-Wertes am 14. Versuchstag ersichtlich, die sich wie bei Fermenter 2 in keiner biologischen Beeinträchtigung äußert. Eine stärkere Abnahme des pH-Wertes ist ab dem 126. Versuchstag (7,24) zu erkennen. Daraufhin wurde die Raumbelastungssteigerung 14 täglich durchgeführt, was zu einer Erholung des Systems führte. Der pH-Wert normalisierte sich zum Ende der Versuchsphase auf 7,69.

Wie bei Fermenter 1 und 2 nahmen die Gehalte an Trockensubstanz, organischer Trockensubstanz und organische Substanz über die Versuchszeit zu. Mit 12,55 % TS wurde zum Ende des Versuchs ein TS-Gehalt erreicht, der als hoch, jedoch noch unbedenklich einzustufen ist.

Beim oTS-Gehalt wurden erstmals kritische Werte ab dem 126. Versuchstag mit $89,46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ erreicht. Dieser Bereich ist wieder als zu hoch einzuschätzen und steigt bis zum 154. Versuchstag auf $99,27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ an.

Die organischen Säuren befinden sich in einem Bereich von $1,17$ bis $2,72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$. Anzustreben sind Gehalte von organischen Säuren um $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$. Diese werden nur am 35. bis 119. Versuchstag erreicht. Die organischen Säuren spiegeln sich in der Zu- bzw. Abnahme des pH-Wertes wider. Die hohen Gehalte am 14. und am 126. Versuchstag deuten wie bei Fermenter 1 und 2 auf eine langsame Anreicherung hin, welche auch im FOS/TAC-Wert und den Biogas- und Methanwerten zu erkennen sind. Hemmungen sind nach Lemmer und Oechsner (2013) erst ab Gehalten von $> 4,0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FM}$ zu erwarten.

Die FOS/TAC-Werte in Fermenter 3 befinden sich bis zum 119. Versuchstag im Bereich der angegebenen Spanne und sind damit stabil und unkritisch zu bewerten. Die Zunahme ab dem 126. Versuchstag auf 0,46 deutet, wie bei den organischen Säuren, auf eine Anreicherung hin und zeigen eine beginnende Prozessstörung an (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Die Raumlaststeigerung von ca. $0,25 \text{ g oS} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ konnte wie bei Fermenter 1 und 2 nahezu eingehalten werden.

Im Verlauf der Versuchsphase erhöht sich die Biogasausbeute von $0,084$ auf $0,661 \text{ Nm}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$. Wie bei Fermenter 1 und 2 kann vom 84. bis zum 98. Versuchstag ein stabiler und effizienter Biogasprozess nachgewiesen werden. Ab dem 105 bis 112. Versuchstag zeigte sich ebenfalls ein noch vertretbarer Grenzlastbetrieb, der ab dem 119. bis 154. Versuchstag in eine Überlastung des Systems mündete, jedoch mit nicht so starken Auswirkungen bezüglich der biologischen Prozessparameter wie besonders bei Fermenter 1 und abgeschwächt bei Fermenter 2.

Tabelle 55: wöchentliche Analysenergebnisse vom Fermenter 3 während der Versuchsphase

Versuchszeit d	pH-Wert	TS - gehalt % TS ₁₀₅	oTS g·kg ⁻¹ FM	org. Säuren g·kg ⁻¹ FM	org Substanz g·kg ⁻¹ FM	FOS/TAC	Raumbelastung g oS·l ⁻¹ ·d	Biogasrate Nm ³ ·m ⁻³ ·d	Biogasausbeute Nm ³ ·kg ⁻¹ oS
1	7,77	5,56	39,98	1,81	41,80	0,16	-	-	-
7	7,54	5,76	41,81	1,99	43,80	0,20	0,25	0,02	0,084
14	7,21	5,81	42,62	2,72	45,33	0,27	0,47	0,12	0,246
21	7,42	5,73	41,46	2,01	43,46	0,18	0,72	0,31	0,432
28	7,62	5,47	39,88	1,83	41,70	0,16	0,97	0,49	0,508
35	7,56	6,10	44,72	1,52	46,24	0,15	1,22	0,72	0,587
42	7,42	6,36	47,34	1,32	48,65	0,17	1,46	0,88	0,606
49	7,37	6,64	50,04	1,29	51,34	0,16	1,71	1,03	0,602
56	8,06	7,08	53,68	1,40	55,09	0,14	1,95	1,18	0,606
63	7,63	7,08	53,10	1,43	54,52	0,15	2,18	1,31	0,601
70	7,54	7,67	58,25	1,37	59,62	0,14	2,43	1,49	0,614
77	7,73	7,76	58,72	1,29	60,01	0,16	2,68	1,66	0,621
84	7,88	8,14	61,09	1,36	62,46	0,12	2,93	1,87	0,638
91	7,37	8,58	65,42	1,27	66,69	0,14	3,18	2,10	0,661
98	7,78	8,88	66,95	1,40	68,35	0,14	3,43	2,13	0,621
105	7,87	9,35	71,23	1,36	72,59	0,16	3,68	2,24	0,609
112	7,57	9,72	74,26	1,26	75,52	0,16	3,91	2,36	0,604
119	7,72	10,01	76,22	1,61	77,83	0,19	4,16	2,43	0,584
126	7,24	10,71	86,82	2,64	89,46	0,46	4,41	2,30	0,522
133	7,23	11,08	86,02	1,17	87,18	0,29	4,66	2,68	0,575
140	7,26	11,44	89,35	1,52	90,87	0,23	4,66	2,65	0,567
147	7,24	12,18	96,25	1,36	97,61	0,31	4,91	2,60	0,529
154	7,69	12,55	99,27	1,53	100,80	0,23	4,92	2,78	0,566

Die Tagesgasmengen und die Biogasgehalte des Fermenters 3 während der Versuchsphase sind in Abbildung 17 dargestellt. Die Biogasausbeute nimmt täglich kontinuierlich mit der Erhöhung der Fütterungsmenge zu und weist gegenüber Fermenter 1 und 2 den stärksten Anstieg und das höchste Niveau auf. Anders wie bei Fermenter 1 und 2 ist schon ab dem 119. Versuchstag eine beginnende Prozessstörung mit einer geringeren verlaufenden Abnahme der Biogasausbeute und des Methangehaltes und einer Zunahme der Kohlendioxidgehalte zu erkennen. Diese hebt sich jedoch um den 126. Versuchstag auf.

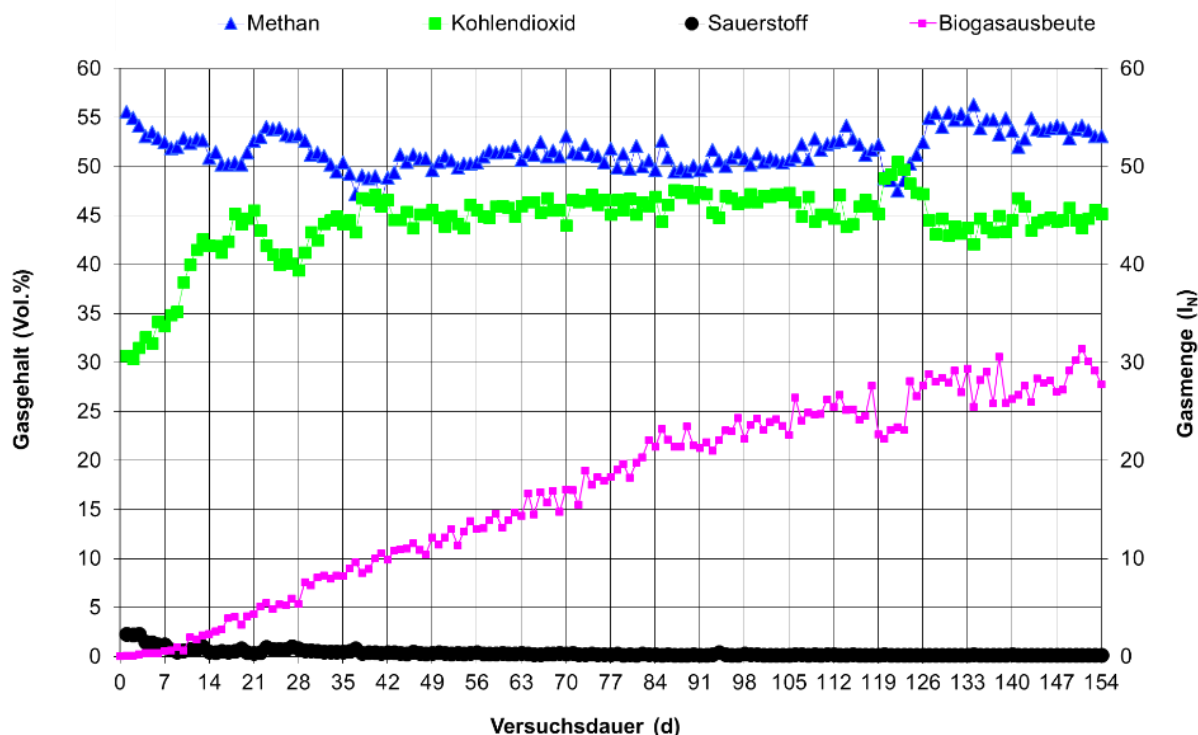


Abbildung 17: Gasmengen und Gasqualitäten vom Fermenter 3 während der Versuchsphase

Der Sauerstoffgehalt konnte wie bei Fermenter 1 und 2 ab dem 7. Versuchstag auf < 1 Vol. % reduziert werden. Die Kohlendioxid- und die Methangehalte näherten sich am 35. Versuchstagen und ab dem 119. Versuchstag deutlich an. Die Methangehalte liegen mit durchschnittlich 52 Vol. % auf einem höheren Niveau als Fermenter 1 und 2.

Die Kohlendioxidgehalte verhalten sich wie bei Fermenter 1 und 2 entgegengesetzt proportional zu den Methangehalten und beschreiben auch bei Fermenter 3 einen typischen Verlauf.

Ein Auszug der wichtigsten Gärssäuren und der Gesamtstickstoff- und der Ammoniumstickstoffgehalte für 4 Untersuchungstermine während der Versuchsphase für Fermenter 3 ist in Tabelle 56 dargestellt.

Tabelle 56: Essigsäure, Buttersäure, Essigsäureäquivalent (ES äq.), Gesamtstickstoff (N gesamt) und Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) in der Versuchsphase von Fermenter 3

Versuchstag	Essigsäure $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FM}$	Buttersäure $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FM}$	ES äq. $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FM}$	N gesamt $\text{kg}\cdot\text{m}^3$	$\text{NH}_4\text{-N}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^3$
1. VT	0,08	< 0,03	0,21	3,54	1,90
63. VT	0,10	< 0,03	0,21	3,43	1,96
112. VT	0,21	< 0,03	0,33	4,51	1,76
133. VT	-	-	-	4,56	1,69
154. VT	0,67	< 0,03	0,82	5,16	1,78

Bei den Gehalten an Essigsäure kam es während der Versuchszeit zu einer Zunahme von 0,08 auf 0,67 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FM}$ (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die Essigsäuregehalte sind jedoch als gering zu bewerten. Nach Kaiser et al. (2008) sind Hemmungen ab 3.000 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\text{ FM}$ zu erwarten. Die Gehalte an Buttersäure blieben unverändert unter < 0,03 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FM}$ und nach Kaiser et al. (2008) ebenfalls unbedenklich. Das Essigsäureäquivalent ist von 0,21 auf 0,82 angestiegen und ist ebenfalls unproblematisch nach Kaiser et al. (2008), der als Grenzwert 4.000 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\text{ FM}$ angibt. Der Gesamtstickstoffgehalt nimmt während der Versuchsphase in Fermenter 3 von 3,54 auf 5,16 $\text{kg}\cdot\text{m}^3$ zu. Beim Ammoniumstickstoff kam es zu einer Abnahme von 1,90 auf 1,78 $\text{kg}\cdot\text{m}^3$.

Das Substrat L265/ Smoothi siliert mit einem Siliermittel konnte uneingeschränkt in einem Raumlastbereich von 2,93 bis 3,91 g oS·l⁻¹·d gefahren werden, ohne dass es zu einer Prozessstörungen kam. Parallel dazu weist das Substrat von Fermenter 3 die höchsten Biogasausbeuten im Vergleich zu Fermenter 1 und 2 kontinuierlich auf.

Zusammenfassung kontinuierlicher Versuch mit Silagen aus Andenlupinen und Mais

In der Versuchsphase konnte mit allen 3 untersuchten Gemengesubstraten eine wöchentliche Raumlaststeigerung von 0,25 g oS·l⁻¹·d realisiert werden. Im Fermenter 1 kam es mit dem Andenlupinen-Mais Gemenge frisch ab einer Raumlast von 4,04 g oS·l⁻¹·d zu prozessbiologischen Problemen. Fermenter 2 zeigte erste Prozessstörungen ab einer Raumlast von 4,21 g oS·l⁻¹·d. Fermenter 3 lief bis zum 126. Versuchstag störungsfrei durch und erreichte damit eine Raumlast von 4,16 g oS·l⁻¹·d. Döhler et al. (2013) beschreibt eine optimale Raumlast von Gülle-NawaRo-Anlagen mit 2,5 g oS·l⁻¹·d. Diese Raumlast konnte mit allen drei untersuchten Substraten in Monovergärung problemlos erreicht werden. Es kam zu einer geringfügigen Schaumbildung, die aber keine negativen Auswirkungen hatte. Eine Ursache für die Schaumbildung könnte eine Anreicherung von Stickstoff sein. Der Effekt der Silierung und insbesondere der des Zusatzes des Siliermittels wirkte sich positiv auf die Stabilität des Biogasprozesses und der Biogas- sowie Methanpotentiale aus.

1.10 Saatgutvermehrung von Andenlupine und Weißer Lupine (AP 10)

Die Prüfglieder der Andenlupine wurden in mehreren Vermehrungszyklen in Südamerika (Chile) erfolgreich vermehrt. Durch die Vermehrung der legumen und nicht an die klimatischen Vorgaben Mitteleuropas adaptierten Prüfglieder bei einem südamerikanischen Züchtungsunternehmen, sollte die Verfügbarkeit von Saatgut zur Durchführung der Versuche an allen Projektstandorten gesichert werden. Besonders eine bei den pflanzen genetischen Ressourcen vielfach beobachtete eingeschränkte Keimfähigkeit des meist aus Südamerika stammenden, dort vermehrten und geernteten Saatguts konnte erst durch zusätzliche Vermehrungsschritte größtenteils ausgeglichen werden. Es gelang rechtzeitig, die für die Durchführung der geplanten, umfassenden Feldprüfungen im 2. und 3. Projektjahr notwendigen Saatgutmengen der LUA-Prüfglieder durch deren Vermehrung zu sichern. Die Vermehrung des leistungsstärksten Prüfgliedes der Andenlupine erbrachte zunächst jedoch nicht die für einen zusätzlichen Demonstrationsversuch notwendige Erntemenge. Durch eine weitere, außerplanmäßige dabei jedoch sehr erfolgreiche Vermehrung konnte das für die Durchführung eines Demonstrationsanbaus erforderliche Saatgut rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden, sodass dieser nach dem Erreichen der verschiedenen Anforderungskriterien (Gesamttrockenmasseertrag etc.) an zwei Standorten (Praxisbetriebe Dummestorf (MV) und Bielefeld-Jöllenbeck (NRW)) etabliert werden konnte.

Aufgrund der klimatischen Probleme, die im Jahr 2019 im fränkischen Triesdorf (Trockenheit) auftraten, erzielte der in diesem Jahr dort durchgeführte Vermehrungsanbau von LUW-Stämmen wenig Erntegut mit der für wissenschaftliche Versuche erforderlichen Qualität. Vorhandene Restsaatmengen sicherten jedoch die Durchführung sowohl der geplanten Versuche für die LUW/Hafer-Gemengeanbauversuche an allen Versuchsstandorten in den Folgejahren als auch der vorgesehenen Vermehrung dieser Stämme ab. Somit stehen nahezu alle LUW-Prüfglieder für weitere Arbeiten bzw. notwendige, vorgelagerte Vermehrungsschritte für weitere Forschungsarbeiten zur Verfügung.



Abbildung 18: Vermehrungsanbau Chile

1.11 Demonstrationsanbau von Mais mit Andenlupinen auf Praxisbetrieben

Im 3. Projektjahr wurde im Rahmen von AP 11 beim Übertreffen von 3 im Vorfeld bereits definierter Abbruchkriterien erstmals an 2 divergenten Standorten ein Demonstrationsanbau von Andenlupinen-Mais-Gemengen auf Praxisbetrieben durchgeführt. Die Abbruchkriterien umfassten den Gesamttrockenmasseertrag, die Biogasausbeute und die Silierfähigkeit. Alle definierten Grenzwerte wurden in den Projektjahren 1 bzw. 2 übertroffen.

Die beiden Demonstrationsanbauten erfolgten auf einem Standort in Dummerstorf (ca. 14 km entfernt von Groß-Lüsewitz) (Abbildung 20) unter norddeutschen und maritim geprägten Anbaubedingungen sowie bei einem Landwirtschaftlichen Betrieb in Bielefeld-Jöllenbeck. Dieser Standort wies dabei Anbaubedingungen des mitteldeutschen Raums auf und repräsentierte diesen Bereich im durchgeführten Versuchsanbau unter Praxisbedingungen. Dabei wurden in Dummerstorf LUA 3 und die Maishybriden Amaroc bzw. Agro Espirito sowie in Bielefeld LUA 1 und wiederum mit den Maishybriden Amaroc bzw. Agro Espirito zusammen als Gemenge und in Reinsaat angebaut. In Dummerstorf bestand die Gemengeanbaufläche pro Kombination aus jeweils ca. 0,3 ha. Die Gemengeflächen in Bielefeld umfassten jeweils nahezu 0,4 ha. Je Standort entwickelten sich beide Gemenge sehr gut und wurden von den beteiligten Unternehmen mit in die Silagen eingebracht.

Insgesamt wurde der Demonstrationsanbau von Seiten der beiden Praktiker jeweils als positiv und erfolgreich bewertet. Leider war aufgrund der zügigen und schwer vorhersehbaren Beerntung der Flächen keine Probennahme zur genaueren Bestimmung des Ertrages möglich.

Als zukünftiges Problem wird die Saatgutverfügbarkeit der Andenlupine gesehen. Um dem zu begegnen, wurde in der Projektverlängerung die Möglichkeit der Vermehrung der Andenlupine unter Bedingungen des süddeutschen Raumes aufgenommen und im Anbaujahr 2022 geprüft.



Abbildung 19: Demonstrationsanbau Bielefeld-Jöllenbeck, Aussaat



Abbildung 20: Ansicht des Demonstrationsanbaus mit dem Gemengeanbau von Andenlupine und Mais im Projekt LuMi-opt am Standort Dummerstorf (Foto: JKI-GL).

2 Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

nicht zutreffend

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Nutzung der ökosystemaren Leistungen der Lupine kann zukünftig einen wichtigen Beitrag für eine zukunftsgerechte Landwirtschaft auf dem Energiepflanzensektor leisten. Aus wirtschaftlicher Sicht liegt eine realistische Chance nach der Beendigung des Vorhabens in der mittelfristigen Erschließung einer neuen, innovativen Nutzungsrichtung für einen deutlich gesteigerten Anbau von Lupinen. Dies würde zusätzliche Argumente liefern für die Erschließung neuer, idealerweise großer Anbauflächen für Lupinen als legume Energiepflanzen. Diese würden aufgrund der mit ihrem Anbau verbundenen kostenneutralen Einbringung der ökosystemaren Leistungen *per se* zu einer Verbesserung der landwirtschaftlichen Kulturflächen führen. Die aufgrunddessen zu verzeichnenden wirtschaftlichen Impulse einer dann nachhaltigeren Energiemaisproduktion in Verbindung mit einer Steigerung der Kulturartendiversität in der landwirtschaftlich geprägten Kulturlandschaft können eine Beförderung des Saatgutsektors zur Folge haben. Das Vorhaben ermöglicht somit die Einbindung von Leguminosen in Fruchtfolgen und eine nachhaltigere Steigerung der Kulturartendiversität. Durch die Identifikation und Bewertung leistungsfähiger Lupinen zur Biomasseproduktion im Gemengeanbau wird es aus wirtschaftlicher Sicht zur Erschließung einer innovativen, idealerweise auf einer umfangreichen Anbaufläche praktizierten, Nutzungsrichtung von Lupinen als legume Energiepflanzen kommen. Neben der Beförderung des Saatgutsektors durch nachhaltigere und gesellschaftlich besser akzeptierte Energiefruchtfolgen unter Einbindung von Leguminosen könnten diese auch bei der zukünftigen Ausgestaltung der agrarpolitischen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Sie würden dann über Fördermaßnahmen im Rahmen der GAP und der Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz zu veränderten, auch ökonomisch vertretbaren Anbauentscheidungen von Landwirtinnen und Landwirten führen. Des Weiteren würde eine nachgewiesene Eignung von züchtungsmethodisch optimierten Gemengen aus Anden- bzw. Weißen Lupinen und Mais bzw. Hafer zur energetischen Nutzung auch angrenzende Forschungs- und Wirtschaftsbereiche wie die des Pflanzenbaus und des Biogassektors nachhaltig stärken sowie in diesen Disziplinen neue bislang nicht verfolgte Forschungsansätze setzen und bisher bekannte und verbreitete Methoden durch neue Aspekte in Frage stellen.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Aufgrund des Neuheitscharakters der Projektarbeiten sind die wissenschaftlichen Erfolgsaussichten gegeben. Eine inzwischen vorhandene, allgemeine Akzeptanz ergänzender Kulturarten in neuen Fruchtfolgen wie z.B. Lupinen ist für die europäische Landwirtschaft richtungsweisend und positiv zu bewerten. Aus den Ergebnissen des Projektes können sowohl für den Gemengeanbau von Andenlupinen mit einer etablierten Nutzpflanze, dem Mais, als auch für Gemenge aus Weißer Lupine und Hafer wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Diese behalten auch im Rahmen von Energiefruchtfolgen ihre Gültigkeit und können somit mittel- bis langfristig verfolgt werden. Die Projektarbeiten führten anteilig zu klaren Ergebnissen mit daraus gezogenen Schlussfolgerungen oder es ergeben sich aus ersten Ergebnissen eine Vielzahl weiterführender neuer Fragestellungen, die sich z. B. mit der Interaktion der Gemengepartner oder einer Anbauverbesserung durch eine optimierte Düngungsstrategie beschäftigen. Daraus ergeben sich Fragen zur zielgerichteten Vorhersage der Gemengeleistung sowie zu dem Zusammenwirken verschiedenster genetischer Komponenten. Gegebenenfalls stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob der Gemengeanbau von Weißen Lupinen mit Hafer eine Option für ein Zweikulturnutzungssystem sein könnte, um die Gesamtproduktivität weiter zu erhöhen.

Die Publikation der wichtigsten wissenschaftlichen Ergebnisse des Verbundvorhabens wird angestrebt. Adressiert werden hier internationale Fachjournale mit pflanzenbaulicher und bioökonomischer Ausrichtung.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Wie erwartet, weist der bislang noch nicht intensiv bearbeitete Gemengeanbau von Andenlupinen und Mais bzw. Weißer Lupine und Hafer ein hohes wissenschaftliches und technisches Anschlusspotenzial auf. Die wissenschaftlichen Erfolgsaussichten sichern bereits heute aufgrund des Neuheitscharakters für anschließende Projektarbeiten richtungsweisende Ergebnisse. Noch nicht abschließende Antworten zu Fragen der Anbauoptimierung, der Interaktion diversifizierter Spezies im Gemenge sowie dem Einfluss genetischer Komponenten auf das Interagieren der Gemengepartner, erfordern weitere lösungsorientierte Forschungsanstrengungen. Diese werden auf den Gebieten der Züchtungs- und Anbaumethodik sowie der Futtermittelanalytik und der Silierung der produzierten Biomasse gesehen.

Der hohe Neuigkeitscharakter sowie hohe Innovationsgrad der Arbeiten innerhalb der agrarwissenschaftlichen Forschung zeigt sich am Beispiel der Andenlupine und Mais in der Kombination einer in der europäischen Landwirtschaft noch gänzlich unbekannten Art mit einer im gleichen Bereich etablierten Energiepflanze. Den dargelegten Arbeiten wird demnach ein hohes bis sehr hohes wissenschaftliches und technisches Anschlusspotenzial attestiert.

Zudem könnte dabei auch die Frage der Weiterentwicklung zu Zweikulturnutzungssystemen mit einer höheren Gesamtproduktivität von Interesse sein, um die Substraterzeugung für eine nachhaltigere, regenerative Energieerzeugung zu optimieren.

3 Erkenntnisse von Dritten

Es liegen derzeit keine Erkenntnisse von Dritten zu diesem Thema vor.

4 Veröffentlichungen

Projektbezogene Veröffentlichungen

- Böhm H, Höppner F, Holzgreve H, Wiedow D, Roux S (2023) Gemengeanbau von Mais und Andenlupine für die Bioenergieerzeugung. In: Kaul H-P, Neugschwandtner RW, Francke-Weltmann L (eds) 64. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 33, Göttingen, Germany, pp 381-382
- Holzgreve H, Böhm H (2021) Intercropping maize with Andean lupin: A view to the roots. Aspects of applied Biology 146:157-164
- Holzgreve H, Böhm H, Roux S (2021) Mit Weißer Lupine und Hafer aufs Ganze – Optimierung der Saatstärkenverhältnisse im Gemenge für GPS oder Biogas im ökologischen Landbau. In: Stützel H, Fricke A (eds) 63. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 32, Rostock, Germany, pp 74-75
- Holzgreve H, Böhm H, Roux S (2023) Andenlupine trifft Mais – Einfluss des Gemengeanbaus auf Wurzeln und Wasser. In: Bibic V, Schmidtke K (eds) One step ahead - einen Schritt voraus! Beiträge zur 16. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Frick (CH), FiBL Campus, 07.-10. März 2023, pp 246-247
- Holzgreve H, Böhm H, Roux S (2023) Do the roots make a difference in lupin intercropping systems? In: International Lupin Conference XIV "Breeding, cultivation and use of lupins for a sustainable agriculture - recent developments", Rostock, Germany, 19.-23. June 2023, p 82
- Höppner F, Roux S (2021) Andenlupine mit Mais Silierfähigkeit und Qualität. In: Stützel H, Fricke A (eds) 63. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 32, Rostock, Germany, pp 179-180

- Höppner F, Roux S, Böhm H (2023) Production of whole plant silage in mixed cultivation of Andean lupine with maize. In: International Lupin Conference XIV "Breeding, cultivation and use of lupins for a sustainable agriculture - recent developments", Rostock, Germany, 19.-23. June 2023, p72
- Höppner F, Wiedow D, Roux S (2023) Gemengeanbau von Mais mit Andenlupine – Ganzpflanzensilierung und Biogasausbeute. In: Kaul H-P, Neugschwandtner RW, Francke-Weltmann L (eds) 64. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 33, Göttingen, Germany, pp 397-398
- Roux S, Höppner F, Böhm H, Holzgreve H, Wiedow D (2022) Andenlupine und Mais im Gemenge. Landwirtschaft ohne Pflug (06/2022): 30-35
- Roux S, Höppner F, Holzgreve H, Wiedow D, Böhm H (2021) Andenlupine und Mais – gezielt kombiniert, im Gemenge ein starkes Team. In: Stützel H, Fricke A (eds) 63. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 32, Rostock, Germany, pp 20-21
- Roux S, Höppner F, Holzgreve H, Wiedow D, Böhm H (2023) Intercropping for bioenergetic use: Andean lupin and maize. In: International Lupin Conference XIV "Breeding, cultivation and use of lupins for a sustainable agriculture - recent developments", Rostock, Germany, 19.-23. June 2023 p18
- Wiedow D, Beck M, Roux S, Burgstaller J (2021) Lupinen im Mischfruchtanbau – eine Alternative als Biogas-substrat? In: Stützel H, Fricke A (eds) 63. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 32, Rostock, Germany, pp 177-178

Projektbezogene Vorträge

- Holzgreve H (2021) Mit Weißer Lupine und Hafer aufs Ganze – Optimierung der Saatstärkenverhältnisse im Gemenge für GPS oder Biogas im ökologischen Landbau. 63. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Rostock.
- Böhm H (2021) Andenlupine und Mais – gezielt kombiniert, im Gemenge ein starkes Team. 63. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Rostock.
- Holzgreve, H (2022) Weiße Lupinen im Gemenge mit verschiedenen Haferarten/-sorten. 1. Virtueller Feldtag des Thünen-Institut für Ökologischen Landbau, Online, 20. Januar 2022.
- Holzgreve, H (2022) Gemengeanbau von Mais und Andenlupinen. 2. Virtueller Feldtag des Thünen-Institut für Ökologischen Landbau, Online, 10. Februar 2022.
- Böhm H, Höppner F, Holzgreve H, Wiedow D, Roux S (2023) Andenlupinen – Anbau im Gemenge mit Mais zur Biomasseerzeugung. Vortrag auf der Jahrestagung der Gesellschaft zur Förderung der Lupine e. V. am 18.01.2023 in Teltow/Ruhlsdorf.
- Höppner F, Roux S (2023) Silierung von Andenlupinen-Mais-Gemengen. Vortrag auf der Jahrestagung der Gesellschaft zur Förderung der Lupine e. V. am 18.01.2023 in Teltow/Ruhlsdorf.
- Wiedow D, Burgstaller J (2023) Biogasausbeute von Andenlupinen-Mais-Gemengen. Vortrag auf der Jahrestagung der Gesellschaft zur Förderung der Lupine e. V. am 18.01.2023 in Teltow/Ruhlsdorf.

Projektbezogene Filme

- Mit Weißer Lupine und Hafer aufs Ganze. Film der Arbeitsgruppe Acker- und Futterbau des Thünen-Institut für Ökologischen Landbau, <https://vimeo.com/showcase/9198423>, 2022.
- Mais und Andenlupine – ein gutes Team? Film der Arbeitsgruppe Acker- und Futterbau des Thünen-Institut für Ökologischen Landbau, <https://vimeo.com/showcase/9198423>, 2022.

ANHANG

Darstellung nur noch von ausgewählten Ergebnissen, die im vorderen Teil kaum dargestellt wurden oder gar nicht dargestellt wurden

Teilvorhaben 1: Julius Kühn-Institut

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

In Teilvorhaben 1 wird die Planung, Durchführung, Auswertung und Dokumentation von Feldversuchen beschrieben, bei denen es sich um Feldversuche an den Standorten Groß Lüsewitz und Braunschweig (jeweils zugehörig zum Julius Kühn-Institut), sowie bei den 3- bzw. 4- ortigen Feldprüfungen, zusätzlich um die Standorte Trenthorst und Triesdorf handelt. Dargestellt sind die Ergebnisse der Versuche zu den Arbeitspaketen 2.3 bis 2.5 und 3.1/3.2 sowie der Arbeitspakete 5.1 und 6.2 im gemeinsamen Teil des Abschlußberichtes, der sich hierbei mit der Bewertung unterschiedlicher Kombinationen von Andenlupine und Mais bzw. Weißer Lupine und Hafer im Gemengeanbau sowie zur Ganzpflanzensilierung beschäftigt. Hierzu wurden anhand vom Versuchsanbau exemplarisch gewählter Prüfglieder Untersuchungen durchgeführt, um die Silierfähigkeit und Silagequalität einschließlich des Futterwertes der Anbauten auch unter Einsatz von Siliermitteln zu bewerten. Neben der Durchführung von reinen Feldprüfungen erfolgte innerhalb von Teilvorhaben 1 zudem die Organisation und technische Abwicklung der Saatgutvermehrung sowie die Saatgutversorgung aller an den Feldversuchen beteiligten Standorte. Die erzielten Ergebnisse der Arbeitspakete 4.1 (GL) und 8 (BS), die im Rahmen von Teilvorhaben 1 exklusiv von einzelnen Partnerinnen und Partnern bearbeitet wurden, werden im Folgenden berichtet.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 4.1

In Arbeitspaket 4.1 wurde untersucht, ob die 5 verwendeten Andenlupinenherkünfte im Gemengeanbau mit Mais zeitlich vor diesem ausgesät werden können und so einen größeren Beitrag zu einem signifikant höheren Gesamttrockenmasseertrag bzw. Methanertrag leisten können. Aufgrund einer deutlich ausgeprägten Kühletoleranz im Vergleich zu Mais, was nicht zuletzt an der physiologischen Konstitution von Mais als C4-Pflanze begründet liegt, könnten Andenlupinen z. B. im norddeutschen Raum bei bestehender Befahrbarkeit der Ackerfläche bereits in der ersten Aprilhälfte und somit in Abhängigkeit von der Anbauregion 1-3 Wochen vor dem Mais ausgesät werden. Dies würde dann jedoch eine zweite Überfahrt der Gesamtfläche erfordern und somit zu einer erheblichen Kostensteigerung des gesamten Systems führen. Zur Überprüfung der Wirkung dieser an die Kühletoleranz der Andenlupine angepassten Methode wurden deshalb in AP 4.1 verschiedene Andenlupinen (n=5) vergleichend geprüft, wobei der Gesamttrockenmasseertrag (dt ha^{-1}) auch hier das zu maximierende Zielmerkmal darstellte. Die Frage sollte geklärt werden, ob der Gesamttrockenmasseertrag durch die Nutzung der höheren Kühletoleranz der Andenlupine gesteigert werden kann. Hierzu wurden neben der etablierten Methode mit zeitgleicher Aussaat zwei gegenüber der Partnerspezies Mais vorgezogene Aussaattermine (1 bzw. 2 Wochen) der Andenlupine gewählt und wie geplant im Rahmen von AP 4.1 am JKI Groß Lüsewitz geprüft.

Zur Beantwortung der Versuchsfrage, ob die Andenlupine als ein Partner in dem 2 Arten umfassenden Gemenges aufgrund ihrer partiellen Kühletoleranz im Frühjahr zeitlich vor der Partnerspezies Mais ausgesät werden kann und dadurch der GTM-Ertrag des Gemenges steigt, wurden mit 5 Andenlupinen exemplarisch an 3 unterschiedlichen Saatterminen am JKI in Groß Lüsewitz geprüft. Um den Einfluss des Mais *per se* und eine mögliche Interaktion zwischen den beiden Prüfgliedern Mais und Andenlupine auszuschließen, wurde in allen Versuchen einheitlich die Hybride AGRO ESPIRITO als Maispartner verwendet.

Dabei wurden die Andenlupinen gemeinsam mit dem Mais bzw. aufgrund der erhöhten Kühletoleranz 1- oder 2 Wochen vor dem Mais ausgesät. Durch eine frühere Aussaat verlängerte sich die Vegetationszeit der Andenlupinen in diesem Versuch. Die geerntete Gesamttrockenmasse des Gemenges wurde mit den Ergebnissen der Methode einer gleichzeitigen Aussaat der beiden Partner verglichen. Der Versuch wurde 3 Jahre in je 2 Wiederholungen und 3 Aussaatvarianten der 5 exemplarisch in diesem Versuch eingesetzten Andenlupinen angelegt und jeweils pro Projektjahr bzw. als 3-jährige Serie mit PLABSTAT ausgewertet. Vor der Verrechnung erfolgte eine Transformation der Datensätze. Zu diesem Zweck wurde der natürliche Logarithmus der Daten gebildet. In Tabelle 57 sind die erreichten mittleren GTM-Erträge jedes Saattermins der einzelnen Jahre sowie der 3-jährigen Serienverrechnung dieser Daten dargestellt.

Tabelle 57: Mittlerer GTM-Ertrag von 5 Andenlupinen zu jeweils 3 unterschiedlichen Saatzeitpunkten (V1 bis V3) der Andenlupinen in Kombination mit der Maishybride AGRO ESPIRITO in den Jahren 2019, 2020 und 2021 am Standort Groß Lüsewitz und die Resultate der 3-jährigen Betrachtung dieser Versuchsdaten in der Serienverrechnung

Jahr	V1=...1 Woche früher als Mais	V2=...2 Wochen früher als Mais	V3=... zeitgleich mit Mais
2019	91,6	99,4	119,0
2020	122,1	118,3	135,6
2021	100,8	103,0	153,7
Mittel/Signifikanz Serienverrechnung 2019 - 2021	104,7	106,9	136,1/7,99

Bei der in Tabelle 57 dargestellten 3-jährigen Serienverrechnung finden mehrere möglichst differenzielle d.h. idealerweise unterschiedlich auf die Genotypen wirkende Umwelten Berücksichtigung. Bei der Verrechnung der Daten werden solche Effekte sichtbar, die alleine nicht immer zu einer signifikanten Differenzierung in der Merkmalsausprägung führen oder aber auf Jahreseffekte zurückgehen. In ihrer mehrjährigen Betrachtung ist dies bei solchen, quantitativ vererbten Merkmalen eher der Fall. Bei einem quantitativ vererbten Merkmal, wie es der GTM-Ertrag oder der Kornertrag jeweils ist, ist eine kontinuierliche Variation des betrachteten Merkmals aufgrund des Zusammenwirkens mehrerer bis vieler Gene mit jeweils einem häufig sehr kleinen Teileffekt, eher der Normalfall, denn außergewöhnlich.

Es zeigte sich in der Serienverrechnung der Versuchsjahre 2019, 2020 und 2021, dass die Saatzeitvarianten eine hochsignifikante Varianzursache gewesen sind. Die GTM-Erträge fielen signifikant höher aus, wenn die beiden Gemegepartner zeitgleich ausgesät wurden. Die Saatzeitpunkt-Genotyp Interaktion zeigte keine Signifikanz, so dass aus dem Set der in AP 4.1 geprüften LUA kein Prüfglied für eine gestaffelte Aussaat empfohlen werden kann. Der Mais machte im Erntegut einen Anteil von 39 % (LUA 2 Wochen früher gesät), 44 % (LUA 1 Woche früher gesät) und 67 % (gleichzeitige Aussaat) der Gemegebiomasse aus. Dies unterstreicht die bereits im 1. Projektjahr formulierte Hypothese, dass der Konkurrenzdruck einer früher ausgesäten Andenlupine sich durch die damit verbundene Reduktion des Maisanteils für die Gesamttrockenmasseproduktion als kontraproduktiv erweist.

Arbeitspaket 8

In Arbeitspaket 8 wurden von LUA-Mais (AP 2.3-2.5 u. 3), LUW-Hafer (AP 6) und LuMi-Best Futterwertuntersuchungen durchgeführt. Bestimmt wurden die Rohnährstoffe Rohprotein (XP), Stärke (XS), Rohfaser (XF) sowie die enzymlösliche Organische Substanz (ELOS). Bei der statistischen Verrechnung ergaben sich bei allen Untersuchungsparametern für LUA-Mais und LUW-Hafer 3-fache Wechselwirkungen zwischen Jahr, Prüfglied und Prüfort, für LuMi-Best 2-fache Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Prüfglied (Tabelle 58).

Tabelle 58: Signikanztabelle für Rohnährstoffe (XP=Rohprotein, XS=Stärke, XF=Rohfaser, ELOS=Enzymlösliche Organische Substanz) und ELOS der Wechselwirkungen von den Versuchsansätzen LUA-Mais und LUW-Hafer (Jahr $\times$ Prüfglied $\times$ Prüfort) sowie LuMi-Best (Umwelt $\times$ Prüfglied), (SAS 9.4, ($p < 0,05$))

Versuchsansatz	XP	XS	XF	ELOS
PR > F				
LUA-Mais, AP 2.3-2.5	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
LUA-Mais, AP 3	<0,0001	0,0016	<0,0001	0,0001
LUW-Hafer, AP 6	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
LUA-Mais, LuMi-BEST	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Somit unterlagen alle Parameter keiner gerichteten Veränderung. Dennoch ließen sich aus den ermittelten Analysenergebnissen Aussagen ableiten, die aus den folgenden Abbildung 21 bis Abbildung 31 ersichtlich werden. Im Reinsaatenanbau hatten die Prüfglieder der Andenlupine gegenüber den Maisprüfgliedern deutlich höhere Gehalte an XP und XF und dagegen niedrigere an ELOS aufzuweisen, XS war nur sehr minimal vorhanden (Abbildung 21 bis Abbildung 31). Ein gleiches Bild ergab sich bei den Reinsaatenprüfgliedern der Weißen Lupine gegenüber den Haferprüfgliedern, nur waren die Rohfasergehalte zwischen beiden Prüfgliedern eher ausgeglichen (Abbildung 29). Alle Prüfglieder der Gemengesaaten orientierten sich in ihren Gehalten an den Werten der jeweilig beteiligten Kombinationspartner und unterlagen dem Einfluss des pflanzlichen Trockenmasseanteils, welcher jeder Partner in das Gemenge mit einbrachte (vergl. **Fehler! V erweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, Tabelle 11, Tabelle 11, u. **Fehler! V erweisquelle konnte nicht**

gefunden werden.). Die Streuung der Gehalte der Untersuchungsparameter war innerhalb eines Prüfgliedes oft hoch und es war auch eine Variabilität zwischen den Prüfgliedern vorhanden. Dabei war in die Betrachtung ebenfalls mit einzubeziehen, dass alle Prüfglieder zu einem sich an Leitsorten orientierten zeitgleichen Termin geerntet wurden, welcher für viele Prüfglieder häufig dann nicht der optimalen Reife einer Ganzpflanzensilierung entsprach. Bei den Gemengesaaten von LUA-Mais und LuMi-Best war häufig Mais der dominierende Kombinationspartner. Insofern orientierten sich die Werte aller Untersuchungsparameter am Maisniveau. Dies war nur dann nicht der Fall, wenn höhere trockenmassebasierte LUA-Anteile mit Anbau realisiert wurden und die Andenlupine damit einen größeren Einfluß bekam. Dabei bestand eine Abhängigkeit zum Prüfort bzw. zur Umwelt, wie aus den Abbildungen Abbildung 25 bis Abbildung 31 zu erkennen ist. Hierbei stach der Prüfort Groß Lüsewitz (JKI-GL) heraus, welcher beispielsweise bei der Gemengesaat der Arbeitspakete AP 2.2-2.5 im Mittel LUA-Anteile von 48,9% in 2019 und 37,3% in 2020 erzielte. Bei den anderen beiden Prüforten lagen die Anteile im Schnitt beider Jahre in Braunschweig (JKI-BS) nur bei 11% und in Trenthorst (TI-OL) bei 12,6%. Auch bei den anderen Arbeitspaketen 3 und LuMi-Best waren die LUA-Anteile in JKI-GL entsprechend höher. Für die LUW-Hafer-Gemenge galt der zuvor beschriebene gleiche Sachverhalt. Dadurch, dass die jeweiligen Kombinationspartneranteile beim Gemengeanbau etwas ausgeglichener waren, pendelten sich die Werte der Untersuchungsparameter mittig beider Kombinationspartner ein, wenn wie bei XP, XS und ELOS Werteunterschiede in den Gehalten bei den jeweiligen Reinsaaten vorhanden waren. Auch war teilweise wieder eine große Wertestreuung zu erkennen. Dagegen lagen die RF-Gehalte der Gemengekombinationen entsprechend der Reinsaatenprüfglieder auf vergleichbarem Niveau und der Anteilseinfluss der Kombinationspartner war unbedeutend. Leichte Unterschiede in den Werten waren zwischen den Prüforten erkennbar, welche wohl wie auch schon bei den LUA-Gemengesaaten in Zusammenhang mit den in den Beständen realisierten LUW-Anteilen zu sehen waren (Abbildung 29). Während diese in JKI-GL und JKI-BS im Mittel der Jahre und Prüfglieder jeweils um 50% lagen, waren dagegen in TI-OL und Triesdorf (LLA-TD) mit knapp 30% weniger etabliert.

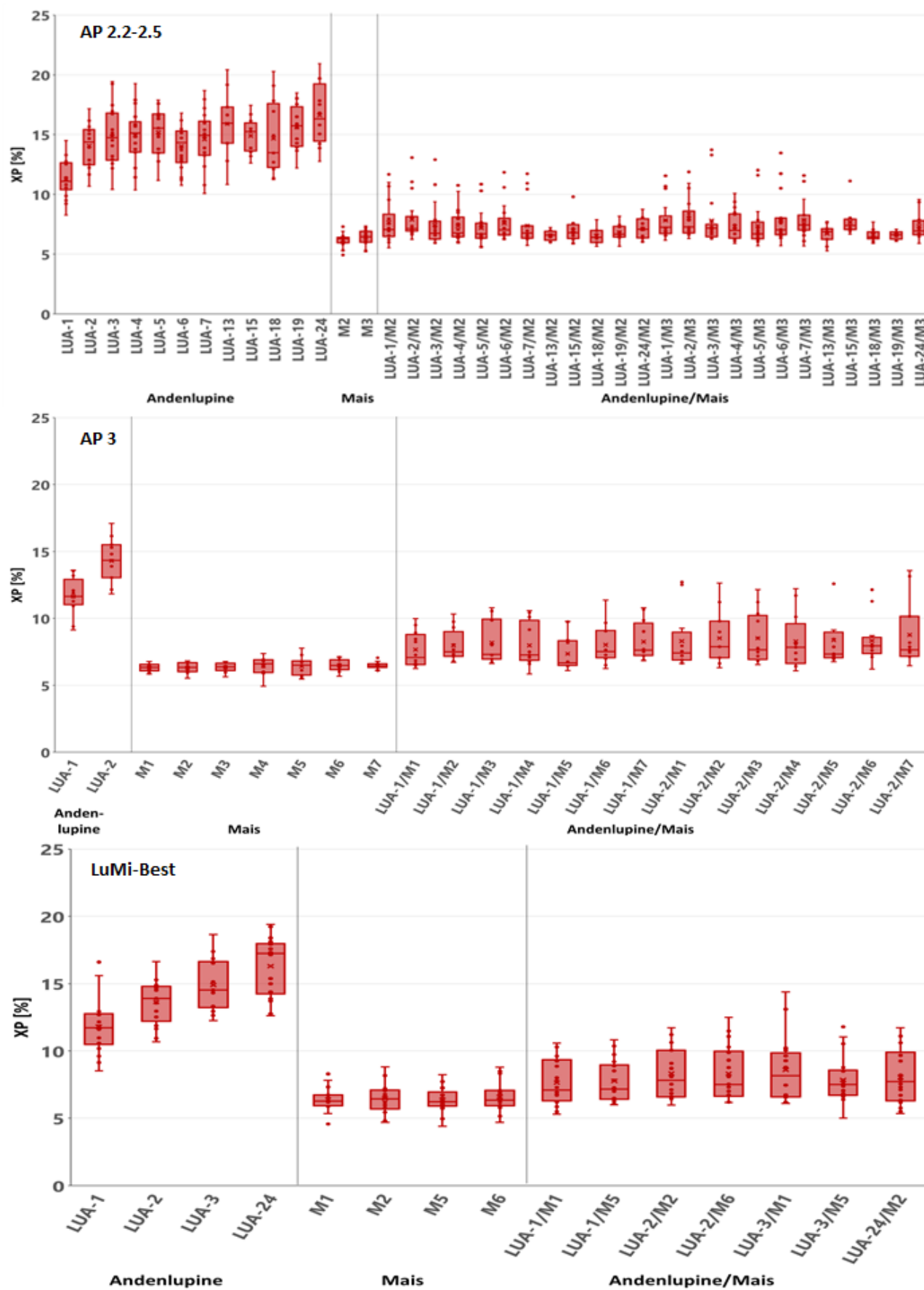


Abbildung 21: Rohprotein (XP) in der Trockensubstanz von Erntegut aller Prüfglieder der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüfforte der Arbeitspakete 2.2-2.5, 3 und LuMi-Best

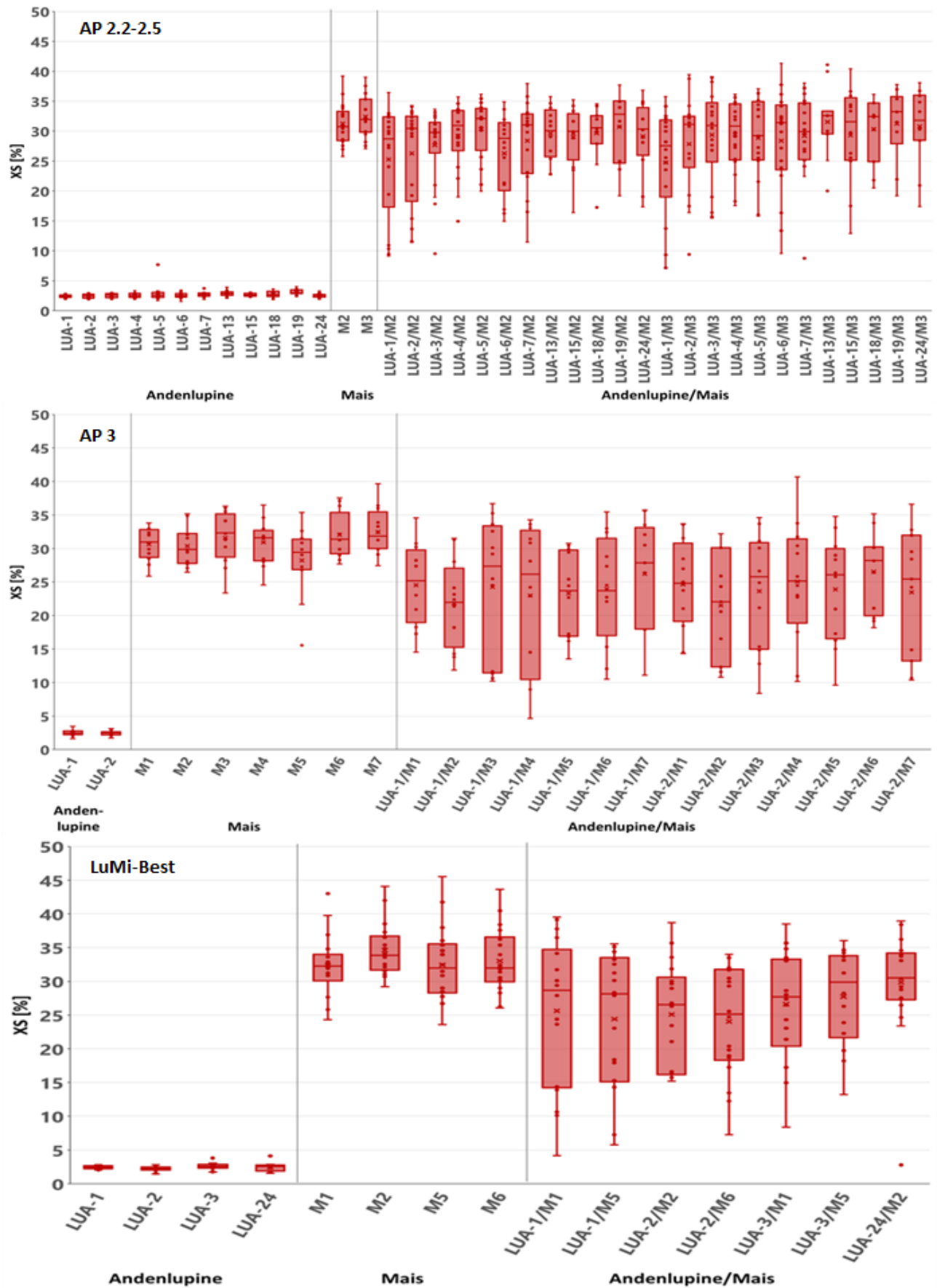


Abbildung 22: Stärke (XS) in der Trockensubstanz von Erntegut aller Prüfglieder der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüforte der Arbeitspakete 2.2-2.5, 3 und LuMi-Best

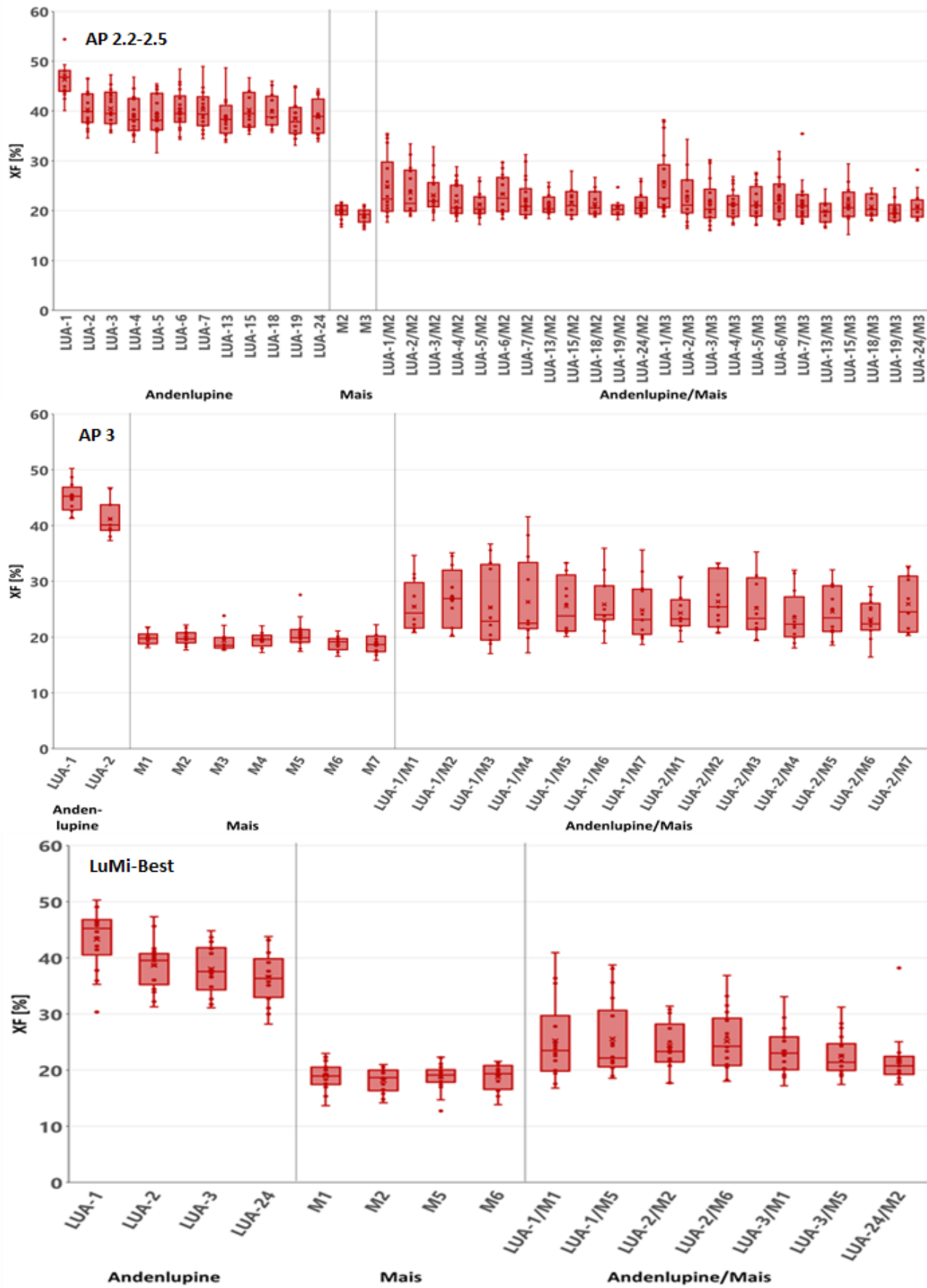


Abbildung 23: Rohfaser (XF) in der Trockensubstanz von Erntegut aller Prüfglieder der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüfforte der Arbeitspakete 2.2-2.5, 3 und LuMi-Best

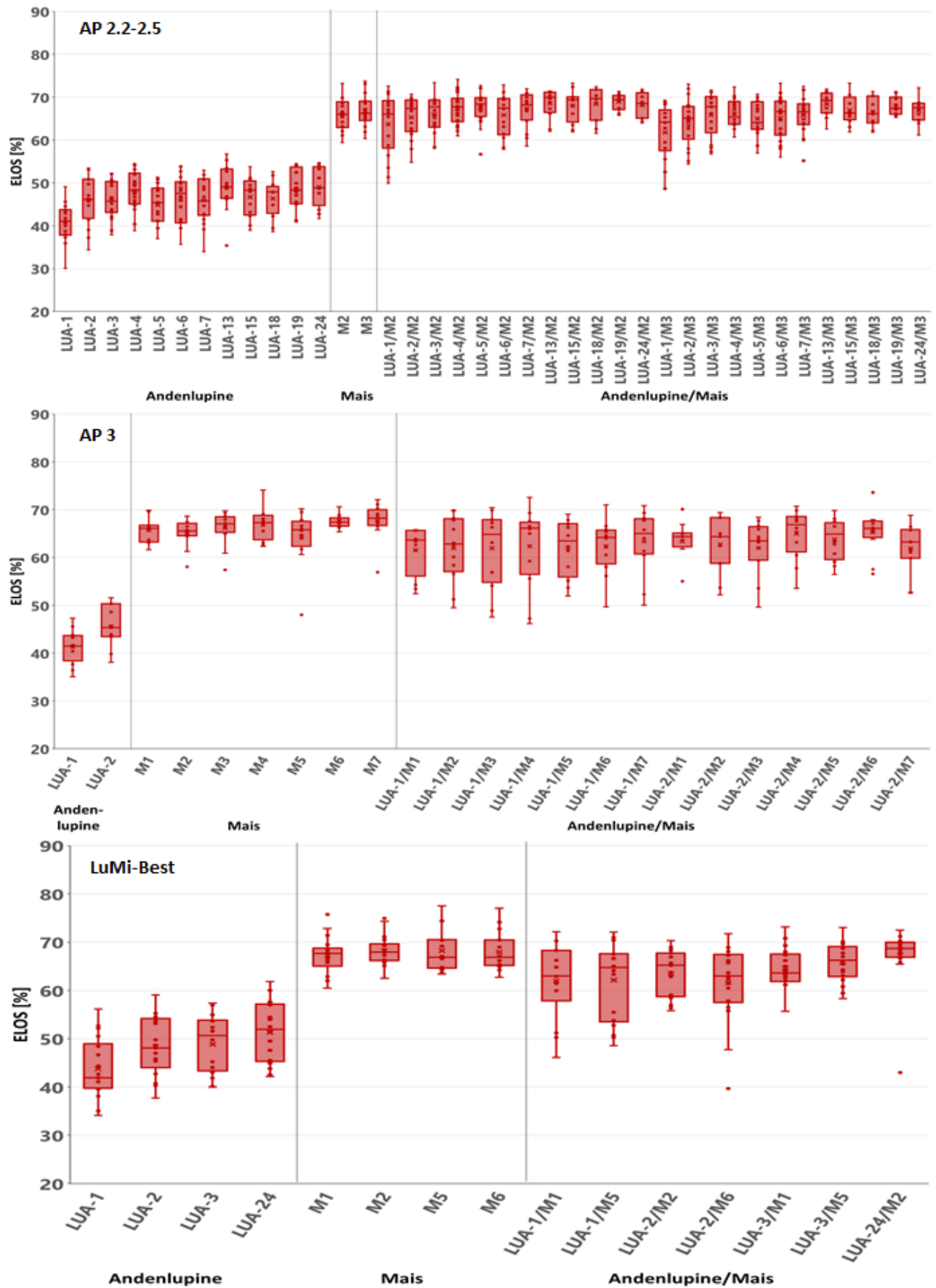


Abbildung 24: Enzymlösliche Organische Substanz (ELOS) in der Trockensubstanz von Erntegut aller Prüfglieder der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüfforte der Arbeitspakete 2.2-2.5, 3 und LuMi-Best

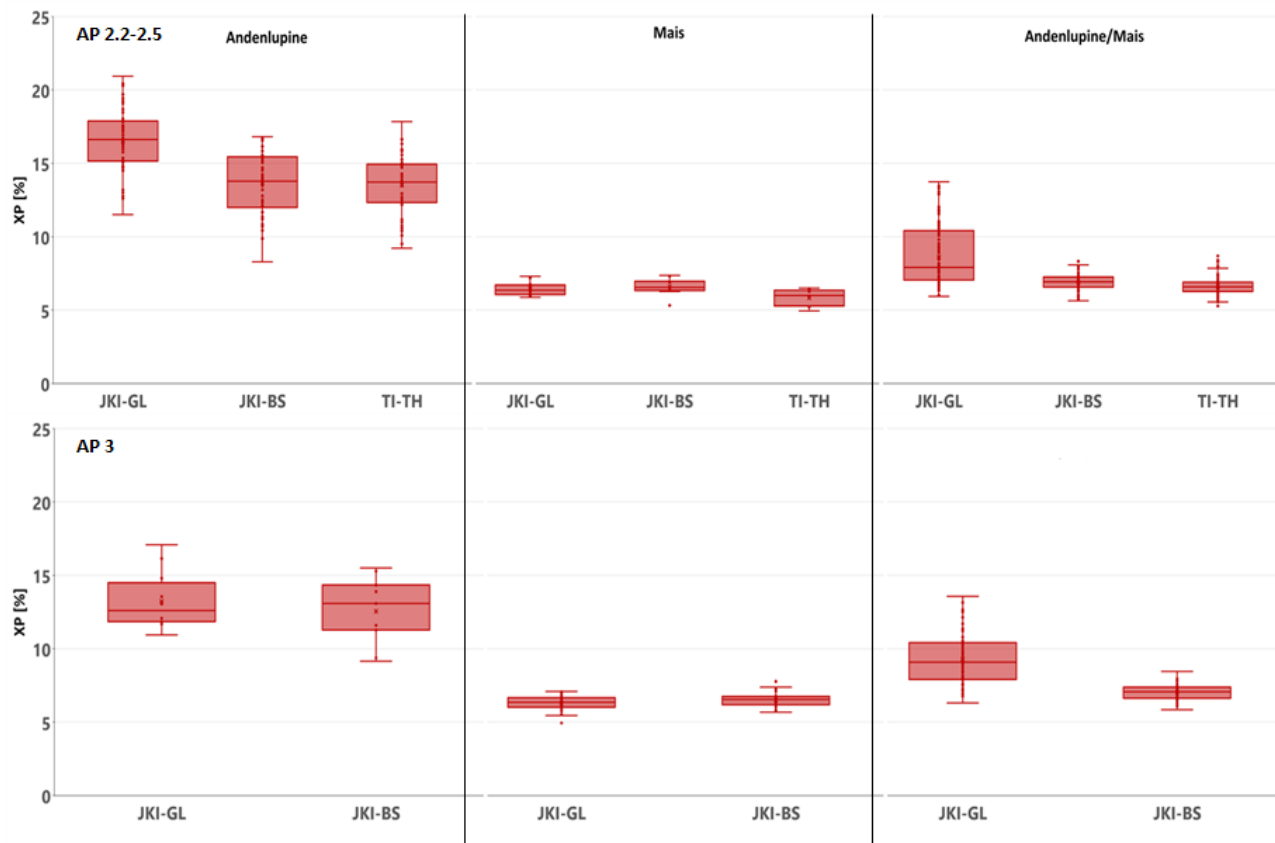


Abbildung 25: Rohprotein (XP) in der Trockensubstanz von Erntegut der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüfglieder getrennt nach Rein- und Gemengesaaten der Arbeitspakete 2.3-2.5 und 3, gruppiert nach Prüfort

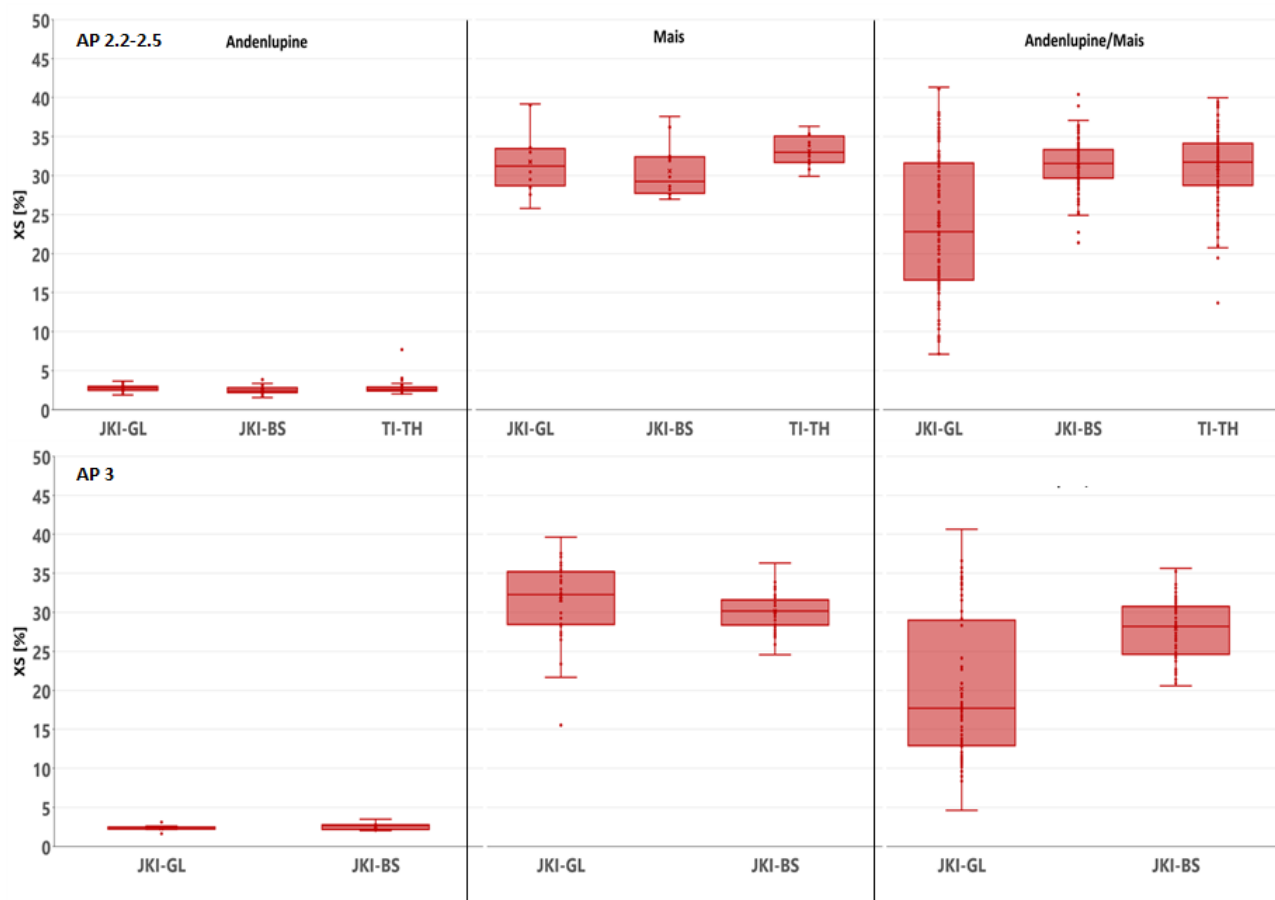


Abbildung 26: Stärke (XS) in der Trockensubstanz von Erntegut der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüfglieder getrennt nach Rein- und Gemengesaaten der Arbeitspakete 2.3-2.5 und 3, gruppiert nach Prüfort

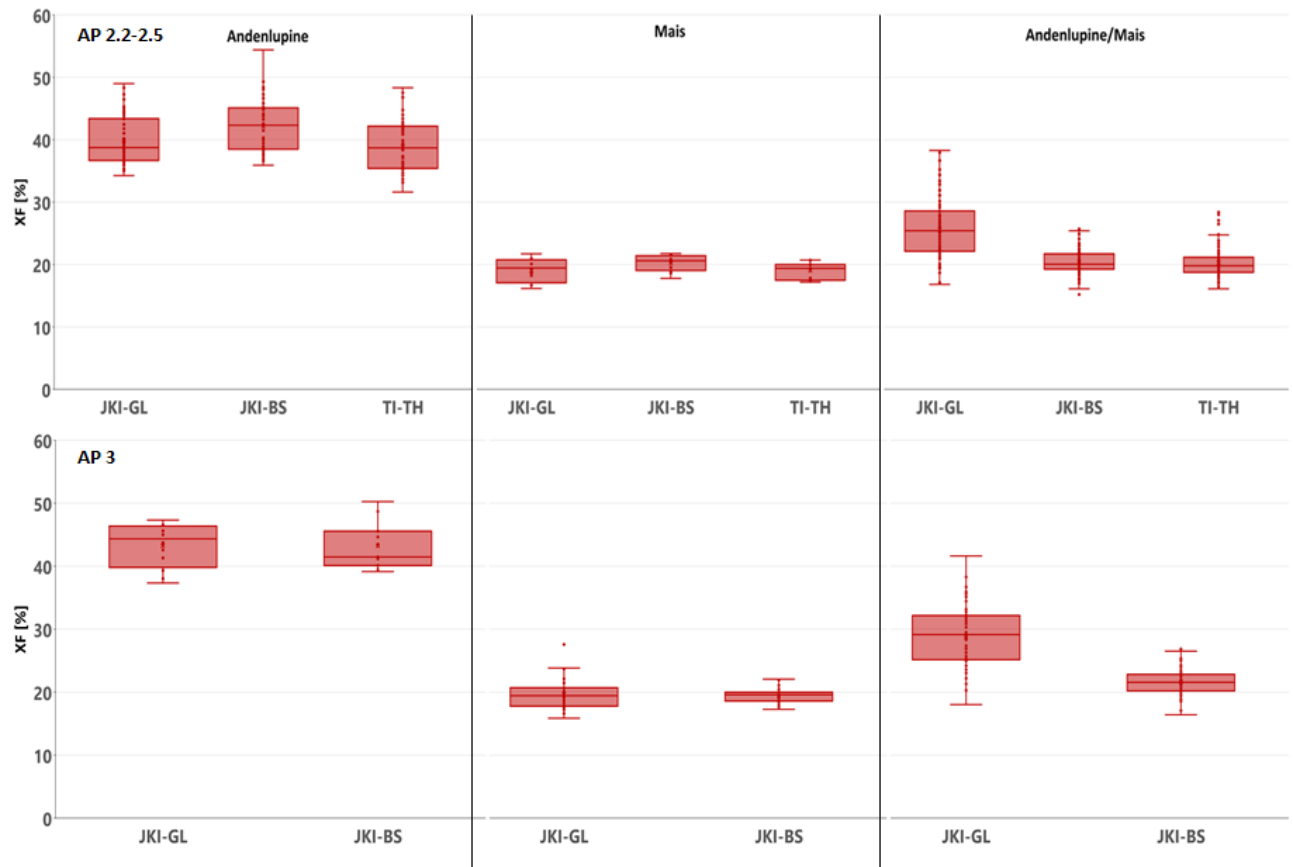


Abbildung 27: Rohfaser (XF) in der Trockensubstanz von Erntegut der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüfglieder getrennt nach Rein- und Gemengesaaten der Arbeitspakete 2.3-2.5 und 3, gruppiert nach Prüfort

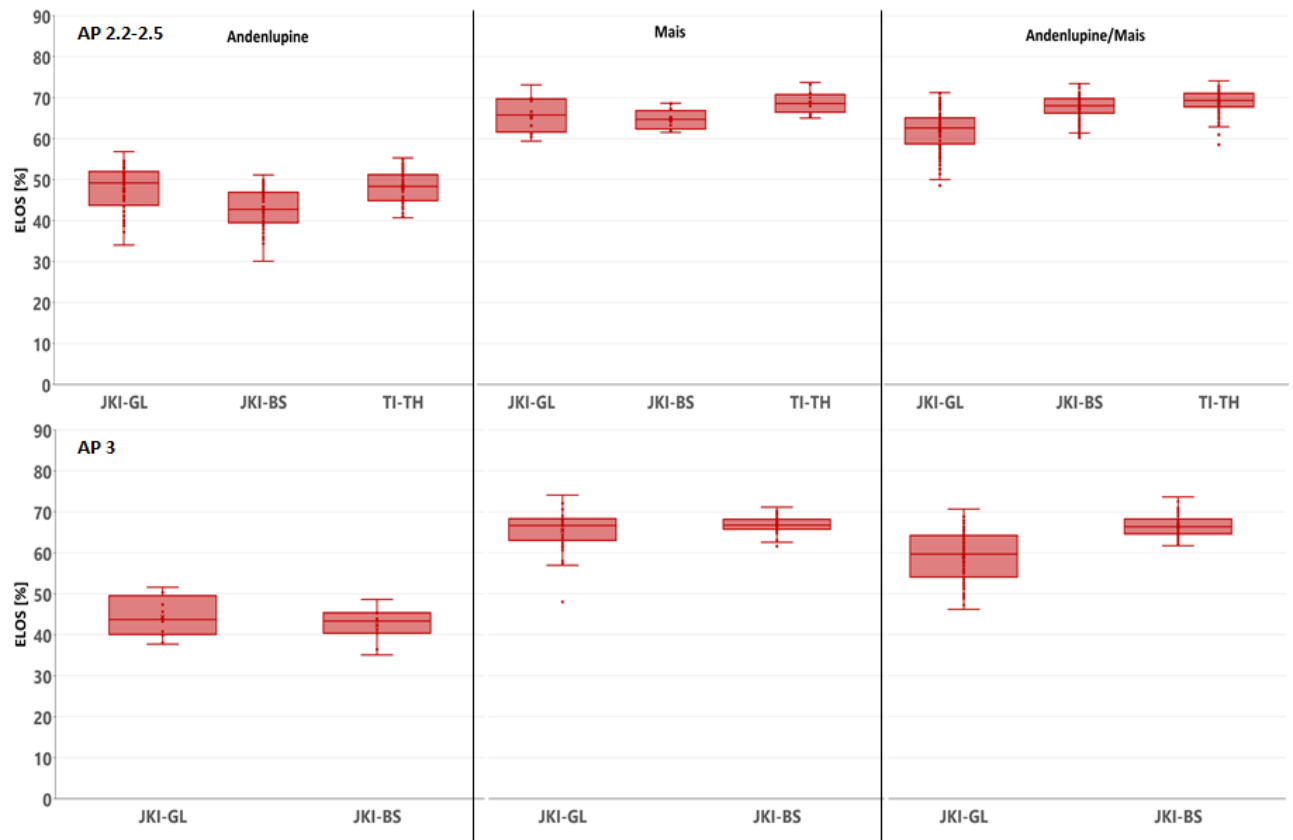


Abbildung 28: Enzymlösliche Organische Substanz (ELOS) in der Trockensubstanz von Erntegut der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüfglieder getrennt nach Rein- und Gemengesaaten der Arbeitspakete 2.3-2.5 und 3, gruppiert nach Prüfort

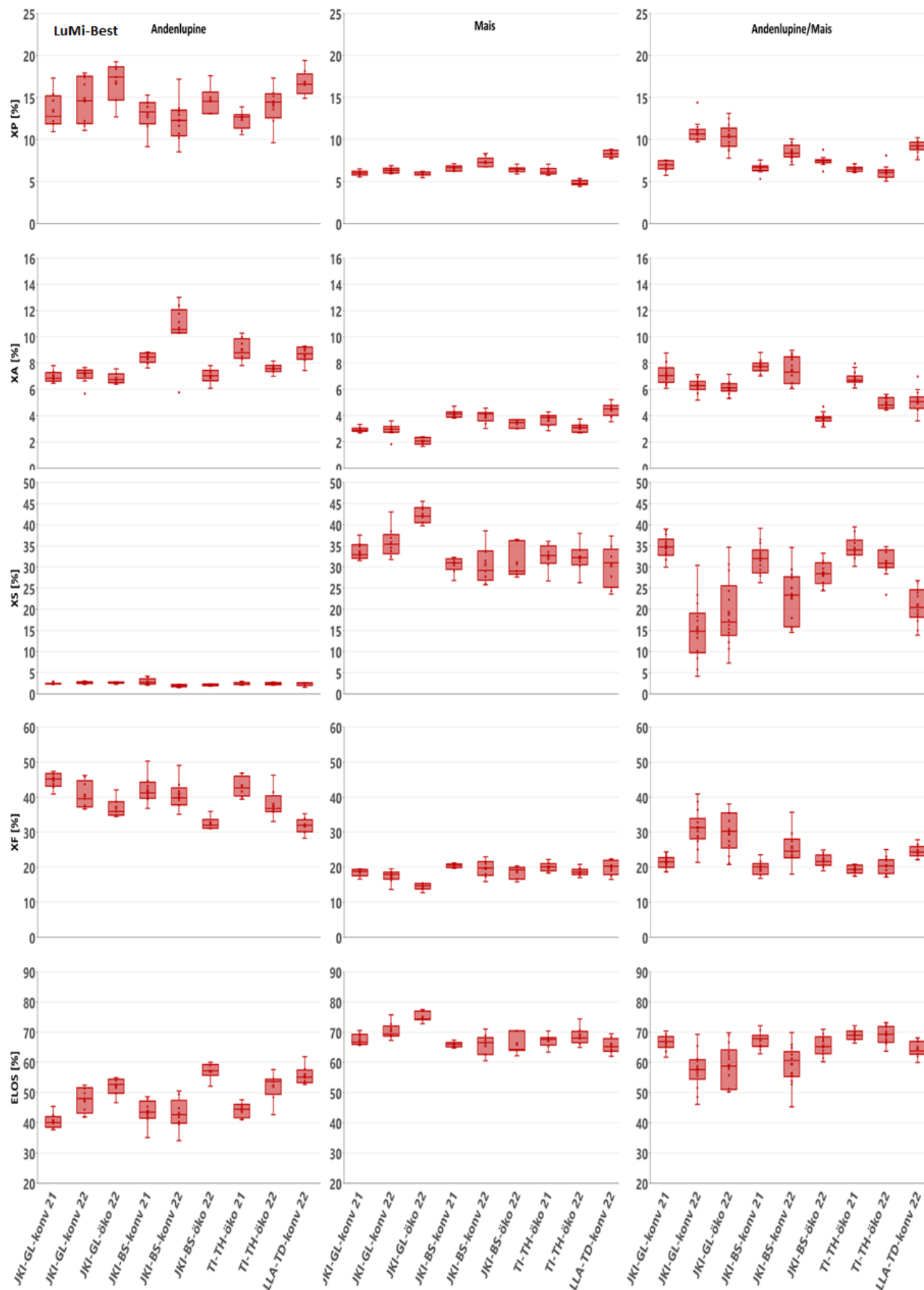


Abbildung 29: Rohnährstoffe inkl. Stärke sowie ELOS in der Trockensubstanz von Erntegut der LUA-Mais-Anbauten über alle Prüfglieder getrennt nach Rein- und Gemengesaaten des Arbeitspaketes LuMi-Best (XP=Rohprotein, XF=Rohfaser, XS=Stärke, ELOS=Enzymlösliche Organische Substanz), gruppiert nach Umwelt

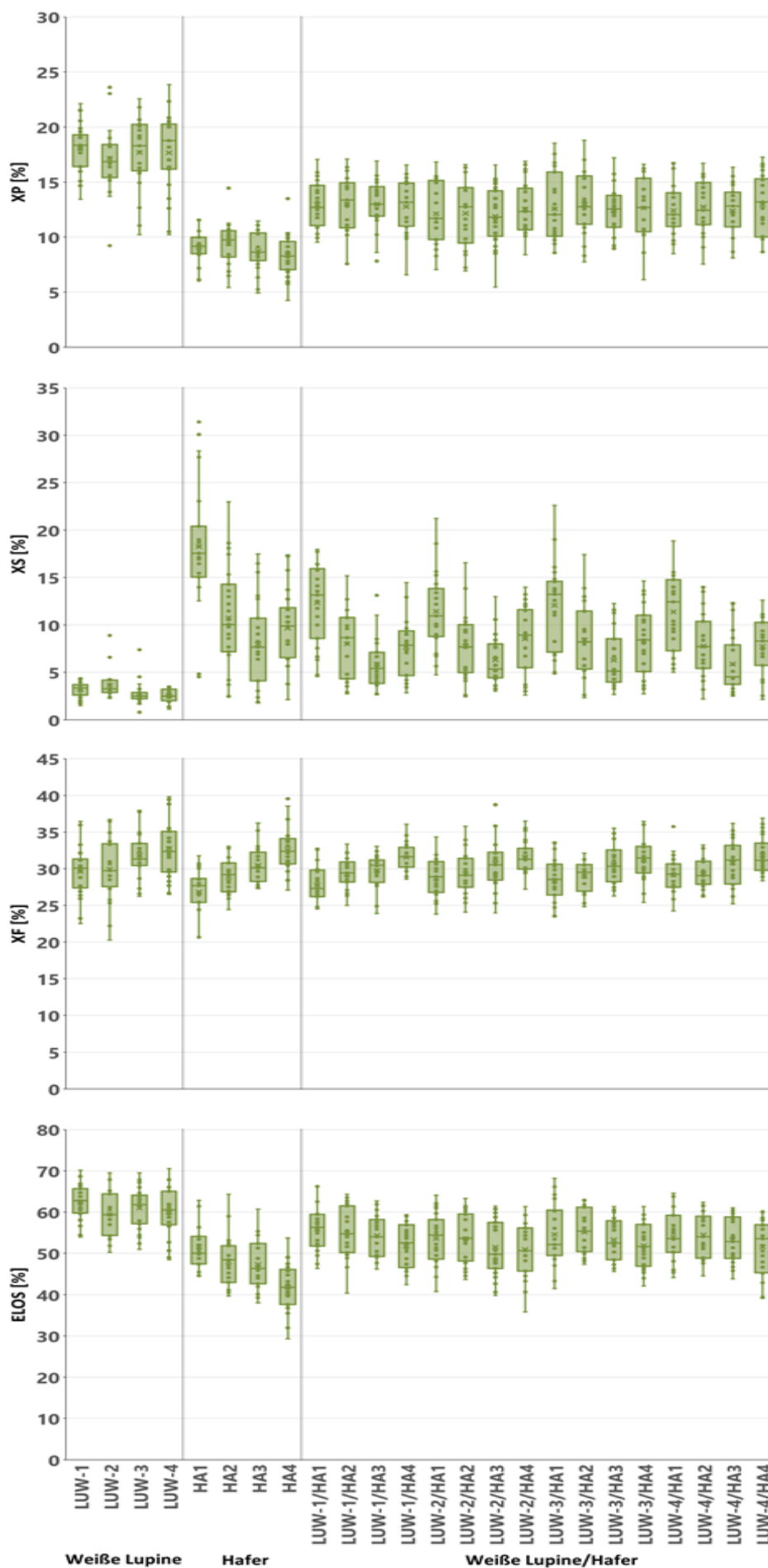


Abbildung 30: Rohnährstoffe inkl. Stärke sowie ELOS in der Trockensubstanz von Erntegut aller Prüfglieder der LUW-Hafer-Anbauten (AP 6) über alle Versuchsjahre und Prüforde (XP=Rohprotein, XS=Stärke, XF=Rohfaser, ELOS=Enzymlösliche Organische Substanz)

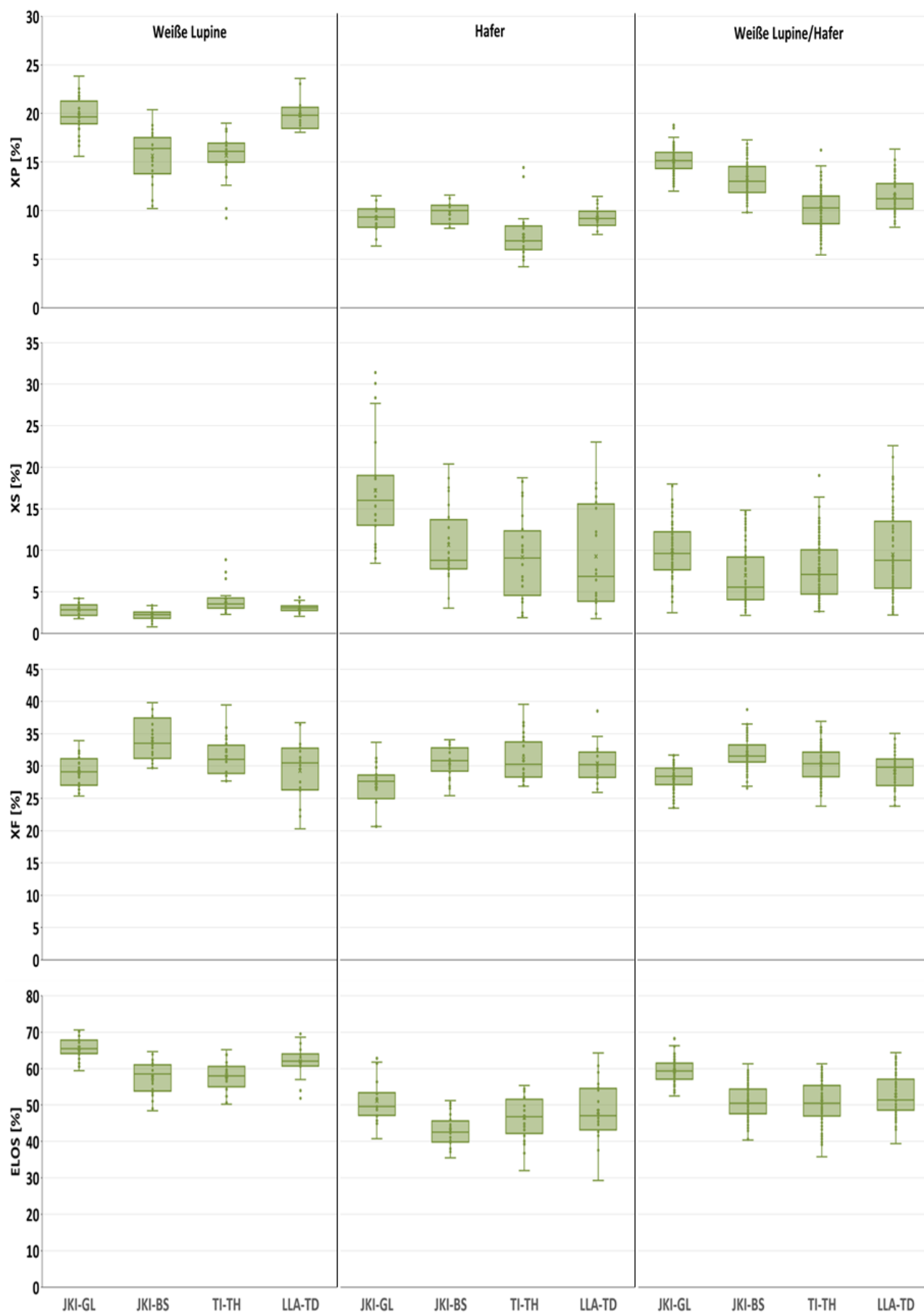


Abbildung 31: Rohnährstoffe inkl. Stärke sowie ELOS in der Trockensubstanz von Erntegut aller Prüfglieder der LUW-Hafer-Anbauten (AP 6) über alle Versuchsjahre und Prüfglieder getrennt nach Rein- und Gemengesaaten (XP=Rohprotein, XS=Stärke, XF=Rohfaser, ELOS=Enzymlösliche Organische Substanz), gruppiert nach Prüfort

Um eine Aussage zur Silierbarkeit von Erntegut treffen zu können ist der Vergärbarkeitskoeffizient (VK) ein wichtiger Parameter (vergl. S. 35 u. 36). Auch dieser wurde von allen Prüfgliedern zuvor erwähnter Arbeitspakete ermittelt und wird in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt. Die Prüfglieder der Reinsaaten Mais und Hafer hatten fast ausschließlich einen VK über dem Zielwert von 45 vorzuweisen, von den LUA- und LUW-Prüfgliedern überschritten diesen nur teilweise LUW 3. Durch den Gemengeanbau konnte der unter dem Zielwert liegende VK-Wert beider Lupinenarten aufgewertet werden. Dies war umso eingeschränkter möglich je höher im Gemenge die trockenmassebasierten Lupinenanteile vorhanden waren und je tiefer der Lupinen-VK-Wert zum Erntezeitpunkt lag.

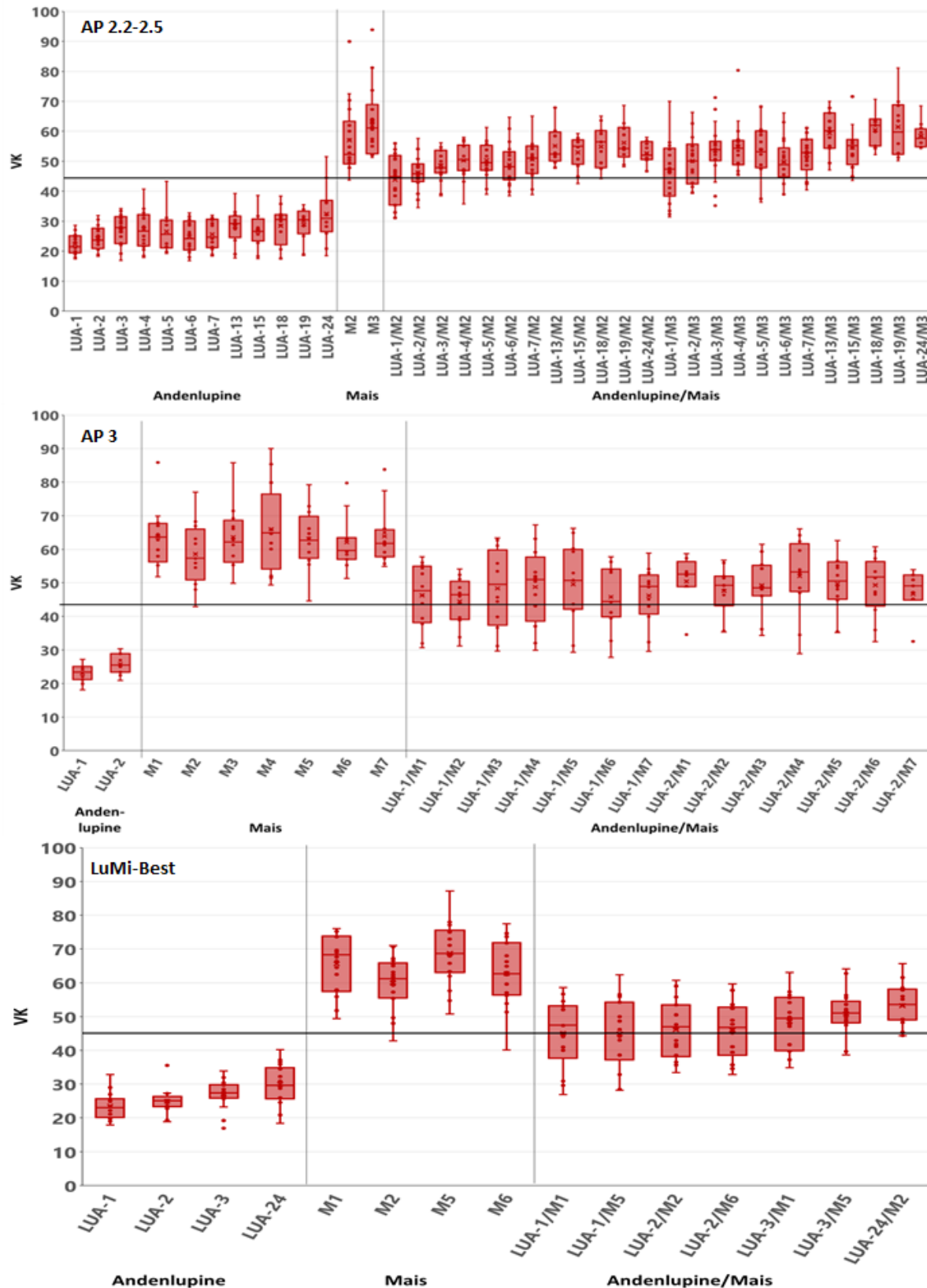


Abbildung 32: Vergärbarkeitskoeffizient (VK) von Erntegut aller Prüfglieder der LUA-Mais-Anbauten über alle Versuchsjahre und Prüfforte der Arbeitspakete 2.2-2.5, 3 und LuMi-Best, Zielwert mind. 45

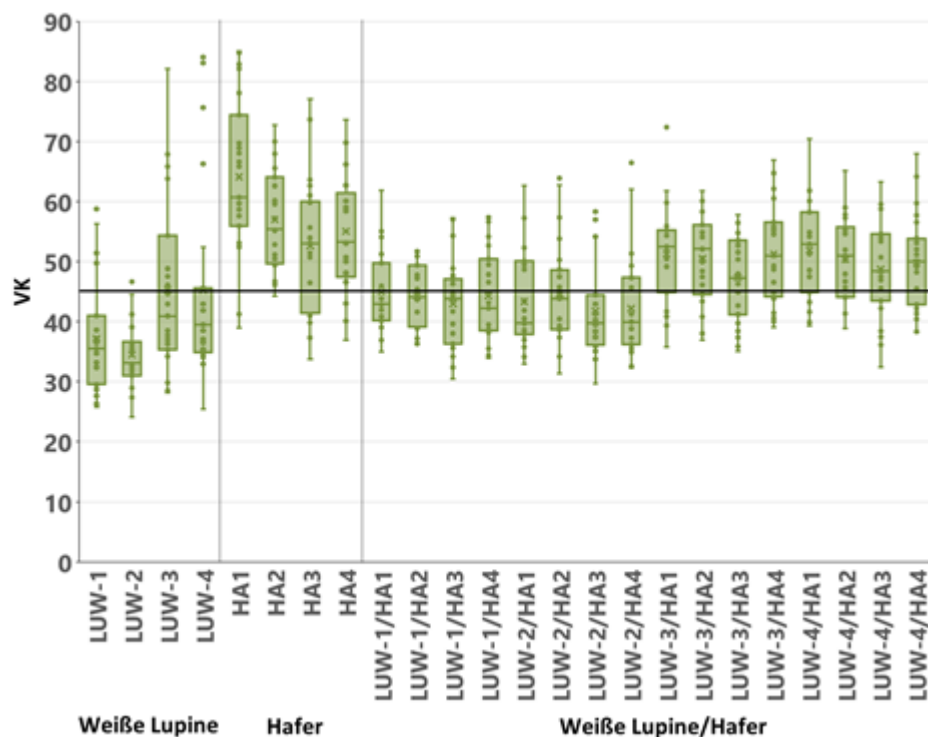


Abbildung 33: Vergärbarkeitskoeffizient (VK) von Erntegut aller Prüfglieder der LUW-Hafer-Anbauten (AP 6) über alle Versuchsjahre und Prüfforte, Zielwert mind. 45

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Eine grundlegende Mitwirkung des JKI-GL bei der Beteiligung und der zeitweiligen Koordination der hier berichteten Arbeiten war neben der Absolvierung der eigenen Arbeiten (z.B. Beteiligung an den AP 2.2 – AP 2.5 sowie an den AP 3.1 und AP 3.2, Durchführung von AP 4.1) die Organisation des Transportes zur und von der Saatgutvermehrung in Chile und die zeitgerechte und umfängliche Bereitstellung der notwendigen Saatgutmengen einer nicht leicht zu vermehrenden Lupinenart für alle an den Forschungsarbeiten Beteiligten. Dabei ist es gelungen, alle Projektbeteiligten rechtzeitig über die gesamte Projektlaufzeit mit dem notwendigen Saatgut der jeweils zu untersuchenden Andenlupine zu versorgen.

Eines der wesentlichen Ergebnisse des Teilvorhabens ist in Arbeitspaket 4.1 zu sehen. Hier konnte zweifelsfrei nachgewiesen werden, dass das Anbausystem der Andenlupine mit Mais keinerlei Vorteil durch die Nutzung der höheren Kühletoleranz der Lupinen im Vergleich zu Mais hat. Demnach ist es weiterhin sinnvoll, die beiden Kulturarten zur gleichen Zeit auszusäen. Die Ergebnisse vom JKI-GL zeigen zweifelsohne, dass es nicht sinnvoll ist, zum Preis einer zusätzlichen Überfahrt die Andenlupine ca. 2 Wochen vor dem Mais auszusäen.

In Arbeitspaket 8 zeigte sich, dass zur Erzeugung qualitativ guter Silagen der Rein- und Gemengesaaten von LUA-Mais bzw. LUW-Hafer die Ausgangsvoraussetzungen des Ernteguts hinsichtlich des Vergärbarkeitskoeffizienten und insbesondere der Gär-schädlinge Hefen und Schimmel nicht immer genügend waren. Bei den Siliergütern der Lupinereinsaaten lagen insbesondere bei der Andenlupine zu geringe Trockensubstanzgehalte vor mit der Folge von ausgeprägter Gär-saftbildung während des Silierprozesses. Trotz dessen fand bei allen Laborsilagen immer eine gute Ansäuerung statt und die bei Öffnung der Silagen erwünschten pH-Werte von 3,7 bis 4,9 stellten sich ein. Diese waren abhängig vom TS-Gehalt, der Pflanzenart und der Behandlung ohne bzw. mit einem chemischen und zwei biologischen Siliermitteln. Die vermeidbaren Gärverluste lagen in einer zu erwartenden Spanne von 3,4 bis 8,2%, wobei die höheren Verluste beim Zusatz biol. 2 auftraten, welches sich mit einer verstärkten Essigsäuregärung erklären ließ. Dennoch konnten häufig bei den Kontrollsilagen als auch den Silagen mit Siliermittel Zusatz biol. 1 nicht durchgehend die Hefen in dem Maße eliminiert werden, dass nach Öffnung der Silagen eine aerobe Stabilität von mindestens 3 Tagen erzielt wurde. Mit Einsatz des chemischen Siliermittels als auch des Siliermittels Zusatz biol. 2 konnte dann allerdings die Aktivität der Hefen bei allen Silagen permanent soweit eingeschränkt werden, dass immer eine gute aerobe Stabilität vorhanden war. Im Allgemeinen war die Silierbarkeit und Gärqualität zur Erzeugung von LUA-Mais-Silagen als auch LUW-Hafer-Silagen gleichermaßen gegeben. Der in der Regel bei den Siliergütern der Lupinenreinsaaten zu niedrig liegende Vergärbarkeitskoeffizient konnte durch den Gemengeanbau hinsichtlich der Zielwertrealisierung positiv aufgewertet werden.

Die Rohnährstoffe, Stärke, die enzymlösliche organische Substanz und Gerüstsubstanzen der Gemengesaaten orientierten sich in ihren Gehalten an den Werten der jeweilig beteiligten Kombinationspartner und waren stark beeinflusst von deren Gehaltsunterschieden als auch der Höhe des pflanzlichen Trockenmasseanteils, welcher jeder Kombinationspartner in das Gemenge mit einbrachte. Insofern war häufig eine hohe Variabilität und Streuung bei den Untersuchungsparametern gegeben. Durch die große Vielfalt der in den Versuchen eingesetzten Sorten und die Ernteorientierung an Leitsorten konnten nicht alle Prüfglieder im optimalen Reifestadium beerntet werden. Bei den LUA-Mais-Gemengesaaten war der Mais in der Regel die dominierende Frucht, was dazu führte, dass die Rohproteingehalte meist nur leicht gegenüber der Maisreinsaat erhöht. Im Gegenzug pendelten sich die Stärkegehalte auf einem leicht niedrigeren Niveau ein. Eine Ausnahme bildete mit höheren trockenmassebasierten LUA-Anteilen der Versuchsort Groß Lüsewitz. Dort ergaben sich gegenüber den anderen Versuchsorten Braunschweig und Trenthorst dann höhere Rohproteingehalte mit im Gegenzug deutlich niedrigere Stärkegehalte. Beim LUW-Hafer-Gemengeanbau wurden meist immer höhere LUW-Anteile realisiert. Insofern kam es bei den Gemengesaaten gegenüber der Haferreinsaat zu einer stärkeren Erhöhung der Rohproteingehalte, die sich mittig beider Fruchtarten wiederfanden.

Teilvorhaben 2: Thünen-Institut

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

In Teilvorhaben 2 wurden Feldversuche zum Gemengeanbau von Andenlupinen und Mais sowie von Weißer Lupine und Hafer als auch die entsprechenden Reinsaaten geplant, durchgeführt und dokumentiert. Die Auswertung der Feldversuche, die am Standort Trenthorst im Rahmen der mehrortigen Leistungsprüfungen durchgeführt wurden, erfolgte zentral am JKI am Standort Groß Lüsewitz durch den Koordinator des Gesamtprojektes Dr. Roux und wurden bereits im gemeinsamen Teil des Abschlussberichtes dargestellt.

Des Weiteren wurden am Standort Trenthorst zusätzliche Anbauversuche zum Gemengeanbau von Andenlupinen und Mais (AP 4.2) sowie Weißer Lupine und Hafer (AP 7) geplant, durchgeführt, dokumentiert und ausgewertet. Ergänzend wurden in ausgewählten Varianten Untersuchungen zur Durchwurzelungsleistung, Infiltrationsleistung, N_2 -Fixierung und zu den N_{min} -Gehalten nach der Ernte durchgeführt.

Ziel der Versuche beider Teilvorhaben ist die Bewertung von unterschiedlichen Kombinationen von Andenlupine und Mais bzw. Weißer Lupine und Hafer im Gemengeanbau sowie die Beurteilung anbautechnischer Varianten zur Produktion von Gesamttrockenmasse.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Wurzeluntersuchungen von Andenlupine-Mais und Weißer Lupine-Hafer (AP 4.2 und 7)

Der Erfolg oder Misserfolg eines Leguminosen-Getreide-Gemenges ist oft nur schwer zu erklären. Da benachbarte Pflanzen nicht nur oberirdisch um Licht, sondern auch unterirdisch um Wasser und Nährstoffe konkurrieren, kann die Interaktion im Wurzelraum bedeutsam für den Erfolg eines Gemenges sein (Faget et al. 2013). Der Gemengeanbau von Getreiden und Leguminosen kann die Wurzelstratifikation der Kulturen mit Potential zu höherer Ressourceneffizienz beeinflussen (Streit et al. 2019). Aus diesem Grund wurde untersucht, ob der Gemengeanbau der beiden Anbausysteme von MA mit LUA und HA mit LUW sich auf die Wurzelstratifikation sowie den Bodenwassergehalt als Beispielressource auswirkt. Die Versuche hierfür wurden in TH an den dort angelegten Feldversuchen durchgeführt.

Die Beprobung von Wurzeln im Feld ist je nach Methode sehr arbeitsaufwändig und destruktiv. In diesem Fall wurden 1,2 m tiefe Gruben in den Parzellen orthogonal zu den Pflanzreihen ausgebaggert. Die so entstandenen Profilwände wurden von Hand geglättet und abgespült, um freie Wurzeln sichtbar zu machen, die bis in 90 cm Tiefe mithilfe eines Rasters dokumentiert wurden (Abbildung 34). Eine anschließende Entnahme von Bodenblöcken (Abbildung 34) gemäß diesem Raster ermöglicht die Ergänzung dieser Profilwanddaten um die Wurzellängen und -biomasse.



Abbildung 34: Wurzelbeprobung im Feld (links: Dokumentation der freien Wurzelenden in einem LUA-RS-Bestand, mitte: Entnahme der Bodenblöcke anhand des Rasters) und beispielhafte Profilwand-Dokumentation (rechts) am Standort TH. Die Grenze zwischen Ober- und Unterboden war stets deutlich sichtbar (siehe links, mitte) und lag bei ca. 30-35 cm (siehe Beispiel rechts).

Nachdem Wurzeluntersuchungen 2019 in LUA-MA-Gemenge und den Reinsaaten (ohne Feldwiederholungen) erste Eindrücke lieferten, die Methode der Monolith-Entnahme gesamter Profilwände (Böhm 1979) aber einen übermäßigen Arbeitsaufwand mit sich brachte, wurde die Methodik auf eine kalibrierte Profilwandmethode (Van Noordwijk et al. 2000) umgestellt. Bei dieser Methode werden aus einzelnen Bodenblöcken ausgewaschene Wurzeln dazu genutzt, anhand einer Dokumentation freier Wurzelenden auch auf Wurzelbiomasse und Wurzellänge der gesamten Profilwand hochzurechnen. In den Jahren 2020 und 2021 wurden Wurzeluntersuchungen mit dieser Methode in LUA-MA-Gemengen und den Reinsaaten (AP 2) sowie LUW-HA-Gemengen (AP 6) in Randparzellen durchgeführt. Aufgrund der veränderten Methodik lassen sich die Ergebnisse aus 2019 nur begrenzt mit denen aus 2020 und 2021 vergleichen. Aufgrund der fehlenden Feldwiederholungen in 2019 werden die Ergebnisse aus den Jahren 2020 und 2021 als zuverlässiger und

aussagekräftiger angesehen und daher zusammenfassend diskutiert. Die Ergebnisse aus 2019 sind detailliert nachzulesen in Holzgreve und Böhm (2021).

Die Wurzelbeprobung wurde in beiden Jahren in drei Feldwiederholungen zu BBCH 75-85 des MA und BBCH 61-79 der LUA bzw. zu BBCH 85-89 des HA und BBCH 75-80 der LUW (BBCH-Stadien nach Hack et al. 1992) durchgeführt, ca. einen Monat vor der GTM-Ernte. Ausgewählt wurden die Varianten MA 2-LUA 1 und HA1-LUW 3. Es wurde eine Profilwand-Dokumentation von 75 cm x 90 cm erstellt, in Rechtecke von 12,5 x 15 cm unterteilt und die Anzahl der Wurzelen pro cm² Profilwandfläche berechnet (Intersektionspunkte-Dichte, IPD). Pro Bodenschicht und Grube wurden zwei Bodenblöcke entnommen (12 Blöcke je Grube), die Wurzeln ausgewaschen, von Fremdkörpern befreit, eingescannt, getrocknet und gewogen. Bis in 100 cm Tiefe wurden Bodenproben zur Ermittlung der Bodenfeuchtigkeit entnommen.

Der Boden am Standort ist ein sandiger Lehm (Pseudogley-Braunerde) mit 44,1 % Sand, 37,5 % Schluff, 18,4 % Ton im Oberboden (0-30 cm) und hoher Partikeldichte (1,8 g cm⁻³) im Unterboden. Dies spiegelte sich deutlich in der Wurzelstratifikation wider, da die Wurzeldichte vom lockeren Oberboden zum sehr festen Unterboden in allen Kulturen signifikant abnahm (Abbildung 35).

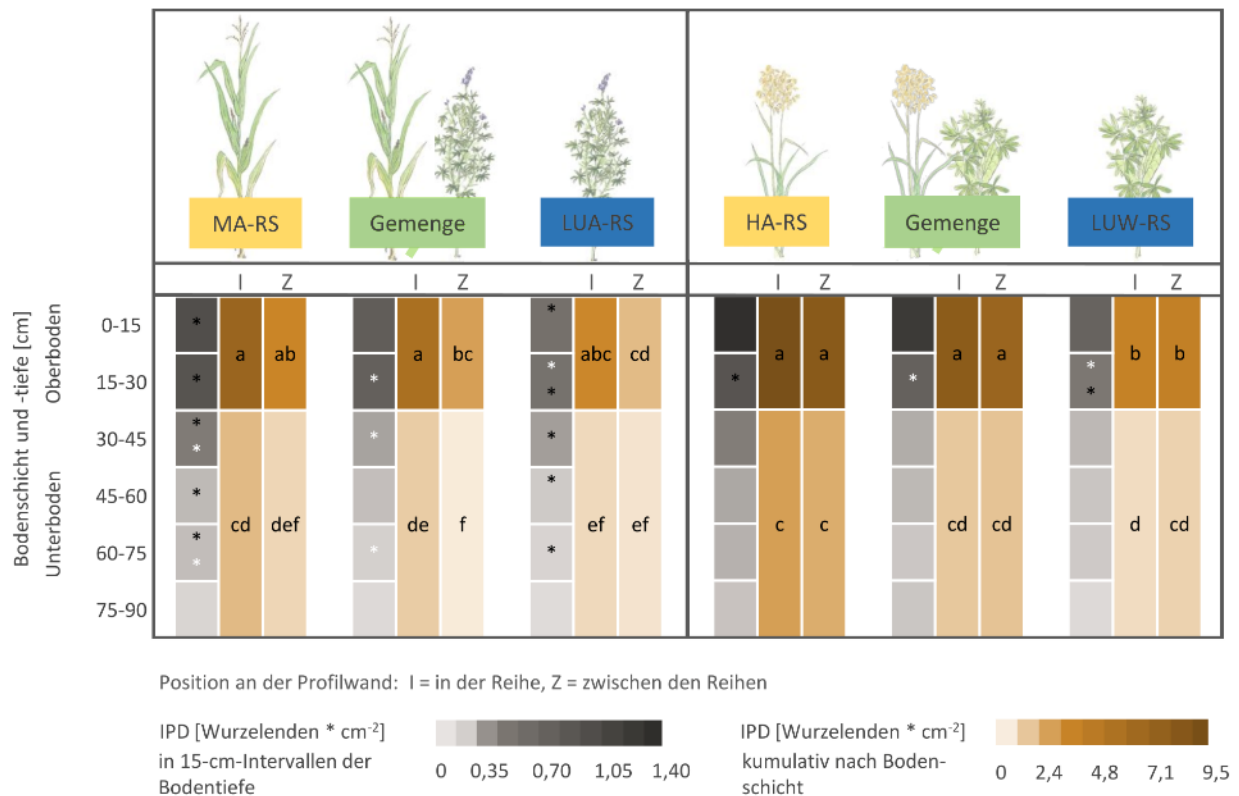


Abbildung 35: Wurzelverteilung in ausgewählten Gemengen und Reinsaaten Hafer (HA) Arborg in Reinsaat (RS), Weiße Lupine (LUW) Celina in Reinsaat und ihrem Gemenge aus AP 6.1 und 6.2 sowie von Mais 2 (MA) in Reinsaat, Andenlupine 1 (LUA) in Reinsaat und ihrem Gemenge aus AP 2.4, 2.5 anhand der Profilwanddokumentationen aus 2020 und 2021 am Standort Trenthorst. Verschiedene Buchstaben beschreiben Unterschiede bei Gesamtgruppenvergleichen der kumulativen Wurzeldichte (rang-transformierte ANOVA, $p=0,003^{**}$). Weiße Sternchen markieren Unterschiede zwischen RS und Gemenge, schwarze Sternchen zwischen den RS in einer Bodentiefe (rang-transformierte ANOVA, $p<0,001^{***}$), $n = 6$.

Die Wurzelstratifikation kann Aufschluss geben über Nährstoff- und Wasser-Akquisitionsstrategien (Hodge, 2009) der Kulturen. In diesem Fall zeigte die Verteilung der Wurzelsysteme anhand der Profilwände stets den größten Anteil des erfassten Wurzelsystems im Oberboden, wobei die Lupinen-RS den geringsten Anteil des Wurzelsystems im Oberboden aufwiesen (LUW-RS 78 %, LUA-RS 74 %), also verstärkte den Unterboden durchwurzelten. Die Getreide-RS zeigten einen mittelhohen Anteil des Wurzelsystems im Oberboden (HA-RS 79 %, MA-RS 78 %), die Gemenge den höchsten (LUW-HA-Gemenge 83 %, LUA-MA-Gemenge 81 %). So bewirkte in den untersuchten Jahren 2020 und 2021 der Anbau im Gemenge eine Verlagerung des Wurzelsystems in den Oberboden, statt wie in 2019 eine Verlagerung in den Unterboden (siehe Holzgreve & Böhm, 2021).

Sowohl für LUA-MA als auch LUW-HA wurden die höchsten Bodenwassergehalte in den Gemengen festgestellt, die signifikant höher ausfielen als in den Lupinen-RS (Abbildung 36). Die Gemenge entzogen dem Boden also weniger Wasser, was mit der verhältnismäßig geringeren Durchwurzelung des Unterbodens erklärbar ist. Die Auswirkung auf die Erträge jedoch fiel nicht bei beiden Anbausystemen gleich aus.

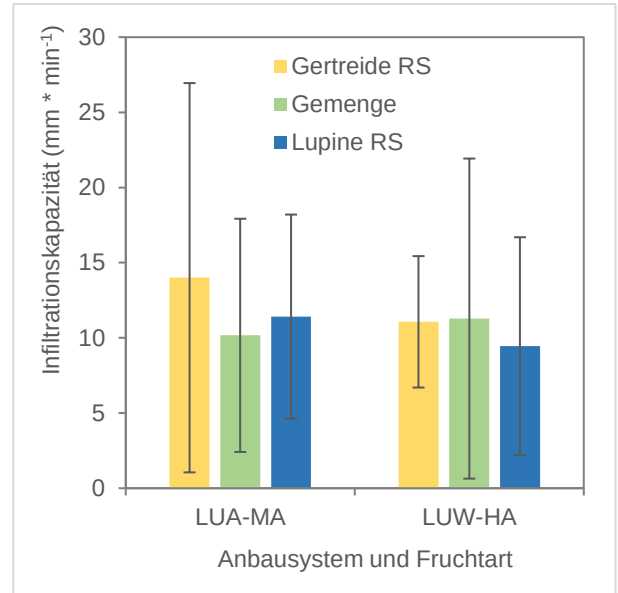
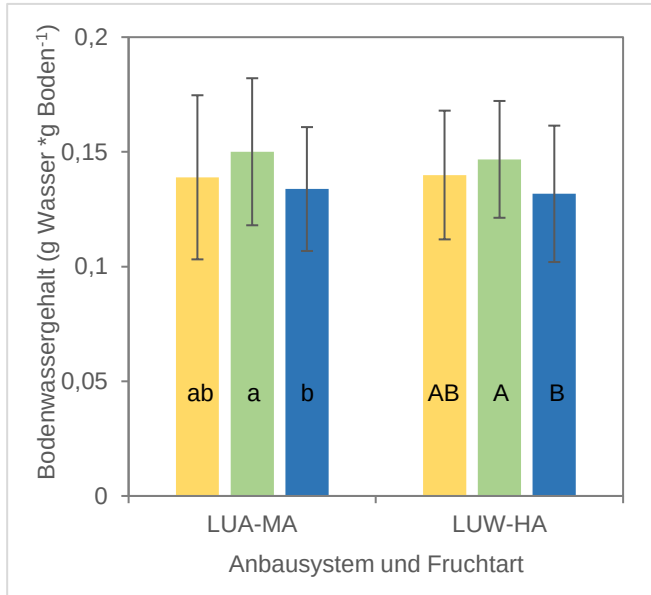


Abbildung 36: Einfluss von Kultur und Anbausystem (Hafer (HA) Arborg in Reinsaat (RS), Weiße Lupine (LUW) Celina in RS und ihrem Gemenge aus AP 6.1 und 6.2 sowie von Mais 2 (MA) in RS, Andenlupine 1 (LUA) in RS und ihrem Gemenge aus AP 2.4, 2.5) auf den Bodenwassergehalt bis 1 m Tiefe (links) und die Infiltrationskapazität des Bodens (rechts). Unterschiedliche Buchstaben zeigen Gruppenunterschiede für den Bodenwassergehalt an, Kleinbuchstaben für LUA-MA, Großbuchstaben für LUW-HA (Mixed Linear Model ANOVA mit Jahr als random factor, $p < 0.001^{***}$, $n = 6$ (*9 Pseudoreplikate). Infiltrationskapazitäten ohne signifikante Unterschiede, $n = 6$. Standort Trenthorst, 2020 und 2021.

Infiltrationsleistungen von Andenlupine-Mais und Weißer Lupine-Hafer (AP 4.2 und 7)

Die Infiltrationsmessungen dienten dazu, den Einfluss der Kulturen bzw. des Anbausystems auf die Fähigkeit des Bodens zur Wasseraufnahme zu untersuchen. In Zeiten geringer Niederschläge und Starkregenereignissen ist dies ein wichtiger Parameter, um sowohl Erosionsgefahren durch ablaufenden Starkregen als auch die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens zugunsten der Kulturen abzuschätzen. Sowohl die Bodenbedeckung durch die Kultur als auch die Durchwurzelung und die Rhizosphäre im Allgemeinen haben hierauf Einfluss.

Die Messung erfolgte mit einem Doppelring-Infiltrometer mit einem inneren Durchmesser von 30 cm. In diesen Ring wurde nach dem Einschlagen in den Boden an einer geeigneten Stelle das Absinken des Wasserpegels im Ring über die Zeit bis zur Konstanz gemessen. Die Ergebnisse der Infiltrationsmessungen fielen insgesamt sehr variabel aus (Abbildung 36). Dies kann auf die schweren Böden am Standort TH in Verbindung mit wechselnder Nässe und Hitze zurückzuführen sein, was zu Rissbildung in der Bodenoberfläche und möglicherweise dem gesamten Gefüge führte. Dies könnte die Messungen in unvorhersehbarer Weise beeinflusst haben. Da es aufgrund der geringen Parzellengröße nicht möglich war, die Anzahl der Messpunkte zu erhöhen, fiel die Varianz der Werte entsprechend hoch aus.

In Betrachtung über beide Jahre zeigten sich weder Unterschiede zwischen den Anbausystemen noch den Fruchtarten (Abbildung 36). Auch die Betrachtung für die einzelnen Jahre erbrachten keine signifikanten Unterschiede. Die festgestellten Effekte des Anbausystems auf den Bodenwassergehalt (Abbildung 36) sind also vermutlich nicht auf eine veränderte Infiltrationskapazität des Bodens unter den Beständen, sondern auf andere Faktoren wie eine veränderte Wassernutzungseffizienz, Verdunstung oder Wasseraufnahme aus dem Boden zurückzuführen.

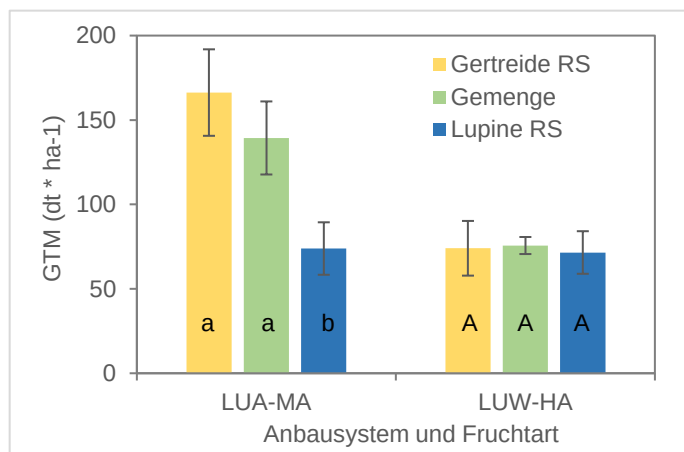


Abbildung 37: Gesamttrockenmasse-Erträge (GTM) der für die Wurzeluntersuchungen ausgewählten Varianten (Hafer (HA) Arborg in Reinsaat (RS), Weiße Lupine (LUW) Celina in RS und ihrem Gemenge aus AP 6.1 und 6.2 sowie von Mais 2 (MA) in Reinsaat, Andenlupine 1 (LUA) in RS und ihrem Gemenge aus AP 2.4, 2.5) aus 2020 und 2021 am Standort Trenthorst. Unterschiedliche Buchstaben zeigen Gruppenunterschiede an, Kleinbuchstaben für LUA-MA, Großbuchstaben für LUW-HA (Rang-transformierte ANOVA mit $p < 0.001^{***}$, $n = 6$).

Bei Betrachtung der GTM-Ernte beider Jahre zeigten sich bei LUA-MA keine signifikanten Unterschiede in der GTM, wohl aber ein Trend zu reduzierter MA-Biomasse im Gemenge im Vergleich zur RS. In LUW-HA jedoch konnte ein Trend zu erhöhter Biomasse festgestellt werden (Abbildung 37). Dies wird illustriert durch den Land-Äquivalenz-Index (LER), der für das LUW-HA-Gemenge mit 1,12 über 1, was auf eine höhere Flächennutzungseffizienz des LUW-HA-Gemenges im Vergleich zu beiden Reinsaaten hinweist. Gegensätzlich dazu lag der LER des LUA-MA-Gemenge mit 0,94 unter 1, was also keinen Flächenvorteil auf.

Ein Erklärungsansatz für diese gegensätzlichen Effekte könnte in der Wurzelverteilung der Kulturen liegen. Die Wurzeldichte der Gemengepartner MA und LUA war zwischen den Pflanzreihen verringert, während dies bei HA und LUW nicht der Fall war (Abbildung 35). So konnten MA und LUA im Gemenge – anders als in den RS, in denen dieser Effekt nicht auftrat – den Bodenraum nicht gänzlich erschließen und so möglicherweise die vorhandenen Nährstoff-Ressourcen weniger effizient nutzen als HA und LUW, die eine sehr gleichmäßige Durchwurzelung des Bodenraumes aufwiesen und daher von der funktionalen Komplementarität der Gemengepartner (Faget et al. 2013, Homulle et al. 2022) profitieren konnten. Ob allelopathisch aktive Substanzen der Gemengepartner von MA und LUW der Grund für diese Vermeidung des gemeinsamen Wurzelraums verantwortlich sind oder ob dieser Effekt andere Ursachen hat und welcher Gemengepartner hauptsächlich ist, müsste weitergehend untersucht werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Gemengeanbau von MA mit LUA und HA mit LUW einen Einfluss auf die Wurzelstratifikation zeigte und insgesamt den Wasserentzug der Kulturen aus dem Boden reduzierte. Allerdings zeigten LUW und HA eine positive unterirdische Interaktion mit gleichmäßiger Durchwurzelung des Bodenraumes, während dies bei LUA und MA nicht der Fall war und auf eine negative Interaktion schließen lässt, die die geringere Flächennutzungseffizienz des Anbausystems erklären könnte.

N_{min}-Untersuchungen nach Ernte von Andenlupine und Weißer Lupine in Reinsaat und im Gemenge (AP 4.2 und 7)

Die Beprobung auf die N_{min}-Gehalte erfolgte im Frühjahr nach Aussaat der Versuche bis auf eine Tiefe von 90 cm blockweise, d.h. je nach Versuchsanlage in zwei-, drei- oder vierfacher Wiederholung. Im Herbst erfolgte die Beprobung in ausgewählten Varianten im Vergleich Reinsaat Lupine und Mais bzw. Hafer versus Gemengeanbau bis zu einer Tiefe von 60 cm. Die Durchführung der Analyse erfolgte nach VDLUFA (1991).

Die Ausgangssituation des zur Aussaat der Versuche verfügbaren Stickstoffs war teilweise in den Versuchsjahren und in Abhängigkeit der Versuchsanlagen (Andenlupinen-Mais- bzw. Weiße Lupine-Hafer-Versuche) unterschiedlich (Tabelle 59). Auffallend sind die im Jahr 2020 niedrigeren N_{min}-Gehalte, insbesondere in den Versuchen zu Weißer Lupine-Hafer. Die Ursache hierfür ist voraussichtlich in den hohen Niederschlägen in der Herbst-Winterperiode zu sehen, die zu einer Verlagerung von Nitratstickstoff geführt haben könnten. In den Andenlupinen-Mais-Versuchen sind die N_{min}-Gehalte im Boden moderat. Dies begründet sich darin, dass der Klee grasumbruch stets im Frühjahr durchgeführt wurde und somit keine starke frühzeitige Mineralisation eingesetzt konnte.

Tabelle 59: N_{min}-Gehalte (kg ha⁻¹) im Frühjahr zur Aussaat der Versuche für die Jahre 2019 bis 2021 am Standort Trenthorst in 0-90 cm Tiefe

Jahr	/	LUA-Mais			LUW-Hafer	
		AP	AP 2	AP 4.2	AP 6	AP 7
2019			49	54	86	86
2020			38	50	22	21
2021			57	46	61	70

LUA – Andenlupine, LUW = Weiße Lupine

Nach der Beerntung der Versuche wurde in den LUA-Mais-Versuchen in allen 3 Jahren die Mais-Reinsaat (Sorte Smoothi), im Jahr 2019 6 LUA-Reinsaaten sowie in den Jahren 2020 und 2021 jeweils 11 LUA-Reinsaaten und die entsprechenden LUA-Mais-Gemengevarianten beprobt.

In den LUW-Hafer-Versuchen wurde in AP 6 nach der Beerntung die 4 Sorten der Weißen Lupine in Reinsaat sowie die Gemenge von Weißer Lupine und der Hafersorte Evererst beprobt. Zusätzlich wurde aus dem Versuch in AP 7 die Weiße Lupinensorte Energy und die Hafersorte Arborg in Reinsaat sowie die dazugehörigen Gemenge mit 75% LUW+25% Hafer und 50% LUW+50% Hafer beprobt.

In 2019 konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Reinsaaten und den Gemengevarianten nachgewiesen werden (Tabelle 60). In den Jahren 2020 und 2021 waren die $N_{\min}$ -Gehalte nach Ernte in den Gemengevarianten jedoch niedriger als in den LUA-Reinsaaten, sodass die Gemengevarianten auf vergleichbarem Niveau mit den Mais-Reinsaaten lagen (Tabelle 60). Dennoch verhielten sich die Andenlupinenlinien in diesen beiden Jahren unterschiedlich, d.h. es wurde bei der statistischen Verrechnung eine Wechselwirkung von Jahr x Sorte ausgewiesen, die jedoch in beiden Jahren nicht gleichgerichtet ausfiel (Tabelle 61). So wies LUA 4 in 2020 den höchsten $N_{\min}$ -Gehalt aus, in 2021 jedoch den niedrigsten.

Tabelle 60: $N_{\min}$ -Gehalte (kg ha^{-1}) im Herbst nach der Ernte für die Jahre 2019 bis 2021 am Standort Trenthorst in 0-60 cm Tiefe

Jahr	LUA-Mais			LUW-Hafer			AP 7		
	AP 2			AP 6					
	LUA-RS	LUA-Mais	Mais-RS	LUW-RS	LUW-HA	Hafer-RS	LUW-RS	LUW-HA	Hafer-RS
2019	24,1 a	26,4 a	19,0	14,8 a A	18,8 a B	14,4	25,7	28,4	19,5
2020	28,3 b	16,5 a	16,1	32,4 b B	19,9 a B	13,0	17,5	15,8	18,4
2021	31,7 b	20,5 a	22,5	18,2 b A	12,8 a A	14,3	22,8	22,8	16,2

LUA – Andenlupine, LUW = Weiße Lupine, RS – Reinsaat, unterschiedliche kleine Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Reinsaat Lupine und Gemengeanbau für das jeweilige Jahr für die verschiedenen Versuche, unterschiedliche große Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Jahren für die jeweilige Anbauform.

Tabelle 61: $N_{\min}$ -Gehalte (kg ha^{-1}) im Herbst nach der Ernte für die Jahre 2020 und 2021 am Standort Trenthorst in 0-60 cm Tiefe dargestellt für die Wechselwirkung von Sorte und Jahr

Jahr	Andenlupinenherkunft										
	LUA 1	LUA 2	LUA 3	LUA 4	LUA 6	LUA 7	LUA 13	LUA 15	LUA 18	LUA 19	LUA 20
2020	19,7 ab	19,7 ab	22,8 ab	31,9 c	19,7 ab	22,7 ab	19,8 ab	26,6 bc	22,6 ab	18,7 a	21,8 ab
2021	23,7 ab	23,4 ab	23,2 ab	20,3 a	26,6 ac	20,7 a	22,7 ab	25,0 ac	30,6 bd	32,5 cd	38,4 d

LUA – Andenlupine

In den Versuchen zu Weißer Lupine und Hafer in AP 6 zeigten sich – vergleichbar zu den LUA-Mais-Versuchen keine signifikanten Unterschiede bei den $N_{\min}$ -Gehalten nach Beerntung (Tabelle 60). Ebenfalls lagen signifikante Unterschiede für die Jahre 2020 und 2021 vor, wobei auch hier die $N_{\min}$ -Gehalte nach Gemengeanbau niedriger ausfielen als nach Reinsaat Lupine (Tabelle 60). Im Gegensatz zu den Andenlupinenversuchen waren die $N_{\min}$ -Gehalte bei allen 4 untersuchten Lupinensorten auf vergleichbarem Niveau.

N₂-Fixierleistung von Andenlupine und Weißer Lupine in Reinsaat und im Gemenge (AP 4.2 und 7)

Die Stickstofffixierleistung wurde am Standort Trenthorst in den Versuchen mit Andenlupinen und Mais (AP 2) als auch mit Weißer Lupine und Hafer (AP 6) in den Jahren 2019 – 2021 an ausgewählten Varianten bestimmt. Hierzu wurde bei 60°C getrocknetes Probenmaterial mit einer Schwingmühle vermahlen und gemäß den Vorgaben der UC Davis (Stable Isotope Facility) in Zinnkapseln eingewogen und verschlossen. Die ¹⁵N-Isotopenanalyse wurde an der UC Davis mit einem Elementaranalysator (PDZ Europa ANCA), der an ein Massenspektrometer (PDZ Europa 20–20 mit Isotopenverhältnis, Sercon Ltd., Cheshire, UK) angeschlossen ist, durchgeführt.

Die Berechnung der symbiotischen N₂-Fixierung der Lupinen basiert auf dem Ertrag der Lupinen [dt TM ha⁻¹], dem N-Gehalt [%] der Lupinen, den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Lupinen, den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Referenzpflanze (Mais bzw. Hafer) und dem B-Wert zur Korrektur der Isotopenfraktionierung (Unkovich 2008).

Der aus der symbiotischen N₂-Fixierung stammende N-Anteil (N_{dfa} = nitrogen derived from the atmosphere) wurde anhand der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Lupinen sowie der Referenzpflanze und dem B-Wert (= $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von

Lupine, die auf N-freiem Medium gewachsen sind und somit ausschließlich N₂ aus der Luft aufgenommen haben) berechnet. Da es nicht möglich war einen eigenen B-Wert zu ermitteln, wurde der B-Wert von -0,57 nach Unkovich (2008) für die Berechnung des Ndfa verwendet:

$$Ndfa(\%) = \frac{(\delta^{15}N_{Referenzpflanze} - \delta^{15}N_{Lupine})}{(\delta^{15}N_{Referenzpflanze} - B)}$$

Die N-Menge der Lupinen-Sprossmasse wurde aus dem N-Gehalt [%] der Lupinen und dem Lupine-Ertrag [kg TM ha⁻¹] ermittelt:

$$N - Menge_{Lupinen-Sprossmasse} (kg ha^{-1}) = N - Gehalt_{Lupine} (\%) \times Lupinenertrag (kg TM ha^{-1})$$

Die symbiotisch fixierte Stickstoffmenge in der Lupinen-Sprossmasse wurde anhand des Ndfa-Wertes [%] und der N-Menge in der Lupinen-Sprossmasse [kg ha⁻¹] berechnet:

$$N_{fix}(kg ha^{-1}) = \frac{(Ndfa (\%) \times N - Menge_{Lupinen-Sprossmasse} (kg ha^{-1}))}{(100)}$$

Tabelle 62: N₂-Fixierleistung [kg ha⁻¹] der Andenlupinen in Reinsaat und im Gemenge mit Mais sowie gemittelt über den Anbau in Reinsaat und Gemenge

Faktor		2019		2020		2021	
Anbauform	Reinsaat	48,5	b	39,5	b	23,2	b
	Gemenge	12,6	a	7,9	a	5,2	a
Andenlupine	LUA 1	27,4	a	27,1	c	12,1	a
	LUA 2	31,0	a	27,6	c	22,2	a
	LUA 3	26,5	a	21,1	bc	11,5	a
	LUA 4	27,5	a	18,6	bc	14,6	a
	LUA 6	30,1	a	28,0	c	16,2	a
	LUA 7	23,5	a	26,0	bc	11,6	a
	LUA 13			18,6	bc	8,2	a
	LUA 15			19,9	bc	12,4	a
	LUA 18			5,6	a	12,3	a
	LUA 19			16,1	b	6,7	a
	LUA 24			25,8	bc	13,6	a

Die Ergebnisse für die Andenlupineversuche (Tabelle 62) zeigen, dass die N₂-Fixierleistung zwischen den Jahren unterschiedlich war, was vor allem auf die unterschiedlich hohe Ertragsleistung in den Jahren zurückzuführen ist (vgl. Abbildung 1 - Abbildung 3 für den Standort Trenthorst).

Die statistische Auswertung zeigte signifikante Effekte für den Faktor Anbauform in allen 3 Jahren, für die Sorte der Andenlupine jedoch nur für das Jahr 2020 (Tabelle 62). Eine Wechselwirkung zwischen Anbauform und Andenlupinensorte wurde nicht ausgewiesen. Die Reinsaat der Andenlupinen wiesen in allen 3 Versuchsjahren eine signifikant, d.h. mindestens um das 4-fache höhere N₂-Fixierleistung auf als in den Gemengevarianten mit Mais. Dennoch lag die N₂-Fixierleistung der Andenlupinen in Reinsaat bei maximal 65 kg N ha⁻¹ (Sorte Tarwi blanco im Jahr 2019). Inwiefern die N₂-Fixierleistung der Andenlupinen aufgrund der Vorfrucht Klee gras, die in der Vegetationsperiode nach dem Umbruch relativ hohe N-Mineralisationsraten aufweist und damit auch zu höheren Nitratgehalten führen kann, die sich wiederum negativ auf die N-Fixierleistung der angebauten Leguminosen (Jensen 1997, van Kessel und Hartley 2000, Salvagiotti et al. 2008), also in diesem Fall der Andenlupinen, auswirken kann, konnte nicht festgestellt werden.

Im Jahr 2020 wurde die höchste N₂-Fixierleistung für die Andenlupinensorten LUA 1, LUA 2 und LUA 6 ausgewiesen, die zumeist auch in den beiden anderen Jahren die höchsten N₂-Fixierungsleistungen zeigten. LUA 1 und LUA 2 waren zudem die beiden Andenlupinen in dem Projekt, die in 8 von 9 Fällen die höchsten Andenlupinen-TM-Erträge realisiert haben (vgl. Kap. 1.2).

Die N₂-Fixierleistung der Weißen Lupinen wurde im Rahmen des Feldversuches im Rahmen des AP 6 am Standort Trenthorst erhoben, wobei die im Versuch geprüften 4 Sorten der Weißen Lupine in Reinsaat und im Gemenge mit dem Hafer (*Avena sativa* L.), Sorte Everest als Gemegepartner und gleichfalls als nicht legume Referenzpflanze untersucht wurden. Die Aussaatstärke der Weißen Lupine in Reinsaat betrug 60, die vom Hafer 300 keimfähige Körner pro m². In den Gemengevarianten wurden 30 + 100 keimfähige Körner pro m² Lupine bzw. Hafer in alternierenden Reihen ausgesät.

Tabelle 63: N₂-Fixierleistung [kg ha⁻¹] der Weißen Lupine im Mittel der Jahre, der Anbau-form und der Sorte am Standort Trenthorst

		N ₂ -Fixierleistung [kg N ha ⁻¹]
Jahr	2019	66,5
	2020	28,7
	2021	50,9
Anbau-form	Reinsaat	76,8 b
	Gemenge	25,0 a
Sorte	Energy	31,6
	Rumbo	47,9
	Celina	55,5
	TRI 07077	56,8

Tabelle 64: N₂-Fixierleistung [kg ha⁻¹] der Weißen Lupine im Mittel der Jahre, der Anbau-form und der Sorte am Standort Trenthorst

		Jahr		
		2019	2020	2021
Sorte	Energy	57,7 b B	13,6 a A	31,2 a AB
	Rumbo	28,9 a A	64,6 b B	53,8 ab AB
	Celina	117,7 c C	21,4 a A	51,1 ab B
	TRI 07077	82,3 bc B	25,7 a A	71,8 b B

Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede für die Lupinensorte für das jeweilige Jahr, unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Jahren für die jeweilige Sorte

Die statistische Verrechnung über die 3 Versuchsjahre ergab signifikante Effekte der 3 Hauptfaktoren Jahr, Anbauform und Sorte (Tabelle 63), wobei jedoch zusätzlich eine signifikante Wechselwirkung für die Faktoren Jahr x Sorte ausgewiesen wurde (Tabelle 64).

Deutlich wurde auch hier, wie bei den Versuchen mit Andenlupinen und Mais, dass die N₂-Fixierleistung der Gemenge signifikant niedriger war als in den Reinsaat. Dies konnte in vielen Versuchen zur N₂-Fixierleistung in Gemengeanbauversuchen nachgewiesen werden (Wichmann 2006, Riu et al 2022). Obwohl die Aussaatstärke der Weißen Lupinen in den Gemengen 50% der Saatstärke der Reinsaat Weiße Lupine betrug, fiel die N₂-Fixierleistung im Gemenge im Vergleich zur Reinsaat jedoch deutlich geringer aus, d.h. sie betrug ca. 30% der Fixierleistung der Reinsaat. Dies begründet sich in den deutlich geringeren Ertragsanteilen der Weißen Lupinen in den Gemengen aufgrund der konkurrierenden Bedingungen zwischen Hafer und Weißer Lupine.

Die Wechselwirkung der Faktoren Jahr und Sorte (Tabelle 64) sind nur zum Teil nachvollziehbar zu erklären. Die niedrigste N₂-Fixierleistung von Rumbo in 2019 kann durch den ebenfalls geringen TM-Ertrag von Rumbo in diesem Jahr erklärt werden. In 2020 hat Rumbo die signifikante höchste N₂-Fixierleistung, die TM-Erträge liegen aber für alle geprüften Lupinensorten auf vergleichbarem Niveau. Welche Faktoren hier noch Einfluß auf die N₂-Fixierleistung hatten, konnte nicht geklärt werden.

Saatstärkenversuch zum Gemengeanbau von Weißer Lupine und Hafer (AP 7)

Eine Zusammenfassung des Arbeitspakets erfolgte bereits im Hauptteil dieses Berichts. Es konnte dort festgestellt werden, dass der Gemengeanbau anhand der GTM-Erträge insgesamt vorteilhaft gegenüber den Reinsaat ausfiel, dieser Effekt gemessen an dem Parameter AYL jedoch abhängig war von der LUW-Saatstärke, der LUW-Sorte und der Kombination der Gemegepartner LUW und HA. Die Unterdrückung von Unkraut im Gemenge war insgesamt am vorteilhaftesten bei 25 und 50 % Saatstärke der LUW, jedoch zudem abhängig von der LUW-Sorte. Eine Betrachtung der einzelnen Sorten ist hier also zusätzlich angemessen.

Bei den Reinsaat wiesen LUW 4 und HA 1 (beide früh abreifend) die höchsten, LUW 2 (langsame Jugendentwicklung) den geringsten GTM-Ertrag auf (Abbildung 38). Die Kombination HA 1-LUW 2 mit 25 % Saatstärke der LUW jedoch wies den höchsten GTM-Ertrag der Gemenge sowie einen hohen LER auf, während alle Kombinationen der LUW 2 mit HA 3 die geringsten Erträge brachten und die Kombination aus 25 % LUW 2 mit 75 % HA 3 zudem den geringsten LER (Abbildung 38, Tabelle 65). Nur noch die Kombination von 25 % LUW 4 mit HA 3 erbrachte einen erhöhten LER. Insgesamt wies nur eine Kombination (25 % LUW 2 mit HA 3) anhand des LER einen Nachteil im Gemenge, alle anderen Kombinationen waren vorteilhaft (LER > 1).

Die Einstufung der Gemengeleistung anhand des AYL jedoch fällt differenzierter aus, da hier die Saatstärke der Partner berücksichtigt wird (Tabelle 65). Hier lässt sich zusammenfassen, dass Kombinationen mit 25 %

LUW unabhängig vom HA-Partner nachteilig ausfielen (AYL -0,104 im Mittel der Varianten), während Kombinationen mit 75 % LUW am vorteilhaftesten waren (AYL 1,199 im Mittel der Varianten). Am vorteilhaftesten anhand dieses Parameters wären die Kombinationen 75 % LUW 2-HA 1 und 75 % LUW 4-HA 1 einzuschätzen.

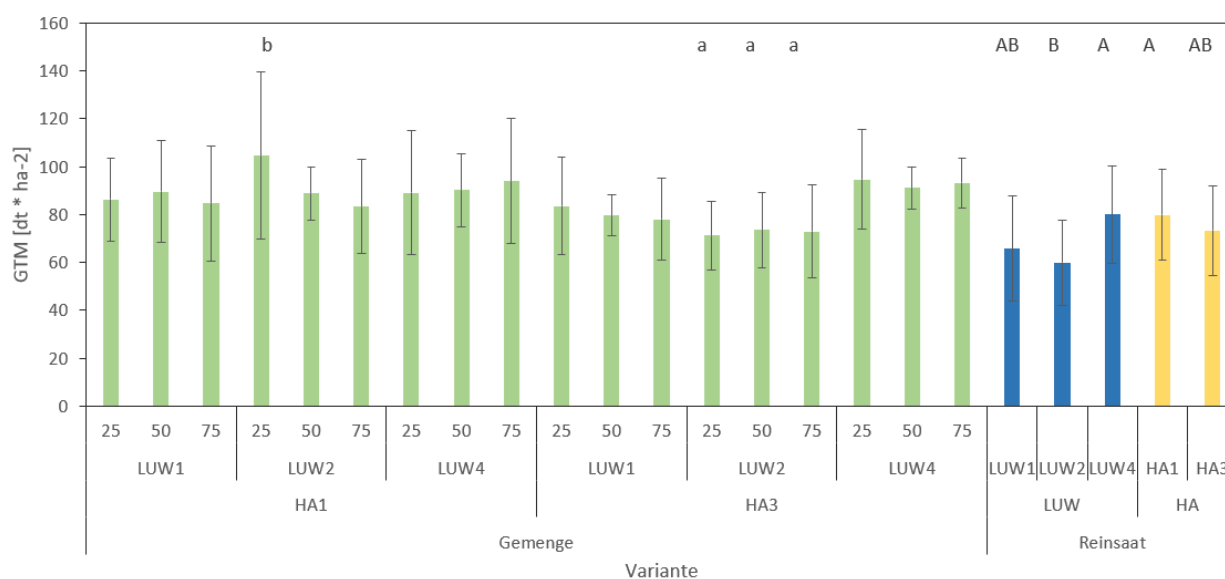


Abbildung 38: GTM-Erträge aller Varianten (nach Hafer, Weiße Lupine-Sorte, Saatstärke der Lupine) aus AP 7 am Standort TH 2019-2021. HA = Hafer, LUW = Weiße Lupine, Nummern nach HA / LUW geben die Sorte / Linie an. Unterschiedliche Buchstaben zeigen einen signifikanten Unterschied auf, MMANOVA mit Jahr als Zufallsfaktor, $p < 0,05$.

Tabelle 65: Gemeindeindizes Landequivalent-Index (LER) und Ertragsgewinn (actual yield loss, AYL) der Gemeindevarianten aus AP 7 am Standort TH 2019-2021. HA = Hafer, LUW = Weiße Lupine, Nummern nach HA / LUW geben die Sorte / Linie an

HA	LUW	Saatstärke LUW ¹⁾	LER			AYL		
			Mittel	Stabw.		Mittel	Stabw.	
HA 1	LUW 1	25	1,06	0,14	ab	-0,21	0,26	a
		50	1,14	0,23	ab	0,28	0,46	abcd
		75	1,13	0,26	ab	1,25	0,98	def
	LUW 2	25	1,29	0,37	b	-0,01	0,59	a
		50	1,15	0,20	ab	0,28	0,39	abcd
		75	1,10	0,31	ab	1,31	0,73	f
	LUW 4	25	1,12	0,32	ab	0,05	0,69	a
		50	1,13	0,14	ab	0,26	0,26	abcd
		75	1,16	0,21	ab	1,31	0,87	ef
HA 3	LUW 1	25	1,10	0,31	ab	-0,22	0,45	a
		50	1,03	0,19	ab	0,06	0,40	abc
		75	1,09	0,27	ab	1,09	0,12	cdef
	LUW 2	25	0,96	0,33	a	-0,43	0,68	a
		50	1,03	0,30	ab	0,08	0,60	ab
		75	1,09	0,27	ab	0,92	0,98	bcdef
	LUW 4	25	1,31	0,37	b	0,16	0,50	abc
		50	1,16	0,19	ab	0,31	0,38	abcde
		75	1,16	0,22	ab	1,26	0,11	def

Unterschiedliche Buchstaben in einer Spalte kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$),

¹⁾ Saatstärke LUW = Anteil (%) von LUW im Aussaatgemenge

Bei der Unkrautbiomasse in den Reinsaaten der LUW war trotz der Jahresunterschiede durch witterungsabhängig unterschiedliche mechanische Regulierung doch erkennbar, dass LUW 2 mit einem langen Rosettenstadium in der Jugendentwicklung eine bessere Unkrautunterdrückung aufwies als LUW 4, die durch eine frühe Abreife gekennzeichnet ist (Abbildung 39). Bei Betrachtung der einzelnen Varianten wird zum einen der bereits im Hauptteil des Berichts festgestellte positive Effekt durch den Hafer-Gemengepartner (Abbildung 9) bei fast allen Varianten sichtbar, zum anderen zeigte die besonders Ertragsstarke Gemengekombination 25 % UW2-HA1 auch den besten Unkrautunterdrückungseffekt (Abbildung 39).

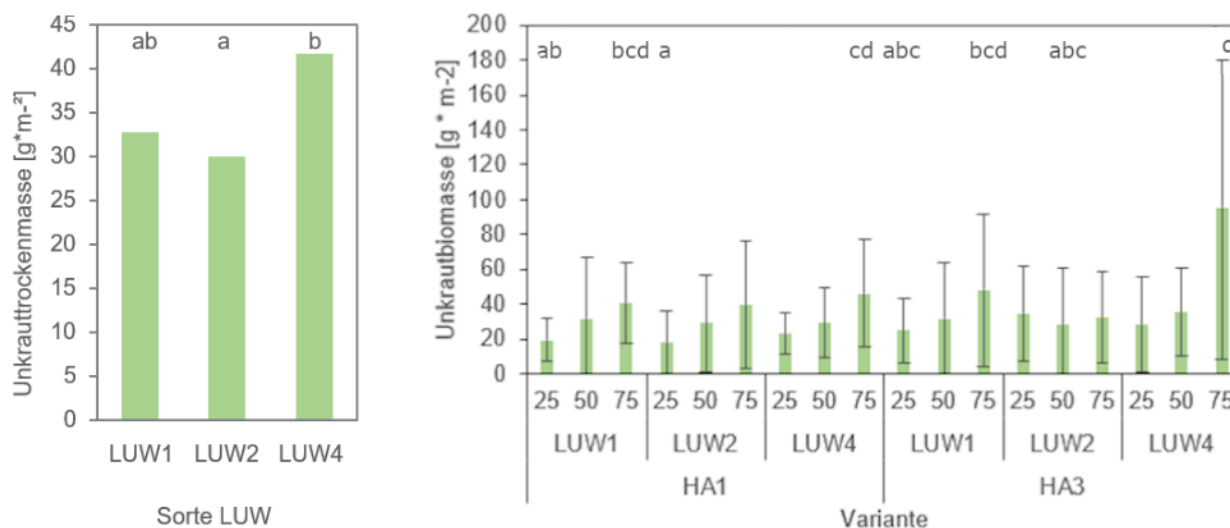


Abbildung 39: Unkrautbiomasse in den Gemengevarianten (nach Hafer, Weiße Lupine-Sorte, Saatstärke der Lupine) des AP 7 am Standort TH 2019-2021 nach der Sorte der LUW (links) und in alle Varianten aufgeschlüsselt (rechts). HA = Hafer, LUW = Weiße Lupine, Nummern nach HA / LUW geben die Sorte/ Linie an. Verschiedene Buchstaben zeigen Gruppenunterschiede anhand MMANOVA mit dem Jahr als Zufallsfaktor, $p < 0,05$.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Der in AP 4.2 durchgeführte Feldversuch ermöglichte eine Einschätzung der Anbauparameter Reihenweite und Saatstärke der Andenlupinen zum Anbau einer wachstumsstarken Andenlupine wie LUA 1 in Kombination mit Mais. Die Saatstärke der Andenlupine, die in dem Versuch von 10 bis 20 kf Kö m⁻² variiert wurde, sollte sich nach wirtschaftlichen Faktoren orientieren. Aufgrund der voraussichtlich im Vergleich zu Mais höheren Saatgutkosten für Andenlupinen (Saatgutknappheit, Vermehrung in Südamerika) und keinen deutlichen Mehrerträgen bei höherer Saatkichte wäre eine Saatstärke von 10 kf Kö m⁻² in Kombination mit 8 kf Kö m⁻² Mais empfehlenswert. Weiter sollte der Anbau mit einer Reihenweite von 37,5 cm erfolgen, da hier mit leichten Mehrerträgen zu rechnen ist.

Anhand der Profilwanduntersuchungen konnte gezeigt werden, dass der Gemengeanbau von Andenlupine und Mais bzw. Weißer Lupine und Hafer einen Einfluss auf die Wurzelstratifikation besaß und insgesamt den Wasserentzug der Kulturen aus dem Boden reduzierte. Allerdings zeigten die Gemenge von Weißer Lupine und Hafer eine positive unterirdische Interaktion mit gleichmäßiger Durchwurzelung des Bodenraumes, während dies bei den Gemengen von Andenlupine und Mais nicht der Fall war und auf eine negative Interaktion schließen lässt, die die geringere Flächennutzungseffizienz des Anbausystems Andenlupine-Mais erklären könnte.

In AP 7 zeigte sich, dass die Gemenge aus Weißer Lupine und Hafer insgesamt den Reinsaaten im Ertrag überlegen waren. Im Sinne einer Kombination aus einerseits guter Unkrautunterdrückung und andererseits einem möglichst optimalen Ertragsvorteil ist ein Gemenge mit 50 % beider Gemengepartner in der Aussaatmischung zu empfehlen. Unterschiede zwischen den verschiedenen Sortenkombinationen von Weißer Lupine und Hafer wurden ebenfalls festgestellt. So zeigte sich, dass die LUW 2, die in Reinsaat den geringsten Ertrag brachte, im Gemenge durchaus vorteilhaft sein kann, jedoch in Abhängigkeit vom Hafer-Partner. Mit der frühreifen, auch in Reinsaat ertragsstarken Sorte HA1 konnte bei 25 % LUW der höchste Ertrag gemeinsam mit einer guten Unkrautunterdrückung gewährleistet werden.

Die N₂-Fixierleistung war in den Reinsaaten bei Weißen Lupinen mit durchschnittlich 77 kg ha⁻¹ deutlich höher als bei den Andenlupinen mit 40 kg ha⁻¹. Im Gemengeanbau war die N₂-Fixierleistung im Vergleich zu den Reinsaaten deutlich reduziert, d.h. die Weißen Lupinen fixierten im Gemenge durchschnittlich 25 kg ha⁻¹, während die Andenlupinen lediglich 8 kg ha⁻¹ Luftstickstoff fixierten. Die insgesamt sehr geringe N₂-

Fixierleistung der Andenlupinen ist auch auf die recht geringe Saatchichte der Andenlupinen in den Gemengen (10 kf Kö m⁻²) im Vergleich zu 40 kf Kö m⁻² in den Reinsaat zu erklären. Bei den Weißen Lupinen wurden in den Gemengen 50% der Aussaatstärke der Reinsaat gewählt (60 kf Kö m⁻² vs 30 kf Kö m⁻²).

Literaturverzeichnis

- Anil L, Park J, Phipps RH (2000) The potential of forage–maize intercrops in ruminant nutrition. *Animal Feed Science and Technology* 86:157-164
- Böhm W (1979) *Methods of studying root systems* (p. 20-38; 48-59). Berlin Heidelberg, Springer
- DLG (2013) DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit, 64 p
- Döhler, H., Eckel, H., Fröba, N., Grebe, S., Grube, J., Hartmann S., Hauptmann, A., Horlacher, D., Horn, C., Hofmann, M., Häußermann, U., Möller, K., Klages, S., Sauer, N., Nakazi S., Niebaum A., Paterson, M., Roth U., Schultheiß, U., Stadelmann, M., Vandr , R., Wirth, B., Witzel, E., Wulf, S. (2013) *Faustzahlen Biogas*, 3. Ausgabe, Herausgeber Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, ISBN: 978-3-941583-85-6, 360 Seiten
- Driehuis F, Oude Elferink SJWH, Spoelstra S, (1999) Anaerobic lactic acid to acetic acid degradation during ensilage of whole crop maize inoculated with *Lactobacillus buchneri* inhibits yeast growth and improves aerobic stability. *J Appl Microbiol* 87(4):583-594
- Eder B., Eder J. (2009) Bayern Biogas Forum: Silomais für die Biogasproduktion, LfL- Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, [online]< <http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Silomais.fuer.die.Biogasproduktion.pdf> [zitiert am 22.012.2022], 9 Seiten
- Faget M, Nagel K A, Walter A, Herrera J M, Jahnke S, Schurr U, Temperton V M (2013) Root–root interactions: extending our perspective to be more inclusive of the range of theories in ecology and agriculture using in-vivo analyses. *Annals of Botany* 112:253–266
- FNR (2010) *Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen*, 3. Auflage, ISBN: 978-3-942147-02-6, 116 Seiten
- Friehe, J., Schattauer, A., Weihland, P. (2016) *Beschreibung ausgewählter Substrate in: Leitfaden Biogas – von der Gewinnung zur Nutzung*. 7. Auflage, ISBN: 3-00-014333-5, S. 68 - 75
- Friehe, J., Schattauer, A., Weiland, P. (2013) *Grundlagen der anaeroben Fermentation*, In FNR Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung, 6., überarbeitete Auflage, ISBN 3-00-014333-5, S. 11 – 19
- Hack H, Bleiholder H, Buhr L, Meier U, Schnock-Fricke U, Weber E, Witzemberger A (1992) Einheitliche codierung der phänologischen entwicklungsstadien mono-und dikotyler pflanzen – erweiterte BBCH-Skala, *Allgemein. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutz*, 44(12), 265–270
- H lker, U. (2013) Eine ständig aktualisierte und erweiterte Beschreibung von über 1.600 Biogasanlagen, [online]: <http://www.biogaswissen.de/> Zugriff: 22.12.2022
- Holzgreve H und Böhm H (2021) Intercropping maize with Andean lupin: a view to the roots. Intercropping for sustainability: Research developments and their application. Warwick: Association of Applied Biologists. S. 157–164.
- Homulle Z, George T S, Karley A J (2022) Root traits with team benefits: understanding belowground interactions in intercropping systems. *Plant Soil* 471:1-26
- Honig H (1986) Evaluation of aerobic stability. *Proceedings of the Eurobac Conference*, 12.-16. August 1986, Grass and Forage report, Uppsala (Schweden), pp 76-82
- Jänicke H (2011) Grobfutter- und Substraterzeugung. In: DLG e.V. (ed) *Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung*, 8. Aufl., DLG, Frankfurt, pp 23-50
- Jensen E S (1997) The role of grain legume N₂ fixation in the nitrogen cycling of temperate cropping systems. PhD-Thesis, Risoe National Lab, 215 pp.
- Kaiser F, Metzner T, Effenberger M, Gronauer A (2008) Sicherung der Prozessstabilität in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, In Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freisingen – Weißenstephan: LfLInformation 2007, 14 Seite
- Kalzendorf Ch, Staudacher W (2011) G rungsbiologische Grundlagen und biochemische Prozesse der Silagebereitung. In: DLG e.V. (ed) *Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung*, 8. Aufl., DLG, Frankfurt, pp 83-96

- Kleinschmidt DH, Kung Jr L (2006) A Meta-Analysis of the Effects of *Lactobacillus buchneri* on the Fermentation and Aerobic Stability of Corn and Grass and Small-Grain Silages. *J Dairy Sci* 89:4005-4013
- Krooneman J, Faber F, Alderkamp AC, Oude Elferink SJHW, Driehuis F, Cleenwerck I, Swings J, Gottschal JC, Vancanneyt M (2002) *Lactobacillus diolivorans* sp. nov., a 1,2-propanediol-degrading bacterium isolated from aerobically stable maize silage. *Int J Syst Evol Microbiol* 52:639-646
- KTBL (2005) Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Heft 50, Gasaussbeuten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, ISBN: 10:3-939371-17-3, S.24
- KTBL (2010) Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Gasaussbeuten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Heft 88, 2. Auflage, ISBN: 978-3-941583-42-9, Seiten 36
- KTBL (2013) Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Faustzahlen Biogas, 3. Auflage, ISBN: 978-3-941583-85-6, Seiten 360
- Lemmer A, Oechsner H (2013) Biogaserzeugung, In: Biogas-Erzeugung, Aufbereitung, Einspeisung, Hrsg. Bajohr, S., Graf, F., Deutscher Industrieverlag GmbH, ISBN 978-3-8356-3363-6
- LFL Bayern (2022) Gasaussbeuten verschiedener Substrate [online], https://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=20%2Cb&anker0=substratanker#substratanker Zugriff: 12.01.2023
- Liu R, Zhou G-p, Chang D-n, Gao S-j, Han M, Zhang J-d, Sun X-f, Cao W-d (2022) Transfer characteristics of nitrogen fixed by leguminous green manure crops when intercropped with maize in northwestern China. *Journal of Integrative Agriculture* 21(4):1177-1187
- Muck R, Kung Jr L (1997) Effects of silage additives on ensiling. *Silage: Field to feedbunk*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES), Ithaca, New York, USA
- Muck RE, O'kiely P (1992) Aerobic deterioration of lucerne (*Medicago sativa*) and maize (*Zea mais*) silages—effects of fermentation products. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 59:145-149
- Nishino N, Yoshida M, Shiota H, Sakaguchi E (2003) Accumulation of 1,2-propanediol and enhancement of aerobic stability in whole crop maize silage inoculated with *Lactobacillus buchneri*. *J Appl Microbiol* 94:800-807
- Oude Elferink SJWH, Krooneman J, Gottschal JC, Spoelstra SF, Faber F, Driehuis F (2001) Anaerobic conversion of lactic acid to acetic acid and 1,2-propanediol by *Lactobacillus buchneri*. *Appl Environ Microbiol* 67(1):125-132
- Pahlow G (1985) O₂-abhängige Veränderungen der Mikroflora in Silagen mit Lactobacterienzusatz. In: Kongressband 1984: Vorträge gehalten auf dem 96. VdLUFA-Kongreß in Karlsruhe 17.-22. September 1984, Landwirtschaftliche Forschung – Sonderheft, 41, pp 630-639
- Pahlow G (2004) Erfahrungen mit Mikroorganismen in der Silierung. In: Hülsenberger Gespräche, 20, pp 85-96
- Pahlow G, Hünting K (2011) Gärungsbiologische Grundlagen und biochemische Prozesse der Silagebereitung. In: DLG e.V. (eds) *Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung*, 8. Aufl., DLG, Frankfurt, pp 73-82
- Pieper J, Poppe S, Schröder A (2014) Tipps zur Herstellung von Topsilagen. 2. Aufl., 75 p, <https://www.dr-pieper.com/wp-content/uploads/2014/08/Broschueren-Infoblaetter-07-de.pdf> [letzter Abruf am 19.01.2024]
- Qu Y, Jiang W, Yin G, Wei C, Bao J (2013) Effects of Feeding Corn-lablab Bean Mixture Silages on Nutrient Apparent Digestibility and Performance of Dairy Cows. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 26:509-516
- Ranjit NK, Taylor CC, Kung Jr L (2006) Effects of *Lactobacillus buchneri* 40788 on the fermentation, aerobic stability and nutritive value of maize silage. *Grass and Forage Science* 57:73-81
- Resch R, Wiedner G, Tiefenthaller F, Wurm K, Stromberger W, Frank P, Meusburger Chr (2010) Qualitätsbewertung von österreichischen Grassilagen und Silomais aus Praxisbetrieben. Abschlussbericht Silageprojekt, Wissenschaftlich Tätigkeit Nr.3561 (100535), 86p
- Salvagiotti F, Cassman KG, Specht JE, Walters DT, Weiss A, Dobermann A (2008) Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research* 108(1):1-13
- Schaumann (ohne Jahr) Maissilage-Fibel: Leitfaden zur erfolgreichen Maissilierung, 27p, https://www.schaumann.de/statics/www_schaumann_de/downloads/Prospekte_Flyer/fib_hws_maissilage_fibel_191212.pdf [letzter Abruf am 19.01.2024]

- Siegfried R, Rückmann H, Stumpf G (1984) Eine HPLC-Methode zur Bestimmung organischer Säuren in Silagen. *Landwirtschaftliche Forschung*, 37(3-4):298-304
- Spiekers H (2011) Konservierungsverfahren. In: DLG e.V. (Hrsg.) *Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung*, 8. Aufl., DLG, Frankfurt, pp 13-17
- Spiekers H, Nußbaum H, Potthast V (2009) *Erfolgreiche Milchviehfütterung*. 5. Aufl., DLG, Frankfurt, 576 p
- Streit J, Meinen C, Rauber R (2019) Intercropping effects on root distribution of eight novel winter faba bean genotypes mixed with winter wheat. *Field Crops Research* 235:1–10
- Thaysen J (2010) Ganzpflanzensilage. In: *Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft*, Reckleben Y (eds), Rendsburg, pp 847-920, <https://www.rkl-info.de/wp-content/uploads/Thaysen-Ganzpflanzensilage.pdf> [letzter Abruf am 19.01.2024]
- Unkovich M (2008) *Measuring Plant-associated Nitrogen Fixation in Agricultural Systems*. Canberra, ACT: Australian Centre for International Agricultural Research, ACIAR Monograph; No. 136
- van Kessel C, Hartley C (2000) Agricultural management of grain legumes: has it led to an increase in nitrogen fixation? *Field Crops Research* 65(2-3):165-181
- Van Noordwijk M, Brouwer G, Meijboom F, do Rosário M, Oliveira G, Bengough A G (2000) Trench profile techniques and core break methods, S. 211–234. In: *Root Methods: A Handbook*. Berlin Heidelberg, Germany: Springer Spektrum
- VDI-Richtlinie 4630 (2006) VDI-Gesellschaft Energietechnik, Fachausschuss Regenerativer Energien: „Vergärung organischer Stoffe, Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche“, Beuth Verlag, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, April 2006
- VDLUFA (1991) *VDLUFA-Methodenbuch: Band I - Die Untersuchung von Böden*. Darmstadt: VDLUFA-Verlag
- VDLUFA (2012) *Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, VDLUFA-Methodenbuch Band III*, 3. Auflage, 8. Ergänzungslieferung
- Ward, RT, Ondarza, MB (2008) Fermentation analysis of silage: Use and Interpretation. <https://www.foragelab.com/Media/Fermentation-Silage-NFMP-Oct-2008.pdf> [letzter Abruf am 19.01.2024]
- Weinberg ZG, Ashbell G, Hen Y, Azrieli A (1993) The effect of applying lactic acid bacteria at ensiling on the aerobic stability of silages. *Journal of Applied Bacteriology* 75:512-518
- Weißbach F, Kuhla, S (1995) Stoffverluste bei der Bestimmung des Trockenmassegehaltes von Silagen und Grünfutter: Entstehende Fehler und Möglichkeiten der Korrektur. *Übersichten der Tierernährung* 23:189-214
- Weißbach F, Strubbelt C (2008) Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Maissilagen als Substrat für Biogasanlagen. *Landtechnik* 63(2):2-4
- Wichmann S, Loges R, Taube F (2006) Kornerträge, N₂-Fixierungsleistung und N-Flächenbilanz von Erbsen, Ackerbohnen und Schmalblättrigen Lupinen in Reinsaat und im Gemenge mit Getreide. *Pflanzenbauwissenschaften* 10(1):2-15
- Wilkinson JM, Davies DR (2013) The aerobic stability of silage: key findings and recent developments. *Grass and Forage Science* 68:1-19
- Wyss U, Arrigo Y (2015) Qualität von Ganzpflanzensilagen aus Triticale, Hafer und Futtererbsen. *Nutztiere, Agroforschung Schweiz* 6(4):152-159