Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Verbundvorhaben: Standortangepasste Anbausysteme für die Produktion von Energiepflanzen – EVA II

Teilvorhaben 4: Ermittlung des Einflusses der Substratqualität auf die Biogasausbeute in Labor und Praxis

Zuwendungsempfänger und ausführende Stelle:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) - Abt. Technikbewertung und Stoffkreisläufe

Förderkennzeichen:

22013308

Laufzeit:

01.02.2009 bis **31.01.2013**

Datum der Veröffentlichung:

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

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

Leibniz-Institut für Agrartechnik
Potsdam-Bornim e. V.

Wissenschaftlicher Direktor: Prof. Dr. Brunsch

Schlussbericht

des Teilprojekt 4 (FKZ: 22013308)

„Ermittlung des Einflusses der Substratqualität auf die Biogasausbeute in Labor und Praxis“

im Rahmen des Verbundvorhabens

„Standortangepasste Anbausysteme für die Produktion von Energiepflanzen – EVA II“

Dr. Christiane Herrmann [1], Dr. Monika Heiermann [1]
Dr. Christine Idler [2], Dipl.-Ing. (FH) Vincent Plogsties [1]

Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam
[1] Abteilung Technikbewertung und Stoffkreisläufe
[2] Abteilung Bioverfahrenstechnik

Projektzeitraum: 01.02.09 – 31.01.2013

Gliederung **Seite**

I	**Kurzdarstellung**	**3**
I.1	Aufgabenstellung	3
I.2	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens	4
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	5
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
II	**Eingehende Darstellung**	**7**
II.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	7
II.1.1	Eignung verschiedener Pflanzenarten aus Energiefruchtfolgen für die Silierung	7
II.1.2	Methanbildungspotenziale verschiedener Pflanzenarten aus Energiefruchtfolgen	12
II.1.3	Nutzung einer Biogasfruchtfolge im Praxismaßstab	21
II.1.4	Biogasbildung aus Ackerfuttermischungen	37
II.1.5	Silierung und Biogasbildung bei Mischfruchtanbau Mais – *Sorghum*	43
II.1.6	Verbesserung der Konservierung und Biogasbildung durch Mischsilierung	46
II.1.7	Wirkung von Unkrautbiomasse im Erntegut auf die Silierung und Biogasbildung	49
II.1.8	Einfluss der Silagequalität auf das Methanbildungspotenzial	56
II.1.9	Bewertung neuer Siliermittel für die Biogasproduktion	64
II.1.10	Handlungsempfehlungen für die Praxis	74
II.1.11	Verwendung der Zuwendung	75
II.2	Zahlenmäßiger Nachweis	76
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	76
II.4	Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse	76
II.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	77
II.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	77
Literaturverzeichnis		81
Anhang		84

I Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Bei dem Forschungsvorhaben „Ermittlung des Einflusses der Substratqualität auf die Biogasausbeute in Labor und Praxis“ handelt es sich um das Teilprojekt 4 (TP4) innerhalb des Forschungsverbundes „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands (EVA II)“ (Abb. I.1-1). Zielstellung des Verbundvorhabens ist, verschiedene landwirtschaftliche Kulturarten im Fruchtfolgesystem unter typischen Standortbedingungen Deutschlands auf ihre Ertragsfähigkeit und Eignung als Energiepflanze für die Biogasproduktion zu prüfen, um mögliche Optionen des Energiepflanzenanbaus regionsspezifisch aufzuzeigen. Den Kern des EVA-Verbundes bildet ein Fruchtfolgeversuch, der durch Landesforschungsanstalten und Landwirtschaftskammern aus neun Bundesländern in agrarisch sehr unterschiedlich geprägten Regionen parallel umgesetzt wird. Dieser Fruchtfolgeversuch wird durch eine Reihe zusätzlicher Teil- und Satellitenprojekte begleitet, die verschiedenste Fragestellungen hinsichtlich einer nachhaltigen Fruchtfolge- und Anbaugestaltung behandeln.

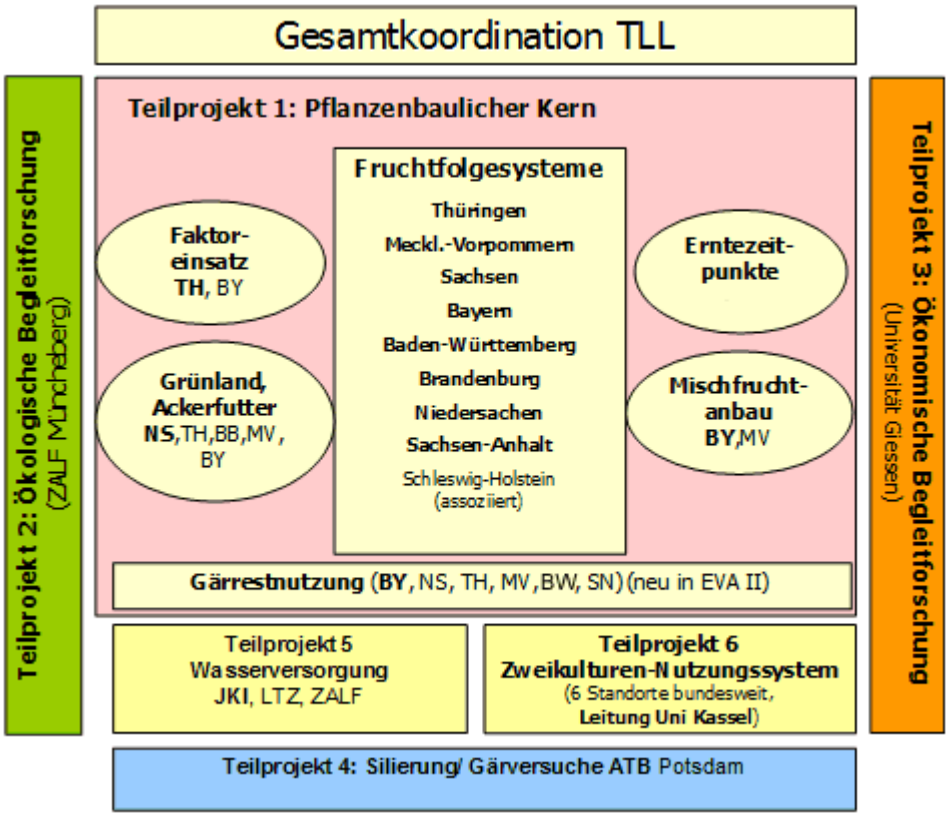


Abb. I.1-1: Struktur des Forschungsverbundes EVA II sowie Ziele der einzelnen Teilprojekte

Ziel dieses Teilprojektes ist es, aufbauend auf den Ergebnissen des ersten Bewilligungszeitraums (EVA I, 2005-2008), weiterführende Erkenntnisse zum Einfluss der Silierung auf Substratqualität und Biogasausbeute im Rahmen definierter Anbau- und Fruchtfolgesysteme zu gewinnen. Hierzu wurden in Vertiefung und Ergänzung des Bearbeitungsschwerpunktes

Silagequalität weitere Aspekte, wie der Einsatz von neuen Siliermitteln zur Vermeidung aerober Instabilitäten, die gleichzeitige Silierung verschiedener Pflanzenarten (Mischsilagen) und Untersuchungen zu Auswirkungen von Unkrautbesatz auf die Substratbereitstellung für die Biogasproduktion in das Versuchsprogramm dieses Teilprojektes aufgenommen. Die Fortführung der Gärtests zu den Partnerproben aus dem Verbundvorhaben (Grund- und Satellitenversuche) zielt auf einen Pflanzenartenvergleich anhand ausgewählter Proben aus dem Grundversuch sowie den Satellitenversuchen „Erntetermin“, „Zwei-Kultur-Nutzungssystem (Ökolandbau)“, „Ackerfuttermischungen/Grünland“ und „Mischfruchtanbau“ ab.

Erreicht werden sollen die Ziele auf Basis von Labor- und Praxisversuchen unter Anwendung etablierter Methoden; das Teilprojekt beinhaltet somit mehrere Schwerpunkte:

- Großflächige Anbauversuche mit definierten Fruchtfolgen in landwirtschaftlichen Betrieben
- Silierversuche im großtechnischen Maßstab (Praxisversuche)
- Vergärung der unterschiedlichen Biomassequalitäten in Praxisbiogasanlagen
- Durchführung von Modellsilierversuchen zur Ermittlung qualitätsbestimmender Faktoren für die Silierung von Biogaspflanzen
- Ermittlung der aeroben Stabilität von Silagen in Abhängigkeit verschiedener Silierparameter (Luftstress, Siliermittel)
- Gärtests (Batch-Ansatz) zur Ermittlung der Stoff- und Energieumsätze der unterschiedlichen Substratqualitäten hinsichtlich Biogasausbeute und –qualität (Methangehalt)

Daraus lassen sich für das Vorhaben folgende wissenschaftlich-technischen Arbeitsziele formulieren:

- Prüfung der Methanbildungspotenziale zur Einordnung möglicher neuer, d.h. bislang in der Region nicht angebauter Energiepflanzen in die bestehende regionalspezifische Anbaustruktur
- Identifizierung und Quantifizierung qualitätsbestimmender Parameter für Silagen zum Einsatz zur Biogasproduktion
- Bewertung neu entwickelter Siliermittel für Anwendungen im Biogasbereich
- Monitoring und Bewertung der Vergärung pflanzlicher Substrate in Praxisbiogasanlagen
- Gesamtbewertung auf Basis der Labor- und Praxisversuche zwecks Formulierung von Standards für die Qualität von Silagen für die Biogasproduktion
- Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Landwirtschaft.

I.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Im Frühjahr 2005 wurde der EVA-Verbund initiiert und für 3,5 Jahre gefördert. Nach positiver Evaluierung erfolgte aufbauend auf den Ergebnissen des ersten Bewilligungszeitraums (EVA I, 2005-2008) die Neubeantragung des EVA-Verbundvorhabens, Phase II (EVA II). Damit war eine kontinuierliche Weiterführung der Arbeiten gewährleistet. Die formale Grundlage für die erfolgreiche Zusammenarbeit der beteiligten Einrichtungen bildete der Abschluss der Kooperationsvereinbarung zwischen den 7 Verbund- und 6 Projektpartnern im März 2009.

Die Durchführung des Forschungsvorhabens TP 4 erfolgt unter der Leitung des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB), Abteilung Technikbewertung und Stoffkreisläufe unter Mitarbeit der Abteilung Bioverfahrenstechnik in enger Kooperation mit den Praxispartnern, der Lehranstalt für Tierzucht u. Tierhaltung Groß Kreutz sowie der Agrargenossenschaft agt Agrar GmbH Trebbin und ihrer Biogasanlage, der agt bioenergy GmbH.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die im Kap. I.1 aufgeführten Versuchsschwerpunkte wurden mit den Verbundpartnern entwickelt und in Zusammenarbeit umgesetzt. Weiterhin wurde in enger Abstimmung mit der Koordination ein systematischer Probenplan für die Durchführung der Gärtests erarbeitet, der die Probenauswahl hinsichtlich Pflanzenart, Versuchsvariante bzw. Standort und deren Umfang festgelegt. Im Projektverlauf wurden witterungs- und pflanzenbaulich bedingte Abweichungen vom Versuchsplan einvernehmlich abgestimmt. Dazu führte die Projektkoordination sowohl halbjährliche Verbundtreffen als auch zwischenzeitliche Arbeitstreffen durch.
In Wechselwirkung flossen die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ermittelten Ergebnisse in einen gemeinsamen Datenpool, so dass kohärente Datensätze nicht nur für die Bewertung einzelner thematischer Schwerpunkte sondern auch für die Gesamtbewertung des Themenkomplexes zur Verfügung standen.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Der Anbau von Energiepflanzen zur Biogasproduktion hat sich in den letzten Jahren als zusätzlicher Betriebszweig in der Landwirtschaft etabliert. Aus pflanzlicher Biomasse können hohe Methanausbeuten erzielt werden, was zu einem wirtschaftlichen Betrieb von Biogasanlagen beitragen kann. Eine Ausschöpfung dieses Potenzials ist jedoch nur gewährleistet, wenn der Anlage kontinuierlich qualitätsgerechte Konservate, die mit geringen Verlusten erzeugt werden, bereitgestellt werden.

Die Qualität feucht konservierter Pflanzen durch Silierung wird durch zahlreiche Parameter bestimmt. Neben pflanzenbaulichen Faktoren wie Sortenwahl, Anbau und Düngung beeinflussen die siliertechnischen Faktoren wie Schnittzeitpunkt, Häcksellänge, Konservierungsform, Verdichtung und Zusätze entscheidend das Konservierungsergebnis und damit die Substratqualität für die Biogaserzeugung. Aus den ersten Ergebnissen bisheriger Untersuchungen kann ein direkter Zusammenhang zwischen Silagequalität und Biogasausbeute abgeleitet werden. Schlecht konservierte Silagen weisen oft zunächst in den Gärtests gleich hohe oder sogar höhere Gaserträge im Vergleich zu gut konservierten Pflanzen auf. Unter Berücksichtigung der Massenverluste während der Konservierung sind dann jedoch die berechneten Biogaserträge solcher Silagen deutlich geringer. Für die Formulierung von Grenzbedingungen und Standards für Energiesilagen fehlen weitere gesicherte Daten auf Basis systematischer Untersuchungen. Außerdem müssen für einige „Nichtfutterpflanzen“ die Konservierungsbedingungen noch erstmalig beschrieben werden. So liegen z. B. für einige erfolgversprechende Biogaspflanzen wie Sudangras und

Sonnenblumen bislang keine ausreichenden Konservierungserfahrungen, insbesondere unter Berücksichtigung des Fruchtfolgeregimes, vor.

Aus dem Bereich der Tierfutterbereitstellung wird die positive Wirkung der Essigsäure auf die aerobe Lagerstabilität in der Literatur vielfach beschrieben. Hingegen wurde der Zusammenhang zwischen der „aeroben Stabilität“ von Silagen und dem Biogaspotenzial noch nicht eingehend untersucht. Die Anpassung des Gärsäuremusters in den Biogassilagen stellt ein erhebliches Potenzial zur Optimierung des Silierprozesses dar.

Im Hinblick einer qualitätsgerechten Silagebereitung mit spezieller Ausrichtung auf die spezifischen Bedürfnisse der Biogaserzeugung ist die Mischsilierung unterschiedlicher Pflanzenarten von Interesse. Als wichtiger Einflussfaktor sowohl für die Silierung als auch für die Methanbildung gilt der Trockenmassegehalt (TM-Gehalt) des Erntegutes und damit die Wahl des Erntetermins. Vor allem bei der Gestaltung von Anbaussystemen (z.B. Zwei-Kultur-Nutzung) sowie von Fruchtfolgen kommt dem Gesichtspunkt der Harmonisierung der TM-Gehalte verschiedener Pflanzenarten bei Ernte zum nicht optimalen Erntezeitpunkt eine enorme Bedeutung zu. Die Bereitung von Mischsilagen stellt somit einen potenziellen Lösungsansatz dar, um Siliereigenschaften des Erntegutes zu verbessern, Sickersaft zu binden sowie zusätzlich durch Kombination von Inhaltsstoffen positiv auf die Methanbildung zu wirken. Bisher durchgeführte Arbeiten beschränken sich auf die Untersuchung von Substratmischungen, die bereits siliertes Pflanzenmaterial mit Mais als Mischungspartner in unterschiedlichen Verhältnissen mischen oder gezielt Fruchtarten innerhalb einer Fruchtfolge kombinieren. Die Ergebnisse zeigen bei einigen Mischungen, insbesondere bei proteinreichen Mischungspartnern deutliche Synergieeffekte sowohl in der Prozesskinetik wie auch bei dem spezifischen Methanertrag.

Die Silagequalität und damit auch die Biogasausbeuten können durch Unkrautbiomasse im Erntegut beeinflusst werden. Durch minimierten Faktoreinsatz (z.B. Bodenbearbeitung) im Getreide oder bedingt durch fehlende Herbizide in *Sorghum*-Beständen (Lückenindikation) kommt es zu einem verstärkten Unkrautbesatz. Erste eigene Versuchsergebnisse belegen Gasertragseinbußen. So traten zum Beispiel in *Sorghum*-Beständen Methanertragseinbußen von über 20 % auf. Weitere Daten zum Einfluss von Unkrautbiomassen auf die Biogasproduktion sind nicht bekannt.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

National und international ist das ATB in zahlreiche Netzwerke und Verbundvorhaben eingebunden. Die Basis hierfür sind intensive Kooperationen mit Hochschulen und außeruniversitären Einrichtungen im In- und Ausland. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes kommt der engen Kooperation des ATB mit dem „Biogas Competence Network“ (BMBF geförderte Grundlagenprojekte der Biogasforschung) besondere Bedeutung zu. In dem Forschungsschwerpunkt Konservierung und Lagerung bestehen langjährige Zusammenarbeiten mit dem Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (Julius-Kühn-Institut Braunschweig, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde), der Universität Rostock (Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät) sowie dem DLG-Bundesarbeitskreis Futterkonservierung.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

II.1.1 Eignung verschiedener Pflanzenarten aus Energiefruchtfolgen für die Silierung

Die Siliereignung eines Siliergutes wird durch biologische, physikalische und chemische Eigenschaften bestimmt. Zu den biologischen Kennwerten gehören u.a. Pflanzenart und –sorte, der Keimbesatz an Milchsäurebakterien und Schadorganismen. Die physikalische Beschaffenheit wird u.a. durch Häcksellänge, TM-Gehalt und den osmotischen Druck charakterisiert. Bei der chemischen Zusammensetzung sind es vor allem die Gehalte an wasserlöslichen Kohlenhydraten (WLK), Proteinen und Nitrat, die die Vergärbarkeit bestimmen sowie die Pufferkapazität. Darüber hinaus beeinflussen Witterung, Verschmutzung, Unkrautbesatz und Pflanzenkrankheiten die Vergärbarkeit.

Die Einschätzung der Siliereignung stellt eine wichtige Voraussetzung für eine optimale Silierung dar; ist es doch durch gezielte Maßnahmen möglich ungünstige Bedingungen zu verbessern. Durch die Ermittlung der Pufferkapazität, unter Berücksichtigung von TM und WLK sowie durch die Bestimmung des Nitratgehaltes (vgl. Anhang Tab. A-1) können mit vertretbarem analytischem Aufwand bereits verlässliche Silierprognosen für Futterpflanzen getroffen werden.

Im vorliegenden Projekt wurde einerseits untersucht, inwieweit Silierprognosen für die Energiepflanzen der EVA-Fruchtfolgen auf der Basis von TM- und Zuckergehalt sowie Pufferkapazität zutreffen und andererseits wurden für alle Fruchtarten, für die noch keine Vergärbarkeitskoeffizienten (VK) aus der Literatur bekannt sind, diese Daten erstmalig erhoben.

Siliereignung verschiedener Fruchtarten und Mischungen

Zur Einschätzung der Siliereignung verschiedener Pflanzenarten sowie regionaltypischer Mischungen aus den EVA-Fruchtfolgen wurden von allen 597 untersuchten Frischmassen die ermittelten mittleren VK (vgl. Anhang A-2) mit dem Median der tatsächlich erreichten Silagequalität (vgl. Anhang A-3) verglichen (Tab. II.1.1-1). Die Bewertung der Silierbarkeit wurde entsprechend den DLG-Richtlinien (2000) vorgenommen.

Tab. II.1.1-1: Bewertung der Vergärbarkeitskoeffizienten (DLG, 2000)

Vergärbarkeits-koeffizient	Bewertung
< 35	Schwer silierbar
> 35	Mittelschwer bis leicht silierbares Futter im unteren TM-Bereich ≤ 35 %
> 35	Mittelschwer bis leicht silierbares Futter im oberen TM-Bereich ≥ 35 bis 50 %

Schwer silierbare Fruchtarten und Mischungen

Schwer silierbare Fruchtarten sind oft durch einen hohen Rohproteingehalt sowie geringe Kohlenhydrat- und TM-Gehalte gekennzeichnet. Der daraus resultierende VK ist kleiner als 35 (Tab. II.1.1-2). Das trifft vor allen für Kräuter und Leguminosen zu.

Tab. II.1.1-2: Prognoseparameter verschiedener Fruchtarten aus Energiefruchtfolgen für die Silierung im Vergleich zu Literaturwerten

				Frischmasse	Frischmasse	Frischmasse			Silage		Literatur (Jänicke, 2011)	
Zeile	**Fruchtarten 2009-2011**	**BBCH**	**Anzahl**	**TM**	**Nitrat**	**Vergärbarkeitskoeffizient (VK)**			**Silagequalität (Noten)**		**TM**	**VK**
				% FM	g/kg TM	Mittel	Min.	Max.	Median	schlechteste (Anzahl)	% FM	
	Schwer silierbar											
1	Markstammkohl	41-50	6	15,37	8,42	**23**	22	25	1	1	16	51
2	Amarant	71-85	6	21,44	3,37	**25**	25	26	1	1		
3	Kleegrasmischung, Folgeschnitte, spät	bis 59	18	20,03	0,32	**25**	22	35	2	5 (1)		
4	Landsberger Gemenge	61	3	21,20	0,25	**25**	24	26	1	2 (1)		
5	Kleegrasmischung, erster Schnitt, spät	bis 59	9	24,75	0,17	**30**	24	38	2	4 (1)	35	49
6	Erbse	76	3	25,68	3,99	**32**	31	32	1	1	16	42
7	Luzernegrasmischung, Folgeschnitte	59-61	9	27,48	0,33	**32**	24	42	1	3 (1)		
8	Hafer HF	71-85	6	27,17	1,68	**34**	21	39	1	1	20	46 [3]
9	Sonnenblume	71-87	12	29,32	1,05	**34**	23	44	1	2 (1)	23	35 [4]
10	Wintergerste/ Winterrübsen[1]	43-51/61-65	6	27,93	3,29	**34**	25	49	1	2 (1)		
	Mittelschwer bis leicht silierbares Futter im unteren TM-Bereich ≤ 35 %											
11	Buchweizen	75-83	9	27,41	1,50	**35**	28	44	1	1		
12	Luzernegrasmischung, erster Schnitt, spät	59-61	3	29,25	0,02	**35**	35	37	1	1		
13	Raps	65-85	12	27,96	1,14	**36**	30	42	1	1		
14	Sorghum b. x s., späte Abreife	33-75	35	22,22	7,28	**38**	20	56	1	4 (1)		
15	Winterroggen (Grünschnitt)[1]	bis 59	22	26,39	0,52	**41**	29	65	1	5 (3)	16	35
16	Gerstgras	77-83	3	27,92	0,56	**41**	39	42	1	1	20-25	>35 [5]
17	Weidelgrasmischungen, Folgeschnitte, spät[2]	bis 59	44	32,34	1,00	**41**	25	62	1	5 (5)		
18	Sorghum b. x b., späte Abreife	33-75	22	23,92	4,43	**42**	21	53	1	1		
19	Topinamburkraut	39-69	3	31,65	0,24	**43**	43	44	1	1		
20	Weidelgrasmischungen, Folgeschnitte, früh[2]	bis 59	9	31,01	0,99	**43**	41	46	1	2 (3)	35	52
21	Weidelgrasmischungen, erster Schnitt, spät[1]	bis 59	24	31,21	0,42	**46**	30	82	1	4 (3)		
22	Mais HF	81-87	67	32,26	0,63	**47**	37	55	1	1	30	58
23	Mais ZF	81-87	21	32,43	0,88	**47**	41	54	1	1		
24	Sorghum b. x s., gute Entwicklung	69-85	65	29,41	2,17	**47**	38	61	1	1		
25	Mais, mangelnde Abreife	67-79	3	23,61	0,21	**48**	47	48	1	1		
26	Wintertriticale (Grünschnitt)[2]	bis 59	6	25,89	0,21	**48**	33	64	1	1		
27	Wintergerste (Grünschnitt)[2]	bis 59	9	29,22	1,42	**51**	33	85	1	3 (1)		
28	Winterroggen, Zwischennutzung	61-69	3	30,60	1,28	**51**	51	52	1	1		
29	Wintergerste HF	71-85	36	33,32	0,35	**51**	38	70	1	4 (1)	40	68
30	Winterroggen/ Winterwicke HF	71-85	5	32,18	0,24	**53**	43	63	1	1		
31	Sorghum b. x b. , gute Entwicklung	69-85	22	27,86	5,04	**54**	42	69	1	1		
32	Weidelgrasmischungen, erster Schnitt, früh[2]	bis 51	3	33,87	0,49	**57**	56	57	1	1	35	63
33	Winterroggen HF	71-85	18	33,16	0,85	**61**	45	71	1	1	40	69
34	Winterroggen/ Wintertriticale HF	71-85	14	32,87	0,97	**62**	47	87	1	1		
	Mittelschwer bis leicht silierbares Futter im oberen TM-Bereich ≥ 35 bis 50 %											
35	Einjähriges Weidelgras[1]	51-69	9	43,83	2,74	**49**	33	80	2	5 (3)		
36	Hafer- Erbse - Leindotter	71-85	9	38,30	0,68	**52**	49	57	1	1		
37	Luzernegrasmischung, erster Schnitt, früh	bis 55	3	42,65	0,49	**59**	58	59	1	1	35	41
38	Wintertriticale HF	71-85	34	37,08	0,31	**64**	49	92	1	2 (1)	38 [6]	67
39	Winterweizen HF	71-85	6	49,06	0,29	**60**	52	69	1	1	38	67
			Σ 597		optimaler Gehalt							
	[1]einige FM angewelkt, [2] alle FM angewelkt	[3] Grünhafer	[4] Weißbach, 2007		[5] Peyker, 2003	[6] Triticale						

Entsprechend den berechneten VK mussten neun der 39 untersuchten Fruchtarten und Mischungen als schwer silierbar bewertet werden: Amarant, Erbse, Hafer, Kleegrasmischungen, Landsberger Gemenge, eine Luzernegrasmischung (Folgeschnitte), Markstammkohl, Sonnenblumen und das Gemisch aus und Wintergerste und Winterrübsen.Sonnenblumen, Hafer und die Wintergerste-Winterrübsen-Mischung liegen mit einem VK vom 34 im Grenzbereich. Bei allen untersuchten Proben konnten dennoch in Modellsilierversuchen gute bis sehr gute Silagen erzeugt werden.

Sonnenblumen sind sehr wasserreiche, nicht welkfähige und deshalb mittelschwer bis schwer silierbare Pflanzen. Sie enthalten relativ wenig Zucker und haben eine sehr hohe Pufferkapazität etwa vergleichbar mit Luzerne. Bei einem TM-Gehalt von 23 % wird ein VK von 35 in der Literatur angegeben, mit dem die ermittelten Werte gut übereinstimmen (Weißbach, 2007). Ein Mischanbau oder die Mischsilierung mit Mais kann den ungünstigen Siliervoraussetzungen der Sonnenblumen entgegenwirken (vgl. Kapitel II.1.6).

Die Grasmischungen mit Luzerne und Klee wurden häufig nur unzureichend angewelkt und wiesen im Mittel vergleichsweise geringe TM-Gehalte auf. Sowohl bei Luzerne als auch bei Klee und Kleegrasmischungen sind geringe Zuckergehalte und hohe Pufferkapazitäten der Hauptgrund für die schlechtere Siliereignung. Deshalb kommt bei den Fruchtarten dem Anwelken eine besondere Bedeutung zu, wobei TM-Gehalte von 30 % angestrebt werden sollten. Ein Siliermitteleinsatz zur Gewährleistung einer guten Silagequalität kann sinnvoll sein.

Bei einigen Fruchtarten liegen VK in der Literatur vor (Tab. II.1.1-2). Bei vergleichbaren TM-Gehalten ist eine gute Übereinstimmung gegeben. Häufig jedoch wurde in der Literatur mit höheren TM-Gehalten einsiliert, so dass sich Abweichungen im VK ergeben. Erstmalig wurden die VK von Amarant, Kleegrasmischungen, Landsberger Gemenge, späte Luzernegrasmischung und der Mischung aus Wintergerste und Winterrübsen ermittelt (Tab. II.1.1-3).

Tab. II.1.1-3: Neue Angaben zur Vergärbarkeit von schwer vergärbaren Fruchtarten und Mischungen

Fruchtart/ Mischung	**Zucker** g/kg TM	**Pufferkapazität** g MS/kg TM	**TM** %	**VK** -
Amarant	37	77	21	25
Kleegrasmischung, erster Schnitt, spät	66	98	25	30
Kleegrasmischung, Folgeschnitte, spät	49	82	20	25
Landsberger Gemenge	41	92	21	25
Luzernegrasmischung, Folgeschnitte	38	72	27	32
Wintergerste/ Winterrübsen	55	76	28	34

Mittelschwer bis leicht silierbares Futter im unteren TM-Bereich ≤ 35 %

Im Bereich bis 35 % TM und einem VK von > 35 sind 24 der 39 untersuchten Fruchtarten einzuordnen. Sie sind damit mittelschwer bis leicht silierbar. Ausnahmslos konnten aus diesen Frischmassen sehr gute Silagen erzeugt werden (Tab. II.1.1-2). Dazu gehören neben Mais und *Sorghum*, Getreideganzpflanzen, Grasmischungen sowie Buchweizen, Raps und Topinamburkraut.

Mais weist auf Grund des hohen Gehalts an Kohlenhydraten und des niedrigen Rohproteingehalts eine geringe Pufferkapazität und somit einen hohen VK auf, d.h. er ist leicht silierbar. (Jeroch et al., 1993). Aus der Literatur sind keine Hinweise zur Silierprognose bei *Sorghum* bekannt, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei ausreichend hohem TM-Gehalt zur Ernte auf Grund des Zuckergehalts von 11 % TM bis 13 % TM bei *Sorghum* ähnliche Verhältnisse anzutreffen sind wie bei Mais (KWS, 2011; Zeise & Fritz, 2011).

Getreideganzpflanzen werden u.a. auf Grund der geringen Zuckergehalte zwischen 6 % und 8 % TM den mittelschwer silierbaren Grünfutterstoffen zugeordnet (Jänicke 2011).

Die ermittelten VK für Gras- und Ackerfuttermischungen sind mit Literaturwerten vergleichbar (von Bostel et al., 2003; Jänicke, 2011). Es ist zu berücksichtigen, dass sich mit fortschreitender Vegetationsperiode die Silierbedingungen verschlechtern und geeignete Gegenmaßnahmen ergriffen werden müssen. Das betrifft für Folgeschnitte vor allem die N-Düngung des Bestands, aber auch den Schnittzeitpunkt und das Anwelken.

Für die meisten Fruchtarten und Mischungen in dieser Gruppe gibt es noch keine Literaturwerte zur Vergärbarkeit. Diese erstmalig erhobenen Daten sind in Tab. II.1.1-4 zusammengestellt.

Tab. II.1.1-4: Neue Angaben zur Vergärbarkeit von mittelschwer bis leicht silierbaren Fruchtarten und Mischungen im unteren TM-Bereich ≤ 35 %

Fruchtart/ Mischung	Zucker g/kg TM	Pufferkapazität g MS/kg TM	TM %	VK -
Buchweizen	32	41	27	35
Luzernegrasmischung, erster Schnitt, spät	60	78	29	35
Raps	48	52	28	36
Sorghum b. x s., späte Abreife	76	41	22	38
Weidelgrasmischungen, Folgeschnitte, spät[2]	60	59	32	41
Sorghum b. x b., späte Abreife	88	43	24	42
Topinamburkraut	75	51	32	43
Weidelgrasmischungen, erster Schnitt, spät[1]	83	51	31	46
Mais ZF	46	29	32	47
Sorghum b. x s., gute Entwicklung	71	32	29	47
Mais, mangelnde Abreife	58	19	24	48
Wintertriticale (Grünschnitt)[2]	104	42	26	48
Wintergerste (Grünschnitt)[2]	89	40	29	51
Winterroggen, Zwischennutzung	84	33	31	51
Winterroggen/ Winterwicke HF	75	30	32	53
Sorghum b. x b. , gute Entwicklung	106	33	28	54
Weidelgrasmischungen, erster Schnitt, früh[2]	125	44	34	57
Winterroggen HF	100	29	33	61
Winterroggen/ Wintertriticale HF	92	25	33	62

[1]alle FM angewelkt, [2] einige FM angewelkt

Mittelschwer bis leicht silierbares Futter im oberen TM-Bereich ≥ 35 bis 50 %

Zu den mittelschwer bis leicht silierbaren Fruchtarten im oberen TM-Bereich wurden Einjähriges Weidelgras, das Gemisch aus Hafer- Erbse - Leindotter, Luzernegrasmischung (erster Schnitt, früh), Wintertriticale und Winterweizen jeweils in HF-Stellung zugeordnet. Die Silagen sind mit wenigen Ausnahmen von guter bis sehr guter Qualität.

Bei Grasmischungen ist zu beachten, dass die TM-Gehalte 40 % nicht wesentlich übersteigen, da einerseits Verluste bei der Bergung auftreten und andererseits die Verdichtung im Silo erschwert wird. Die erstmalig erhobenen Daten sind in Tab. II.1.1-5 dargestellt.

Tab. II.1.1-5: Neue Angaben zur Vergärbarkeit von mittelschwer bis leicht silierbaren Fruchtarten und Mischungen im oberen TM-Bereich ≥ 35 %

Fruchtart/ Mischung	Zucker g/kg TM	Pufferkapazität g MS/kg TM	TM %	VK -
Einjähriges Weidelgras[1]	40	48	44	49
Hafer- Erbse - Leindotter	68	38	39	52

[1] alle FM angewelkt

Nitratgehalt

Neben dem TM-Gehalt und der Pufferkapazität ist das im Grüngut enthaltene Nitrat von großem Einfluss auf den Gärverlauf (Kaiser, 1981; Weiß, 2001). Nitrat wird in den einzelnen Silierphasen über Nitrit zu Ammoniak und nitrosen Gasen reduziert, die hemmend auf die Entwicklung von Clostridien wirken. Art und Umfang des Abbaus werden entscheidend von den Gärbedingungen beeinflusst. Der Nitratgehalt in den Pflanzenbeständen wird durch die Wachstums– und Nutzungsbedingungen beeinflusst und steht in einem engen Zusammenhang zur Stickstoffdüngung. Steigende Stickstoffdüngermengen erhöhen einerseits den Nitratgehalt und erniedrigen anderseits den Zuckergehalt.

Bei Futterpflanzen können sich geringe Nitragehalte von < 4,4 g/kg TM (Kaiser & Weiß, 2007) nachteilig auf die Silierung auswirken, da nur geringe Mengen an Nitrit gebildet werden und so kein ausreichendes Substrat zur Unterdrückung von Clostridien (Buttersäurebildner) zur Verfügung steht. Als optimal werden Nitratgehalte zwischen 4,4 bis 13,3 g/kg TM angesehen (Jänicke, 2011). Auch hohe Nitratgehalte können sich nachteilig auf die Konservierung auswirken (Kaiser, 1981). Ebenso können reduzierte Stickstoffdüngung und/ oder Schnittverzögerungen, wie sie gelegentlich im Grünfuttermanagement anzutreffen sind, den Konservierungserfolg verringern. Ob dem Nitratgehalt bei der Silierung von Energiepflanzen die gleiche Bedeutung zukommt, sollte untersucht werden. Die Nitratgehalte wurden von allen silierten Frischmassen ermittelt (vgl. Anhang Tab. A-1).

Nur bei vier der 39 untersuchten Fruchtarten konnten Nitratgehalte im optimal angesehenen Bereich von 4,4 bis 13,3 g/kg TM ermittelt werden (Tab. II.1.1-2): Markstammkohl, Futterhirsehybride *Sorghum b. x b.* sowie bei den Sudangrashybriden *Sorghum b. x s*.(späte Abreife). Die hohen Nitratgehalte (> 5 g/kg TM) im Sudangras werden auch in der Literatur beschrieben (Thaysen, 2011) und sind der Grund, weshalb diese Fruchtartart nicht an Rinder verfüttert werden. Bei allen anderen Fruchtarten lagen die Nitratgehalte niedriger (0,02 bis 3,99 g/kg TM). Aus allen Fruchtarten mit optimalem Nitratgehalt wurden auch sehr gute Silagen erzeugt. Diese ersten Ergebnisse lassen die Vermutung zu, dass auch bei der Silierung von Energiepflanzen der Nitratgehalt von Bedeutung für die Silagequalität sein könnte, allerdings konnte bei einer bedeutend größeren Probenanzahl sehr gute Silagen bei suboptimalem Nitratgehalt erzeugt werden.

Der Nitratgehalt im Siliergut ist auch bei optimaler Düngung für den Landwirt kaum steuerbar. Kaiser & Weiß (2007) kommen zu dem Schluss, dass in der Praxis überhöhte Nitratgehalte im Grünland im Allgemeinen eher selten anzutreffen sind. Weiterhin ermittelten sie einen Zusammenhang zwischen Nitratgehalt und Mindest-TM-Gehalt für die Silierung. Bei sauber geerntetem Futter mit geringen Nitratgehalten (< 1g/kg TM) liegt der Mindest-TM-Gehalt um ca. 20 %-Punkte höher als bei Nitratgehalten von 4,4 g/kg TM. Das steht z.T. im Widerspruch zu den siliertechnisch erforderlichen TM-Gehalten. Große Diskrepanzen können teilweise durch den Einsatz von Siliermitteln ausgeglichen werden.

Fazit:
Der VK ist für eine Silierprognose der untersuchten Energiepflanzen prinzipiell geeignet. Alle Frischmassen, die als leicht bis mittelschwer silierbar eingestuft worden sind (519 Proben), führten auch zu guten bis sehr guten Silagen. Das entspricht 87 % aller 597 untersuchten Proben. Dass auch bei 78 Proben, die als schwer silierbar bewertet wurden, gute und sehr gute Silagequalitäten ermittelt worden sind, ist u. a. durch die gute Siliertechnik bei der Modellsilierung zu erklären.

Der Vergleich der ermittelten VK mit Literaturwerten wird zum einen durch die unterschiedlichen TM-Gehalte der Fruchtarten erschwert, die der Berechnung zu Grunde liegen und zum anderen durch methodisch unterschiedlich ermittelte Zuckergehalte. Da jedoch alle Proben innerhalb des Projekts mittels gleicher Methoden untersucht wurden, ist ein Vergleich der Fruchtarten untereinander möglich. Für viele Fruchtarten und Gemische liegen somit Angaben zur Vergärbarkeit vor.

Einen Zusammenhang zwischen Nitratgehalt in den Frischmassen und Silagequalität konnte bei den untersuchten Proben nicht festgestellt werden. Nur bei vier Proben lagen die Nitratgehalte im optimalen Bereich zwischen 4,4 bis 13,3 g/kg TM. Bei diesen Proben wurde eine sehr gute Silagequalität ermittelt. Inwieweit die schlechte Siliereignung nicht nur durch eine sehr gute Siliertechnik, sondern auch durch den optimalen Nitratgehalt ausgeglichen worden war, lässt sich noch nicht mit Bestimmtheit aussagen. Durch differenzierte Versuchsanstellungen sollte der Bedeutung des Nitratgehalte bei der Konservierung von Energiepflanzen nachgegangen werden.

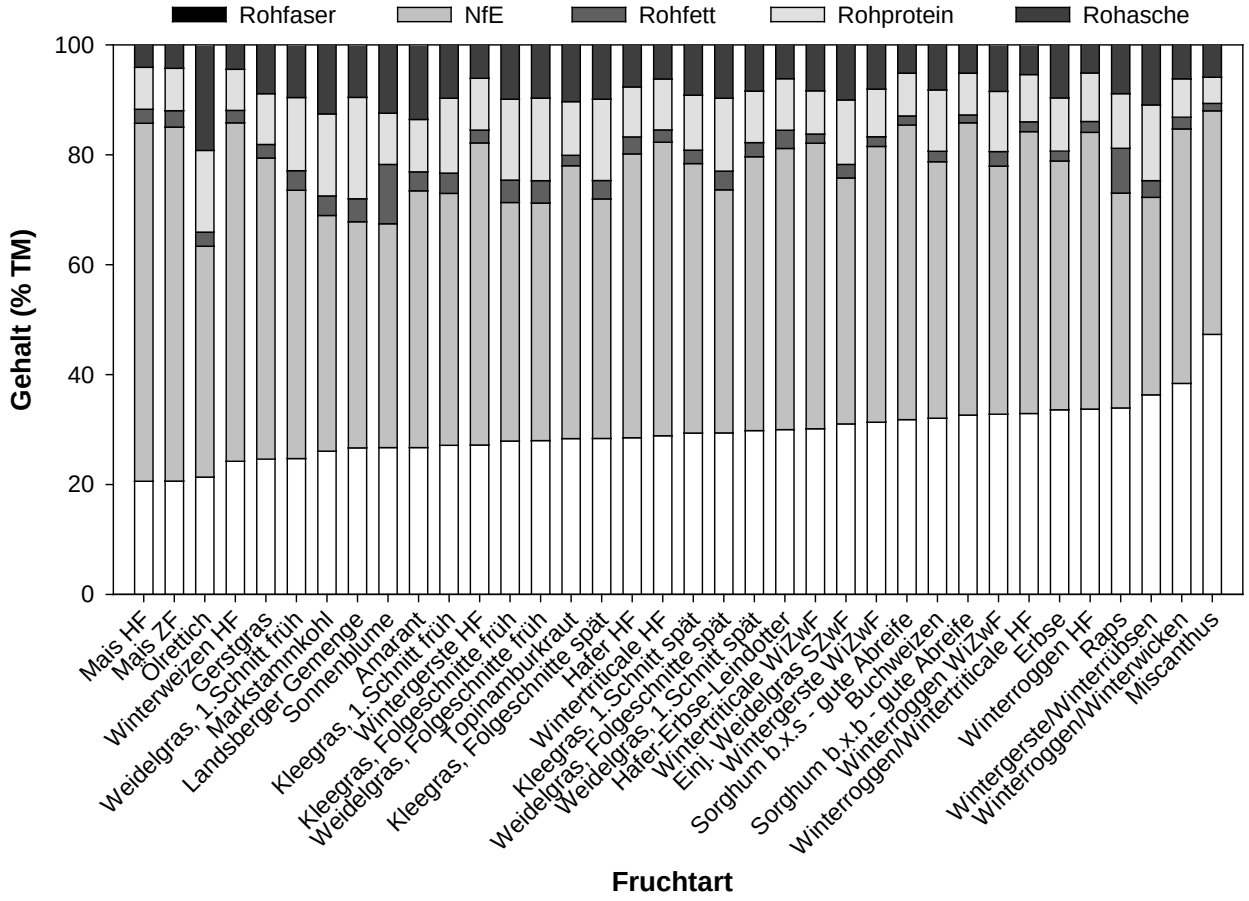
Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass bei 26 der 39 untersuchten Fruchtarten und Mischungen weniger als 20 Proben je Fruchtart untersucht wurden, so dass diese Ergebnisse als nicht hinreichend für eine Verallgemeinerung angesehen werden müssen. Weitere Untersuchungen bei diesen bislang unterrepräsentierten Fruchtarten sollten die Datenbasis erweitern und somit auch regionale Aussagen ermöglichen.

II.1.2 Methanbildungspotenziale verschiedener Pflanzenarten aus Energiefruchtfolgen

Ein wesentliches Ziel des Teilprojektes 4 ist die Bewertung der verschiedenen Fruchtarten aus den Fruchtfolgen des Verbundprojektes hinsichtlich ihres Biogas- bzw. Methanbildungspotenzials. Hierfür wurden an den Standorten Güterfelde (BB), Gülzow (MV), Ascha (BY), Ettlingen (BW), Dornburg (TH), Trossin (SN) und Werlte (NI) Erntegüter ausgewählter Prüf-

glieder der Standard- und Regionalfruchtfolgen vor Ort siliert und die Silagen anschließend am ATB hinsichtlich Qualität und Methanbildung im Batch-Gärtest geprüft.

Das Biogasbildungspotenzial eines Erntegutes bzw. einer Silage wird vorrangig von der chemischen Zusammensetzung, d.h. den Gehalten abbaubarer Nährstoffe im Pflanzenmaterial, bestimmt. Dabei werden allgemein aus Rohproteinen und Rohfetten die höchsten Biogasausbeuten erzielt, während der Rohfaseranteil, insbesondere Lignin und komplexe Lignocellulose-Verbindungen in der Biogasanlage schwer oder nicht verwertbar sind (Weiland, 2001). In Abb. II.1.2-1 sind die mittleren Rohnährstoffgehalte verschiedener Fruchtarten aus den EVA-Fruchtfolgen (EVA 1 und 2) aufsteigend geordnet nach dem Rohfasergehalt dargestellt.



HF… Hauptfrucht; ZF… Zweitfrucht; WiZwF… Winterzwischenfrucht; SZwF… Sommerzwischenfrucht; NfE… stickstofffreie Extraktstoffe

Abb. II.1.2-1: Rohnährstoffgehalte verschiedener Fruchtarten und Mischungen aus den Fruchtfolgen in EVA 1 und EVA 2 (Mittelwerte)

Die verschiedenen Fruchtarten und Mischungen unterschieden sich vorrangig im Gehalt an Rohfaser und Rohasche sowie den stickstofffreien Extraktstoffen (NfE). Der Rohfettgehalt war hingegen fast ausschließlich mit 1,4 bis 4,2 % TM gering. Höhere Rohfettgehalte von 8 bis 11 % TM wurden lediglich bei Sonnenblume und Raps gemessen. Der mittlere Gehalt an Rohprotein der Fruchtarten und Mischungen variierte zwischen 4,7 und 18,5 % TM. Die geringsten Proteingehalte wurden bei Miscanthus, die höchsten Proteingehalte bei den Kleegras- und Weidelgrasmischungen, Landsberger Gemenge sowie Markstammkohl ermittelt

(Abb. II.1.2-1). Die mineralischen Bestandteile der pflanzlichen Substrate, d.h. die Rohasche, tragen grundsätzlich nicht zur Biogasbildung bei. Hohe Ascheanteile im Erntegut wirken sich daher negativ auf die Biogasausbeute bezogen auf TM oder Frischmasse aus. Die Rohaschegehalte der Fruchtarten und Mischungen lagen zwischen 4,1 und 19,2 % TM. Dabei wiesen vor allem zu einem frühen Entwicklungsstadium geerntete Güter, wie Markstammkohl, die Wintergerste-Winterrübsen-Mischung und Zwischenfrüchte, wie Ölrettich und Einjähriges Weidelgras, aber auch Amarant und Sonneblume hohe Rohaschegehalte auf. Die mittleren Rohfasergehalte der Fruchtarten reichten von 20,6 % TM bei Mais bis zu 47,3 % TM bei Miscanthus, wobei auch Winterroggen und die Mischungen mit Winterroggen sowie Raps, Erbse und *Sorghum* bei guter Abreife zu den rohfaserreichen Erntegütern zu zählen sind.

Die auf die organische Trockenmasse (oTM) bezogenen mittleren Methanausbeuten sowie die mittleren Methangehalte im Biogas der in EVA1 und EVA 2 untersuchten Fruchtarten und Mischungen relativ zu Mais in Hauptfruchtstellung sind der Tabelle II.1.2-1 zu entnehmen. Dabei erfolgte bei einem Teil der Fruchtarten eine weitere Untergliederung nach Fruchtfolgestellung, Reife zur Ernte bzw. Schnitt. Hohe Methanausbeuten oberhalb der Werte von Mais wurden für Grünschnittgetreide, Topinamburknolle, die ersten bzw. frühen Schnitte der Weidelgras- und Kleegrasmischungen, sowie für Gerstgras erzielt. Die Methanausbeuten verschiedener Getreidearten bei Ernte in der Milch- bis Teigreife, verschiedener Mischungen mit Getreide sowie von *Sorghum* lagen im mittleren Bereich. Die geringsten Methanausbeuten wurden für die mehrjährigen Kulturen, d.h. für Topinamburkraut und Miscanthus ermittelt. Dabei lag die mittlere Methanausbeute um 30 bis 36 % unterhalb der Methanausbeute von Mais. Aber auch Buchweizen, Erbse, Quinoa und Amarant sowie, trotz hoher Rohfettgehalte, Sonnenblume und Raps wiesen Methanausbeuten im unteren Bereich auf (Tab. II.1.2-1).
Tendenziell wurden für Fruchtarten mit hohem Rohfaseranteil geringere Biogasausbeuten gemessen als bei Fruchtarten mit niedrigem Rohfasergehalt. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Rohfasergehalt und der Biogasausbeute konnte jedoch nicht gefunden werden (R^2=0,285). Der Rohfasergehalt ist ein Summenparameter, der sowohl in der Biogasanlage leicht abbaubare als auch schwer oder nicht nutzbare Faserbestandteile beinhaltet. Eine weitere Unterteilung des Faseranteils in Gehalte an Lignin, Cellulose und Hemicellulose lässt detailliertere Aussagen bezüglich des Biogasbildungspotenzials zu. Zwischen den Gehalten an Lignin (Säure-Detergentien-Lignin – ADL) und der mittleren Biogasausbeute bezogen auf die oTM der untersuchen Fruchtarten konnte ein enger Zusammenhang gefunden werden (Abb. II.1.2-2). Dabei wirkten sich hohe Ligningehalte negativ auf die Biogasausbeute aus. Der Methangehalt im Biogas war hingegen vor allem vom Gehalt an NfE in den Silagen abhängig, wobei mit steigenden NfE-Gehalten der Methangehalt abnahm (Abb. II.1.2-2).

Die Richtwerte der Methanausbeuten der untersuchten Fruchtarten bezogen auf Mais in Hauptfruchtstellung (Tab. II.1.2-1) wurden den Verbundpartnern für die Berechnung von Methanhektarerträgen sowie für die ökonomische und ökologische Bewertung der Fruchtfolgen zur Verfügung gestellt. Die Werte basieren auf im Batch-Gärtest am ATB gemessenen Methanausbeuten sowie auf einigen im Hohenheimer Biogastest an der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) ermittelten Daten. In die Auswertung wurden ausschließlich gut bis sehr gut konservierte Silagen einbezogen. Die Richtwerte der Methanausbeuten ersetzen im Verbund die bisher verwendete Formel zur Berechnung theoretischer Biogas- und Me-

thanausbeuten auf Grundlage der einfachen Weenders-Analyse nach Baserga (FNR, 2010). Durch den Bezug der relativen Richtwerte für Methanausbeuten auf eine praxisübliche Methanausbeute von Mais (z.B. 338 lN/kg oTM, KTBL 2009) können die relativen Werte der Tabelle wiederum auf praxisnahe absolute Methanausbeuten umgerechnet werden.

Tab. II.1.2-1: Richtwerte für Methanausbeuten, mittlere Methangehalte und mittlere Rohaschegehalte von Silagen verschiedener Fruchtarten aus den EVA-Fruchtfolgen; Stand: 07.12.2012

Fruchtart	BBCH	n ausgewertet (Anzahl)	oTM-Methanausbeute (% bezogen auf Mais HF)	Methangehalt (Vol-%)	Mittlerer Aschegehalt (% TM)
Mais					
Mais HF	81-87	62	100	55,2	4,3
Mais ZF	81-87	17	101	55,3	4,5
Mais mangelnde Abreife	67-79	10	96	55,1	5,2
Sorghum b. x s.					
Sorghum b. x s. mäßige bis gute Entwicklung (TS > 22%)	69-85	38	88	56,5	5,4
Sorghum b. x s. späte Abreife (TS < 22%)	33-75	18	95	57,8	7,4
Sorghum b.					
Sorghum b. mäßige bis gute Entwicklung (TS > 22%)	69-85	10	88	56,2	5,2
Sorghum b. späte Abreife (TS < 22%)	33-75	11	93	56,5	7,2
Winterroggen					
Winterroggen HF	71-85	14	91	55,9	5,3
W.roggen Zwischennutzung	61-69	3	94	57,0	6,1
W.roggen WiZwF/Grünschnitt	bis 59	23	104	58,0	8,3
Sommerroggen	71-85	7	85	55,6	5,1
Wintergerste					
Wintergerste HF	71-85	23	98	56,4	6,6
W.gerste Zwischennutzung	61-69	3	99	56,5	6,9
W.gerste WiZwF/Grünschnitt	bis 59	6	105	57,1	9,3
Sommergerste	71-85	8	96	55,8	6,0
Wintertriticale					
Wintertriticale HF	71-85	26	96	55,3	5,5
W.triticale Zwischennutzung	61-69	4	97	56,4	6,2
W.triticale WiZwF/Grünschnitt	bis 59	5	104	56,3	8,6
Winterweizen HF	71-85	2	98	54,2	4,5
Winterroggen/Wintertriticale HF	71-85	4	94	56,3	5,7
W.gerste/W.triticale/W.weizen HF	71-85	4	99	56,5	6,0
Hafer HF	71-85	16	92	56,9	7,2
Hafer-Erbse-Leindotter	71-85	5	92	56,9	6,2
Winterroggen/Winterwicken HF	71-85	2	86	56,7	6,2
Wintergerste/Winterrübsen	43-51/61-65	2	86	58,9	11,0
Sonnenblume	71-87	10	75	56,5	12,5
Raps	65-85	5	82	59,3	8,9
Ölrettich	51-69	5	83	58,7	18,9
Erbse	76	1	78	56,2	9,7
Topinamburkraut	39-69	13	70	55,6	10,1
Topinamburknolle	ab 65	1	108	52,3	16,2
Miscanthus	33-77	4	64	61,1	5,8

Fortsetzung **Tab. II.1.2-1:** Richtwerte für Methanausbeuten verschiedener Fruchtarten

Fruchtart	BBCH	n ausgewertet (Anzahl)	oTM-Methanausbeute (% bezogen auf Mais HF)	Methangehalt (Vol-%)	Mittlerer Aschegehalt (% TM)
Mais HF	81-87	62	100	55,2	4,3
Buchweizen	75-83	3	74	56,0	8,2
Amarant	75-79	2	84	58,8	13,6
Quinoa	85	1	79	57,3	10,6
Markstammkohl	41-50	2	98	54,8	12,6
Weidelgrasmischung					
1. Schnitt früh[a]		13	111	56,4	9,6
1. Schnitt spät[b]		17	105	56,4	8,5
Folgeschnitte früh[a]		11	102	57,4	9,7
Folgeschnitte spät[b]		26	95	57,3	9,9
Einj. Weidelgras (SZwF)	51-69	8	87	58,1	10,7
Kleegrasmischung					
1. Schnitt früh[a]		4	114	57,6	9,8
1. Schnitt spät[b]		5	98	58,1	9,2
Folgeschnitte früh[a]		2	107	60,0	9,9
Folgeschnitte spät[b]		9	91	59,9	9,9
Luzernegras					
1. Schnitt früh	bis 55	7	96	59,8	11,0
1. Schnitt spät	59-61	6	92	60,2	11,3
Folgeschnitte spät	59-61	15	86	59,3	12,1
Gerstgras	77-83	2	100	54,8	8,9
Landsberger Gemenge	61	1	90	57,3	9,6

HF… Hauptfrucht, ZF… Zweitfrucht, WiZwF… Winterzwischenfrucht, SZwF… Sommerzwischenfrucht
n… Anzahl der Mittelwerte der analysierten Proben (keine Einzelwerte!)
[a] hohe Schnittfrequenz; [b] niedrige Schnittfrequenz

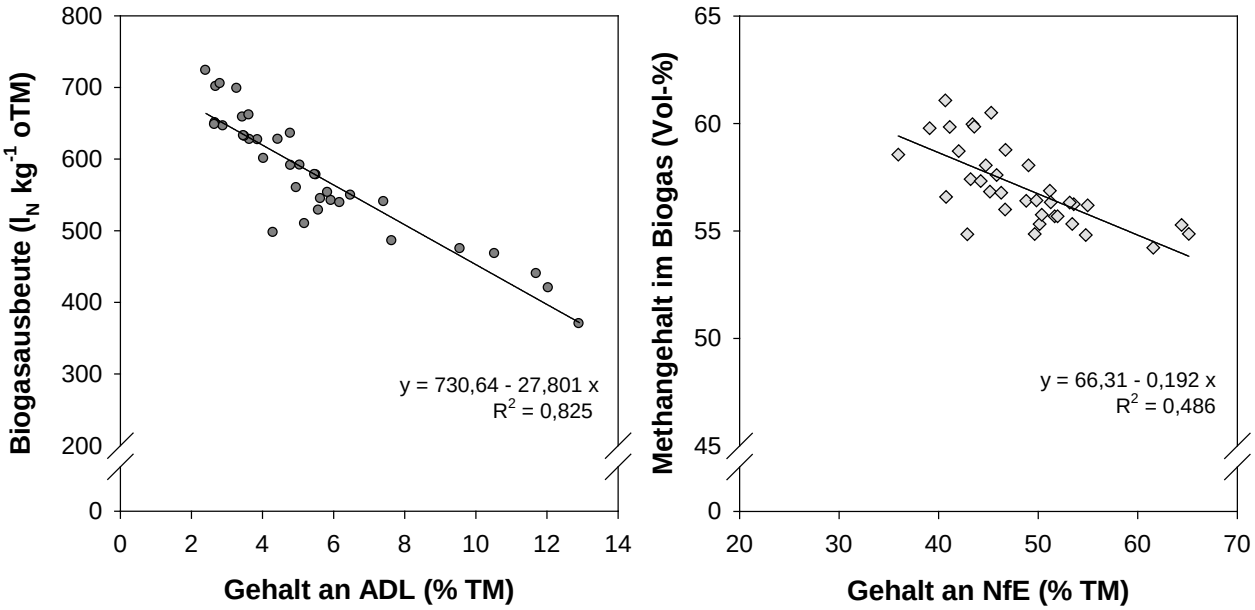
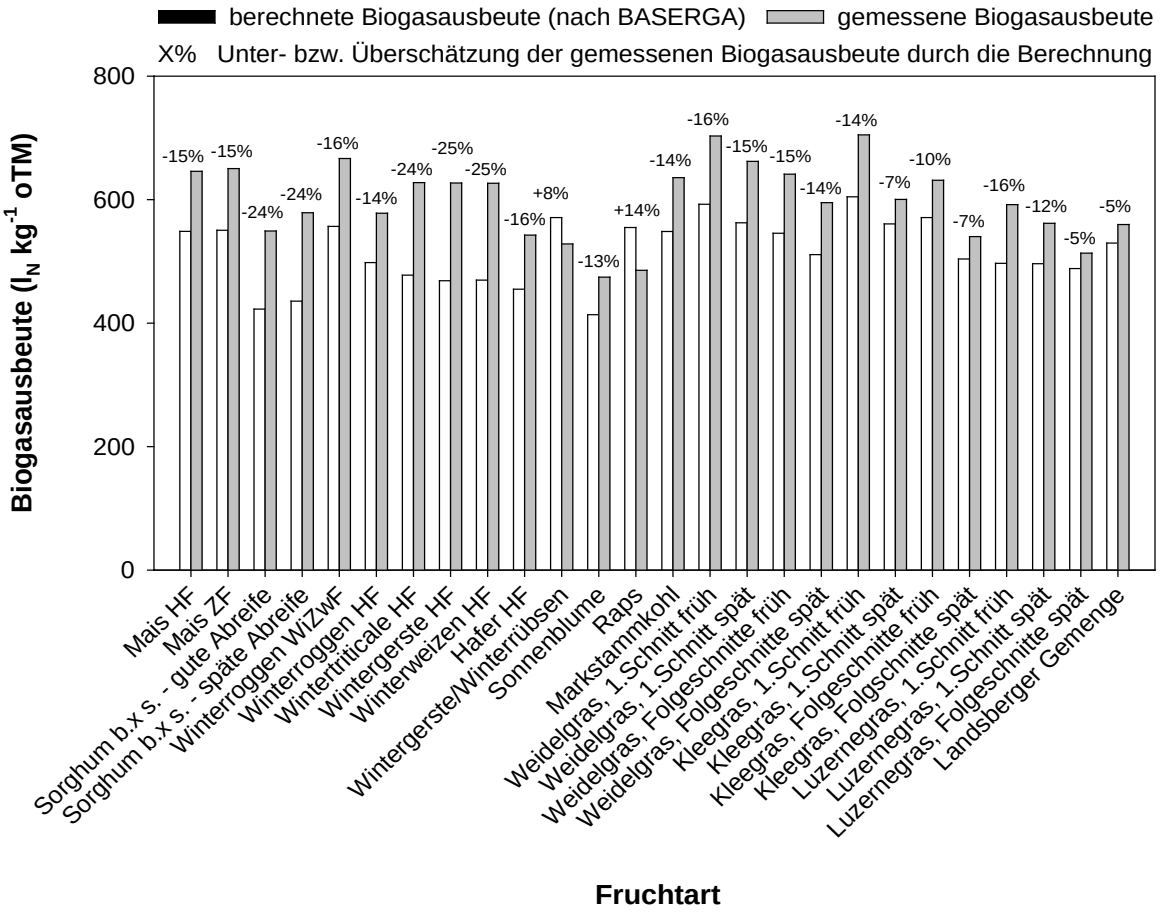


Abb. II.1.2-2: Zusammenhang zwischen Ligningehalt (ADL) und Biogasausbeute sowie dem Gehalt an stickstofffreien Extraktstoffen (NfE) und dem Methangehalt im Biogas (mittlere Werte verschiedener Fruchtarten und Mischungen)

Die bisher im EVA-Verbund sowie in anderen Studien für die Abschätzung von Methanausbeuten der Proben, die nicht im Gärtest untersucht werden konnten, verwendete Formel nach Baserga (FNR, 2010) hat sich als ungeeignet erwiesen. Ein Nachteil waren die der theoretischen Berechnung zugrunde liegenden und der DLG-Futterwerttabelle (DLG, 1997) entnommenen Verdaulichkeitsquotienten, die nicht für alle Fruchtarten und häufig nicht für die notwendigen Reifestadien verfügbar sind. Werte für einzelne Fruchtarten und Mischungen konnten daher z.T. nur näherungsweise verwendet werden bzw. mussten interpoliert (z.B. Wintertriticale) oder aus Mischungsanteilen abgeschätzt werden. Teilweise war eine Berechnung nicht möglich (z.B. Topinamburkraut).



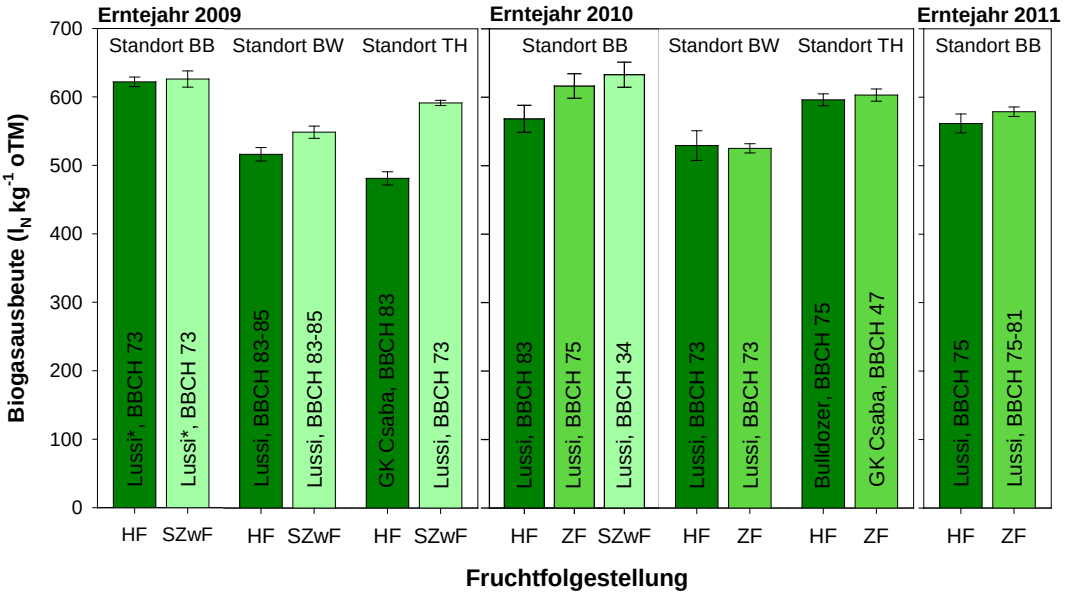
HF… Hauptfrucht, ZF… Zweitfrucht, WiZwF… Winterzwischenfrucht

Abb. II.1.2-3: Vergleich theoretischer (berechnet nach Baserga, FNR, 2010) und gemessener Biogasausbeuten der Silagen verschiedener Fruchtarten und Mischungen aus den Fruchtfolgen in EVA 1 und EVA 2 (Mittelwerte)

Die theoretisch berechneten Biogasausbeuten lagen zudem mit Ausnahme weniger Fruchtarten deutlich unterhalb der gemessenen Biogasausbeuten und ebenfalls deutlich unter den Biogasausbeuten in sorgfältig betriebenen Praxisbiogasanlagen (Abb. II.1.2-3). Lediglich bei Raps, Erbse und der Mischung aus Wintergerste und Winterrübsen wurden die Biogasausbeuten durch die theoretische Berechnung überschätzt. Bei 94 % aller auswertbaren Varianten (n = 313, nur Partnerproben; Mittelwerte der Silagen einer Variante) wurde die Biogasausbeute unterschätzt. Im Mittel lagen die berechneten Werte um 16 % unterhalb der experimentell ermittelten Biogasausbeuten. Große Differenzen ergaben sich vor allem bei

Sorghum und Getreideganzpflanzen (Abb. II.1.2-3). Zudem korrelierten die berechneten und experimentell ermittelten Werte nur gering (R^2 = 0,301), d.h. die über die Formel berechneten Biogasausbeuten spiegeln nicht in geeigneter Weise die unterschiedlichen Qualitäten der Erntegüter bzw. Silagen wider. Dies bestätigen auch Untersuchungen aus anderen Arbeitsgruppen (Gerber, 2009). Die Bewertung der Biogasproduktion verschiedener Fruchtfolgeglieder sollte daher zukünftig anhand der experimentell ermittelten Richtwerte (Tab. II.1.2-1) erfolgen.

Die im Teilprojekt 4 ermittelten Ergebnisse machen deutlich, dass die Wahl der Fruchtart der Haupteinflussfaktor für die erzielte Biogas- bzw. Methanausbeute in der Biogasanlage ist. Weiterhin können aber auch die Fruchtfolgestellung sowie Standort und Jahr die Biogasausbeute wesentlich beeinflussen. Bei Nutzung von Ganzpflanzengetreide als Winterzwischenfrucht wurden aufgrund der Ernte zu einem früheren Entwicklungsstadium und damit verbunden einer geringeren Lignifizierung des Erntegutes im Mittel um 7 bis 13 % höhere Methanausbeuten erzielt als bei Nutzung als Hauptfrucht. Auch für Mais in Hauptfruchtstellung wurden im Mittel geringfügig niedrigere Methanausbeuten gemessen als für Mais in Zweitfruchtstellung (Tab. II.1.2-1). An einzelnen Standorten war zudem der direkte Vergleich von *Sorghum b. x s.* in Hauptfrucht-, Zweitfrucht- und Sommerzwischenfruchtstellung in den Jahren 2009 bis 2011 möglich (Abb. II.1.2-4). Dabei wurden mit einer Ausnahme am Standort BW in 2010 bei Nutzung des *Sorghums* als Zweitfrucht bzw. als Sommerzwischenfrucht höhere Biogasausbeuten erzielt gegenüber der Nutzung des *Sorghums* als Hauptfrucht. Erfolgte die Ernte des *Sorghums* in unterschiedlicher Fruchtfolgestellung zu einem vergleichbaren Entwicklungsstadium, dann waren die Unterschiede in der Biogasausbeute mit 1 bis 6 % überwiegend gering. Teilweise musste das *Sorghum* jedoch in Zweitfrucht- bzw. Sommerzwischenfruchtstellung zu einem früheren Reifestadium geerntet werden. In diesen Fällen traten deutlichere Unterschiede in der Biogasausbeute vor allem im Vergleich Sommerzwischenfrucht – Hauptfrucht von bis zu 23 % auf (Abb. II.1.2-4). Allgemein war bei *Sorghum* eine stärkere Lignifizierung des Erntegutes mit zunehmender Reife bzw. zunehmendem TM-Gehalt zur Ernte festzustellen als bei anderen Fruchtarten, wie beispielsweise Mais. Gleichzeitig nahm mit steigendem Ligninanteil die Umsetzung zu Methan im Biogasprozess ab. Die gewonnenen Daten deuten darauf hin, dass bei *Sorghum* die Fruchtfolgestellung nur indirekt über die Abreife und dem erzielten TM-Gehalt zur Ernte die Biogasausbeute bestimmt.



* wahrscheinlich falsche Sortenbezeichnung
HF… Hauptfrucht, ZF… Zweitfrucht, SZwF… Sommerzwischenfrucht

Abb. II.1.2-4: Vergleich der Biogasausbeuten von *Sorghum*-Silagen (Mittelwert und Standardabweichung) bei unterschiedlicher Fruchtfolgestellung an einzelnen Standorten in den Jahren 2009 bis 2011; die Beschriftung der Balken kennzeichnet jeweils die angebaute Sorte sowie das Entwicklungsstadium zur Ernte

Ein Vergleich der Biogasausbeuten über mehrere Jahre an unterschiedlichen Standorten war in EVA 2 für Mais in Hauptfruchtstellung möglich (Abb. II.1.2-5). Der Mais wurde an sieben verschiedenen Standorten im Stadium der Teigreife bis physiologischen Reife (BBCH 83-87) geerntet. Bei der Silierung wurden ausschließlich Konservate mit sehr guter Gärqualität erzeugt.

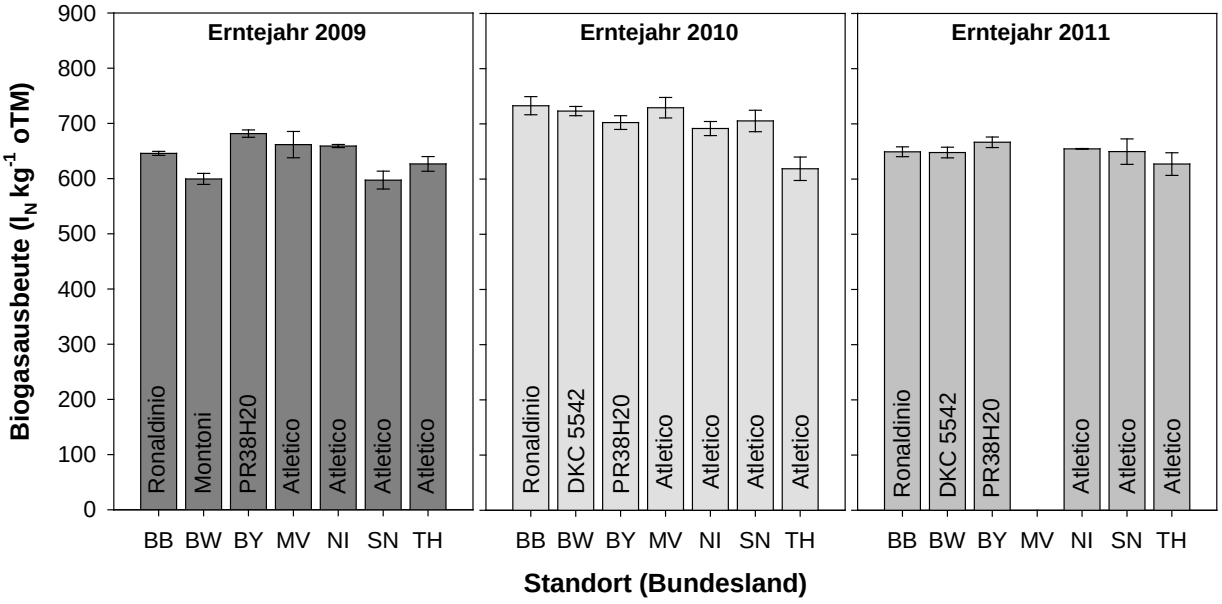


Abb. II.1.2-5: Vergleich der Biogasausbeuten von Mais in Hauptfruchtstellung (Mittelwert und Standardabweichung) an sieben Standorten in den Jahren 2009 bis 2011; die Beschriftung der Balken kennzeichnet jeweils die angebaute Sorte

Die Biogasausbeuten der Maissilagen unterschieden sich zwischen den Standorten innerhalb der einzelnen Jahre um bis zu 18 % (Abb. II.1.2-5). Dabei wurden im Erntejahr 2010 die größten und in 2011 die geringsten Standortunterschiede ermittelt. Insgesamt lagen die Biogasausbeuten der Maissilagen am Standort TH am niedrigsten, wobei in 2009 auch für die Standorte BW und SN geringe Biogasausbeuten ermittelt wurden. Große Unterschiede in den Biogasausbeuten wurden auch zwischen den Anbaujahren festgestellt. An den gleichen Standorten differierten die Biogasausbeuten der Maissilagen zwischen den Jahren um bis zu 21 %. Die größte Differenz wurde am Standort BW analysiert, wobei unterschiedliche Sorten zum Anbau kamen. Die in 2009 verwendete sehr spät reifende Sorte „Montoni“ wies eine vergleichsweise niedrige Biogasausbeute auf (Abb. II.1.2-5). Auffällig waren hohe Biogasausbeuten im Erntejahr 2010. Niedrigere Ligningehalte als in den übrigen Jahren sowie vergleichsweise geringe TM- und Stärkegehalte der Maissilagen deuten auf eine verzögerte Abreife hin, verursacht durch die länger anhaltende kühle und niederschlagsreiche Witterung im Mai sowie im August und September 2010. In 2009 wurden hingegen bei ausgeprägt warmer und trockener Witterung im August und September die geringsten Biogasausbeuten gemessen. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Ligningehalt und der Biogasausbeute der Silagen konnte nicht ermittelt werden (R^2 = 0,170), die Maissilagen mit den höchsten Ligninanteilen wiesen jedoch die geringsten Biogasausbeuten auf. Die Ergebnisse zeigen, dass auch Standort und Sorte sowie die Witterung in den einzelnen Anbaujahren einen deutlichen Effekt auf die erzielte Biogasausbeute haben.

Fazit:
Die Wahl der Fruchtart bzw. Fruchtfolge ist ein Haupteinflussfaktor bezüglich der erzielbaren Biogasmenge und -qualität in der Biogasanlage. Hohe Methanausbeuten bezogen auf die oTM werden aus den ersten Schnitten bzw. aus früh geschnittenem Ackerfutter, aus Mais sowie aus Ganzpflanzengetreide bei Ernte vor der Blüte (Stellung als Winterzwischenfrucht in der Fruchtfolge) erzielt. Die Methanausbeuten von *Sorghum*, Getreideganzpflanzen (Hauptfrucht) sowie verschiedenen Artenmischungen mit Getreide liegen im mittleren Bereich, während Fruchtarten mit hohen Zellwandanteilen, wie Sonnenblume, Raps, Topinambburkraut oder *Miscanthus* nur niedrige Methanausbeuten aufweisen.

Aus den für eine große Bandbreite von silierten Erntegütern mit einheitlicher Methode analysierten Methanbildungspotenzialen wurden Richtwerte abgeleitet, die mit hoher Wahrscheinlichkeit je Fruchtart und Fruchtfolgestellung, Schnitt bzw. TM-Bereich zur Ernte erzielt werden können („Richtwerte Methanausbeuten“). Die Werte dienen als Grundlage für die Berechnung von Methanhektarerträgen sowie für die ganzheitliche ökonomische und ökologische Bewertung im Verbund.

Die Biogasbeute von Silagen kann auch bei gleicher Fruchtart zum Teil deutlich voneinander abweichen. Neben der Fruchtart beeinflussen die Fruchtfolgestellung sowie Standort und Erntejahr die Biogasausbeute. Als Ursache hierfür werden Unterschiede in den Boden- und Witterungsbedingungen sowie die Wahl unterschiedlicher Sorten mit voneinander abweichendem Abreifeverhalten gesehen. Dies führt an einzelnen Standorten bzw. in einzelnen Jahren zu unterschiedlicher Entwicklung der Pflanzenbestände, zur Variation des Verhältnisses Korn-Stroh bzw. Kolben-Restpflanze und damit zur Variation der chemischen Zusammensetzung, was sich wiederum auf die Methanausbeute auswirkt.

Der Zusammenhang zwischen dem Ligninanteil (ADL) in den Silagen und der dadurch bedingten geringeren Abbaubarkeit und niedrigeren Biogasausbeute lässt sich bei den durchgeführten Untersuchungen immer wieder finden und ist ein wesentlicher Ansatzpunkt für eine zukünftig angestrebte Abschätzung der Methanbildung auf Grundlage der chemischen Zusammensetzung. Ein weiterer Ausbau der vorhandenen Datengrundlage ist notwendig, um Richtwerte, insbesondere auch für bisher weniger intensiv beprobte Fruchtarten, abzusichern. Zudem sollte eine weitere Untergliederung einzelner Fruchtarten, beispielsweise anhand des Ligningehaltes zur Ernte, angestrebt werden.

II.1.3 Nutzung einer Biogasfruchtfolge im Praxismaßstab

Ziel der Untersuchungen im Praxismaßstab war es, ergänzend zu den Laboruntersuchungen am Beispiel einer Fruchtfolge zu prüfen, inwiefern sich der Anbau sowie die Konservierung und Nutzung des Erntegutes für die Biogasproduktion in die Praxis übertragen lassen.

Anbauversuche

Es erfolgte der Anbau der Standard-Fruchtfolge Nr. 3 aus dem EVA-Verbund, bestehend aus Mais (Hauptfrucht) – Grünschnittroggen (Winterzwischenfrucht) – *Sorghum* (Zweitfrucht) – Wintertriticale-GPS und Winterroggen (Kornnutzung), in zwei Praxisbetrieben in Brandenburg (Betrieb A und B). Die Versuchsflächen befanden sich auf für Brandenburg typischen ertragsschwachen Standorten mit geringen mittleren jährlichen Niederschlägen (Tab. II.1.3-1).

Tab. II.1.3-1: Standortcharakteristik der Versuchsflächen

	Betrieb A	**Betrieb B**
Standort	Groß Kreutz (Havel)	Trebbin
Landkreis	Potsdam-Mittelmark	Teltow-Fläming
Größe der Fläche	10,137 ha	9,245 ha
Bodenart	lehmiger Sand	Sand / lehmiger Sand
Ackerzahl	37 und 42	22
mittlerer jährlicher Niederschlag	490 mm	495 mm
mittlere Jahrestemperatur	9,1 °C	8,9 °C
Höhe über NN	35 m	34 m

Bodenbearbeitung, Aussaat, Bestandesführung und Ernte wurden praxisüblich entsprechend den Gegebenheiten in den beiden Betrieben durchgeführt. Ein Anbau des in der EVA-Fruchtfolge 3 vorgesehenen Einjährigen Weidelgrases als Sommerzwischenfrucht nach Wintertriticale-GPS wurde für die niederschlagsarmen Standorte in Brandenburg von den Praxispartnern als zu risikoreich bewertet und war in den Praxisversuchen daher nicht möglich.

Die Jahre 2009 bis 2012, in denen der Anbau der Fruchtfolge in den Praxisbetrieben erfolgte, waren geprägt durch unterschiedliche, teilweise extreme Witterungsbedingungen. Tabelle II.1.3-2 und Abbildung II.1.3-1 geben einen Überblick über wesentliche Merkmale der Witterung in den Anbaujahren und deren Auswirkungen bzw. über Auffälligkeiten in den Pflanzenbeständen.

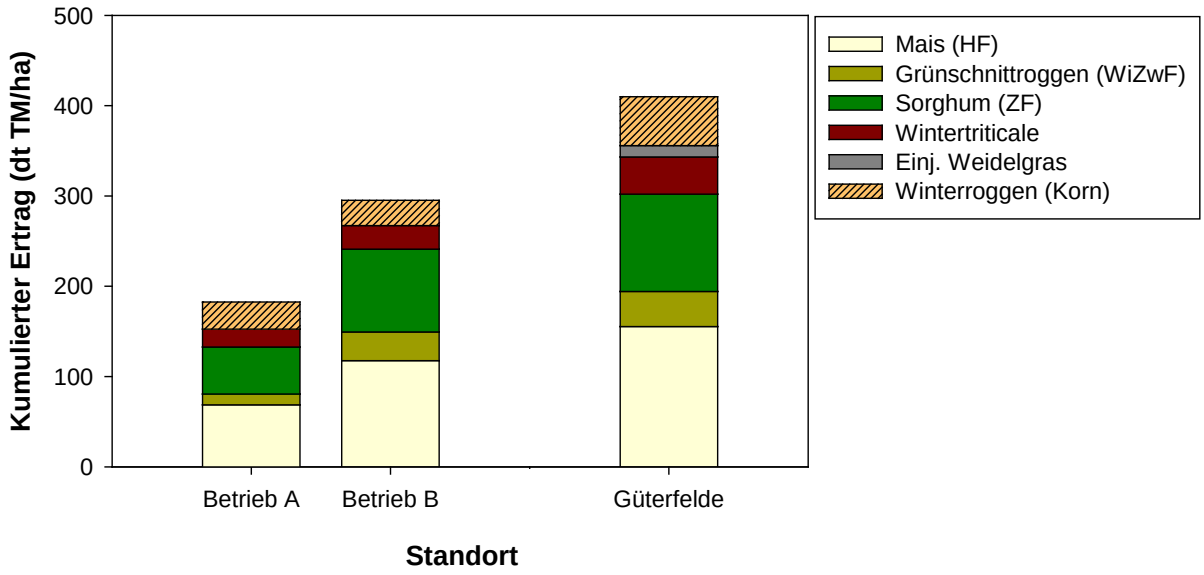
Tab. II.1.3-2: Wesentliche Merkmale des Witterungsverlaufes in den Anbaujahren sowie Auffälligkeiten im Pflanzenbestand

Anbau-jahre	Temperaturen	Niederschläge	Pflanzenbestände Betrieb A	Pflanzenbestände Betrieb B
2009	- winterlich bis 2. Märzdekade - deutlich übernormal im April bis Anf. Mai - häufige Schwankungen im Juni und Juli - überdurchschnittlich hoch ab Ende Juli und im August	- ausgeprägte Trockenheit im April - unbeständig, insges. etwas zu geringe NS im Juni und Juli - ausgeprägte Trockenheit im August und September	Mais: - ungleichmäßiges Auflaufen - gute Entwicklung bis August - beschleunigte Abreife ab August, deutliche Trockenschäden zur Ernte	Mais: - gleichmäßiges Auflaufen und gute Entwicklung bis August - beschleunigte Abreife ab August, Welke der unteren Blätter
2010	- winterlich bis 2. Märzdekade - durchschnittlich im April, deutlich zu kühl im Mai - ab Ende Juni dauerhaft hohe Temperaturen, überdurchschnittlich im Juli - unterdurchschnittlich ab August bis Ende des Jahres	- trockener April - hohe NS im Mai bis Anfang Juni - ausgeprägte Trockenheit ab Mitte Juni bis Ende Juli - anhaltend hohe NS im August und September	Grünschnittroggen: - verzögerte Entwicklung durch späten Vegetations-beginn - hoher Unkrautbesatz zur Ernte *Sorghum*: - durch feuchte Witterung Aussaat erst Anfang Juni - zögerliche Entwicklung bis Anfang August, sehr inhomogen - dünne Stängeldurchmesser - noch deutlicher Biomassezuwachs ab August	Grünschnittroggen: - etwas verzögerte, dann gute Entwicklung im Frühjahr *Sorghum*: - durch feuchte Witterung Aussaat erst Ende Mai - zögerliche Entwicklung bis Anfang August, Höhe der Pflanzen sehr unterschiedlich - noch deutlicher Biomassezuwachs, z.T. Ausgleich der Unterschiede im Bestand ab August
2011	- winterlich bis Anfang März - warme Temperaturperioden im April und Mai - unterdurchschnittliche Temperaturen im Sommer, v.a. Juli und August - anhaltend unterdurchschnittliche Temperaturen bis November	- vergleichsweise trocken von März bis Mai - extrem niederschlagsreicher Juli mit NS >40 mm pro Tag - anhaltend überdurchschnittliche NS bis Oktober	Wintertriticale: - rasche Entwicklung zu Jahresbeginn - Bereits ab April Trockenschäden sichtbar - heterogener Pflanzenbestand zur Ernte, Pflanzen z.T. vertrocknet - hoher Unkrautbesatz	Wintertriticale: - rasche Entwicklung zu Jahresbeginn - Bereits ab April Trockenschäden sichtbar - Geringe Bestandeshöhe und Stängeldurchmesser der Pflanzen zur Ernte
2012	- Dauerfrost bis Mitte Februar, milde Temperaturen ab 3. Märzdekade - warme Temperaturen v.a. im März und Mai - kühl und unbeständig im Juni und Juli - wärmer im August, durchschnittliche Temperaturen im Herbst	- trockenes Frühjahr mit zu geringen NS von März bis Mai - überdurchschnittliche NS ab Juni bis Ende Juli - etwas zu trocken im August - durchschnittliche NS in den Herbstmonaten	- gleichmäßiges Wachstum und gute Bestockung zu Vegetationsbeginn - Braunrostbefall im Mai sichtbar - teilweise hoher Unkrautbesatz zur Ernte - etwa 10 % des Bestandes im Lager	- Frostschäden zu Vegetationsbeginn - Trockenschäden im Mai deutlich sichtbar - große Teile des Bestandes zur Ernte im Lager

NS… Niederschläge

Abb. II.1.3-1: Trockenschäden im Mais September 2009 (Foto links, Betrieb A), heterogener *Sorghum*-Bestand im August 2010 (Foto Mitte, Betrieb B), hoher Unkrautbesatz zur Ernte der Wintertriticale 2011 (Foto rechts, Betrieb A)

Die Ernte des Fruchtfolgegliedes Mais in 2009 erfolgte an beiden Praxisstandorten zur Vollreife (BBCH 89) bei relativ hohen TM-Gehalten von 40 bzw. 39 % (Betrieb A bzw. B), wobei insbesondere in Betrieb A große Unterschiede im TM-Gehalt innerhalb des Bestandes gemessen wurden. Zudem trugen erhebliche Wildschäden im Maisbestand des Betriebes A zu Ertragsminderungen bei. Der Grünschnittroggen wurde in beiden Betrieben zum Entwicklungsstadium Ährenschwellen (BBCH 47) geerntet. Aufgrund anhaltender Niederschläge gestaltete sich die Ernte des Grünschnittroggens, insbesondere das Anwelken auf dem Feld, schwierig. In Betrieb A wurde aufgrund der ungünstigen Witterung auf ein Anwelken verzichtet, während in Betrieb B bei einer Feldliegezeit von vier Tagen nach der Mahd keine deutliche Erhöhung des TM-Gehaltes erzielt werden konnte. Die TM-Gehalte des Siliergutes lagen bei 18 bzw. 22 % (Betrieb A bzw. B). Durch lang anhaltende Trockenperioden im Sommer 2010 erreichte das *Sorghum* bis zur Ernte Anfang Oktober nur das Entwicklungsstadium Rispenschieben (BBCH 59) in Betrieb A, und zur Ernte Ende September die Mitte der Blüte (BBCH 65) in Betrieb B. In beiden Praxisbetrieben wies das Erntegut mit 27-28 % einen relativ geringen TM-Gehalt auf. Die Ernte der Wintertriticale zu Beginn der dritten Junidekade 2011 erfolgte auf beiden Praxisflächen im Entwicklungsstadium frühe Teigreife (BBCH 83). Der Pflanzenbestand in Betrieb A war sehr heterogen und zum Teil vertrocknet, wodurch nur geringe Erträge erzielt wurden. In Betrieb B waren trotz eines homogeneren Bestandes und leicht höheren Bestandesdichten eine geringe Bestandeshöhe von ca. 62 cm der Wintertriticale sowie geringe Stängeldurchmesser der Pflanzen auffällig, wodurch ebenfalls nur ein niedriger Ertrag geerntet werden konnte. Die TM-Gehalte lagen mit 37 bzw. 47 % (Betrieb A bzw. B) im oberen Bereich. Die Ernte des Roggenkorns erfolgte nach ungünstigen Witterungsbedingungen in beiden Praxisbetrieben Anfang August 2012. Die Roggenbestände wiesen partiell Rostbefall und einen hohen Unkrautbesatz auf, und befanden sich zum Teil im Lager. Das Roggenkorn war mit einem TM-Gehalt von 86 % in Betrieb B und 88 % in Betrieb A lagerfähig. Das Tausendkorngewicht lag jedoch mit 31,0 g/1000 Körnern (Betrieb A) bzw. 25,4 g/1000 Körnern (Betrieb B) ebenso wie das Hektolitergewicht mit 71,9 kg/hl (Betrieb A) bzw. 68,0 kg/hl (Betrieb B) im unteren Bereich.



HF… Hauptfrucht, ZF… Zweitfrucht, WiZwF… Winterzwischenfrucht

Abb. II.1.3-2: Summierte TM-Erträge der EVA-Fruchtfolge 3 auf den Flächen der beiden Praxisbetriebe sowie in Parzellenversuchen in Güterfelde zum Vergleich im Zeitraum 2009 bis 2012

Bei Anbau der Fruchtfolge 3 wurde auf der Praxisfläche in Betrieb A ein vergleichsweise geringer kumulierter TM-Ertrag (ohne Roggenkorn) von 153 dt TM/ha erzielt (Abb. II.1.3-2). In Betrieb B lag der kumulierte TM-Ertrag der Fruchtfolge 3 mit 267 dt TM/ha deutlich höher. Die Fruchtfolge 3 wurde bereits in der ersten EVA-Projektphase in den Jahren 2005 bis 2008 in Betrieb A auf den identischen Praxisflächen angebaut. Im ersten Untersuchungszeitraum ergaben sich dabei mit 226 dt TM/ha ebenfalls deutlich höhere Gesamterträge verglichen mit dem Anbauzeitraum 2009 bis 2012.

Die EVA-Fruchtfolge 3 wurde in den bisherigen Untersuchungen im Verbund an fast allen Standorten als ertragreichste der geprüften Fruchtfolgen bewertet (Barthelmes et al., 2010). In Parzellenversuchen am vergleichbaren Standort Güterfelde (Brandenburg) wurden für die Fruchtfolge ohne Berücksichtigung des einjährigen Weidelgrases sowie des Roggenkorns TM-Erträge von 343 dt TM/ha (3. Anlage, Anbau 2009 bis 2012) erzielt (G. Ebel, LELF Güterfelde, persönliche Mitteilung, 10.04.2013). Im Mittel über alle Versuchsanlagen in EVA 1 und 2 lag dieser Wert bei 323 dt TM/ha. Die TM-Erträge der Fruchtfolge 3 waren demnach in den Praxisversuchen (Anbau 2009 bis 2012) um 22 % (Betrieb B) bzw. 56 % (Betrieb A) geringer als in Parzellenversuchen am vergleichbaren Standort Güterfelde. Üblich sind höhere Erträge in Parzellenversuchen im Vergleich zum Praxisanbau von etwa 15 – 20 %, verursacht durch geringere Randeffekte im Anbau sowie geringe Feld- und Transportverluste bei der Ernte. Dies entspricht den Ergebnissen des Praxisanbaus in Betrieb B, während im Praxisanbau in Betrieb A deutlich geringere Erträge zu verzeichnen waren. Zu den sehr niedrigen Erträgen in Betrieb A hat insbesondere der geringe Maisertrag in 2009 beigetragen. Eine Ursache hierfür war neben Trockenschäden und Wildschäden im Bestand auch, dass vor dem Mais in Betrieb A Grünschnittroggen als Vorfrucht gestellt wurde, was zu einer vergleichsweise späten Aussaat sowie zusätzlicher Beanspruchung von Wasserressourcen führte.

Silierversuche

Für die Konservierung des Erntegutes aus den Praxisanbauversuchen wurde in beiden Betrieben das Verfahren der Folienschlauchsilierung angewandt (Abb. II.1.3-3). Dabei wurde jeweils etwa die Hälfte des Erntegutes der Praxisflächen ohne Silierzusatz eingelagert, während der anderen Hälfte des Erntegutes beim Häckseln ein Siliermittel zugegeben wurde. Dem Mais, *Sorghum* sowie der Wintertriticale wurde in beiden Betrieben ein biologischer Silierzusatz mit homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterien mit Wirkrichtung Verbesserung der aeroben Stabilität (Biol. C, Beschreibung des Siliermittels in Tab. II.1.9-2) zugesetzt. Das Erntegut des Grünschnittroggens wurde in der Siliermittelvariante unter Zusatz eines biologischen Siliermittels mit ausschließlich homofermentativen Milchsäurebakterien zur Verbesserung des Gärverlaufes (Biol. 1, Beschreibung des Siliermittels in Tab. II.1.9-1) konserviert. Beide Varianten einer Fruchtart wurden jeweils nacheinander in einem Schlauchsilo verdichtet und nach Siloöffnung nacheinander entnommen und beprobt.

Abb. II.1.3-3: Versuchssilagen im Folienschlauch

Lagerdauer und Entnahmezeitraum der Silagen waren von der Substratzugabe in die betriebseigenen Biogasanlagen abhängig. Infolgedessen war die Lagerdauer der einzelnen Silagen sehr unterschiedlich und lag zwischen 66 und 618 Tagen (Tab. II.1.3-3). Das Maissilo in Betrieb A musste während der Entnahme zeitweise wieder verschlossen werden, da aufgrund einer biologischen Hemmung in der Biogasanlage keine Zugabe der Silage in die Anlage möglich war. Die Entnahme der Silage erfolgte in beiden Betrieben mittels Frontlader, was insbesondere in Betrieb A zu starken Auflockerungen der Anschnittfläche führte.

Tab. II.1.3-3: Charakterisierung der Schlauchsilos

Fruchtart	Silogröße/ Abmaße	Lagerdauer	Entnahme	Mittlerer Vorschub	Bemerkungen
Betrieb A					
Mais	Breite: 3,7 m Höhe: 2,0 m Länge: 55,7 m	13.09.09-16.05.10 245 d	16.05.10-22.08.10 27.10.10-29.01.11* 99 + 95 d	0,29 m/d	Schimmel v.a. im linken Bereich und Randbereich, Anzeichen für Verderb; Mäusebefall
Grünschnittroggen	Breite: 3,9 m Höhe: 1,5 m Länge: 16,6 m	13.05.10-05.08.10 84 d	05.08.10-19.09.10 46 d	0,36 m/d	Stark aufgelockerte Anschnittfläche; vereinzelt Schimmel im Randbereich
Sorghum	Breite: 3,7 m Höhe: 2,1 m Länge: 63,4 m	04.10.10-13.06.12 618 d	13.06.12-03.12.12 174 d	0,36 m/d	Ventil nach Einlagerung nicht verschlossen; Schimmel v.a. im Randbereich, Pflanzenteile stark angegriffen, z.T. verrottet
Wintertriticale	Breite: 3,3 m Höhe: 2,0 m Länge: 23,6 m	23.06.11-29.01.12 220 d	29.01.12-06.04.12 69 d	0,34 m/d	---
Betrieb B					
Mais	Breite: 3,8 m Höhe: 2,0 m Länge: 65,1 m	31.08.09-02.03.10 183 d	02.03.10-23.03.10 22 d	2,96 m/d	vereinzelt Vogelschäden in der Silofolie; kleine Schimmelnester
Grünschnittroggen	Breite: 3,8 m Höhe: 1,6 m Länge: 33,0 m	05.05.10-21.04.11 351 d	21.04.11-04.06.11 45 d	0,73 m/d	Vogelschäden in der Silofolie; Schimmelnester im oberen Randbereich
Sorghum	Breite: 3,6 m Höhe: 2,1 m Länge: 65,8 m	22.09.10-22.11.11 426 d	22.11.11-08.01.12 48 d	1,37 m/d	vereinzelt Vogelschäden in der Silofolie; wenige Schimmelnester
Wintertriticale	Breite: 1,8 m Höhe: 3,1 m Länge: 15,7 m	20.06.11-25.08.11 66 d	25.08.11-12.09.11 19 d	0,83 m/d	---

* Entnahmepause durch Defekt der Biogasanlage

Die Beprobung der Praxissilos erfolgte in der Regel an vier Terminen je Versuchssilo während der Auslagerung, wobei jeweils zwei Probenahmen der Silagen ohne Silierzusatz und zwei Probenahmen der Silagen mit Silierzusatz stattfanden. Ausnahmen waren der Grünschnittroggen mit Silierzusatz in Betrieb A sowie die Wintertriticale ohne Silierzusatz in Betrieb B. Aufgrund einer unerwartet raschen Auslagerung der Silage war für diese Varianten nur jeweils eine Probenahme möglich. Die Beprobung der Silos fand grundsätzlich am fri-

schen Siloanschnitt statt. Mit Hilfe eines Gitters konnte die Anschnittfläche gleichmäßig in 30 x 30 cm große Quadrate unterteilt werden. Je Probenahmetermin wurden mittels Probenbohrer (Fa. Pioneer) insgesamt sechs Mischproben an unterschiedlichen Positionen im Silo gewonnen (Oben, Mitte, Unten, Links, Rechts, Silorand), wobei jede Mischprobe aus wenigstens drei Einzelproben bestand. Das Schema der Silobeprobung ist der Abb. II.1.3-4 zu entnehmen. In jedem vollen Quadrat des Gitters wurde zudem die Silagetemperatur 40 cm hinter der Anschnittfläche ermittelt.

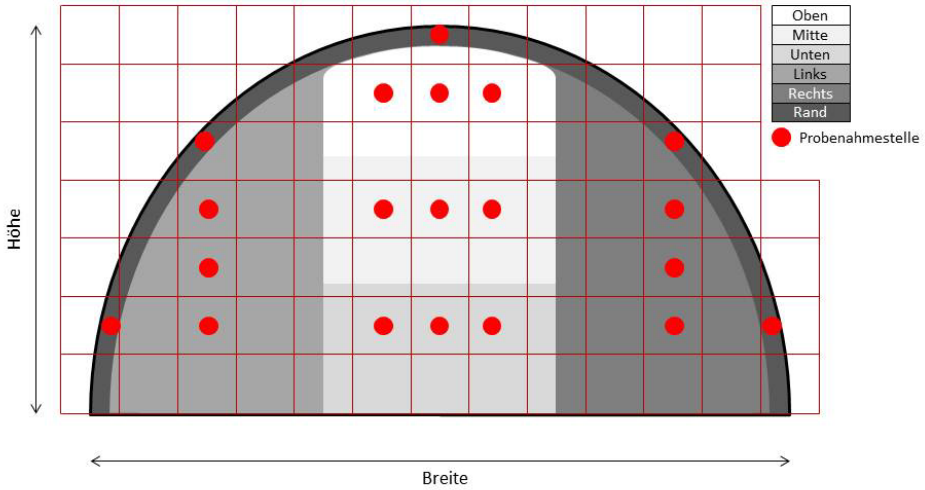


Abb. II.1.3-4: Schematische Darstellung der Beprobung der Praxissilos

Von den Silageproben aus den Praxissilos wurden Nährstoffgehalte, pH-Wert und Gärsäuremuster, die aerobe Stabilität sowie die Biogasausbeute im Batch-Gärtest entsprechend Anhang Tabelle A-1 analysiert. Mittelwerte der gemessenen Parameter für das Gesamtversuchssilo bzw. die jeweilige Variante wurden aus den Einzelwerten für die unterschiedlichen Positionen gewichtet nach den aus dem Probenahmeschema (Abb. II.1.3-4) abgeleiteten Flächenanteilen an der Anschnittfläche, die die einzelnen Positionen im Silo präsentieren, berechnet. Dabei wurde vereinfacht davon ausgegangen, dass die Flächenanteile am Siloanschnitt den Gewichtsanteilen im Gesamtsilo entsprechen.

Die in beiden Betrieben im Schlauchsilo erzeugten Versuchssilagen wiesen bei Bewertung der Gärprodukte der Silierung nach DLG-Schlüssel (DLG, 2006; Anhang A-3) überwiegend „gute“ bis „sehr gute“ Gärqualitäten auf (Tab. II.1.3-4). Bei Mais, *Sorghum* und Wintertriticale ohne Silierzusatz überwog die Bildung von Milchsäure bei der Silierung. Milchsäuregehalte von im Mittel 3,9 bis 6,0 % TM führten zu einer ausreichenden Absenkung des pH-Wertes auf Werte von 3,9 bis 4,1 und damit zu einer erfolgreichen Konservierung des Erntegutes. Buttersäure wurde nur vereinzelt und in geringen Konzentrationen bis 0,2 % TM analysiert. Der Zusatz des Siliermittels Biol. C mit homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterien bewirkte in den Silagen mit Ausnahme der Wintertriticale in Betrieb B eine deutliche Erhöhung der Essigsäuregehalte sowie einen Anstieg der Anteile an ein- und zweiwertigen Alkoholen. Dies wird durch die heterofermentativen Milchsäurebakterien des Silierzusatzes Biol. C verursacht, deren Umsetzungsprozesse unter verstärkter Bildung von Essigsäure und Alkoholen ablaufen (McDonald et al., 1991; Oude Elferink et al., 2001). Ein erhöhter Essigsäuregehalt ist erwünscht, da der undissoziierte Anteil der Essigsäure vor allem auf Hefen

hemmend wirkt und damit die aerobe Stabilität der Silage erhöht (Kalzendorf, 2006). Essigsäuregehalte oberhalb von 3 % TM werden jedoch hinsichtlich der Gärqualität der Silage negativ bewertet (DLG, 2006). Entsprechend wiesen die Varianten mit Silierzusatz Biol. C zum Teil eine geringere Gärqualität auf verglichen mit den Varianten ohne Zusatz. Die fehlende Wirkung des Silierzusatzes in der Wintertriticale in Betrieb A ist möglicherweise auf hohe TM-Gehalte und die kurze Lagerdauer der Silage zurückzuführen. Bei dem kombinierten Einsatz von homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterien bewirken die homofermentativen Milchsäurebakterien in der Anfangsgärphase die Umsetzung von Pflanzenzuckern zu Milchsäure, während die Essigsäure durch die heterofermentativen Milchsäurebakterien erst im weiteren Gärverlauf aus restlichen Pflanzenzuckern und Milchsäure gebildet wird (Kalzendorf, 2006).

Tab. II.1.3-4: Gärsäuremuster, Gärqualitäten und aerobe Stabilitäten der Versuchssilagen ohne und mit Silierzusatz

Fruchtart Variante	**n**	**TM**	**pH-Wert**	**MS**	**ES[1)]**	**BS[2)]**	**Alkohole[3)]**	**Gärqualität**	**Aerobe Stabilität[4)]** MW (Spanne)
		(% TM)		**(% TM)**	**(% TM)**	**(% TM)**	**(% TM)**	**(DLG-Punkte)**	**(d)**
Betrieb A									
Mais									
ohne Silierzusatz	12	38,9	4,0	4,4	0,8	0,0	0,5	93*	3,0 (0,3- >7)
mit Silierzusatz Biol.C	12	39,3	4,1	3,1	2,3	0,1	0,5	83*	5,8 (0,9- >7)
Grünschnittroggen									
ohne Silierzusatz	12	19,2	4,4	2,5	7,8	0,0	7,9	28*	2,2 (0,3-3,4)
mit Silierzusatz Biol.1	6	21,1	3,9	9,8	1,7	0,0	3,2	98	0,4 (0,1-0,7)
Sorghum									
ohne Silierzusatz	12	26,3	3,9	6,0	1,3	0,0	2,2	89*	3,9 (0,0-5,5)
mit Silierzusatz Biol.C	12	27,2	4,3	2,2	4,2	0,0	2,9	67*	6,6 (2,5- >7)
Wintertriticale									
ohne Silierzusatz	12	35,3	4,1	5,3	1,4	0,0	0,9	100	6,9 (5,9- >7)
mit Silierzusatz Biol.C	12	40,3	4,1	4,9	1,6	0,0	2,9	100	7,0 (6,8- >7)
Betrieb B									
Mais									
ohne Silierzusatz	12	37,3	3,9	5,3	0,7	0,0	0,6	88*	5,3 (0,8- >7)
mit Silierzusatz Biol.C	12	43,8	4,1	3,0	2,2	0,0	1,1	94*	6,5 (3,8- >7)
Grünschnittroggen									
ohne Silierzusatz	12	21,7	4,3	6,7	5,9	0,2	2,4	38*	3,5 (0,2-6,2)
mit Silierzusatz Biol.1	12	22,8	4,0	9,0	1,9	0,0	4,1	95*	1,8 (0,1-3,2)
Sorghum									
ohne Silierzusatz	12	31,6	4,0	4,9	2,2	0,0	4,2	98	> 7 (>7)
mit Silierzusatz Biol.C	12	29,8	3,8	4,3	4,1	0,1	7,0	76*	> 7 (>7)
Wintertriticale									
ohne Silierzusatz	6	44,3	4,1	3,9	3,8	0,0	1,2	82	> 7 (>7)
mit Silierzusatz Biol.C	12	41,4	4,1	4,4	3,3	0,0	0,3	90	> 7 (>7)

MS… Milchsäure, ES… Essigsäure, BS… Buttersäure, MW… Mittelwert
[1)]Summe aus Essig- und Propionsäure; [2)]Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; [3)]Summe aus Ethanol, Propanol, 1,2-Propandiol, 2,3-Butandiol; [4)] die aerobe Stabilität wurde nur jeweils zu einer Probenahme je Variante ermittelt
* Punktabzug nach sensorischer Prüfung

Die Grünschnittroggensilagen ohne Silierzusatz aus beiden Praxissilos wiesen im Gegensatz zu den Silagen der übrigen Fruchtarten eine „schlechte“ bis „sehr schlechte“ Gärqualität auf. Auffällig waren hier vor allem hohe Gehalte an Essigsäure von im Mittel 5,9 bzw. 7,8 % TM, und höhere pH-Werte von 4,3 bis 4,4. Dies deutet auf Fehlgärungen verursacht durch Clostridien hin. In nitratreichem Erntegut wird durch die Umsetzungsprozesse von Clostridien Milchsäure in Essigsäure umgebaut (Pahlow, 2006). Die geringen TM-Gehalte des Grünschnittroggens zur Ernte, die aufgrund der niederschlagsreichen Witterung durch Anwelken nicht wesentlich erhöht werden konnten, trugen zu einer verminderten Vergärbarkeit des Erntegutes und damit zu einem erhöhten Risiko für Fehlgärungen bei (vgl. Kapitel II.1.1). Je niedriger der TM-Gehalt eines Siliergutes ist, desto stärker muss der pH-Wert abgesenkt werden, um das Wachstum von Clostridien zu hemmen (Weißbach et al., 1974). Die Absenkung des pH-Wertes erfolgte durch die im Erntegut des Grünschnittroggens vorhandenen Milchsäurebakterien nur unzureichend. Der Zusatz leistungsfähiger homofermentativer Milchsäurebakterien erhöhte die Milchsäurebildung während der Silierung jedoch erheblich und führte zu einer deutlichen Verbesserung der Gärqualität in der Siliermittelvariante.

Ein wesentliches Prinzip der Silierung ist die Lagerung des zu konservierenden Pflanzenmaterials unter Ausschluss von Luftsauerstoff, um die Milchsäuregärung durch anaerobe Milchsäurebakterien zu fördern und aerobe Gärschädlinge zu hemmen. Tritt während der Lagerung durch Schäden in der Siloabdeckung Luftsauerstoff in das Silo ein, so kann dies das Wachstum von im Ruhezustand überlebenden aeroben Mikroorganismen, wie Hefen und Schimmelpilzen, wieder anregen (Pahlow, 2006). Bei der Entnahme der Silage nach Siloöffnung ist ein Eindringen von Luftsauerstoff hinter die Anschnittfläche nicht vollständig zu vermeiden. Geringe aerobe Stabilitäten bzw. eine zu langsame Entnahme können dann ebenfalls zur Erwärmung der Silage und dem Verderb durch Hefen und Schimmelpilze führen (Pahlow, 2006). Dabei wird das Eindringen von Sauerstoff durch geringe Dichten im Silo sowie durch auflockernde Entnahmetechniken zusätzlich gefördert. Vorteile der Folienschlauchsilierung bestehen u.a. in einem guten Luftabschluss sowie geringen Anschnittflächen, die einen hohen Vorschub bei der Silageentnahme ermöglichen. Dennoch war mit Ausnahme der Wintertriticale in allen Praxissilagen partienweise aerober Verderb erkennbar (Tab. II.1.3-3). In Betrieb B führten vor allem kleinere, durch Vögel verursachte Schäden in der Silofolie zu Schimmelnestern im Randbereich. Dies konnte in Betrieb A durch die zusätzliche Verwendung von Schutzgewebe verhindert werden. In Betrieb A wurde die Silofolie während der Lagerung jedoch ebenfalls teilweise durch Mäuse beschädigt. Zudem wurde die Silage bei der Entnahme stark aufgelockert, wodurch tiefreichende Luftkanäle im Silostock entstehen.
Der Vorschub bei der Entnahme der Silage sollte bei 1,5 m/Woche im Winter und 2,5 m/Woche im Sommer liegen, um Nacherwärmung und damit verbundene hohe Verluste zu vermeiden (Thaysen & Wagner, 2006). In Betrieb B lag der Entnahmevorschub mit 5 bis 21 m/Woche deutlich über diesen Empfehlungen. Eine großflächige Erwärmung der Silagen an den Anschnittflächen wurde daher in Betrieb B nicht festgestellt, jedoch begrenzte Temperaturerhöhungen in den Randbereichen bei Verletzungen der Silofolie. In Betrieb A wurde der empfohlene Entnahmevorschub mit 2 bis 2,5 m/Woche teilweise nicht erreicht. Temperaturerhöhungen an der Anschnittfläche waren hier besonders in den stark aufgelockerten Randbereichen sowie in Bereichen mit sichtbarer Schimmelbildung zu verzeichnen. Dies ist in Abbildung II.1.3-5 beispielhaft für die Maissilage in Betrieb A dargestellt. Probleme beim Betrieb der Biogasanlage während des Entnahmezeitraumes der Maissilage verringerten

zusätzlich den Entnahmevorschub und führten zwischenzeitlich sogar zu einer Entnahmepause.

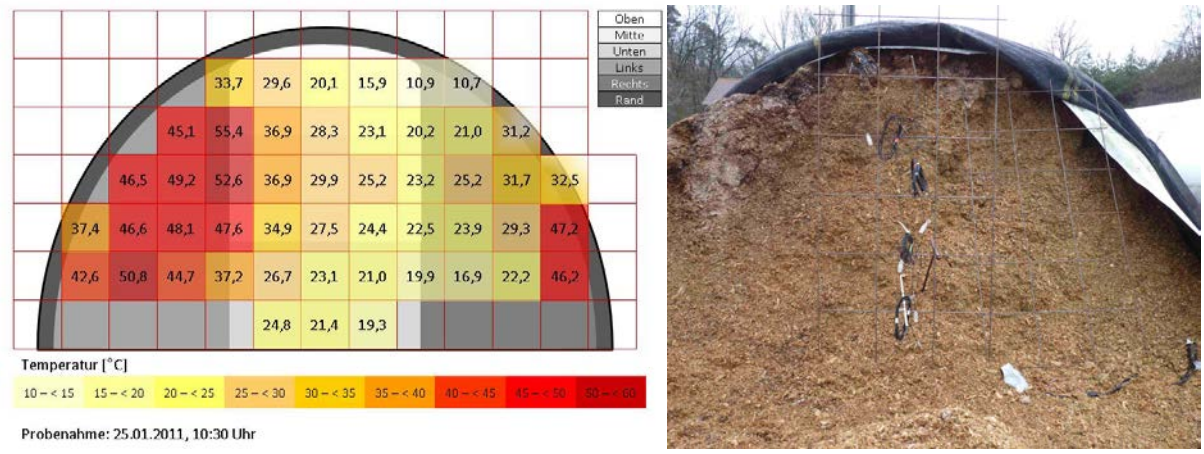


Abb. II.1.3-5: Temperaturprofil (links) sowie fotografische Darstellung der Temperaturmessung am Siloanschnitt (rechts) des Versuchssilos mit Maissilage in Betrieb A am 25.01.2011

Neben der Gärqualität der Praxissilagen wurde auch die aerobe Stabilität, d.h. die Dauer bis zur Erwärmung der Silage bei aerober Lagerung um mehr als 3°C über Umgebungstemperatur (vgl. Anhang Tab. A-1) analysiert. Dabei waren vor allem Mais und Grünschnittroggen nur über eine kurze Zeit der Lagerung unter Lufteinfluss stabil, während Wintertriticale und *Sorghum* hohe aerobe Stabilitäten aufwiesen. Die geringere aerobe Stabilität des *Sorghums* in Betrieb A ist auf Lufteintritt durch ein nicht verschlossenes Ventil im Schlauchsilo zurückzuführen. Mit Ausnahme der Wintertriticale in beiden Praxisbetrieben sowie des *Sorghums* in Betrieb B wurden erhebliche Unterschiede der aeroben Stabilität abhängig von der Position im Silo festgestellt. Dabei wurden im Randbereich jeweils die geringsten aeroben Stabilitäten gemessen. Durch höhere Essigsäuregehalte im Gärsäuremuster bei Zusatz des Siliermittels Biol. C konnte die aerobe Stabilität verbessert werden (Tab. II.1.3-4). Hingegen bewirkte der Zusatz Biol. 1 durch erhöhte Milchsäure- und niedrigere Essigsäuregehalte eine Verringerung der aeroben Stabilität der Grünschnittroggensilagen zum Teil auf wenige Stunden (Tab. II.1.3-4). Die Wirkung verschiedener Siliermittel auf die aerobe Stabilität der Silagen wird vertiefend in Kapitel II.1.9 betrachtet.

Von den Praxissilagen wurde das Biogasbildungspotenzial in Batch-Gärtests ermittelt. In beiden Betrieben lag die Biogasausbeute des Grünschnittroggens bezogen auf die oTM am höchsten, gefolgt von Mais, Wintertriticale und *Sorghum* (Abb. II.1.3-6). Dies entspricht der Reihung, die auch bei Analyse der Laborsilagen des Erntegutes aus den Parzellenversuchen („Richtwerte Methanausbeuten“) gefunden wurde (vgl. Kap. II.1.2). Ebenso wie bei den Laborsilagen nahmen auch bei den Praxissilagen die Biogasausbeuten mit steigenden Ligninanteilen im Erntegut ab.
Das gewichtete Mittel der Biogasausbeuten ohne und mit Silierzusatz unterschied sich bei allen Fruchtarten nur gering. Mit Ausnahme des Grünschnittroggens und des *Sorghums* in Betrieb A sowie der Wintertriticale in Betrieb B wurden mit Silierzusatz um 1 bis 2 % höhere Biogasausbeuten gemessen. Bei *Sorghum* in Betrieb A lag die Biogasausbeute mit Silierzusatz um 4 % niedriger verglichen mit der Kontrollvariante ohne Zusatz. Dies wurde jedoch

durch höhere Methangehalte im Biogas bei Betrachtung der Methanausbeuten ausgeglichen. Die Wintertriticale wies mit Silierzusatz eine um 2 % geringere Biogasausbeute auf, wobei hier bereits bei der Silierung keine Wirkung des Silierzusatzes durch Änderungen im Gärsäuremuster der Silagen festgestellt wurde. Bei Betrachtung der Einzelwerte wurden signifikante Effekte durch den jeweiligen Silierzusatz auf die Biogasausbeute für Mais in Betrieb B, sowie *Sorghum* und Wintertriticale in beiden Betrieben gefunden. Trotz der erheblichen Wirkung auf die Gärqualität des Grünschnittroggens wurde durch den Silierzusatz Biol.1 kein signifikanter Effekt auf die Biogasausbeute des Grünschnittroggens erzielt. Silierverluste sind hierbei nicht berücksichtigt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass durch die Fehlgärungen ohne Silierzusatz deutlich höhere Masseverluste zu verzeichnen waren. So wurden in Betrieb B für die Grünschnittroggensilage Silierverluste von 31 % ohne Silierzusatz und von 11 % mit Silierzusatz durch Wägung bei der Siloein- und –auslagerung ermittelt. Die Messung von Silierverlusten für die Praxissilagen war allerdings nicht fehlerfrei und nur näherungsweise möglich, da bei Übergang zwischen den Varianten ohne und mit Siliermittel die Massen nicht eindeutig getrennt werden konnten.

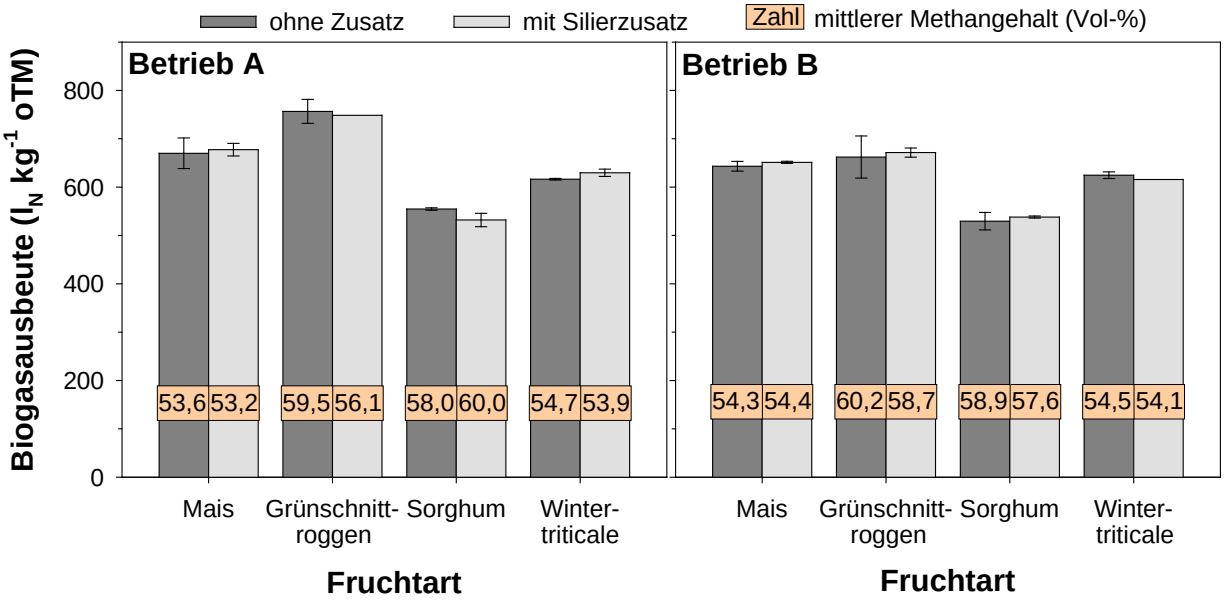


Abb. II.1.3-6: Biogasausbeuten und Methangehalte der Silagen der Fruchtfolge 3 aus den Praxissilos der Betrieb A und B, jeweils ohne und mit Silierzusatz (gewichtetes Mittel und Standardabweichung zwischen den beiden Probenahmen je Variante; gemessen in Batch-Gärtests)

Innerhalb der Siloanschnitte waren für unterschiedliche Positionen im Silo zum Teil deutliche Unterschiede in der Biogasausbeute festzustellen. Insbesondere die Randbereiche bzw. Silagepartien mit sichtbarem aeroben Verderb bzw. Nacherwärmung wiesen niedrigere Biogasausbeuten auf. Dies ist beispielhaft für die Maissilage in Betrieb A und die Grünschnittroggensilage in Betrieb B in Abb. II.1.3-7 dargestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sich in Praxissilos vor allem aerobe Umsetzungen negativ auf die Biogasproduktion auswirken. Bereits das Eindringen geringer Luftsauerstoffmengen in das Silo, z.B. durch beschädigte Siloabdeckungen, führen zum aeroben Verderb von Silagepartien und zu Verlusten des Biogasbildungspotenzials. Weitere Ausführungen zur Wirkung aerober Bedingungen auf die Biogasausbeute sind dem Kap. II.1.8 zu entnehmen.

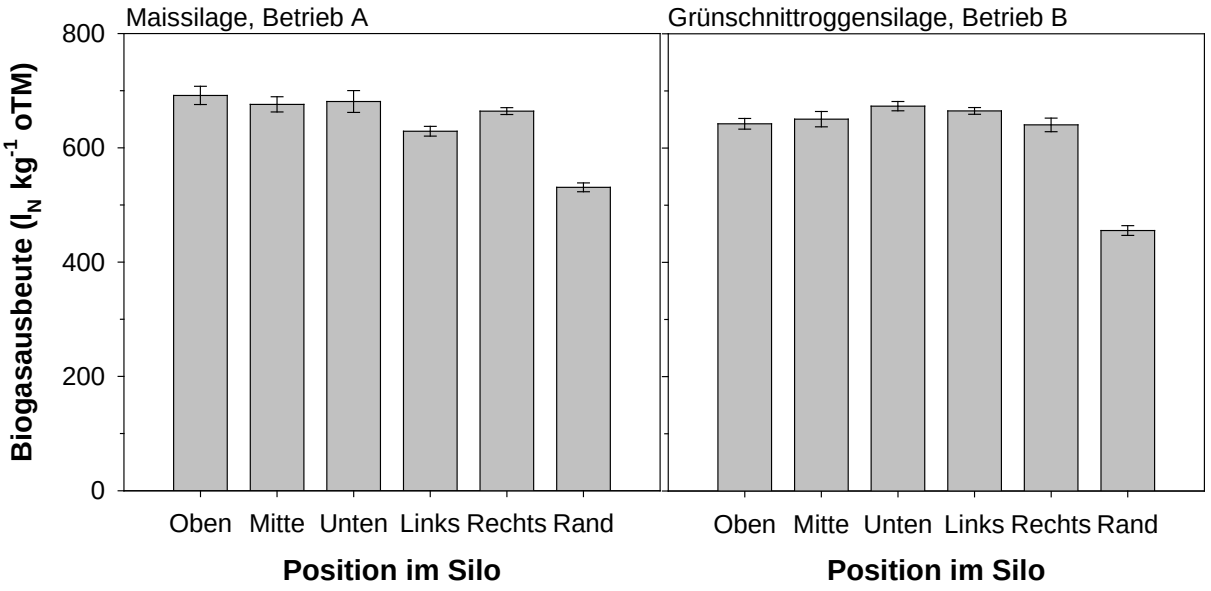


Abb. II.1.3-7: Biogasausbeuten der Maissilage in Betrieb A (links) sowie der Grünschnittroggensilage in Betrieb B (rechts) bei unterschiedlicher Position im Silo (Beispiel jeweils 2. Probenahme der Variante ohne Silierzusatz; Mittelwert ± Standardabweichung)

Monitoring der Praxisbiogasanlagen

Neben den Laborversuchen erfolgte der Einsatz der Versuchssilagen in den an die Praxisbetriebe angeschlossenen Biogasanlagen. Parallel dazu wurde ein umfangreiches Anlagenmonitoring durchgeführt.

Betrieb A verfügt über eine einstufige Biogasanlage (Hersteller: Biowatt Energy) mit einem Arbeitsvolumen (AV) von 630 m³ und einer installierten elektrischen Leistung von 80 kW. Die Inbetriebnahme erfolgt im Jahr 2003. Als Besonderheit der Anlage besteht eine Längstrennung in der Mitte des Fermenters, die eine Kreisführung des Substratgemisches erzwingt. Die Feststoffe werden vor der Zudosierung über einen Homogenisator mit Rezirkulat aus dem Fermenter vermischt. Zur Bestimmung der Zugabemengen im Messzeitraum wurden repräsentative Pumpenlaufzeiten und Wägungen an Schaufelladungen vorgenommen. Wegen eines Kalibrierungsfehlers des Gasanalysegerätes mussten die Methanwerte anhand Eigenmessungen korrigiert werden.

Die Biogasanlage des Betriebes B (Hersteller: Ökotec) wurde 2006 in Betrieb genommen. Die Anlage besteht aus zwei parallel beschickten und baugleichen Fermentern (jeweils 1500 m³) sowie einem Nachgärbehälter (1500 m³), mit einer installierten elektrischen Leistung von insgesamt 1000 kW. Als Substrate werden Rindergülle, Mais- und Grassilage, Getreide-Ganzpflanzsilage (GPS), Getreideschrot sowie Futterreste aus der Rinderhaltung eingesetzt. Die Massenbestimmung erfolgt über Wiegezellen sowie indirekt über Durchflusszähler.

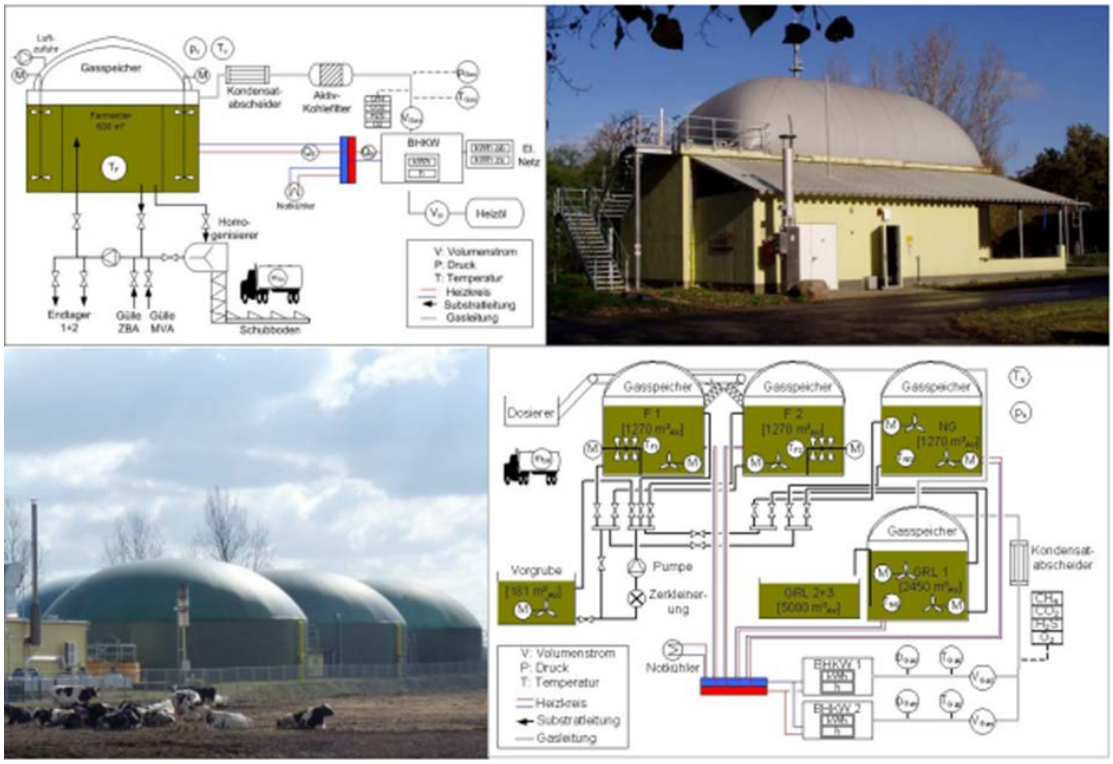


Abb. II.1.3-8: Praxisbiogasanlagen. Oben: Betrieb A, unten: Betrieb B

Das Monitoring der teilnehmenden Anlagen wurde über einen Zeitraum von insgesamt 1100 Tagen (Betrieb A) und 850 Tagen (Betrieb B) durchgeführt. Die Zugabe der Versuchssilage wurde dabei in Abhängigkeit der ausgewählten Fruchtfolge auf vier Phasen aufgeteilt. Im Betrieb A erfolgte keine Zugabe der Grünschnittroggensilage (GS-Roggen, Phase 2), die aus innerbetrieblichen Gründen für die Tierfütterung verwendet wurde. Weiterhin wurde die Fütterung der Versuchssilage in Phase 4 (*Sorghum*) unterbrochen, um nicht für die Tierfütterung geeignete Maissilage in die Biogasanlage zu geben. Weitere Unterbrechungen erfolgten in Phase 1 (Mais) aufgrund von technischen und biologischen Störungen an der Anlage. Aufgrund der unterschiedlichen Anlagengrößen war die Dauer der Zugaben der Versuchssilagen in Betrieb A mit 68 - 141 Tagen deutlich länger als in Betrieb B (18 - 47 Tage) (Tab. II.1.3-5). Gleiches gilt für die Anteile der Versuchssilagen am Gesamtinput. Hier betrug im Betrieb B der Anteil bezogen auf die oTM zwischen 2,5 und 25 %. Wesentlich höhere Anteile konnten im Betrieb A eingesetzt werden, hier betrug der Anteil in allen Versuchsphasen über 30 % der zugeführten oTM.

Tab. II.1.2-5: Anteile der Versuchssilage am Gesamtinput

Phase	Versuchs-silo	Betrieb	Zugabe-dauer [d]	Substratmischung [% d. oTM]						
				Versuchs-silage	Mais-silage	Gras-silage	GPS	Mais-schrot	Getreide-schrot	Rinder-gülle
1	Mais	A	141	55,4	---	---	---	---	15,9	28,7
		B	21	25,1	32,2	17,9	---	---	---	24,8
2	GS-Roggen	A	---	---	---	---	---	---	---	---
		B	44	2,5	62,6	10,4	11,0	---	---	13,5
3	W-Triticale	A	68	32,8	19,2	---	---	15,2	---	32,8
		B	18	4,4	51,3	---	25,7	---	---	18,6
4	*Sorghum*	A	131	39,0	9,8	---	---	10,7	4,4	36,1
		B	47	7,6	60,6	11,7	---	---	---	20,1

GS-Roggen … Grünschnittroggen

In Abbildung II.1.3-9 ist der zeitliche Verlauf des Anlagenmonitorings von Betrieb A dargestellt. Die Versuchsphasen drei und vier wurden dabei ohne maßgebliche Störungen erfolgreich durchgeführt. In Phase eins kam es zu mehreren Störungen, im Wesentlichen verursacht durch BHKW sowie Eintragssystem. In diesem Zusammenhang kam es auch zu einer Versäuerung des Fermenters, vermutlich verursacht durch zu schnelle Belastungssteigerung. Diese Zeiträume wurden in der Auswertung jeweils nicht berücksichtigt. In der zweiten Hälfte dieses Zugabezeitraums kam es in der Kälteperiode zum Jahreswechsel zu einem deutlichen Rückgang der Fermentertemperatur auf mittlere 32°C. Dieser Zustand hielt bis zum Frühjahr 2011 an. Insgesamt kann über das gesamte Monitoring ein sehr schwankender Prozess festgestellt werden. Unter Betrachtung aller Versuchsphasen reichte die tägliche Biogasproduktion von 180 bis 900 m^3_N bei Methanwerten zwischen 45 und 57 Vol.%. Im Mittel wurde die Anlage dabei bei einer Raumbelastung von 1,5 - 1,7 kg oTM/(m^3_{AV}·d) bei einer Verweilzeit von 58 - 62 Tagen betrieben (Tab. II.1.3-6).

In der ersten Hälfte der Versuchsphase 1 kam es sowohl zu einer mehrwöchigen Unterbrechung der Feststoffzufuhr aufgrund eines Defekts an der Welle des Homogenisators als auch im Anschluss zu einer Übersäuerung der Fermenterbiologie, vermutlich verursacht durch zu schnelle Belastungssteigerung. Beide Zeiträume wurden in der Auswertung zur Phase 1 nicht berücksichtigt.

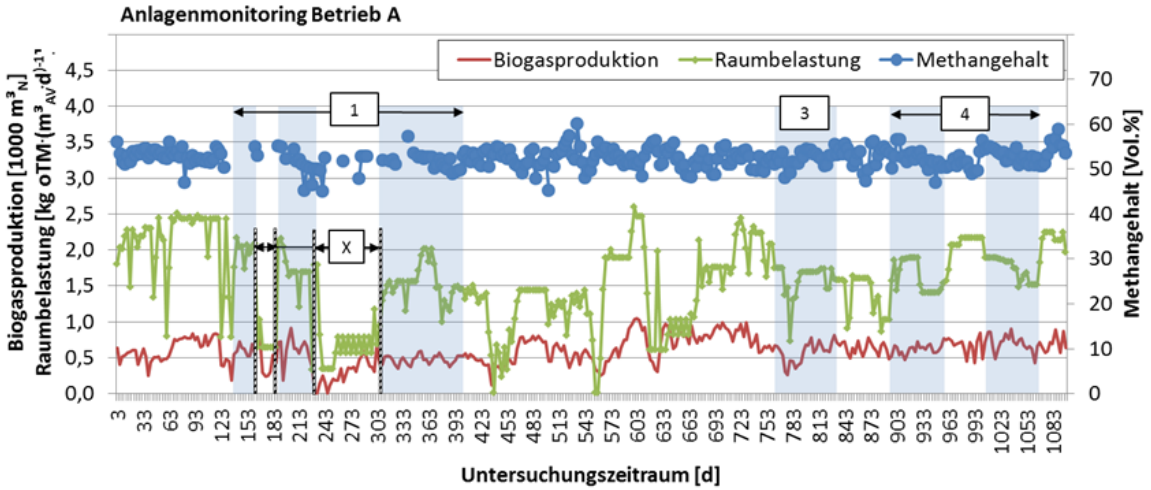


Abb.II.1.3-9: Anlagenmonitoring Betrieb A im Untersuchungszeitraum
1 - 4: Versuchsphasen, X: in Auswertung nicht berücksichtigte Zeiträume

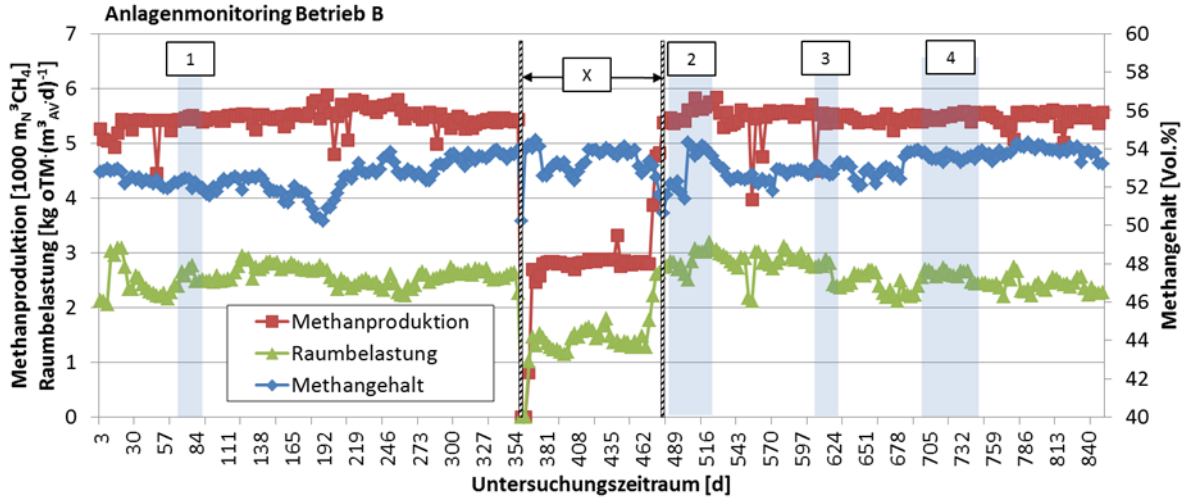


Abb. II.1.3-10: Anlagenmonitoring Betrieb B im Untersuchungszeitraum
1 - 4: Versuchsphasen, X: in Auswertung nicht berücksichtigte Zeiträume

Der Anlagenbetrieb im Betrieb B gestaltete sich im Hinblick auf die Versuchsdurchführung weitgehend störungsfrei. Gegen Ende des Jahres 2010 kam es zu einem Trafoschaden in dessen Zuge der Anlagenbetrieb unterbrochen werden musste (Abb. II.1.3-10). Die Einspeiseleistung musste bis zur Ersatzlieferung im April 2011 auf 50 % reduziert werden. Sonstige Ausschläge nach unten wurden durch planmäßige Wartungsarbeiten und kleinere Störungen an den BHKW verursacht. Insgesamt weisen die Werte nur eine geringe Schwankungsbreite auf. Unter Betrachtung aller Versuchsphasen wird eine Methanproduktion zwischen 8400 und 10800 $m^3_N CH_4$ bei Methangehalten zwischen 51 und 54 Vol.% erzielt. Im Mittel wurde die Anlage dabei bei einer Raumbelastung von 2,6 - 2,9 kg oTM/(m^3_{AV}·d) bei einer Verweilzeit von 62 - 68 Tagen betrieben (Tab. II.2.3-6).

Tab. II.1.3-6: Mittlere Anlagenkennwerte der Betriebe

Phase	Betrieb	Raum-belastung [kg oTM·(m^3_{AV}·d)$^{-1}$]	Mittlere Verweilzeit [d]	Methan-ausbeute [$l_N CH_4$·kg^{-1} oTM]	Methan-gehalt [Vol.%]	Elektr. Auslastung BHKW [%]
1	A	1,6	58	272	52,0	51,5
	B	2,6	68	337	52,3	95,1
2	A	---	---	---	---	---
	B	2,9	63	308	52,8	95,2
3	A	1,6	62	296	52,2	58,3
	B	2,8	64	306	53,8	93,2
4	A	1,7	62	327	52,5	72,8
	B	2,6	62	335	53,6	95,5
Ge-samt	A	1,5	61	307	52,4	59,7
	B	2,3	63	290	52,2	94,3

Zur Einordnung der erzielten Methanausbeuten der Praxisanlagen wurden die Ergebnisse mit Standardwerten aus der Literatur (KTBL 2009) verglichen. Die Methanausbeuten der eingesetzten Versuchssilagen konnten dabei den durchgeführten Batch-Tests (vgl. Abb. II.1.3-6) entnommen werden.

Die erzielten Methanausbeuten der Praxisanlagen entsprechen weitestgehend den zu erwartenden Werten (Abb. II.1.3-11). Während es in den Versuchsphasen zwei und drei kaum Abweichungen zur theoretisch ermittelten Methanausbeute gibt, wurde bei beiden Praxisbetrieben eine um ca. 10 % höhere Methanausbeute zur Versuchsphase vier (*Sorghum*) erzielt. Betrieb B erzielte eine Mehrausbeute von ca. 10 % in der Versuchsphase 1 (Maissilage), während Betrieb A aufgrund der verringerten Arbeitstemperatur des Fermenters hier Einbußen von ca. 13 % zu verzeichnen hat.

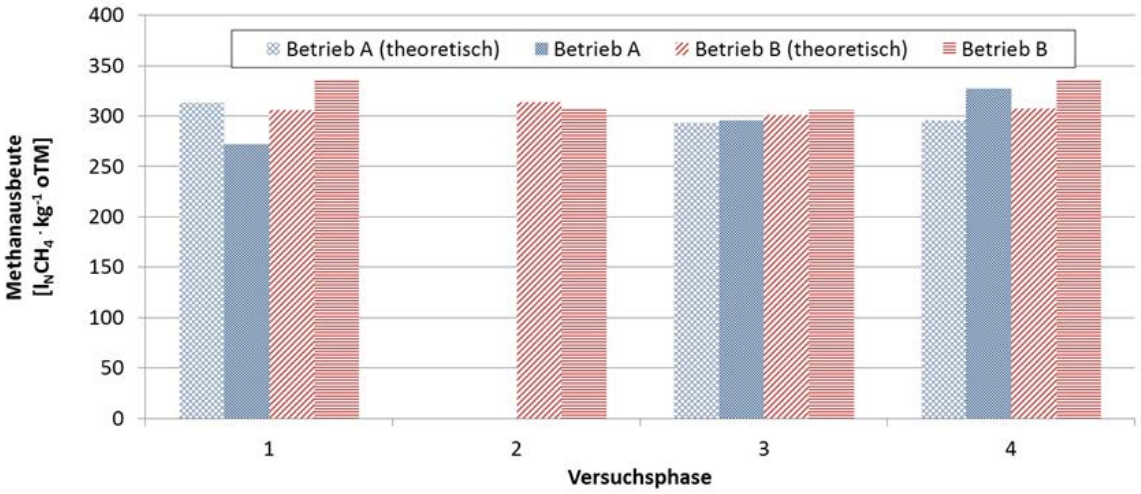


Abb. II.1.3-11: Vergleich theoretischer und erzielter Methanausbeuten der Substratmischung in den Versuchsphasen. Daten basieren auf Literaturangaben KTBL (2009); Versuchssilage: Batchtest

Fazit:
Der Anbau der EVA-Fruchtfolge 3 im Praxismaßstab war möglich, wobei jedoch in den Anbaujahren 2009 bis 2012 auf ertragsschwachen Standorten in Brandenburg vergleichsweise geringe Gesamt-TM-Erträge erreicht wurden. Die höchsten Biomasseerträge in der Fruchtfolge wurden von Mais (44-45 % des Gesamt-TM-Ertrages), gefolgt von *Sorghum* (34 % des Gesamt-TM-Ertrages) erzielt. Die Erträge des Ganzpflanzengetreides waren aufgrund ungünstiger Witterungsbedingungen sehr gering. Der Anbau des einjährigen Weidelgrases als Zwischenfrucht nach Wintertriticale ist auf den trockenen Standorten nicht praxisrelevant.

Die begleitende Untersuchung zur Konservierung der EVA-Fruchtfolge 3 -Glieder für die Biogasproduktion in den Praxisbetrieben hat gezeigt, dass die Silierung im Praxismaßstab gut gelingen kann, jedoch nicht immer problemlos verläuft. Häufig sind zumindest einzelne Partien im Silo von Silagemängeln betroffen. Vor allem aerobe Umsetzungsprozesse können dabei zu einem erheblichen Verlust von Nährstoffen und zu einer geringeren Biogasproduktion führen. Die Ursachen für Verluste, Fehlgärungen oder aeroben Verderb sind vielfältig und können beispielsweise in ungünstigen Ernte- und Einlagerungsbedingungen, in unzureichenden oder beschädigten Siloabdeckungen oder in einer verzögerten Silageentnahme aufgrund von Betriebsstörungen der Biogasanlage liegen. Im Modellsilo können die in der Praxis vorherrschenden Silierbedingungen nur idealisiert abgebildet werden. Defizite bei der Silierung von Biogaspflanzen sollten daher weiterhin vertieft auf Praxisebene analysiert und Lösungsansätze erarbeitet werden.

Die Zugabe der Substrate aus der untersuchten Fruchtfolge konnte problemlos in den Biogasanlagen der Praxisbetriebe erfolgen. Die erzielten Methanausbeuten entsprechen dabei im störungsfreien Betrieb den zu erwartenden Werten. Probleme hinsichtlich der Eintragssysteme, die auf die Silagen zurückzuführen sind, konnten im Rahmen des Monitorings nicht festgestellt werden.

II.1.4 Biogasbildung aus Ackerfuttermischungen

Ziel der ATB-Untersuchungen von Ackerfuttermischungen aus dem Satellitenprojekt „Ackerfutter/Grünland“ war die Ermittlung von Effekten hinsichtlich der Wahl der Ackerfuttermischung, des Schnittregimes sowie von Standort- und Jahreseffekten auf die Biogasproduktion. Hierzu wurden folgende Untersuchungen an ausgewählten Ackerfuttervarianten durchgeführt:

- Vergleich fünf verschiedener Ackerfuttermischungen mit extensiver Nutzung (3 Schnitte) am Standort Burkersdorf (TH) im Erntejahr 2009
- Vergleich der Ackerfuttermischung AM1 bei extensiver Nutzung (3 Schnitte) an fünf verschiedenen Standorten im Erntejahr 2010
- Vergleich einer intensiven Nutzung (4 bis 5 Schnitte) mit einer extensiveren Nutzung (3 Schnitte) der Ackerfuttermischung AM1 am Standort Wehnen (NI) im Erntejahr 2011
- Vergleich der Ackerfuttermischung AM1 am Standort Wehnen (NI) über die drei Erntejahre 2009 bis 2011

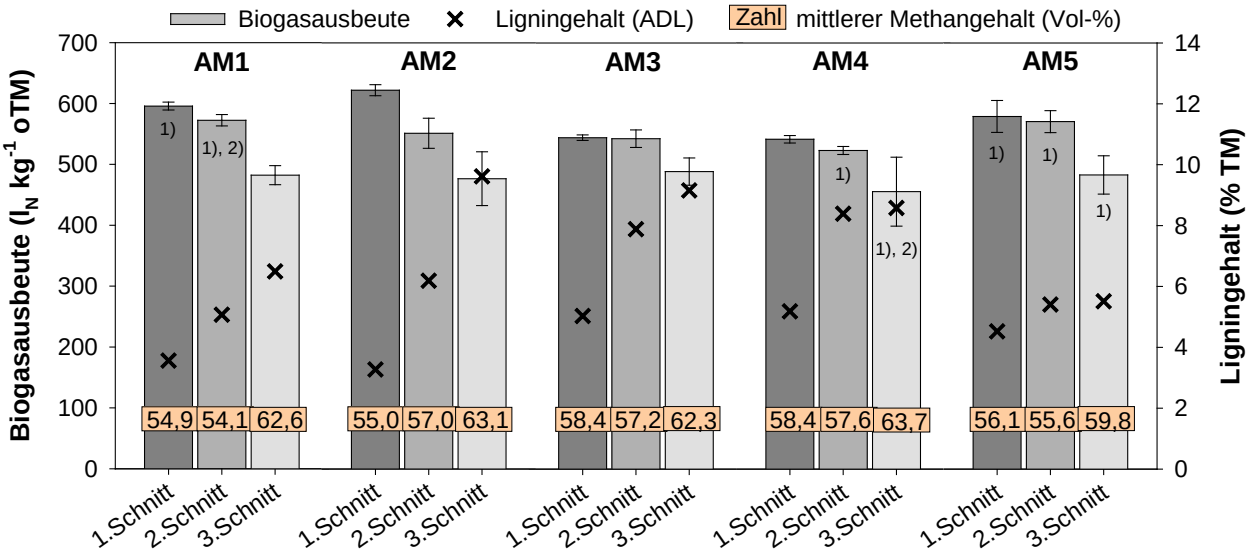
Die an den Standorten gewonnenen Proben wurden vor Ort siliert und die Silagen nach Auslagerung am ATB hinsichtlich Gärqualität, Nährstoffgehalten und Biogasausbeute im Batch-Gärtest (vgl. Anhang Tab. A-1) analysiert.

Die Gärqualität der untersuchten Ackerfuttersilagen aus den Jahren 2009 bis 2011 lag überwiegend im guten bis sehr guten Bereich. Dennoch wiesen etwa 25 % der Silagen Qualitätsmängel auf und wurden hinsichtlich ihrer Gärqualität mit „verbesserungsbedürftig“ bis „sehr schlecht“ bewertet. Mit Ausnahme zweier Einzelproben traten die Qualitätsmängel ausschließlich bei Silagen mit TM-Gehalten unterhalb von 30 % auf. Die Zielvorgabe, die geernteten Ackergräser auf einen TM-Gehalt von 30 – 35 % vor der Silierung anzuwelken, war bei diesen Silagen nicht erreicht worden bzw. die Varianten wurden vor Ort nicht angewelkt. Die Varianten, bei denen Silagen mit verbesserungsbedürftiger bis sehr schlechter Gärqualität auftraten, sind in den folgenden Abbildungen gekennzeichnet (Abb. II.1.4-1 bis II.1.4-4). Fehlgärungen bei der Silierung der Ackerfuttermischungen führten zu erhöhten Silierverlusten. Im Mittel wurden bei den Silagen mit guter bis sehr guter Gärqualität TM-Verluste von 5 % ermittelt, während die TM-Verluste der Silagen mit verbesserungsbedürftiger bis sehr schlechter Gärqualität im Mittel bei 9 % lagen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Anwelken von Ackerfutter auf ausreichend hohe TM-Gehalte zur Ernte entscheidend ist, um eine gute Vergärbarkeit des Erntegutes zu gewährleisten und das Risiko für Fehlgärungen zu minimieren (vgl. Kap. II.1.1).

Im Vergleich der Ackerfuttermischungen am Standort Burkersdorf waren die Weidelgrasmischungen AM1 (Welsches Weidelgras, Bastardweidelgras, Deutsches Weidelgras) und AM2 (Welsches Weidelgras, Bastardweidelgras, Deutsches Weidelgras, Rotklee) durch geringe Aschegehalte sowie höhere Anteile an Hemicellulose und NfE gekennzeichnet. Die Mischungen mit Luzerne AM4 (Welsches Weidelgras, Wiesenlieschgras, Glatthafer, Rotklee, Luzerne) und AM5 (Knaulgras, Glatthafer, Luzerne) sowie die Mischung AM3 (Welsches Weidelgras, Wiesenlieschgras, Rotklee) wiesen höhere Gehalte an Rohasche und Rohprotein sowie geringfügig höhere Rohfettgehalte, verglichen mit den übrigen Mischungen, auf. Vom 1. zum 3. Schnitt nahm der Ligningehalt in den Silagen tendenziell zu (Abb. II.1.4-1), wobei die Zunahme des Ligninanteils bei der Mischung AM2 und AM3 am stärksten ausgeprägt war. Die höchsten Ligningehalte wurden zum 1. und 2. Schnitt bei den Mischungen AM3 und AM4, und zum 3. Schnitt bei den Mischungen AM2, AM3 und AM4 gemessen.

Die Biogasausbeuten der im Erntejahr 2009 untersuchten Ackerfuttersilagen variierten zwischen 456 und 622 $l_N\ kg^{-1}$ oTM (Abb. II.1.4-1). Die Unterschiede der Biogasausbeuten zwischen den Ackerfuttermischungen lagen zum ersten Schnitt mit maximal 13 % relativ hoch. Zu den späteren Schnitten wurden geringere Unterschiede in den Biogasausbeuten von maximal 9 % (2. Schnitt) bzw. 7 % (3. Schnitt) ermittelt. Die Biogasausbeuten korrelierten mit den Ligningehalten der Silagen, wobei bei höheren Ligningehalten sinkende Biogasausbeuten zu verzeichnen waren. Die Mischungen mit Wiesenlieschgras AM3 und AM4 mit etwas höheren Ligningehalten wiesen allgemein etwas niedrigere Biogasausbeuten auf verglichen mit den übrigen Weidelgras- und Knaulgrasmischungen. Ein eindeutiger Effekt der Anteile an Rotklee bzw. Luzerne in der Mischung auf die Biogasausbeute war nicht erkennbar. Mit späterem Schnitt nahm bei steigendem Ligningehalt die Biogasausbeute tendenziell ab. Zum 3. Schnitt wurden bei allen Mischungen um 10 bis 23 % geringere Biogasausbeuten erzielt ver-

glichen mit dem 1. Schnitt. Allerdings stieg der Methangehalt im Biogas zum 3. Schnitt um 3,5 bis 8,5 Vol-% an (Abb. II.1.4-1).



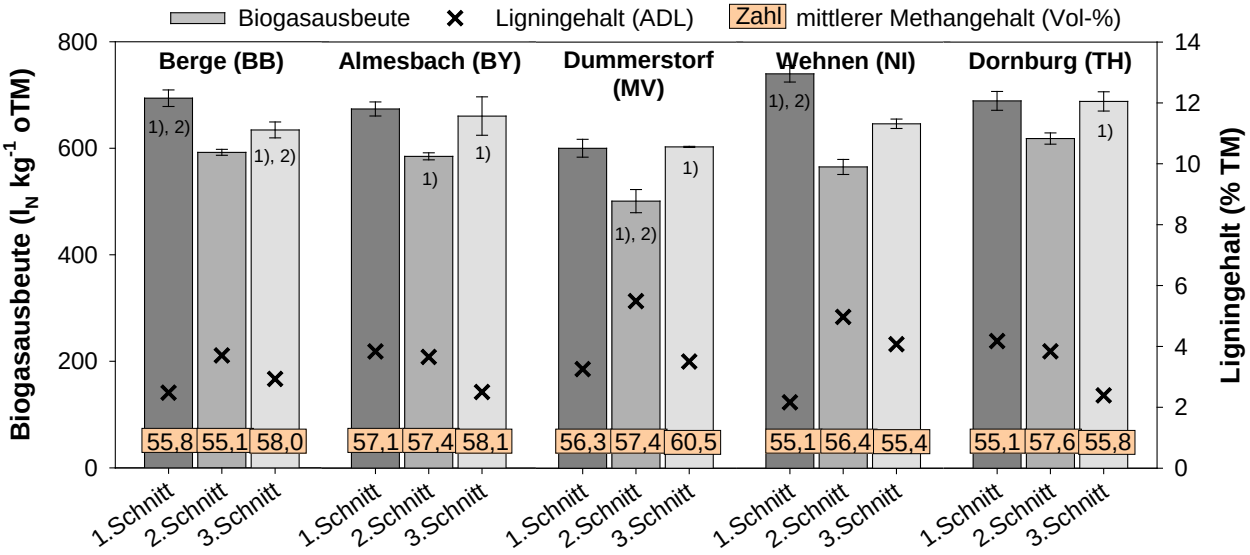
1) Silagen mit verbesserungsbedürftiger bis sehr schlechter Gärqualität;
2) große Unterschiede in der Gärqualität der Einzelsilagen

Abb. II.1.4-1: Biogasausbeuten und Methangehalte im Batch-Gärtest sowie Ligningehalte der Silagen von fünf verschiedenen Ackerfuttermischungen bei 3-schnittiger Nutzung am Standort Burkersdorf (TH), Erntejahr 2009

Der Vergleich der Weidelgrasmischung AM1 (Welsches Weidelgras, Bastardweidelgras, Deutsches Weidelgras) mit 3-schnittiger Nutzung an fünf verschiedenen Standorten ergab vergleichsweise geringe Unterschiede in den Nährstoffgehalten der Aufwüchse zwischen den Standorten. In Dummerstorf (MV) sowie Dornburg (TH) wurden leicht höhere Asche- und Proteingehalte sowie etwas geringere Gehalte an NfE verglichen mit den übrigen Standorten ermittelt. Im Gegensatz zu den Untersuchungen im Erntejahr 2009 traten in 2010 die höchsten Ligningehalte zum 2. Schnitt bei 3-schnittiger Nutzung des Ackerfutters auf, während die Ligningehalte in den Aufwüchsen des 3. Schnittes ähnlich bzw. teilweise unterhalb des 1. Schnittes lagen. Die höchsten Ligningehalte wurden zum 2. Schnitt der Ackerfuttermischung AM1 in Dummerstorf (MV) analysiert.

Die Biogasausbeuten der Ackerfuttermischung AM1 waren mit 501 bis 740 l_N kg^{-1} oTM im Erntejahr 2010 insgesamt auf einem höheren Niveau als bei den untersuchten Silagen im Erntejahr 2009 (Abb. II.1.4-2). Trotz relativ geringer Unterschiede in den Nährstoffgehalten ergaben sich zum 1. und 2. Schnitt der Ackerfuttermischung AM1 Unterschiede von 19 %, und zum 3. Schnitt Unterschiede von 12 % in der Biogasausbeute zwischen den Standorten. Die geringsten Biogasausbeuten wurden für den Standort Dummerstorf (MV) mit im Mittel 8 bis 15 % niedrigeren Werten im Vergleich zu den übrigen Standorten ermittelt. Ursache für die vergleichsweise hohen Ligninanteile und geringeren Biogasausbeuten in Dummerstorf (MV) könnten ein lückiger Bestand durch Auswinterungsschäden und nachfolgender Beikrautbesatz im Erntegut 2010 gewesen sein.

Entsprechend der negativen Wirkung erhöhter Zellwandanteile auf die Biogasproduktion, der hohen Ligningehalte zum 2. Schnitt sowie der geringen Ligningehalte in den Aufwüchsen des 3. Schnittes wiesen die Aufwüchse des 2. Schnittes die geringsten Biogasausbeuten auf, während die Biogasausbeuten des 3. Schnittes an drei der fünf Standorte sogar nahezu die Biogasausbeuten des 1. Schnittes erreichten.



1) Silagen mit verbesserungsbedürftiger bis sehr schlechter Gärqualität;
2) große Unterschiede in der Gärqualität der Einzelsilagen

Abb. II.1.4-2: Biogasausbeuten und Methangehalte im Batch-Gärtest sowie Ligningehalte der Silagen der Weidelgrasmischung AM1 bei 3-schnittiger Nutzung an fünf verschiedenen Standorten, Erntejahr 2010

Am Standort Wehnen (NI) wurde im Erntejahr 2011 eine extensivere Nutzung der Ackerfuttermischung AM1 mit 3 Schnitten verglichen mit einer intensiven Nutzungsvariante, bei der in 2011 die Ernte von 4 Schnitte möglich war. In der intensiven Nutzungsvariante erfolgten die Schnitte im Entwicklungsstadium Beginn bis Mitte Rispenschieben und damit früher als in der extensiveren Variante, bei der die Aufwüchse zum Ende des Rispenschiebens geschnitten wurden. Mit zunehmender Reife nehmen im Allgemeinen der Aschegehalt sowie der Rohproteingehalt in Gräsern ab, während der Anteil an Zellwandbestandteilen in den Pflanzen steigt (McDonald et al., 1991). Dies bestätigen die etwas geringeren Gehalte an Rohasche und Rohprotein sowie höhere Gehalte an Neutrale-Detergentien-Faser (NDF), Säure-Detergentien-Faser (ADF) und ADL der Aufwüchse der extensiven Nutzungsvariante gegenüber der 4-schnittigen Nutzung.

Die geringeren Fasergehalte der Aufwüchse der intensiven Nutzungsvariante bedingten höhere Biogasausbeuten verglichen mit der 3-schnittigen Nutzung (Abb. II.1.4-3). Dabei lagen die Biogasausbeuten um 2 bis 16 % höher. Die größten Differenzen ergaben sich zum 3. Schnitt. Ähnlich dem Erntejahr 2009 wurden auch für die untersuchten Ackerfutterproben in 2011 tendenziell steigende Ligningehalte mit späterem Schnitt und sinkende Biogasausbeute gemessen (Abb. II.1.4-3).

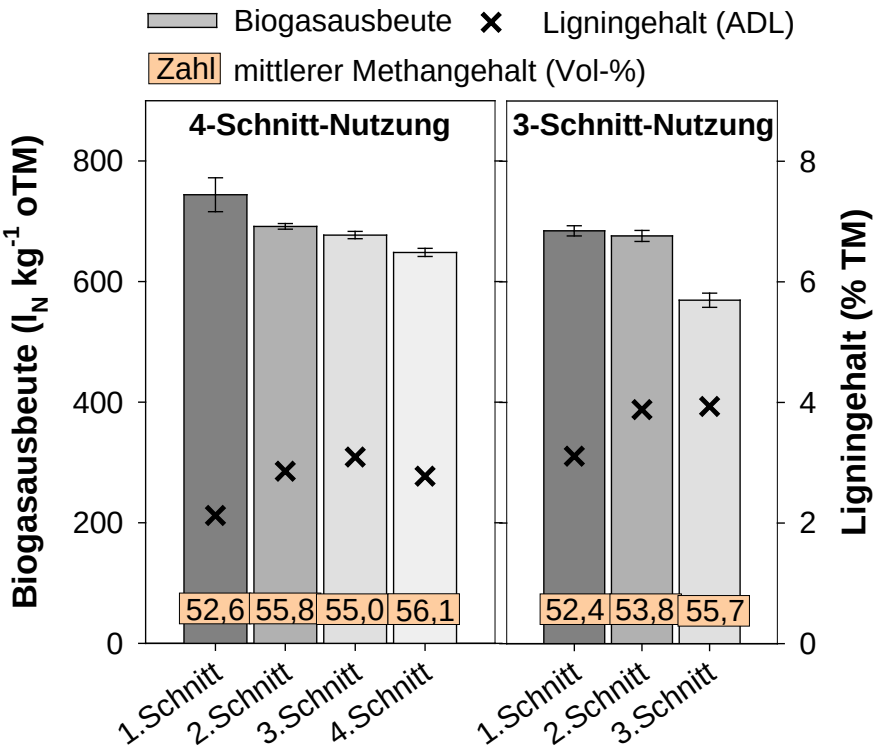
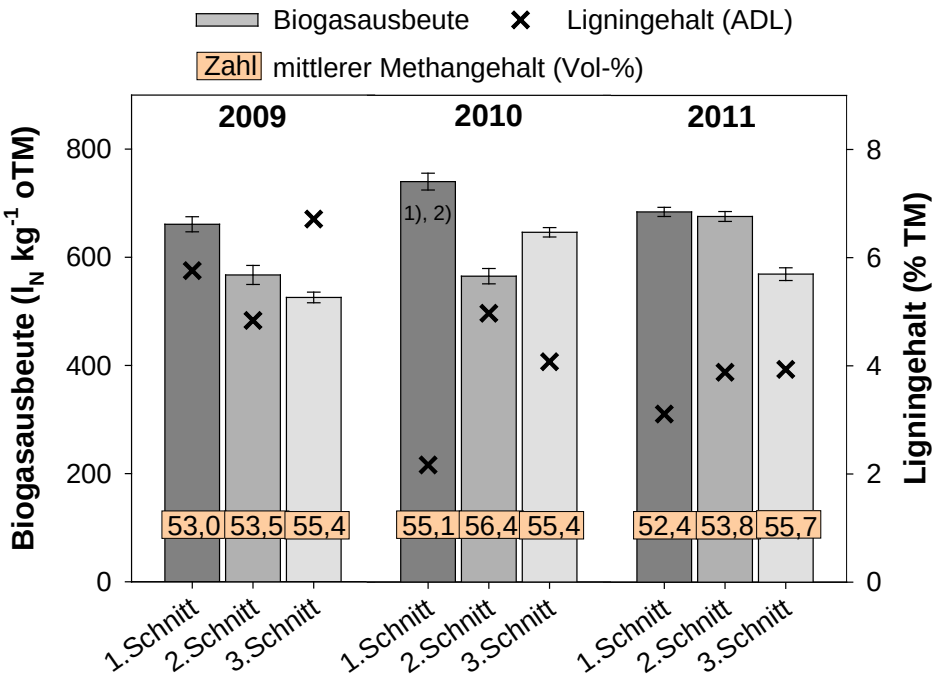


Abb. II.1.4-3: Biogasausbeuten und Methangehalte im Batch-Gärtest sowie Ligningehalte der Silagen der Weidelgrasmischung AM1 bei 3- und 4-schnittiger Nutzung am Standort Wehnen (NI), Erntejahr 2011

In der zusammenfassenden Ergebnisdarstellung (Abb. II.1.4-4) der Ackerfuttermischung AM1 bei extensiver Nutzung am Standort Wehnen (NI) über die Jahre 2009 bis 2011 zeigen die Resultate einen deutlichen Jahreseffekt auf die Biogasausbeute. In 2009 wurden im Vergleich der Jahre die höchsten Ligningehalte im Erntegut sowie die geringsten Biogasausbeuten gemessen. In den Jahren 2009 und 2011 nahmen die Biogasausbeuten mit späterem Schnitt des Ackerfutters ab. In 2010 wurden die geringsten Biogasausbeuten hingegen zum 2. Schnitt und erneut hohe Biogasausbeuten für den 3. Schnitt ermittelt. Die Werte sowohl des Ligningehaltes als auch der Biogasausbeute zwischen den Schnitten differierten im Erntejahr 2010 am stärksten. Es ist davon auszugehen, dass die Witterung während des Pflanzenwachstums neben dem Biomasseertrag auch die Biogasausbeute beeinflusst, wobei warme und trockene Witterungsperioden, wie sie vor dem 3. Schnitt in 2009 oder vor dem 2. Schnitt in 2010 auftraten, die Biogasausbeute senken. Kühle, niederschlagsreiche Witterungsperioden, wie sie vor dem 3. Schnitt in 2010 oder vor dem 2. Schnitt in 2011 auftraten, scheinen die Biogasausbeuten der Aufwüchse hingegen positiv zu beeinflussen.



1) Silagen mit verbesserungsbedürftiger bis sehr schlechter Gärqualität;
2) große Unterschiede in der Gärqualität der Einzelsilagen

Abb. II.1.4-4: Biogasausbeuten und Methangehalte im Batch-Gärtest sowie Ligningehalte der Silagen der Weidelgrasmischung AM1 bei 3-schnittiger Nutzung am Standort Wehnen (NI) in den Erntejahren 2009 bis 2011

Fazit:

Die Biogasausbeute von Ackerfuttersilagen kann abhängig von der Art der Mischung, dem Schnittregime sowie den Standort- und Jahresbedingungen erheblich variieren. Bei der Bewertung von Ackergräsern und -mischungen für die Biogasproduktion sollte daher neben dem Biomasseertrag auch das Biogas- bzw. Methanbildungspotenzial grundsätzlich mit berücksichtigt werden.

Im Vergleich von fünf verschiedenen Ackerfuttermischungen an einem Standort wurden vor allem zum 1. Schnitt große Unterschiede von bis zu 13 % in der Biogasausbeute festgestellt, wobei Mischungen mit Wiesenlieschgras etwas niedrigere Biogasausbeuten aufwiesen als die Weidelgras- und Knaulgrasmischungen. Der Einfluss des Standortes auf die Biogasausbeute einer einheitlich an fünf Standorten geprüften Weidelgrasmischung AM1 waren ebenfalls zum 1. Schnitt mit bis zu 19 % am größten, wobei am Standort Dummerstorf (MV) im Vergleich zu den übrigen Standorten deutlich niedrigere Biogasausbeuten ermittelt wurden.
Die Biogasausbeute von Gräsern ist allgemein stark vom Entwicklungsstadium zur Ernte abhängig und sinkt mit zunehmender Reife. Bei höherer Schnittfrequenz und damit verbunden früherer Ernte der Aufwüchse werden daher höhere Biogasausbeuten erzielt. Biomasse-Mehrerträge bei niedrigeren Schnittfrequenzen stehen damit häufig einer geringeren Qualität der Aufwüchse entgegen. Mit späterem Schnitt nimmt die Biogasausbeute tendenziell ab. Die zum Wachstum der Gräser vorherrschenden Witterungsbedingungen beeinflussen jedoch die Biogasausbeute, wobei warme, trockene Witterungsperioden zu niedrigeren und kühle, feuchte Witterungsperioden zu höheren Biogasausbeuten führen. In Jahren mit sehr

ungleichmäßiger Niederschlagsverteilung während der Vegetationsperiode können die Biogasausbeuten von diesem Trend abweichen.

Durch den zum Teil erheblichen Einfluss von Standort und Witterung, der Zusammensetzung der Ackerfuttermischung sowie der Schnittfrequenz und Reife der Gräser zur Ernte gestalten sich allgemeine Aussagen zur Biogasausbeute von Ackerfuttersilagen, z.B. in Abhängigkeit des Schnittes, schwierig. Generell besteht jedoch ein guter Zusammenhang zwischen den Gehalten an Lignin und Cellulose der Aufwüchse und der Biogasausbeute, der eine grobe Abschätzung der Höhe der Biogasausbeute zulässt. Dabei ist die Biogasausbeute umso höher, je geringer der Anteil an Lignin und Cellulose in der Silage ist.

II.1.5 Silierung und Biogasbildung bei Mischfruchtanbau Mais – *Sorghum*

Durch den Mischfruchtanbau, d.h. dem gleichzeitigen Anbau von zwei oder mehreren Kulturarten, wird die Strategie verfolgt, das Anbaurisiko einzelner Fruchtarten zu senken und damit eine erhöhte Ertragsstabilität zu erreichen, Standräume optimal auszunutzen und die Artenvielfalt beim Energiepflanzenanbau zu erhöhen. Neben ökologischen und produktionstechnischen Vorteilen beim Mischfruchtanbau sind durch eine verbesserte Zusammensetzung der Erntegüter auch positive Effekte auf die Silierung und Biogasproduktion möglich.

In den Erntejahren 2009 und 2010 wurden Erntegüter aus dem Mischfruchtanbau Mais – *Sorghum* des Standortes Aholfing (BY) mit dem Ziel am ATB untersucht, Effekte des Mischanbaus auf die Silierung und Biogasproduktion gegenüber Reinsaaten zu bewerten. Hierfür wurde Erntegut des Mischanbaus Mais – *Sorghum b. x s.* sowie Mais – *Sorghum b. x b.* in 2009 in der Fruchtfolge nach Grünschnittroggen und Roggen-GPS und in 2010 in der Fruchtfolge nach Roggen-GPS vor Ort siliert, und die Silagen am ATB hinsichtlich Siliereignung, Gärqualität, Nährstoffgehalten und Biogasausbeute im Batch-Gärtest (vgl. Anhang Tab. A-1) analysiert. Die Analysen umfassten sowohl die Gemenge, die Gemengepartner einzeln als auch vorhandene Reinsaaten zum Vergleich.

Aufgrund hoher Gehalte an für einen guten Silierverlauf notwendigen WLK und geringen Pufferkapazitäten weisen sowohl Mais als auch *Sorghum* allgemein gute Siliereignungen auf (vgl. Kap. II.1.1). Die in 2009 und 2010 untersuchten Erntegüter der Mais – *Sorghum*–Gemenge, die Gemengepartner und die Reinsaaten konnten mit VK > 35 generell als mittelschwer bis leicht silierbar bewertet werden. Bei den Silagen wurden ausnahmslos sehr gute Gärqualitäten erzielt. Daten zu Siliereignung und Silagequalitäten zeigt Tabelle II.1.5-1 beispielhaft für den Mischfruchtanbau Mais – *Sorghum* nach Roggen GPS in 2009 und 2010. Dennoch waren durch den Mischanbau der leicht silierbaren Mischungspartner Mais und *Sorghum* positive Effekte bezüglich der Silierung gegeben. Der VK des Gemengepartners mit dem jeweils geringeren Wert konnte im Gemenge leicht erhöht werden. In 2009 traf dies für das *Sorghum* zu, während in 2010 etwas niedrigere VK für den Mais ermittelt wurden. Die *Sorghum*-Reinsaaten wurden zudem überwiegend bei einem TM-Gehalt unterhalb von 28 % geerntet. Wird eine Grenze von 28 – 30 % TM-Gehalt zur Ernte unterschritten, so führt dies in Abhängigkeit von der Häcksellänge und der Stapelhöhe des Silos zu Sickersaftbildung (Thaysen & Wagner, 2006). Sickersäfte sind aufzufangen und können in der Biogasanlage verwertet werden, dennoch ist dabei mit erhöhten Verlusten zu rechnen. Durch den

Mischanbau Mais – *Sorghum* konnten niedrige TM-Gehalte einzelner Mischungspartner im Gemenge ausgeglichen bzw. gegenüber den Reinsaaten erhöht werden. Im Praxissilo trägt dies zur Verminderung bzw. Vermeidung von Gärsaftbildung bei.

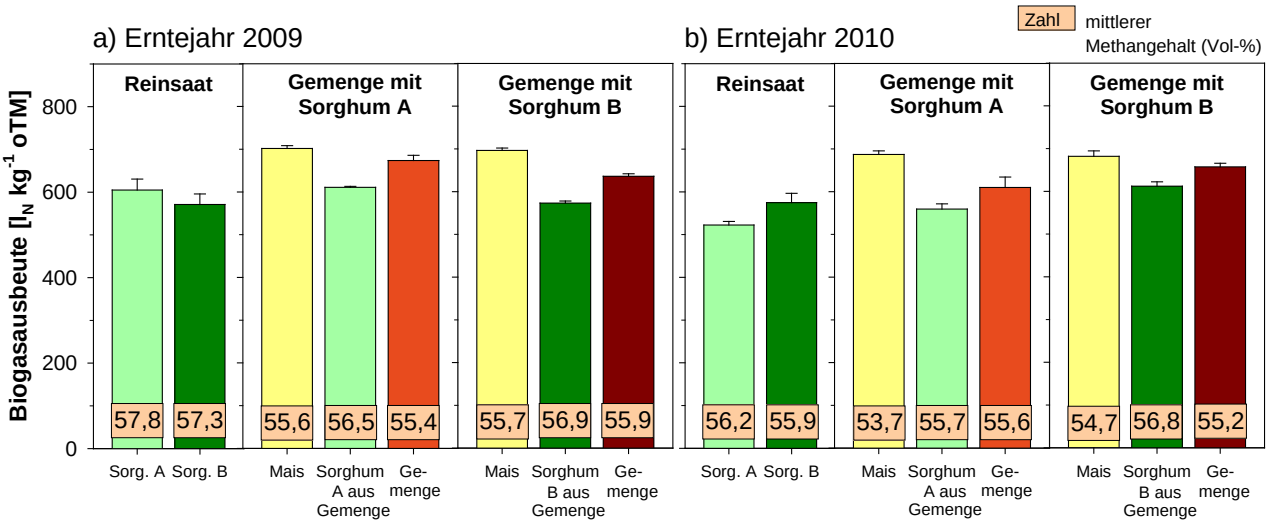
Tab. II.1.5-1: Vergärbarkeit der Frischmassen sowie Gärsäuregehalte und Gärqualitäten der Silagen der *Sorghum*-Reinsaaten und Mais – *Sorghum*- Gemenge im Mischanbau nach Winterroggen-GPS am Standort Aholfing (BY) in den Erntejahren 2009 und 2010

	Frischmassen			Silagen				
	TM	**PK**	**VK**	**pH**	**MS**	**ES[1)]**	**BS[2)]**	**Gärqualität**
	(%)	**(g MS kg^{-1} TM)**			**(% TM)**	**(% TM)**	**(% TM)**	**(DLG-Punkte)**
Erntejahr 2009								
Reinsaat								
Sorghum A	25,4	43,7	43	3,8	7,8	1,4	0,0	100
Sorghum B	26,7	40,3	48	3,9	6,6	1,5	0,0	98
Gemenge mit Sorg. A								
Mais aus Gemenge	33,9	33,0	56	3,9	6,6	0,9	0,0	100
Sorg. A aus Gemenge	28,0	39,3	49	3,8	7,4	0,9	0,0	100
Gemenge	30,6	38,5	51	3,9	7,0	0,9	0,0	100
Gemenge mit Sorg. B								
Mais aus Gemenge	33,7	37,6	50	3,9	7,1	0,9	0,0	100
Sorg. B aus Gemenge	27,3	40,1	49	3,9	7,7	0,9	0,0	100
Gemenge	31,7	37,6	51	3,9	6,1	0,9	0,0	100
Erntejahr 2010								
Reinsaat								
Sorghum A	31,8	31,5	51	4,1	4,9	2,8	0,0	100
Sorghum B	22,8	40,1	47	3,9	5,3	2,8	0,0	93
Gemenge mit Sorg. A								
Mais aus Gemenge	27,4	33,2	39	3,9	6,0	2,1	0,0	100
Sorg. A aus Gemenge	33,5	26,9	55	4,0	4,3	2,4	0,0	100
Gemenge	29,2	32,3	46	3,9	5,8	2,2	0,0	100
Gemenge mit Sorg. B								
Mais aus Gemenge	29,0	31,8	41	4,1	5,6	1,8	0,1	95
Sorg. B aus Gemenge	25,2	32,7	52	3,9	5,5	2,6	0,2	92
Gemenge	26,7	34,1	43	4,0	5,8	2,3	0,0	98

PK… Pufferkapazität, VK… Vergärbarkeitskoeffizient, MS… Milchsäure, ES… Essigsäure, BS… Buttersäure
[1)]Summe aus Essig- und Propionsäure; [2)]Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure
Sorg. A: *Sorghum b. x s.*, Sorte Lussi; Sorg. B: *Sorghum b. x b.*, Sorte Goliath

Die Analyse der Biogasproduktion im Batch-Gärtest ergab im Erntejahr 2009 nahezu identische Biogasausbeuten der Reinsaaten und der entsprechenden einzelnen Gemengepartner im Mischanbau (Abb. II.1.5-1). In 2010 wurden hingegen leicht höhere Methanausbeuten der einzelnen Gemengepartner gegenüber den Reinsaaten gemessen. Ursache hierfür kann die etwas geringere Ligningehalte des *Sorghums* aus dem Gemenge im Vergleich zu dem *Sorghum* in Reinsaat sein, die jedoch nur in 2010 beobachtet wurden. Die Biogasausbeuten der Gemenge lagen bei allen untersuchten Mischungen im mittleren Bereich zwischen den Biogasausbeuten der einzelnen Gemengepartner (Abb. II.1.5-1). Im Vergleich zu anteilmäßig aus den Biogasausbeuten der einzelnen Gemengepartner errechneten theoretischen Bio-

gasausbeuten der Gemenge wurden nur geringfügig (bis maximal 2 %) höhere Biogasausbeuten der Gemenge gemessen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass durch die Mischung von Mais und *Sorghum* in der Biogasanlage weder ein deutlich positiver Synergieeffekt noch ein negativer Effekt auf die Biogasausbeute erzielt wird, sofern keine Unterschiede in der Gärqualität der Silagen bestehen. Für die Beurteilung des Mischfruchtanbaus sind demnach vor allem Effekte auf den Biomasseertrag ausschlaggebend. Im Vergleich zur Reinsaat *Sorghum b. x s.* bzw. *Sorghum b. x b.* konnte durch den Mischanbau mit dem im Biogasprozess etwas besser abbaubaren Mais eine um 11 bis 17 % (*Sorghum b. x s.*) bzw. eine um 11 bis 14 % (*Sorghum b. x b.*) höhere Biogasbildung erreicht werden.



Sorg. A: *Sorghum b. x s.*, Sorte Lussi; Sorg. B: *Sorghum b. x b.*, Sorte Goliath

Abb. II.1.5-1: Biogasausbeuten (Mittelwerte und Standardabweichung) und Methangehalte der Reinsaaten und Mais – *Sorghum* -Gemenge am Standort Aholfing, Erntejahr 2009 und 2010

Fazit:

Durch den Mischanbau Mais – *Sorghum* können verbesserte Bedingungen für die Silierung des Erntegutes im Vergleich zu Reinsaaten geschaffen werden. Da Mais und *Sorghum* allgemein gute Siliereigenschaften aufweisen, sind nur geringe Effekte auf die Gärqualität zu erwarten. Allerdings können niedrige TM-Gehalte unterhalb von 28 %, die häufig bei spätreifenden *Sorghum*sorten bzw. bei unzureichender Abreife in Zweitfruchtstellung zu verzeichnen sind, durch den Mischungspartner Mais mit üblicherweise höherem TM-Gehalt ausgeglichen werden. Damit kann die Bildung von Sickersaft bei der Silierung verhindert werden.

Deutlich positive Synergieeffekte im Biogasprozess sind durch Mischung von Mais und *Sorghum* bei einheitlich sehr guter Gärqualität der Silagen nicht nachweisbar. Im Vergleich zur Reinsaat Mais verringert sich bei Mischanbau mit dem weniger gut abbaubarem *Sorghum* die Biogasausbeute, im Vergleich zur Reinsaat *Sorghum* erhöht sich bei Mischanbau mit dem besser abbaubarem Mais die Biogasausbeute. Für die Bewertung des Mischfruchtanbaus Mais – *Sorghum* sind vor allem die Effekte auf den Biomasseertrag ausschlaggebend.

II.1.6 Verbesserung der Konservierung und Biogasbildung durch Mischsilierung

Die Bereitung von Mischsilagen, d.h. die gemeinsame Silierung von gleichzeitig geernteten Pflanzenbeständen, stellt einen potenziellen Lösungsansatz dar, um Siliereigenschaften der Erntegüter zu verbessern, Sickersaft zu binden sowie zusätzlich durch Kombination von Inhaltsstoffen positiv auf die Biogasbildung zu wirken. Ziel der Untersuchungen zur Mischsilierung in EVA II war es, zunächst grundlegend Effekte der gemischten Konservierung möglicher Fruchtartenkombinationen aus den EVA-Fruchtfolgen auf den Silierverlauf und die Biogasbildung zu ermitteln.

Der Einfluss der Mischsilierung auf die Silagequalität und Biogasproduktion wurde im Labormaßstab in den Erntejahren 2009 bis 2011 für Mais/*Sorghum*-, Mais/Sonnenblume- und *Sorghum*/Sonnenblume-Gemenge geprüft. In 2011 wurden zusätzlich die Mischsilierung von Grünschnittroggen/Luzernegras (1. Schnitt), Mais/Luzernegras (3. Schnitt) und Winterraps/Wintertriticale untersucht. Die Erntegüter, aus denen die Mischsilagen erstellt wurden, stammten aus den EVA-Fruchtfolgen am Standort Güterfelde (BB). Um grundsätzliche Effekte zu prüfen, wurden die Erntegüter der beiden Gemengepartner einer Mischsilage mit einem Anteil von jeweils 50 Gew.-% bezogen auf die Frischmasse miteinander vermengt und gemeinsam siliert. Daten zur Siliereignung der Erntegüter, zu Gärqualitäten und Nährstoffgehalte der Silagen, sowie zu Biogasausbeuten im Batch-Gärtest (vgl. Anhang Tab. A-1) wurden sowohl für das separat silierte Erntegut als auch für die Gemenge bzw. Mischsilagen erhoben. Im Batch-Gärtest wurden zusätzlich die im Verhältnis 1 : 1 vor Zugabe in die Laborfermenter gemischten Einzelsilagen hinsichtlich der Biogasausbeute analysiert, um mögliche Synergieeffekte im Biogasprozess von dem Einfluss der Konservierung auf die Biogasproduktion getrennt zu ermitteln.

Von den Erntegütern, die in den Jahren 2009 bis 2011 für die Erstellung von Mischsilagen verwendet wurden, war nur die Sonnenblume in 2010 mit einem VK < 35 als schwer silierbar einzuschätzen, während die übrigen Erntegüter mit VK > 35 im mittelschwer bis leicht silierbaren Bereich lagen (Tab. II.1.6-1). Durch ausreichendes Anwelken nach der Ernte wiesen auch Grünschnittroggen und die Luzernegras-Aufwüchse trotz teilweise hoher Pufferkapazitäten eine gute Siliereignung auf. Der VK der Gemenge lag jeweils zwischen den Koeffizienten der Gemengepartner. Durch Mischung mit Mais bzw. *Sorghum b. x s.* konnte der VK der Sonnenblume im Gemenge auf Werte im mittelschwer silierbaren Bereich, und durch Mischung mit dem 1. Aufwuchs Luzernegras bzw. mit Wintertriticale der VK von Grünschnittroggen bzw. Winterraps im Gemenge auf Werte im leicht silierbaren Bereich erhöht werden. Der TM-Gehalt einzelner Erntegüter lag teilweise unterhalb der Gärsaftbildungsgrenze von 28 – 30 %. Durch Mischungspartner mit höheren TM-Anteilen konnten bei den Gemengen günstigere TM-Gehalte von 28 bis 38 % erreicht werden. Die unterschiedliche Siliereignung der Erntegüter bzw. Gemenge hatte keinen deutlichen Effekt auf die Gärqualität der im Labormaßstab erstellten Silagen. Sowohl die Einzelsilagen als auch die Mischsilagen wurden ausschließlich mit sehr guter Gärqualität konserviert, was vorrangig auf eine gute Siliertechnik bei den Modellsilierversuchen im Labormaßstab zurückzuführen ist (vgl. Kap. II.1.1). Dennoch wiesen ca. 80 % der untersuchten Mischsilagen etwas geringere Gärverluste bei der Silierung auf als sie jeweils anteilmäßig aus den Einzelsilagen der Gemen-

gepartner zu erwarten waren (Tab. II.1.6-1). Dies deutet auf einen günstigeren Verlauf der Milchsäuregärung bei Silierung der Mischungen gegenüber den Einzelsilagen hin.

Tab. II.1.6-1: Vergärbarkeit der Frischmassen sowie Gärverluste bei der Silierung, Gärsäuregehalte und Gärqualitäten ausgewählter Mischsilagen und zugehöriger Einzelsilagen in 2010 und 2011

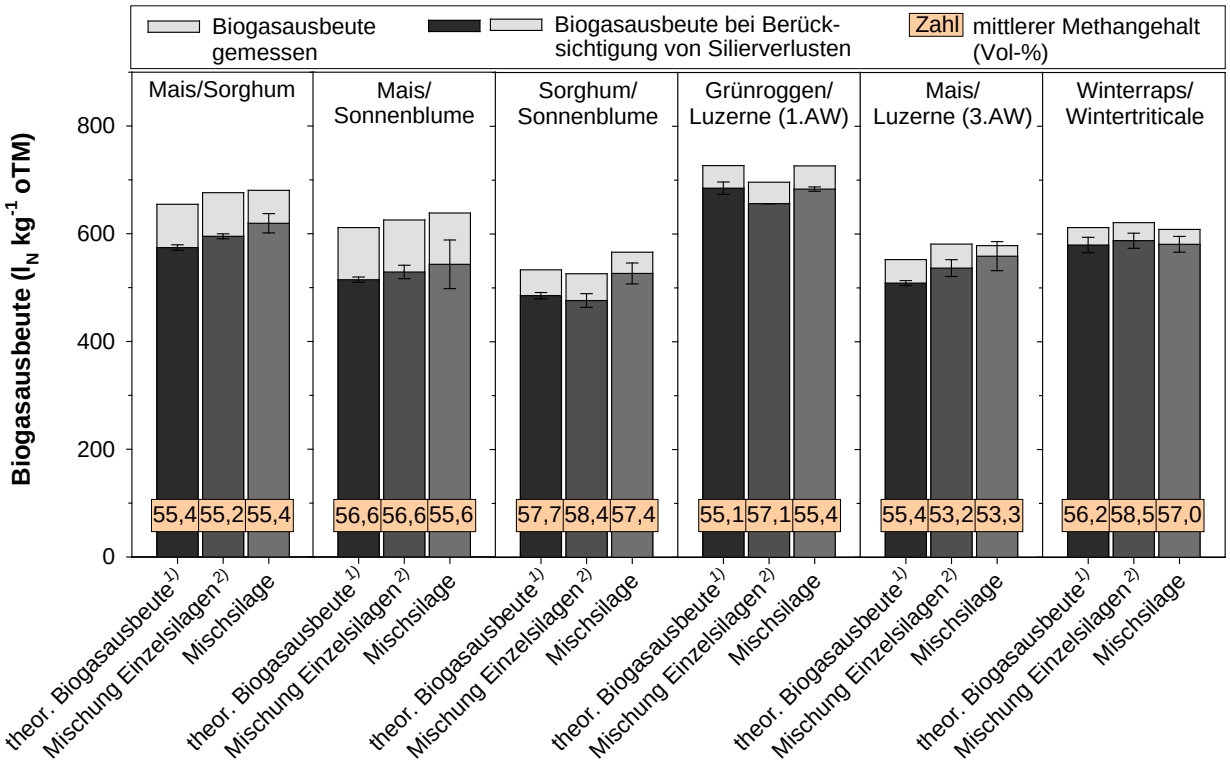
	Frischmassen		Silagen					
	TM	**VK**	**Silier-verluste**	**pH**	**MS**	**ES[1)]**	**BS[2)]**	**Gärqualität**
	(%)		**(%)**		**(% TM)**	**(% TM)**	**(% TM)**	**(DLG-Punkte)**
Erntejahr 2010								
Einzelsilagen								
Mais	26,9	42	5,4	3,7	5,2	0,5	0,0	100
Sorghum b. x s.	27,7	37	0,9	3,7	5,8	0,5	0,0	95
Sonnenblume	29,5	34	3,0	4,2	8,1	0,6	0,0	100
Mischsilagen								
Mais/*Sorghum b.x s.*	27,9	38	2,0	3,8	5,5	0,3	0,0	100
Mais/Sonnenblume	29,0	39	4,3	4,0	6,9	0,5	0,0	100
Sorghum b. x s./ Sonnen-blume	28,0	37	1,2	4,0	7,3	0,6	0,0	97
Erntejahr 2011								
Einzelsilagen								
Grünschnittroggen	31,1	46	0,8	4,0	5,2	0,6	0,0	100
Luzernegras (1.AW)	42,7	59	1,2	4,4	4,3	0,9	0,0	100
Mais	31,4	50	3,1	3,8	7,4	0,4	0,0	100
Luzernegras (3.AW)	37,9	42	0,7	4,3	7,6	1,3	0,1	100
Winterraps	27,2	42	1,0	3,8	6,5	0,5	0,0	100
Wintertriticale	37,0	64	0,7	3,9	4,5	0,7	0,0	100
Mischsilagen								
Grünroggen/Luzerne (1.AW)	38,3	52	1,0	4,2	4,8	0,8	0,0	100
Mais/Luzerne (3.AW)	33,8	42	0,5	4,0	6,5	1,0	0,1	100
Winterraps/Wintertriticale	31,9	53	0,7	3,8	6,0	0,7	0,0	100

VK… Vergärbarkeitskoeffizient, MS… Milchsäure, ES… Essigsäure, BS… Buttersäure, AW… Aufwuchs
[1)]Summe aus Essig- und Propionsäure; [2)]Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure

Die Bereitung von Mischsilagen wirkte sich tendenziell leicht positiv auf die Biogasproduktion aus, die Ergebnisse waren jedoch nicht für alle untersuchten Silagen einheitlich (Abb. II.1.6-1). Im Vergleich zu einer theoretischen, über die Mischungsanteile und gemessenen Biogasausbeuten der Einzelsilagen berechneten Biogasausbeute eines Gemenges wurde durch die tatsächliche Mischung der Einzelsilagen im Biogasprozess nur bei zwei der in den Jahren 2009 bis 2011 untersuchten zwölf Mischungen (Mais/*Sorghum* und Mais/Sonnenblume in 2011) eine signifikant höhere Biogasausbeute ermittelt. Bei einer Mischung lag der Wert unterhalb der theoretischen Biogasausbeute (Mais/Luzernegras 3. Aufwuchs in 2011), wobei hier jedoch ein höherer Methangehalt im Biogas gemessen wurde. Bei Vergleich der Methanausbeuten bestand damit kein Unterschied zwischen dem theoretischen und gemessenen Wert bei Mischung der Einzelsilagen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass unter günstigen Fermentationsbedingungen im Batch-Gärtest positive Sy-

nergieeffekte durch die Mischung von Substraten mit unterschiedlichen Nährstoffgehalten im Biogasprozess nicht oder nur in geringem Maße auftreten. Entsprechende Effekte sind möglicherweise in kontinuierlichen Prozessen bei hoher Raumbelastung und einseitiger Substratzufuhr bzw. bei Mangel an einzelnen Makro- oder Mikronährstoffen gegeben. Dies war jedoch nicht Bestandteil der Untersuchungen im vorliegenden Projekt.

Die Analyse der Mischsilagen im Batch-Gärtest ergab hingegen bei Berücksichtigung der Silierverluste für 75 % der untersuchten Mischungen höhere Biogasausbeuten verglichen mit den theoretisch zu erwartenden Biogasausbeuten aus den Einzelsilagen. Für die Hälfte der untersuchten Mischsilagen wurde eine signifikante Erhöhung der Biogasausbeute um 4 bis 14 % festgestellt, bei den übrigen Mischsilagen war kein statistisch nachweisbarer Effekt auf die Biogasausbeute zu verzeichnen. Im Vergleich zur Biogasproduktion aus der Mischung der Einzelsilagen wurden bei den Mischsilagen um bis zu 11 % höhere Biogasausbeuten bei Berücksichtigung von Silierverlusten erzielt. Ursache für höhere Biogasausbeuten der Mischsilagen bei Berücksichtigung der Silierverluste ist vor allem der günstigere Gärverlauf bei der Konservierung verbunden mit geringeren Gärverlusten.



1)theoretische Biogasausbeute berechnet aus den Biogasausbeuten der Einzelsilagen
2)Mischung der Einzelsilagen vor Zugabe in den Versuchsfermenter des Batch-Gärtests
AW… Aufwuchs

Abb. II.1.6-1: Biogasausbeuten ohne und mit Berücksichtigung von Silierverlusten (Mittelwerte und Standardabweichung) und Methangehalte der Mischsilagen und Mischungen aus Einzelsilagen am Beispiel der Mais/*Sorghum*-, Mais/Sonnenblume- und *Sorghum*/ Sonnenblume-Gemenge in 2010 sowie der Grünschnittroggen/Luzernegras-, Mais/ Luzernegras- und Winterraps/Wintertriticale-Gemenge in 2011

Fazit:
Durch eine gezielte Mischung und gemeinsame Silierung zeitgleich geernteter Kulturarten kann die Vergärbarkeit schwer oder mittelschwer silierbarer Fruchtarten, wie Sonnenblume, Luzernegras oder Raps, bei Zusatz zucker- oder trockenmassereicher Erntegüter verbessert werden. Dies führt zu einem verlustärmeren Verlauf der Silierung und damit zu höheren Biogasausbeuten aus der geernteten Biomasse. Unter Berücksichtigung von Silierverlusten lagen in den vorliegenden Untersuchungen die Biogasausbeuten der Mischsilagen um bis zu 11 % über den Biogasausbeuten der entsprechenden Fruchtarten bei getrennter Silierung und Mischung vor Zugabe zum Biogasprozess. Weitere positive Effekte bezüglich der Vermeidung von Sickersaftbildung oder einer reduzierten Anzahl offener Silos bei der Entnahme der Silage sind möglich. Die Notwendigkeit der zeitgleichen Ernte von Fruchtarten für die Mischsilierung begrenzt jedoch die praktisch realisierbaren Fruchtartenkombinationen. Dennoch ist die Mischsilierung weiterhin auch ein Ansatzpunkt für die Konservierung von Zwischenfrüchten mit extrem niedrigen TM-Gehalten zur Ernte. Untersuchungen mit diesem Schwerpunkt sollten fortgeführt werden.

II.1.7 Wirkung von Unkrautbiomasse im Erntegut auf die Silierung und Biogasbildung

Bei reduziertem Herbizideinsatz, unzureichender Wirkung von Herbiziden oder ungünstigen Wachstumsbedingungen der Kulturpflanzen kann es zu einem erhöhten Besatz an Unkrautbiomasse im Erntegut kommen. Ziel der Untersuchungen im Untersuchungsschwerpunkt „Unkrautbiomasse“ war es, die Auswirkungen des Unkrautbesatzes auf die Konservierung und die Biogasproduktion zu ermitteln und zu bewerten. Hierfür wurden in den Erntejahren 2009 und 2010 für fünf Fruchtarten (Winterroggen, Wintertriticale, Artenmischung aus Winterroggen und Wintertriticale, *Sorghum b. x s.*, *Sorghum b.*) mit jeweils drei verschiedenen Herbizidbehandlungen, und daraus folgend unterschiedlichen Anteilen an Unkrautbiomasse im Erntegut, die Siliereignung, Gärqualität und Nährstoffgehalte der Silagen sowie das Biogasbildungspotenzials analysiert (vgl. Anhang Tab. A-1). In 2011 wurden aufgrund des äußerst geringen Unkrautbesatzes in den Herbizidvarianten des Getreides nur der Winterroggen sowie *Sorghum b. x s.* und *Sorghum b.* in die Untersuchungen einbezogen.

Getreideganzpflanzen
Der Unkrautdeckungsgrad unterschied sich bei den geprüften Getreideganzpflanzen zwischen der unbehandelten Kontrolle und den mit Herbizid behandelten Aufwüchsen. Dabei waren jeweils im Erntejahr 2009 bzw. 2010 mit 34 bzw. 36 % bei Winterroggen, mit 8 bzw. 29 % bei der Artenmischung und mit 14 bzw. 17 % bei Wintertiritcale die höchsten Deckungsgrade in der unbehandelten Kontrolle festzustellen. Zwischen dem reduzierten und ortsüblichen Herbizidaufwand waren hingegen nur geringe Unterschiede zu verzeichnen. Bei Herbizideinsatz lagen die Deckungsgrade bei 1 bis 3 % in 2009 und bei 4 bis 10 % in 2010. Die Ertragsanteile des Unkrautes in der unbehandelten Kontrolle wurden auf maximal 8 bis 10 % bei Winterroggen in 2009 und 2010 geschätzt. In 2010 ist bei der Artenmischung von einem maximalen Ertragsanteil des Unkrautes von 7 %, und bei der Wintertriticale von 5 % auszugehen, während die Ertragsanteile in 2009 mit maximal 1 bis 3 % bei Wintertriticale und der Artenmischung eher zu vernachlässigen sind.

In 2011 wurden im Winterroggen Ende April eine Unkrautdeckung von 15 % in der unbehandelten Kontrolle und 0,4 bis 1,5 % in den Varianten mit reduziertem und ortsüblichem Herbizideinsatz bonitiert. Die Unkrautdeckung bei den übrigen Getreidearten war noch geringer, so dass auf eine Untersuchung der Artenmischung und Wintertriticale verzichtet wurde. Bis zur Ernte war jedoch auch im Winterroggen der Unkrautanteil aufgrund der ausgeprägt niederschlagsarmen Witterung fast vollständig vertrocknet. Der geschätzte Biomasseanteil des Unkrautes war in allen Herbizidvarianten im Winterroggen mit weniger als 1 % nicht ertragsrelevant.

Die vorherrschenden Unkrautarten im Getreide waren in 2009 *Viola arvensis, Capsella bursa-pastoris* und *Papaver rhoeas,* und im Folgejahr *Viola arvensis* und *Papaver rhoeas.* In 2011 wurde der Unkrautanteil maßgeblich von *Stellaria media* gebildet.

Die Siliereignung des Getreideganzpflanzen-Erntegutes und die Gärqualität der Silagen wurden durch die vorhandene Unkrautbiomasse nicht oder nur unwesentlich beeinflusst (Tab. II.1.7-1). In 2009 wie auch in 2011 wurden hohe Gehalte an WLK von 11 bis 15 % TM im Erntegut ermittelt, die mit höherem Unkrautanteil nicht oder nur geringfügig abnahmen. Die Gehalte an WLK im Ganzpflanzengetreide in 2010 waren mit 5 bis 8 % TM vergleichsweise gering, wobei ebenfalls kein eindeutiger Effekt der Herbizidbehandlung auf den Anteil an WLK gegeben war.

In Grasbeständen wird davon ausgegangen, dass eine stärkere Verunkrautung die Pufferkapazität des Erntegutes erhöht (Jänicke, 2006). Für das Ganzpflanzengetreide konnte dies durch die vorliegenden Untersuchungen nicht bestätigt werden. Die unbehandelte Kontrolle unterschied sich trotz des deutlich höheren Anteils der Begleitvegetation im Erntegut bezüglich der Pufferkapazität kaum von den Varianten mit Herbizideinsatz (Tab. II.1.7-1). Die TM-Gehalte lagen mit im Mittel 30 bis 37 % generell im optimalen Bereich, so dass das Erntegut bei allen Varianten als leicht silierbar bewertet werden konnte.
Die im Labormaßstab erzeugten Silagen der Getreideganzpflanzen-Aufwüchse wiesen mit niedrigen pH-Werten und ausreichend hohen Milchsäuregehalten generell gute bis sehr gute Gärqualitäten auf (Tab. II.1.7-1). Die höchsten Buttersäuregehalte wurden mit 0,7 % TM in den Winterroggensilagen in 2009 ermittelt, wobei auch hier kein eindeutiger Effekt der Herbizidvariante auf die Gärsäuregehalte bzw. die Gärqualitäten zu verzeichnen war. Der Herbizideinsatz bzw. der Anteil an Unkrautbiomasse im Erntegut der Getreideganzpflanzen hatte in allen Untersuchungsjahren keinen gerichteten Einfluss auf die Verluste bei der Silierung.

Tab. II.1.7-1: Vergärbarkeit der Frischmassen sowie Gärsäuregehalte und Gärqualitäten der Silagen verschiedener Getreideganzpflanzen bei unterschiedlicher Herbizidbehandlung in den Erntejahren 2009 und 2010

Fruchtart Herbizideinsatz	Frischmassen				Silagen				
	TM	**WLK**	**PK**	**VK**	**pH**	**MS**	**ES[1)]**	**BS[2)]**	**Gärqualität**
	(%)	**(% TM)**	**(g MS kg^{-1} TM)**			**(% TM)**	**(% TM)**	**(% TM)**	**(DLG-Punkte)**
Erntejahr 2009									
Winterroggen									
unbehandelt	30,0	12,0	30,3	62	3,9	4,4	1,4	0,7	78
reduziert	30,8	12,0	30,1	63	4,0	3,8	1,4	0,7	80
ortsüblich	30,5	12,3	31,1	62	4,0	4,1	1,3	0,6	80
Artenmischung[3)]									
unbehandelt	31,8	13,9	24,9	78	4,0	3,8	1,2	0,2	100
reduziert	31,5	14,1	23,2	81	4,0	4,1	1,3	0,2	100
ortsüblich	32,0	14,2	26,3	77	4,0	3,9	1,3	0,2	100
Wintertriticale									
unbehandelt	32,9	14,3	24,6	80	4,0	3,4	1,5	0,1	100
reduziert	33,6	14,5	27,3	76	4,0	3,4	1,7	0,2	100
ortsüblich	33,1	15,5	26,4	81	4,0	3,6	1,5	0,2	100
Erntejahr 2010									
Winterroggen									
unbehandelt	31,3	6,9	30,4	50	3,8	5,5	1,7	0,0	100
reduziert	31,2	6,8	33,3	48	3,8	5,4	1,7	0,0	100
ortsüblich	31,2	6,6	30,1	49	3,8	5,3	1,7	0,0	100
Artenmischung[3)]									
unbehandelt	34,8	5,7	20,5	57	3,9	4,6	1,7	0,0	100
reduziert	35,1	5,6	19,2	59	3,9	4,4	1,7	0,0	100
ortsüblich	35,0	5,8	19,4	59	3,9	4,4	1,8	0,0	100
Wintertriticale									
unbehandelt	35,7	5,6	23,0	56	3,9	4,6	1,6	0.0	100
reduziert	35,7	5,8	25,8	54	3,9	4,5	1,6	0,0	100
ortsüblich	35,0	6,2	23,7	56	3,9	4,5	1,6	0,0	100

WLK… Wasserlösliche Kohlenhydrate, PK… Pufferkapazität, VK… Vergärbarkeitskoeffizient, MS… Milchsäure, ES… Essigsäure, BS… Buttersäure
[1)]Summe aus Essig- und Propionsäure; [2)]Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; [3)] Mischung Winterroggen/Wintertriticale

Die Biogasausbeuten der Silagen bei unterschiedlicher Herbizidbehandlung der Getreideganzpflanzen sind beispielhaft für die Erntejahre 2009 und 2010 in Abb. II.1.7-1 dargestellt. In 2009 wurde nur ein vergleichsweise geringer Effekt der Unkrautbiomasse auf die Methanbildung aus den Getreideganzpflanzensilagen ermittelt. Dabei wurden bei der unbehandelten Variante jeweils um 3 bis 5 % niedrigere Biogasausbeuten mit Bezug auf die der Biomethanisierung zugeführten oTM gegenüber den Varianten mit ortsüblichem Herbizideinsatz ermittelt (Abb. II.1.7-1). Mit Berücksichtigung der Silierverluste in der Biogasausbeute lag diese Differenz bei 3 bis 6 %. Entsprechend der geringen Unterschiede im Anteil der Begleitvegetation zwischen dem reduzierten und ortsüblichen Herbizideinsatz waren auch die Unterschiede in den Biogasausbeuten zwischen diesen Herbizidvarianten vernachlässigbar gering. Die größten Effekte des Anteils an Unkrautbiomasse in der unbehandelten Kontrolle auf

die Biogasproduktion wurden 2009 für Winterroggen und für die Artenmischung analysiert. Die geringsten Biogasausbeuten wurden im Parzellenversuch mit Winterroggen für die Wiederholungen B und C gemessen, die auch die höchsten Unkrautdeckungsgrade (46 bzw. 43 %) aufwiesen.

In 2010 wurde gegenüber 2009 ein stärkerer negativer Effekt der Unkrautbiomasse auf die Biogasbildung aus den Getreideganzpflanzenaufwüchsen ermittelt (Abb. II.1.7-1). Die Biogasausbeuten der Silagen der unbehandelten Varianten lagen unter Berücksichtigung der Gärverluste bei der Silierung bei Winterroggen um 9 bzw. 10 %, bei der Artenmischung um 4 bzw. 5 % und bei Wintertriticale um 4 bzw. 9 % unter den Biogasausbeuten der Silagen bei reduzierter bzw. ortsüblicher Herbizidanwendung (Abb. II.1.7-1). Vor allem bei Wintertriticale traten jedoch relativ große Differenzen zwischen den Wiederholungen einer Variante auf. Ursache für den stärkeren Effekt des Herbizideinsatzes auf die Biogasbildung in 2010 ist ein etwas höherer Anteil massebildender Unkräuter im Erntegut verglichen mit dem Erntejahr 2009. In 2010 wurde eine gute Korrelation zwischen dem Unkrautdeckungsgrad und der Biogasausbeute der einzelnen Parzellen ermittelt, wobei mit höherem Deckungsgrad die Biogasausbeute deutlich abnahm. Die geringsten Biogasausbeuten wurden erneut im Winterroggen für die Wiederholungen B und C mit den höchsten Deckungsgraden der Begleitvegetation (45 bzw. 46 %) ermittelt.
Entsprechend des sehr geringen Aufkommens der Segetalflora waren im Erntejahr 2011 keine deutlichen Unterschiede in der Biogasbildung zwischen den Herbizidvarianten festzustellen. Differenzen von maximal 3 % in der Biogasausbeute bei Berücksichtigung der Silierverluste zwischen der unbehandelten Kontrolle und der Variante mit ortsüblichem Herbizideinsatz des Winterroggens waren statistisch nicht abzusichern.

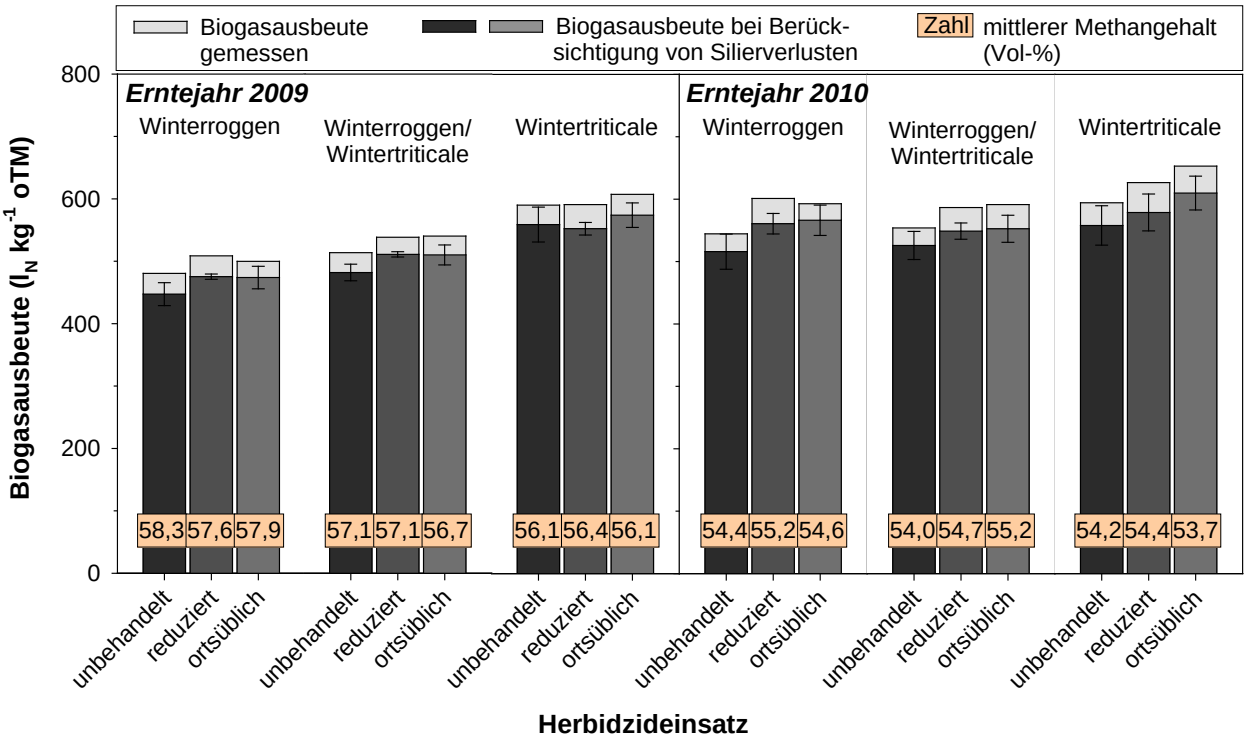


Abb. II.1.7-1: Biogasausbeuten ohne und mit Berücksichtigung von Silierverlusten (Mittelwerte und Standardabweichung) und Methangehalte der Silagen verschiedener Getreideganzpflanzen bei unterschiedlicher Herbizidbehandlung in den Erntejahren 2009 und 2010

Sorghum

Bei *Sorghum* wurde die unbehandelte Kontrolle jeweils einer Behandlung mit einem Herbizid mit mittlerem Erfolg (Certrol B in 2009, Biathlon in 2010, Clio Super in 2011) und einem Herbizid mit gutem Erfolg bezüglich der Unkrautunterdrückung (Gardo Gold in 2009, 2010 und 2011) gegenübergestellt. Dabei nahm in 2009 der Deckungsgrad des Unkrautes von der unbehandelten Kontrolle mit 72 % bei *Sorghum b. x s.* und 78 % bei *Sorghum b.* nach Behandlung mit Certrol B mit 44 % bei *Sorghum b. x s.* und 62 % bei *Sorghum b.* und Behandlung mit Gardo Gold mit 25 % bei *Sorghum b. x s.* und 39 % bei *Sorghum b.* deutlich ab. Der geschätzte Ertragsanteil der Unkrautbiomasse bei *Sorghum b. x s.* bzw. *Sorghum b.* lag mit 28 bzw. 33 % bei der unbehandelten Kontrolle erheblich über dem Ertragsanteil bei Behandlung mit Certrol B (13 bzw. 17 %) und Gardo Gold (6 bzw. 7 %). In 2010 wurden bei *Sorghum b. x s.* höhere Unkrautdeckungsgrade von 100 % in allen Varianten bonitiert. Im geschätzten Ertragsanteil unterschieden sich die Varianten jedoch mit 19 % bei der unbehandelten Kontrolle, 9 % bei Anwendung von Biathlon und 2 % bei Anwendung von Gardo Gold. Die Deckungsgrade der Begleitvegetation des *Sorghum b.* lagen mit 52 % in der unbehandelten Kontrolle, 13 % bei Behandlung mit Biathlon und 4 % bei Behandlung mit Gardo Gold in 2010 deutlich niedriger als bei *Sorghum b. x s.* Die Ertragsanteile wurden entsprechend niedrig auf maximal 4 % bei der unbehandelten Variante, 2 % bei Behandlung mit Biathlon und 0 % bei Behandlung mit Gardo Gold geschätzt. In 2011 wurden generell geringe Unkrautdeckungsgrade von 11 % bei allen geprüften Varianten des *Sorghum b. x s*. und von 20 % bei allen geprüften Varianten des *Sorghum b.* ermittelt. Die geschätzten Ertragsanteile lagen bei 6 bzw. 2 % in der unbehandelten Kontrolle für *Sorghum b. x s.* bzw. *Sorghum b.* und bei < 1 % bei den übrigen Varianten mit Herbizideinsatz für beide *Sorghum*arten.
Die Begleitvegetation im *Sorghum* wurde 2009 vorwiegend durch *Echinochloa crus-galli*, *Chenopodium album*, *Raphanus raphanistrum*, *Capsella bursa-pastoris* und *ripleurospermum maritimum* subsp. *inodorum* gebildet. In 2010 waren *Echinochloa crus-galli*, *Chenopodium album* und *Capsella bursa-pastoris,* und in 2011 *Echinochloa crus-galli*, *Chenopodium album, Raphanus raphanistrum* die vorherrschenden Arten.

Für die untersuchten *Sorghum*arten zeigte sich ein negativer Effekt eines erhöhten Anteils an Unkrautbiomasse im Erntegut auf die Siliereignung (Tab. II.1.7-2). Mit stärkerer Verunkrautung verringerte sich der Gehalt an WLK um bis zu 33 % (relativ). Bei *Sorghum b. x s.* wurden zudem sinkende TM-Gehalte bei höherem Unkrautanteil analysiert, wobei dieser Trend bei *Sorghum b.* nicht eindeutig gegeben war. Bei *Sorghum b.* nahmen jedoch die Pufferkapazitäten mit höherem Unkrautanteil tendenziell zu. Insgesamt lag der VK, der sich aus dem Anteil an WLK, der Pufferkapazität und dem TM-Gehalt im Erntegut ergibt (Anhang A-2), in den Varianten ohne Herbizideinsatz um 1 bis 7 Punkte niedriger als bei den Varianten mit Behandlung mit Gardo Gold. Damit wurden die Erntegüter der unbehandelten Kontrollen überwiegend als schwer bzw. mittelschwer silierbar, die Erntegüter der mit Herbizid behandelten Varianten als mittelschwer bzw. leicht silierbar, eingestuft. Dennoch waren überwiegend günstige Bedingungen für die Silierung gegeben, so dass im Labormaßstab bei allen Varianten ausschließlich buttersäurefreie Silagen mit sehr guter Gärqualität, niedrigen pH-Werten von 3,7 bis 4,1 und hohen Milchsäuregehalten von 5,2 bis 8,4 % TM erzeugt wurden (Tab. II.1.7-2). Ein gerichteter Einfluss der Herbizidvariante auf Gärverluste bei der Silierung konnte nicht ermittelt werden.

Tab. II.1.7-2: Vergärbarkeit der Frischmassen sowie Gärsäuregehalte und Gärqualitäten der Silagen von *Sorghum b.x s.* und *Sorghum b.* bei unterschiedlicher Herbizidbehandlung in den Erntejahren 2009 und 2010

Fruchtart Herbizideinsatz	Frischmassen				Silagen				
	TM	**WLK**	**PK**	**VK**	**pH**	**MS**	**ES**[1)]	**BS**[2)]	**Gärqualität**
	(%)	**(% TM)**	**(g MS kg^{-1} TM)**			**(% TM)**	**(% TM)**	**(% TM)**	**(DLG-Punkte)**
Erntejahr 2009									
Sorghum b.x s.									
unbehandelt	34,9	4,5	41,4	43	4,1	5,4	0,6	0,0	100
Certrol B	36,1	5,4	48,4	46	4,0	5,2	0,7	0,0	100
Gardo Gold	36,6	6,4	41,7	49	4,0	5,6	0,6	0,0	100
Sorghum b.									
unbehandelt	30,4	6,4	37,4	44	3,8	6,7	1,4	0,0	100
Certrol B	29,6	7,4	36,1	46	3,8	6,3	1,4	0,0	100
Gardo Gold	28,8	9,5	33,6	51	3,7	6,7	1,4	0,0	100
Erntejahr 2010									
Sorghum b.x s.									
unbehandelt	25,8	3,6	34,9	34	3,7	8,4	0,4	0,0	100
Biathlon	26,9	4,7	36,8	37	3,8	8,3	0,4	0,0	100
Gardo Gold	27,0	5,0	35,0	38	3,8	8,3	0,4	0,0	100
Sorghum b.									
unbehandelt	24,6	8,9	45,7	40	3,8	7,5	0,5	0,0	100
Biathlon	25,9	10,7	42,6	46	3,8	7,6	0,5	0,0	100
Gardo Gold	25,3	10,3	41,1	46	3,8	7,2	0,5	0,0	100

WLK… Wasserlösliche Kohlenhydrate, PK… Pufferkapazität, VK… Vergärbarkeitskoeffizient, MS… Milchsäure, ES… Essigsäure, BS… Buttersäure
[1)]Summe aus Essig- und Propionsäure; [2)]Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; [3)] Mischung Winterroggen/Wintertriticale

Bei den untersuchten *Sorghum*arten wurden die höchsten Ertragsanteile des Unkrautes im Erntejahr 2009 ermittelt. Entsprechend war hier auch der Einfluss der Herbizidbehandlung auf die Biogasausbeute am größten. Die Biogasausbeuten im Batch-Gärtest lagen bei der unbehandelten Kontrolle mit hohem Unkrautanteil bei *Sorghum b. x s.* bzw. *Sorghum b.* um 3 bzw. 4 % niedriger als bei Behandlung mit Certrol B und um 7 bzw. 10 % niedriger als bei Behandlung mit Gardo Gold, der Variante mit dem geringsten Unkrautbesatz (Abb. II.1.7-2). Bei Berücksichtigung der Silierverluste wurden Differenzen von 1 bzw. 3 % zur Behandlung mit Certrol B und von 5 bzw. 9 % zur Behandlung mit Gardo Gold gefunden (Abb. II.1.7-2).
Im Gegensatz zu dem Ganzpflanzengetreide waren in 2010 bei *Sorghum* die Unterschiede in der Biogasausbeute zwischen unbehandelter Kontrolle und den Varianten mit Herbizideinsatz geringer als in 2009. Der höhere Unkrautbesatz bei fehlender Herbizidbehandlung bewirkte bei Berücksichtigung der Silierverluste bei *Sorghum b. x s.* eine Verringerung der Biogasausbeute um 3 bzw. 5 % und bei *Sorghum b.* eine Verringerung der Biogasausbeute um 2 bzw. 3 % gegenüber der Behandlung mit Biathlon bzw. Gardo Gold (Abb. II.1.7-2). Die geringeren Unterschiede in der Biogasausbeute zwischen den Herbizidvarianten gegenüber 2009 entsprechen den geringeren Differenzen im geschätzten Ertragsanteil der Unkrautbiomasse. Bei Betrachtung der chemischen Zusammensetzung der Aufwüchse ist festzustel-

len, dass sowohl 2009 als auch 2010 die *Sorghum*silagen mit Herbizideinsatz tendenziell geringere Gehalte an Lignin (bis 1,1 % TM) aufwiesen als die Silagen der unbehandelten Kontrollen.
In 2011 lagen die Ertragsanteile der Unkrautbiomasse im Erntegut noch deutlich niedriger als in 2009 und 2010. Entsprechend konnte bei beiden *Sorghum*arten kein eindeutiger Effekt der Herbizidbehandlung auf die Biogasbildung nachgewiesen werden. Die Unterschiede in den Biogasausbeuten zwischen den Herbizidvarianten betrugen maximal 1,5 %.

Insgesamt führten ähnliche Ertragsanteile der Unkrautbiomasse im Erntegut zu einer stärkeren Minderung der Biogasausbeute bei den Getreideganzpflanzen verglichen mit den *Sorghum*aufwüchsen. Dies deutet darauf hin, dass neben dem Ertragsanteil auch die Art und Reife der Begleitvegetation den Effekt auf die Biogasausbeute bestimmt. Weitere Untersuchungen bei detaillierter Charakterisierung der Art und Reife, der chemischen Zusammensetzung und des Gasbildungspotenzials von Leitunkräutern sind notwendig, um gesicherte Aussagen hierzu treffen und Problemunkräuter im Energiepflanzenbau zur Biogasproduktion identifizieren zu können.

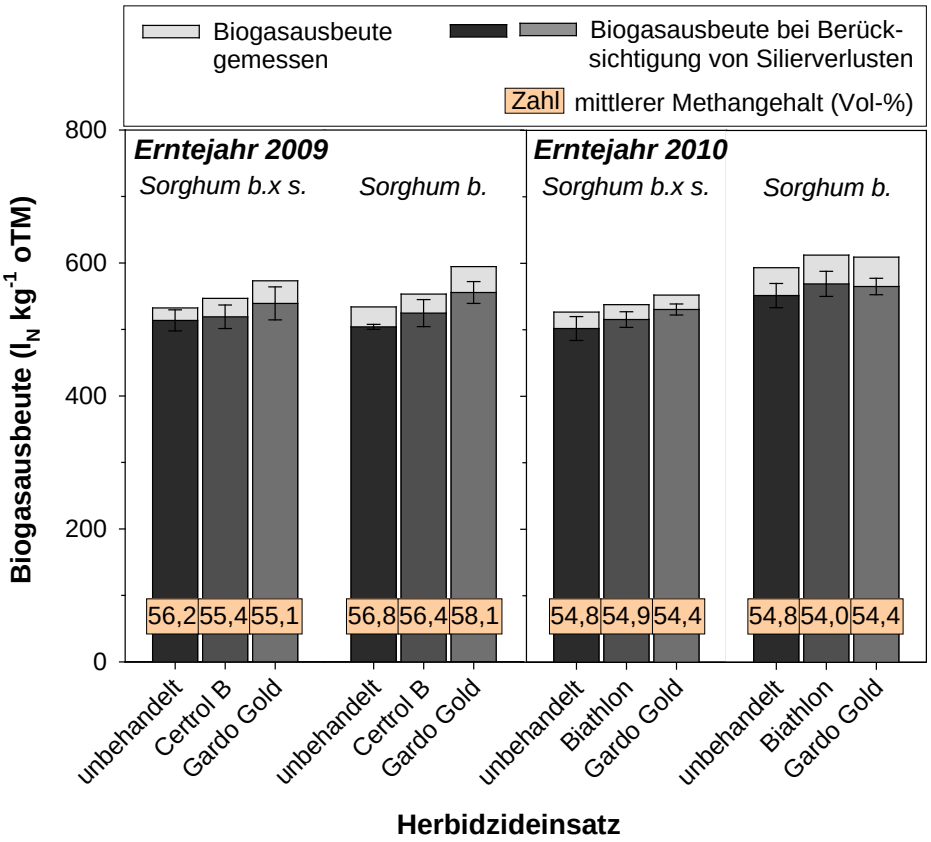


Abb. II.1.7-2: Biogasausbeuten ohne und mit Berücksichtigung von Silierverlusten (Mittelwerte und Standardabweichung) und Methangehalte der Silagen von *Sorghum b. x s.* und *Sorghum b.* bei unterschiedlicher Herbizidbehandlung in den Erntejahren 2009 und 2010

Fazit:
Es ist davon auszugehen, dass Unkrautbiomasse bezüglich der Biogasbildung im Allgemeinen eine ungünstigere chemische Zusammensetzung aufweist als die Kulturart, und ein er-

höhter Anteil an Unkrautbiomasse im Erntegut sich negativ auf das Biogasbildungspotenzial des Bestandes und damit auf die Qualität des Pflanzenmaterials als Einsatzstoff für die Biogasanlage auswirkt. Eine deutliche Verringerung der Biogasausbeute war bei den durchgeführten Untersuchungen mit Getreideganzpflanzen und *Sorghum* ab einem Ertragsanteil von etwa 8 bis 10 % zu verzeichnen. Gleichzeitig kann auch die Siliereignung des Erntegutes herabgesetzt werden, wodurch ein erhöhtes Risiko für Fehlgärungen und für hohe Verluste bei der Silierung gegeben ist. Dieser Effekt war jedoch bei den durchgeführten Untersuchungen nur für *Sorghum* nachweisbar, wobei allgemein bei gut silierbarem Ausgangsmaterial, wie Getreideganzpflanzen in der Milch- bis Teigreife und *Sorghum* mit einem TM-Gehalt >25 % zur Ernte der mögliche Einfluss auf die Silagequalität als eher gering einzuschätzen ist. Wie stark negativ sich der Unkrautanteil auf die Silierung und Biogasbildung auswirkt, ist neben dem ertragsrelevanten Anteil auch von der Art und Zusammensetzung der Begleitvegetation abhängig.
Ein genereller Verzicht auf den Einsatz von Herbiziden mit der Begründung, dass Unkrautbiomasse auch energetisch nutzbare Biomasse sei, ist unter anderem aufgrund der auftretenden Qualitätsminderungen keinesfalls zu empfehlen. Die Reduzierung der Herbizidaufwendung bzw. eine Anpassung von Toleranzschwellen kann jedoch sinnvoll sein und sollte weiter geprüft werden.

II.1.8 Einfluss der Silagequalität auf das Methanbildungspotenzial

Bei der Silierung können im Wesentlichen zwei verbreitete Siliermängel aufteten, die zu einem Umbau bzw. Abbau von Nährstoffen und damit zu erhöhten Verlusten führen (Pahlow, 2006). Zum Einen sind dies Fehlgärungen, wobei durch die Stoffwechselprozesse von Clostridien leicht verfügbare Kohlenhydrate und bereits gebildete Milchsäure zu Essigsäure bzw. Buttersäure umgesetzt werden. Dem Umbau von Milchsäure schließt sich in der Regel der Abbau von Proteinen an. Durch steigende pH-Werte ist eine stabile Lagerung der Silage unter anaeroben Bedingungen nicht mehr gewährleistet. Ein zweiter Siliermangel tritt auf, wenn Luftsauerstoff in die Silage gelangt und ein kritischer Besatz an Hefen in der Silage überschritten wird. Hierbei kommt es zu einem Abbau schützender Gärsäuren zu Kohlendioxid und Wasser unter deutlicher Erwärmung der Silage. Ziel von Untersuchungen in EVA 2 war es, die Effekte entsprechender Siliermängel auf die Biogasproduktion zu quantifizieren und zu bewerten.

Aus umfangreichen Siliermittel- und Lagerungsversuchen mit Mais, *Sorghum b. x s.,* Grünschnittroggen, Wintertriticale und Weidelgras konnte der Einfluss von Fehlgärungen sowie von aeroben Umsetzungen bei Luftzutritt in die Silage abgeleitet werden. Dabei erfolgte die Lagerung der Silagen sowohl unter strikt anaeroben Bedingungen als auch unter „Luftstress“ bei zweimaliger Luftzufuhr über jeweils 24 Stunden während der Lagerung. Von beiden Varianten wurde im Anschluss die aerobe Stabilität im Verfahren „Völkenrode“ (ASTA, vgl. Anhang Tab. A-1) bei 7-tägiger Lagerung ohne Luftabschluss geprüft. Für die unterschiedlich gelagerten Silagen wurden die Gärqualitäten und Nährstoffgehalte sowie die Biogasausbeuten im Batch-Gärtest bestimmt (vgl. Anhang Tab. A-1).

Einfluss der Gärqualität

Deutliche Unterschiede in den Gärqualitäten bei strikt anaerober Lagerung waren für die Silagen des 2010 geernteten Grünschnittroggens sowie etwas weniger deutlich für den 2010 konservierten Mais gegeben. Bei den übrigen untersuchten Fruchtarten waren nur vergleichsweise geringe Unterschiede in den Gärqualitäten der Silagen zu verzeichnen.
Bei Grünschnittroggen wiesen 43 % der Silagen schlechte bis sehr schlechte Gärqualitäten auf. Der Gehalt an Buttersäure in den Grünschnittroggen-Silagen lag bei bis zu 6,9 % TM. Bei Mais wurden überwiegend gute bis sehr gute Gärqualitäten erreicht, etwa 9 % der Silagen wurden bezüglich der Gärqualität als schlecht bis sehr schlecht bewertet. Es wurde ein maximaler Gehalt an Buttersäure in den Maissilagen von 2,2 % TM festgestellt.

Mit zunehmenden Gehalten an niederen Fettsäuren (C2 bis C6) und Alkoholen, und damit verbunden einer schlechteren Bewertung der Gärqualität, nahm die Methanausbeute der Silagen bezogen auf die der Biomethanisierung zugeführten oTM tendenziell zu (Abb. II.1.8-1). Dies bestätigt erste Ergebnisse aus den Untersuchungen in der Projektphase EVA 1 zum Einfluss der Gärqualität auf die Methanbildung, wobei für buttersäurehaltige Silagen ebenfalls leicht höhere Methanausbeuten im Vergleich zu Silagen ohne Fehlgärungen gemessen wurden (Herrmann et al., 2011). Als Ursache hierfür ist eine hohe Methanbildung aus den sich anreichernden niederen Fettsäuren (> C2), insbesondere Buttersäure, und Alkohole zu sehen. Die theoretischen Methanausbeuten dieser Gärprodukte liegen deutlich über den theoretischen Methanausbeuten der Gärsubstrate bei der Silierung (z.B. Glucose) (Herrmann et al., 2011). Es bleibt jedoch zu beachten, dass entsprechende Fehlgärungen auch mit erhöhten Verlusten an oTM verbunden sind. Für Mais wurden in den vorliegenden Untersuchungen oTM-Verluste infolge der Gärprozesse bis 8,0 % und bei Grünschnittroggen bis 19,9 % analysiert (Abb. II.1.8-1). Berücksichtigt man diese oTM-Verluste bei der Methanausbeute, so ist kein eindeutiger Effekt der Gärqualität auf die Methanausbeute bezogen auf die geerntete oTM zu erkennen. Die in den Laborsilos durch die Fehlgärungen entstandenen höheren Masseverluste wurden durch die höheren Methanausbeuten der Silagen überwiegend ausgeglichen, d.h. die Masseverluste von fehlvergorenen Silagen sind deutlich höher als die entsprechenden Energieverluste.

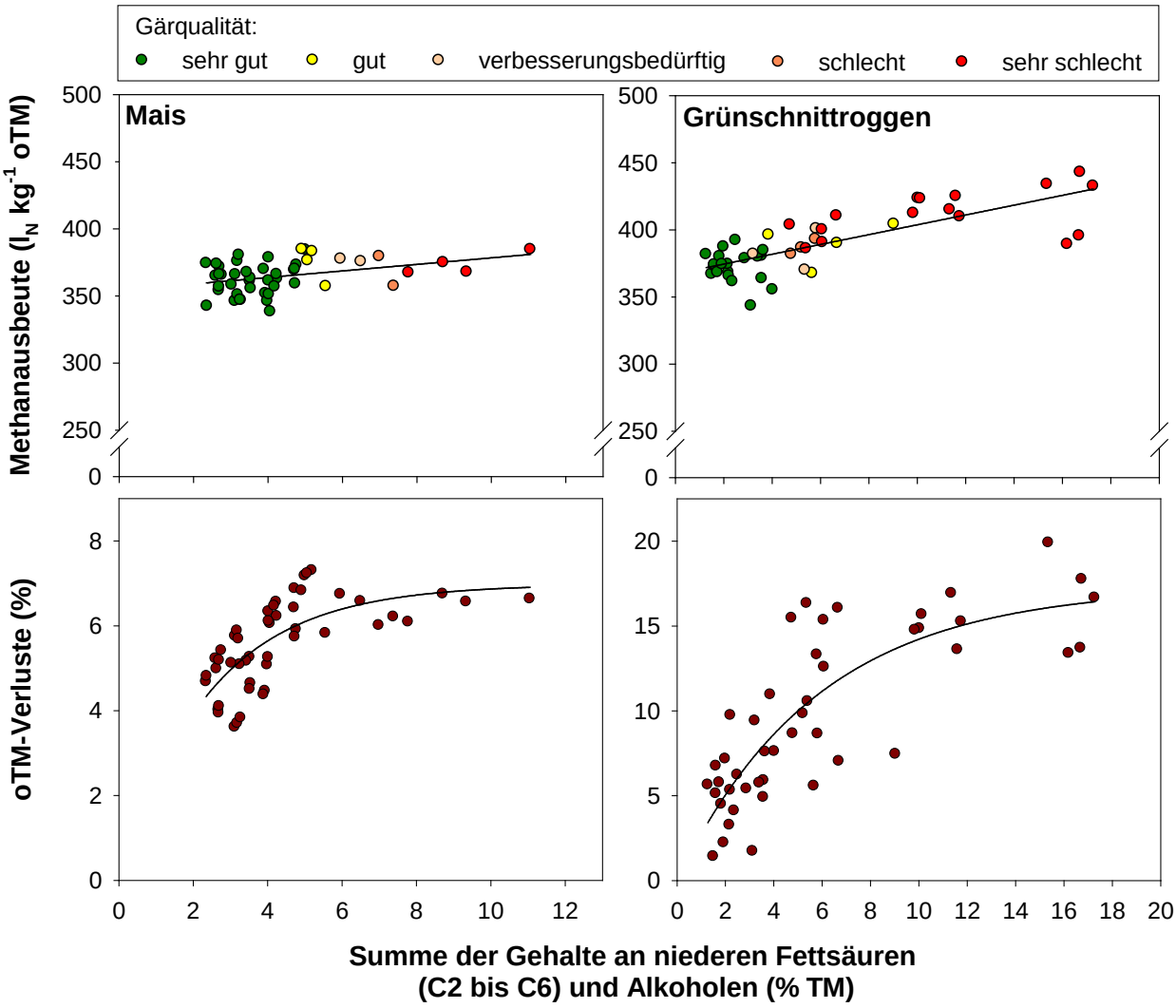


Abb. II.1.8-1: Zusammenhang zwischen der Summe der Gehalte an niederen Fettsäuren und Alkoholen und den oTM-Verlusten bzw. den Methanausbeuten (ohne Berücksichtigung der Silierverluste) von Mais- und Grünschnittroggensilagen, Erntejahr 2010

Bei Silierung des Grünschnittroggens im Praxissilo ohne Silierzusatz wiesen die Silagen ebenfalls überwiegend schlechte bis sehr schlechte Gärqualitäten auf (vgl. Kapitel II.1.3). Ein Anstieg der Methanausbeute bezogen auf die der Biomethanisierung zugeführte oTM konnte für die Praxissilagen jedoch nicht eindeutig nachgewiesen werden. Ursache hierfür könnte eine Überlagerung der Effekte von Fehlgärungen sowie in den Praxissilos aufgetretenen aeroben Umsetzungsprozessen sein. Aufgrund einer sehr geringen aeroben Stabilität des Grünschnittroggens kam es bereits bei der Siloentnahme zur Erwärmung der Silagen an der Anschnittfläche.

Einfluss der aeroben Stabilität / Lagerung unter Lufteinfluss

Die aerobe Stabilität einer Silage wird üblicherweise unter Laborbedingungen ermittelt und kennzeichnet die Zeit bis zur Erwärmung der locker unter aeroben Bedingungen gelagerten Silage um mehr als 3 °C über eine konstante Raumtemperatur. Die Temperaturverlauf bei Erwärmung der Silage durch aerobe Umsetzungsprozesse zeigt häufig zwei Peaks, wobei der erste Peak mit der Vermehrung von Hefen und aeroben Essigsäurebakterien in Verbindung steht, während der zweite Peak die Entwicklung von Schimmelpilzen widerspiegelt

(Wilkinson & Davis, 2013). Abbildung II.1.8-2 zeigt beispielhaft den Temperaturverlauf einer über 7,5 Tage aerob stabilen und einer instabilen Maissilage.

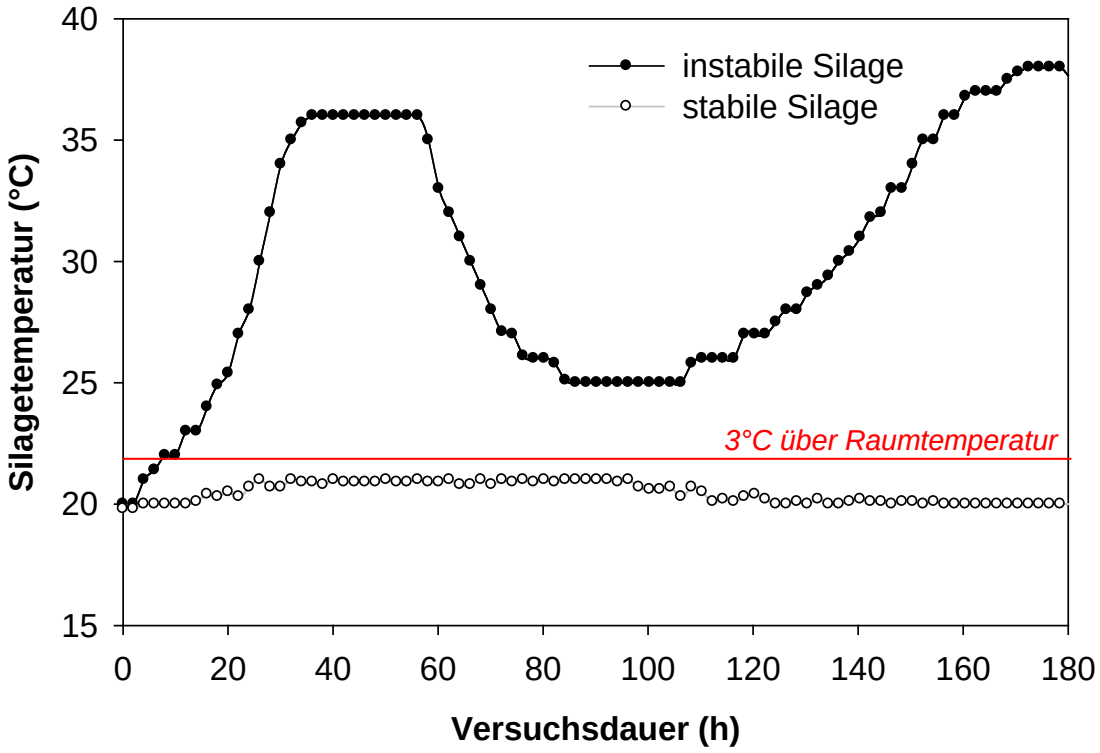
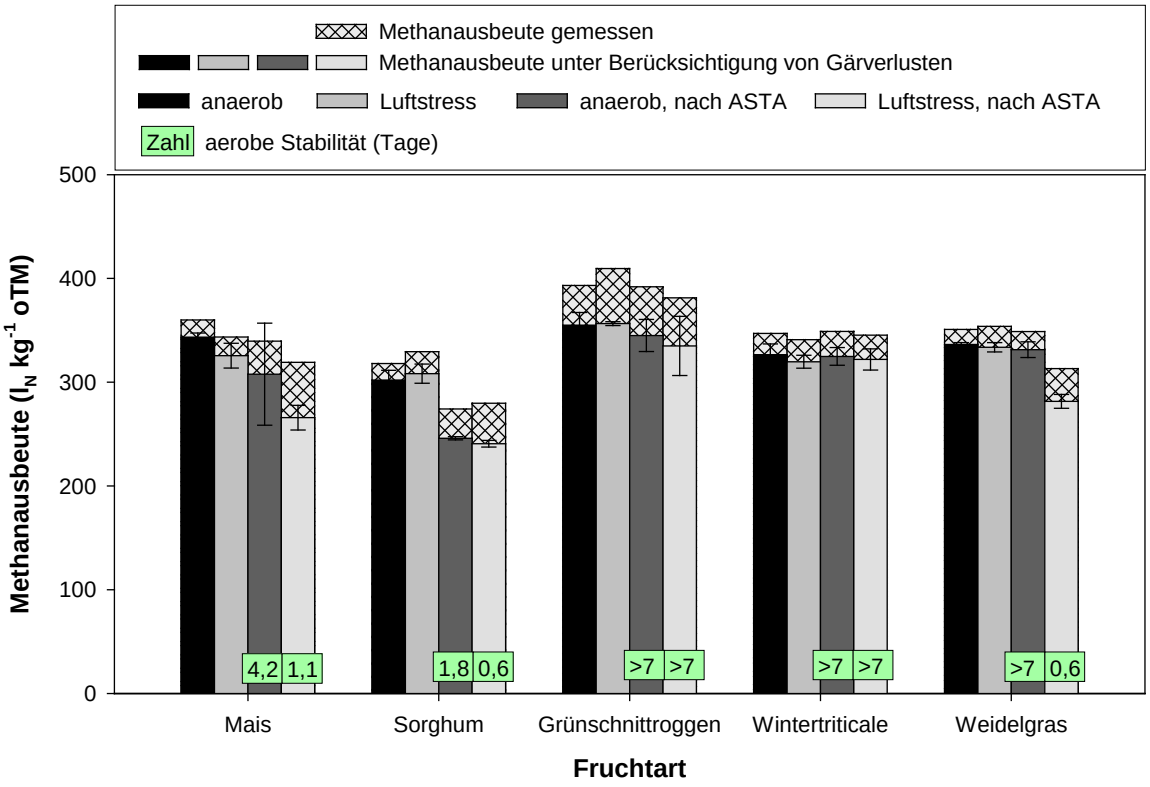


Abb. II.1.8-2: Beispiel eines Temperaturverlaufes einer über 180 Stunden aerob stabilen und einer instabilen Maissilage

Für fünf verschiedene Fruchtarten wurde der Einfluss von Luftstress, d.h. einer begrenzten Luftzufuhr während der Lagerung der Silage, sowie der Einfluss einer aeroben Lagerung über 7 Versuchstage auf die Methanbildung geprüft. Der Luftstress während der anaeroben Lagerung hatte einen vergleichsweise geringen Effekt auf die gemessene Methanausbeute. Er führte jedoch generell zu etwas höheren Silierverlusten. Im Vergleich zur strikt anaeroben Lagerung der Silagen stiegen die oTM-Verluste der Silagen ohne Silierzusatz um 0,3 bis 4,1 % (absolut). Bei Berücksichtigung der Verluste nahmen durch Luftstress während der Lagerung der Silagen die Methanausbeuten um maximal 5,2 % ab (Abb. II.1.8-3). Der größte Effekt auf die Methanbildung wurde dabei für die Maissilage ermittelt.



ASTA… Test der aeroben Stabilität, 7-tägige Lagerung der Silage ohne Luftabschluss

Abb. II.1.8-3: Im Batch-Gärtest gemessene Methanausbeuten, Methanausbeuten bei Berücksichtigung von Silierverlusten (Mittelwerte und Standardabweichung) und aerobe Stabilitäten der Silagen fünf verschiedener Fruchtarten ohne Silierzusatz bei 49-tägiger strikt anaerober Lagerung bzw. Lagerung unter Luftstress, sowie anschließender 7-tägiger aerober Lagerung

Neben der direkten Beeinflussung der Methanausbeute bzw. der Silierverluste bewirkte Luftstress während der Lagerung der Silage bei drei der fünf untersuchten Fruchtarten eine deutliche Verringerung der aeroben Stabilität. Die Methanausbeuten der Silagen nach aerober Lagerung (ASTA) waren wesentlich von der Stabilität der Silagen abhängig. Die Silagen der Wintertriticale und des Grünschnittroggens wiesen hohe aerobe Stabilitäten auf und konnten über 7 Tage ohne deutliche aerobe Umsetzungen gelagert werden. Dabei waren die Wintertriticalesilagen, möglicherweise aufgrund des geringen Restzuckergehaltes in den Silagen, allgemein durch hohe aerobe Stabilitäten gekennzeichnet. Bei Grünschnittroggen konnten hingegen vor allem für die Varianten ohne Silierzusatz, die aufgrund von Fehlgärungen hohe Gehalte an Butter- und Essigsäure beinhalteten, hohe aerobe Stabilitäten gemessen werden. Undissoziierte kurzkettige Fettsäuren wirken hemmend auf die Entwicklung pilzlicher Verderberreger, wodurch fehlvergorene Silagen mit erhöhten Essig- und Buttersäuregehalten häufig eine erhöhte aerobe Stabilität gegenüber Silagen mit guter Gärqualität und hohen Milchsäuregehalten aufweisen (Wilkinson & Davis, 2013). Aufgrund hoher aerober Stabilitäten waren die Unterschiede zwischen den Methanausbeuten vor und nach aerober Lagerung bei Wintertriticale und Grünschnittroggen gering.

Bei aeroben Umsetzungen und Erwärmung, wie sie bei den Mais-, *Sorghum*- und Weidelgrassilagen auftraten, nahm die gemessene Methanausbeute hingegen zum Teil erheblich um bis zu 18 % ab (Abb. II.1.8-3). Zusätzlich entstanden hohe oTM-Verluste, so dass nach

7-tägiger aerober Lagerung im ungünstigsten Fall um etwa ein Viertel weniger Methan aus der oTM des Erntegutes gewonnen werden konnte, verglichen mit der Lagerung ohne Lufteinfluss (Abb. II.1.8-3).
Die Ergebnisse zeigen, dass aerober Verderb oder Nacherwärmung die Methanausbeute einer Silage deutlich senkt. Dabei steigen die Verluste an Methanausbeute mit zunehmender Temperatursumme, d.h. sie sind umso höher, je länger die Erwärmung andauert und je stärker sich die Silage erwärmt (Abb. II.1.8-4). Bereits das Eindringen geringer Mengen an Luftsauerstoff in die Silage während der Lagerung kann die aerobe Stabilität der Silage erheblich mindern und das Risiko für Nacherwärmung und hohe Verluste des Methanbildungspotenzials bei der Entnahme der Silage wesentlich erhöhen.

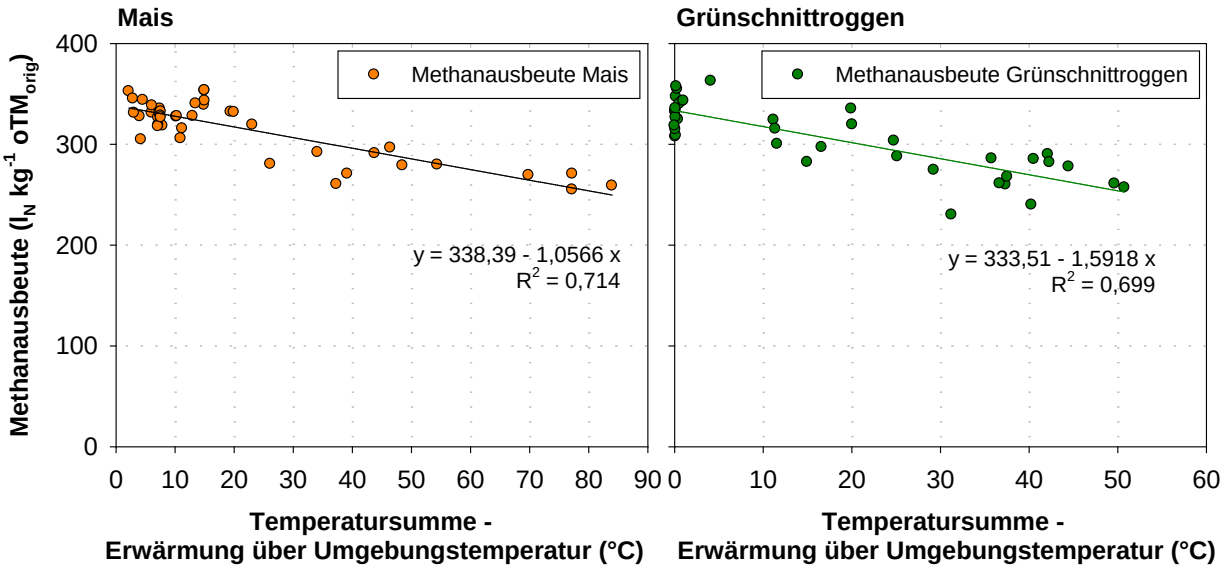


Abb. II.1.8-4: Verringerung der Methanausbeuten bei Berücksichtigung von Silierverlusten von Mais- und Grünschnittroggensilagen bei unterschiedlicher Nacherwärmung

Aerobe Umsetzungen bei Luftzufuhr in die Silage gehen mit dem Abbau noch verfügbarer WLK sowie von organischen Säuren einher (Wilkinson & Davies, 2013). Durch Abbau von bereits gebildeten organischen Säuren, insbesondere Milchsäure, steigt der pH-Wert der Silage, was wiederum die Vermehrung von Clostridien fördern kann. Abb. II.1.8-5 zeigt am Beispiel von Mais und Grünschnittroggen, für welche von identischem Erntegut durch verschiedene Silierzusätze Silagen mit unterschiedlicher aerober Stabilität erzeugt wurden, die Abnahme der Gehalten an organischer Säuren sowie den Anstieg des pH-Wertes in Abhängigkeit der Temperatursumme bei Erwärmung über Umgebungstemperatur. Je eher sich die Silage erwärmt bzw. je länger die Phase der aeroben Umsetzungen andauert, und je stärker sich die Silage erwärmt, desto höher ist die Temperatursumme. Ab einer Temperatursumme von etwa 20°C erreichten die pH-Werte der Silagen in den Laborversuchen bei Mais und Grünschnittroggen den neutralen Bereich, und die organischen Säuren waren fast vollständig abgebaut (Abb. II.1.8-5).

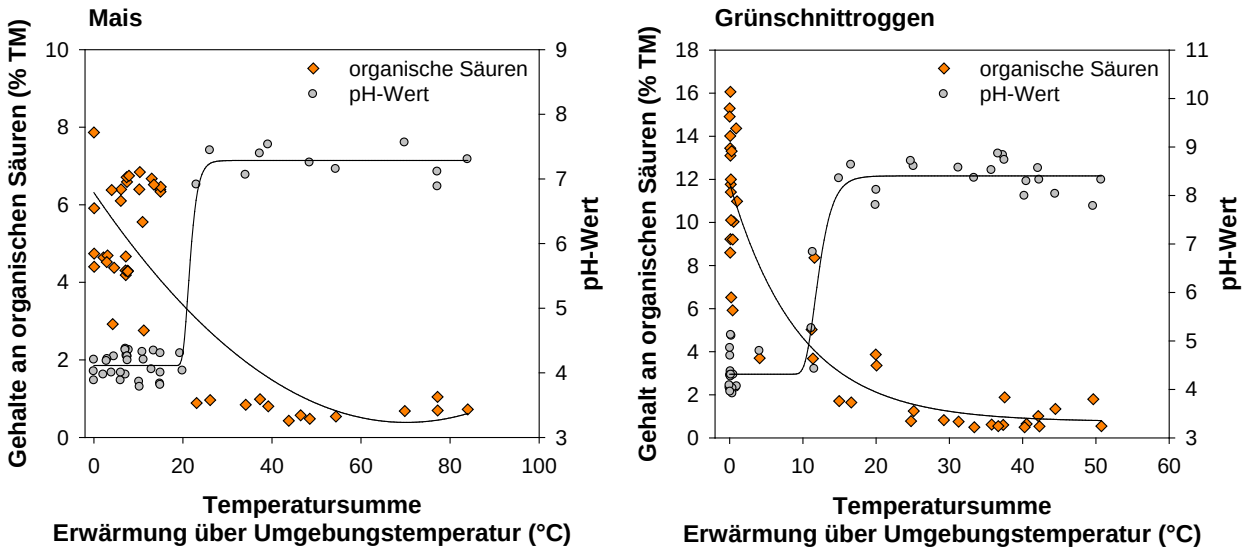
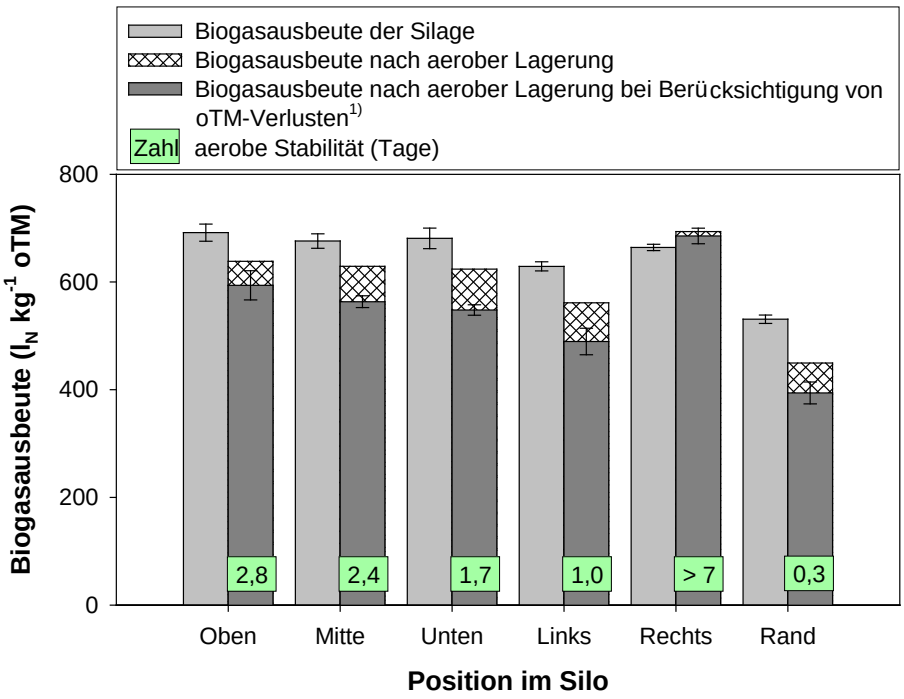


Abb. II.1.8-5: Gehalte organischer Säuren und pH-Werte von Mais- und Grünschnittroggensilagen bei unterschiedlicher Nacherwärmung

Die begleitende Untersuchung der Konservierung in den Praxisbetrieben bestätigte die Ergebnisse der Laborversuche, insbesondere die negativen Effekte aerober Instabilität auf die Biogasproduktion. Bei Mais und Grünschnittroggen wurden in beiden Praxisbetrieben sowie bei *Sorghum* im Praxissilo in Betrieb A bereits bei der Entnahme der Silage deutlich niedrigere Biogasausbeuten für die Silagepartien gemessen, die Anzeichen für Nacherwärmung bzw. aeroben Verderb zeigten (Kap. II.1.3). Dies betraf insbesondere die Randbereiche der Silos, wobei für die Maissilagen um bis zu 23 %, für die Grünschnittroggensilagen um bis zu 32 % und für die *Sorghum*silagen um bis zu 14 % geringere Biogasausbeuten für Silagepartien des Randes ermittelt wurden im Vergleich zu den übrigen Partien der Praxissilos, die keine Anzeichen von aeroben Umsetzungen aufwiesen. Eine anschließend 7-tägige aerobe Lagerung der Silagen nach der Entnahme aus den Praxissilos führte zu einer weiteren Minderung der Biogasausbeute sowie zusätzlich zu oTM-Verlusten. Die Biogasausbeuten der übrigen Silagepartien nahmen ebenfalls deutlich ab, wenn eine Erwärmung der Silage bei der aeroben Lagerung zu verzeichnen war. Insgesamt konnte bei Berücksichtigung der oTM-Verluste nach aerober Lagerung um bis zu 26 % bei Mais, um bis zu 35 % bei Grünschnittroggen und um bis zu 46 % bei *Sorghum* weniger Biogas aus der Silage gewonnen werden als direkt nach Entnahme aus dem Praxissilo. Abb. II.1.8-6 zeigt beispielhaft für die Maissilage ohne Silierzusatz in Betrieb A die Biogasausbeuten bei Entnahme der Silage aus dem Silo und nach anschließender aeroben Lagerung für unterschiedliche Positionen im Silo.



1) Verluste durch aerobe Umsetzungen

Abb. II.1.8-6: Biogasausbeuten der Maissilage in Betrieb A bei unterschiedlicher Position im Praxissilo vor und nach 7-tägiger aerober Lagerung (ausgewähltes Beispiel: 2. Probenahme der Variante ohne Silierzusatz; Mittelwert ± Standardabweichung)

Die Untersuchungen im Praxismaßstab deuten darauf hin, dass Verluste des Biogasbildungspotenzials durch aerobe Umsetzungen praxisrelevant sind und sehr unterschiedliche Ursachen haben können. Gründe für Nacherwärmung und aeroben Verderb können u.a. in einem ungünstigen Silagemanagement, in unzureichender oder fehlerhafter Abdeckung des Silos, in geringen aeroben Stabilitäten der Silage z.B. aufgrund langer Anwelkzeiten bei ungünstigen Witterungsbedingungen, oder in einer Zwischenlagerung der Silage vor Zugabe in den Fermenter liegen.

Fazit:

Die Ergebnisse der Siliermittel- und Lagerversuche deuten darauf hin, dass Fehlgärungen zu hohen Verlusten bei der Silierung, jedoch auch zu steigenden Methanausbeuten der Silagen führen, so dass sich diese beiden Effekte weitestgehend ausgleichen und die Wirkung auf die Methanbildung insgesamt gering ist.

Aerobe Umsetzungen und Nacherwärmung wirken sich hingegen durch hohe Verluste und Verringerung der Methanausbeute erheblich negativ auf die Methanbildung aus. Innerhalb weniger Tage der Lagerung unter aeroben Bedingungen kann bis zu 50 % der potenziellen Biogasproduktion aus der oTM verloren gehen. Der Vermeidung von aerober Instabilität für die Nutzungsrichtung Biogasproduktion durch gutes Silagemanagement, und rasche und saubere Entnahme der Silage aus dem Silo kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Schon das Eindringen geringer Mengen an Luftsauerstoff in die Silage während der Lagerung, z.B. durch fehlerhafte oder defekte Siloabdeckung, kann die aerobe Stabilität der Silage deutlich herabsetzen und sollte bestmöglich verhindert werden.

II.1.9 Bewertung neuer Siliermittel für die Biogasproduktion

Für die Erzeugung von Biogassilagen wird derzeit eine Vielzahl neuer Silierzusätze angeboten, die eine Reduzierung von Energieverlusten bei der Silierung, z.T. den Aufschluss des silierten Pflanzenmaterials sowie höhere Methanausbeuten bzw. Methanhektarerträge versprechen. Für zuckerreiche Energiepflanzen im oberen TM-Bereich, wie Mais oder Zuckerhirse, sind dies vor allem Silierzusätze mit heterofermentativen Milchsäurebakterien bzw. einer Kombination aus homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterien, die durch Bildung von erhöhten Anteilen an Essigsäure im Gärsäuremuster auf eine Verbesserung der aeroben Stabilität und auf positive Effekte beim Gärprozess in der Biogasanlage abzielen. Für zuckerärmere Energiepflanzen im unteren TM-Bereich, wie Grünschnittroggen, Grasmischungen oder Zwischenfrüchte, werden, ähnlich der Zusätze für die Futtermittelkonservierung, Silierzusätze mit homofermentativen Milchsäurebakterien oder Siliersalze zur Unterstützung der Milchsäuregärung bzw. zur Hemmung von Buttersäurebildnern bei der Silierung angeboten. Auch Produkte zur kombinierten Verbesserung des Gärverlaufes und Erhöhung der aeroben Stabilität sind für Biogassilagen verfügbar. Im vorliegenden Projekt wurden verschiedene, für die Biogasproduktion angebotene Silierzusätze mit herkömmlichen Silierzusätzen für Futtersilagen verglichen und hinsichtlich der Wirkung auf Gärsäuremuster und aerober Stabilität untersucht. Weiterhin wurden Silierverluste sowie die Methanbildung bei unterschiedlichen Lagerbedingungen, d.h. bei strikt anaerober Lagerung, bei Lagerung unter Luftstress und bei aerober Lagerung nach Entnahme der Silage, ermittelt.

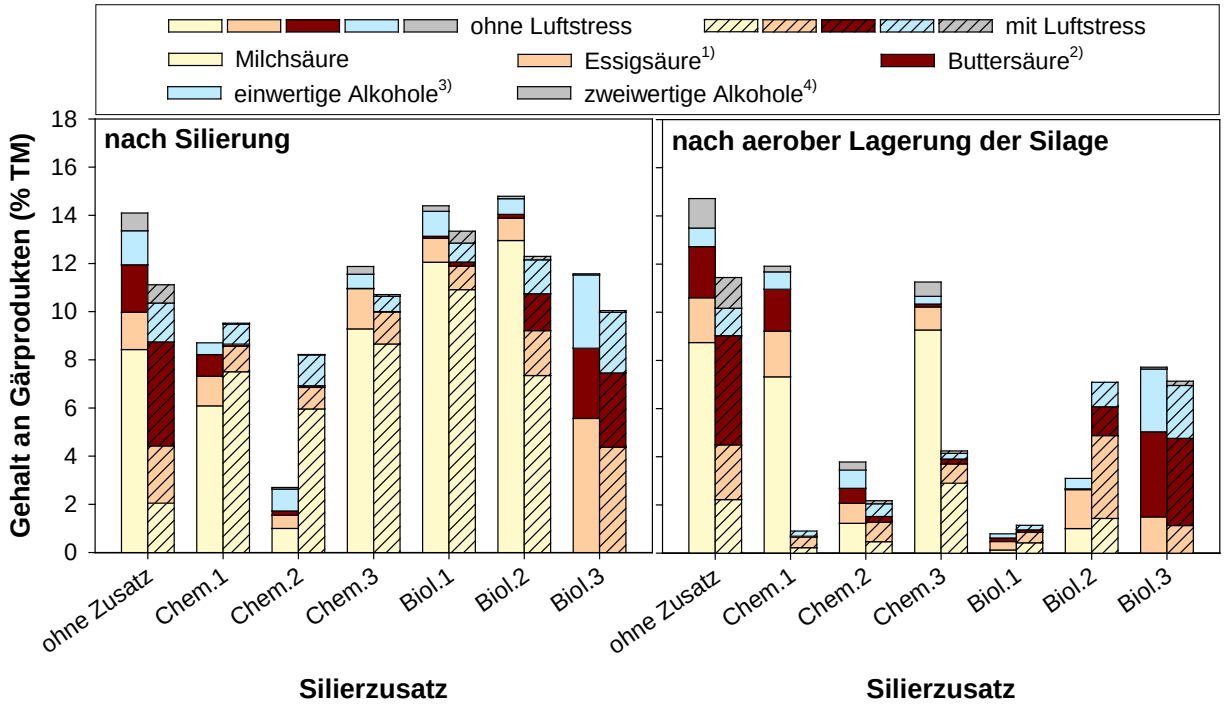
Der Einsatz von Siliermitteln für zuckerärmere Energiepflanzen im unteren TM-Bereich wurde am Beispiel von Grünschnittroggen im Erntejahr 2010 untersucht. Das Erntegut des Grünschnittroggens, das für die Silierversuche verwendet wurde, war aufgrund eines geringen TM-Gehaltes von im Mittel 17,9 % und einer hohen Pufferkapazität als schwer silierbar zu bewerten. Ungünstige Witterungsbedingungen bei der Ernte bewirkten auch nach einer Feldliegezeit von vier Tagen kein ausreichendes Anwelken des Erntegutes. Die lange Feldliegezeit ist mögliche Ursache für einen hohen Besatz an Hefen und Schimmelpilzen von $6{,}4 \cdot 10^7$ bis $3{,}3 \cdot 10^8$ KbE (Kolonie bildende Einheiten) je g Frischmasse.
Da bei schwer silierbarem Ausgangsmaterial in erster Linie das Risiko für Fehlgärungen besteht, wurden vorrangig Silierzusätze zur Verbesserung des Gärverlaufes in die Untersuchung einbezogen (Chem. 1, Chem. 2, Biol. 1, Biol. 2). Zusätzlich wurde ein chemisches Siliermittel mit kombinierter Wirkung zur Verbesserung des Gärverlaufes und zur Erhöhung der aeroben Stabilität getestet (Chem. 3). Weiterhin kam ein biologischer Silierzusatz mit heterofermentativen Milchsäurebakterien, die den Aufschluss von Faserbestandteilen und damit höhere Methanausbeuten bewirken sollen, zur Anwendung (Biol. 3). Art und Wirkrichtung der im Grünschnittroggen geprüften Silierzusätze sind in Tabelle II.1.9-1 zusammengefasst.

Tab. II.1.9-1: Beschreibung der im Grünschnittroggen (Erntejahr 2010) geprüften Silierzusätze

Kürzel	Wirksame Inhaltsstoffe	Anwendung	Anwendungsbereich	Applikationsrate
Chem. 1	Hexamin, Natriumnitrit	Verbesserung der Vergärung von schwer sowie mittelschwer bis leicht silierbarem Futter im unteren TM-Bereich	Tierfütterung	3 l/t FM
Chem. 2	Ameisensäure, Natriumformiat	Verbesserung der Vergärung von schwer silierbarem Futter	Tierfütterung	4,5 l/t FM
Chem. 3	Hexamin, Natriumnitrit, Natriumbenzoat, Natriumpropionat	Unterdrückung von Clostridien, Listerien, coliformen Keimen sowie Hefen und Schimmelpilze bei Grünfutter	Biogasproduktion und Tierfütterung	3 l/t FM
Biol. 1	Homofermentative Milchsäurebakterien	Verbesserung der Vergärbarkeit von mittelschwer bis leicht silierbarem Futter; Verbesserung der Verdaulichkeit	Tierfütterung	$3{,}0 \cdot 10^5$ KbE/g FM
Biol. 2	Homofermentative Milchsäurebakterien	Verbesserung der Vergärung von eiweißreichen, zuckerarmen Energiepflanzen im unteren TM-Bereich	Biogasproduktion	$2{,}0 \cdot 10^5$ KbE/g FM
Biol. 3	Heterofermentative Milchsäurebakterien	Verbesserung des enzymatischen Abbaus von Pflanzenfasern in der Biogasanlage, geringerer Eigenstromverbrauch; Verbesserung der aeroben Stabilität	Biogasproduktion	$1{,}1 \cdot 10^5$ KbE/g FM

Entsprechend der wirksamen Inhaltsstoffe der Silierzusätze wurden Grünschnittroggensilagen mit unterschiedlichem Gärsäuremuster erzeugt (Abb. II.1.9-1). Bei strikt anaerober Lagerung wiesen die Silagen ohne Zusatz hohe Anteile an Milchsäure, jedoch auch hohe Buttersäuregehalte und damit eine schlechte Gärqualität auf. Die oTM-Verluste lagen im Mittel bei 11 %. Luftstress während der Silierung führte zu einer weiteren Erhöhung des Buttersäure- und zu einer Verringerung des Milchsäuregehaltes, wobei die oTM-Verluste auf im Mittel 15 % stiegen. Durch Zusatz der chemischen Siliermittel konnten die Buttersäuregärung während der Silierung weitestgehend verhindert, die Gärqualität verbessert und die oTM-Verluste auf 6 bis 7 % gesenkt werden. Der Zusatz von Ameisensäure (Chem. 2) bewirkte allgemein eine Einschränkung der Gärungsintensität und führte bei strikt anaerober Lagerung zu einem geringen Anteil aller Gärprodukte in den Silagen. Bei Lagerung unter Luftstress wiesen die Silagen mit chemischen Zusätzen teilweise höhere Anteile an Milchsäure auf als bei strikt anaerober Lagerung. Es ist davon auszugehen, dass zum Erreichen eines stabil niedrigen pH-Wertes unter Lufteinfluss hier etwas höhere Säuregehalte notwendig waren. Die niedrigsten pH-Werte und höchsten Milchsäuregehalte zeigten die strikt anaerob gelagerten Grünschnittroggensilagen bei Zusatz der biologischen Siliermittel mit homofermentativen Milchsäurebakterien (Biol. 1 und Biol. 2). Durch Zusatz leistungsstarker Milchsäurebakterien konnten die Milchsäuregärung gefördert und „sehr gute“ Silagen erzeugt, d.h. die Gärqualität der Silagen wesentlich verbessert werden. Die oTM-Verluste dieser Silagen waren mit 4 bis 5 % am niedrigsten. Luftstress während der Silierung minderte jedoch den Siliererfolg, wobei bei Zusatz des Siliermittels Biol. 2 keine ausreichende Absenkung des pH-Wertes und Unterdrückung der Buttersäurebildner erreicht wurde. Der Zusatz heterofermentativer Milchsäurebakterien wird für Fruchtarten im unteren TM-Bereich, wie Grünschnittroggen, nicht empfohlen. Er führte zu hohen Gehalten an Essig- und Buttersäure so-

wie Ethanol und Propanol, wobei die erzeugten Silagen ausschließlich eine sehr schlechte Gärqualität aufwiesen (Abb. II.1.9-1). Sowohl bei strikt anaerober Lagerung als auch bei Lagerung unter Luftstress wurde bei diesen Varianten keine Milchsäure gebildet und es traten hohe oTM-Verluste von 13 bis 15 % auf.



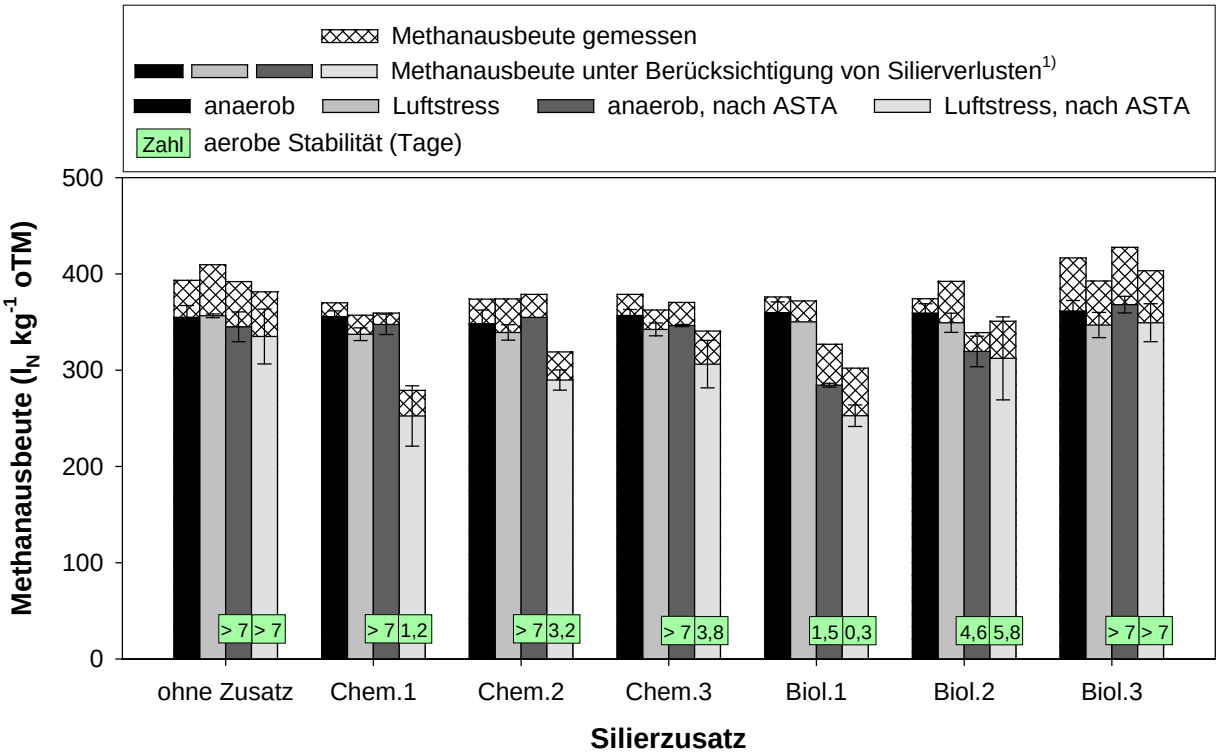
1) Summe aus Essig- und Propionsäure; 2) Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure, Capronsäure; 3) Summe aus Ethanol und Propanol; 4) Summe aus 1,2-Propandiol und 2,3-Butandiol

Abb. II.1.9-1: Gehalte an Gärprodukten in den Grünschnittroggensilagen bei Zusatz verschiedener chemischer und biologischer Siliermittel nach 49-tägiger strikt anaerober Lagerung bzw. Lagerung unter Luftstress, sowie anschließender 7-tägiger aerober Lagerung (Mittelwerte aus jeweils 3 Wiederholungen)

Bei der im Anschluss an die Silierung durchgeführten 7-tägigen aeroben Lagerung der Silagen wurden für den strikt anaerob silierten Grünschnittroggen ohne Zusatz sowie mit chemischen Zusätzen keine Erwärmung und keine deutliche Änderung im Gärsäuremuster bzw. eine leichte Erhöhung der Anteile an Gärprodukten festgestellt. Der strikt anaerob und unter Zusatz von homofermentativen Milchsäurebakterien silierte Grünschnittroggen war hingegen nicht stabil, wobei die aeroben Umsetzungen mit einem deutlichen Abbau der Gärsäuren einhergingen. Dies resultierte in hohen Verlusten an oTM und hohen pH-Werten > 8 der Silagen nach aerober Lagerung. Die Grünschnittroggensilage mit Zusatz von heterofermentativen Milchsäurebakterien (Biol. 3) war über 7 Tage aerob stabil, wobei sich jedoch auch in dieser Variante der Gehalt an Essigsäure deutlich verringerte. Bei Silierung des Grünschnittroggens unter Luftstress waren nur die Silagen ohne Zusatz bzw. mit dem Zusatz Biol. 3 über 7 Tage der aeroben Lagerung stabil. Bei den übrigen Silagen kam es ebenfalls zu Nacherwärmung und dem Abbau der Gärprodukte der Silierung (Abb. II.1.9-1).

Sowohl der Gärverlauf bei der Silierung als auch aerobe Umsetzungsprozesse beeinflussten die Methanbildung. Bei den unter strikt anaeroben Bedingungen erzeugten Silagen wurden für die Silagen mit schlechter Gärqualität und hohen Buttersäuregehalten (Variante ohne Zusatz und mit Zusatz Biol. 3) die höchsten Methanausbeuten von 393 bis 417 l_N/kg oTM gemessen (Abb. II.1.9-2). Hier traten jedoch auch die höchsten Masseverluste bei der Silierung auf. Die gemessenen Methanausbeuten der Silagen mit chemischen Silierzusätzen bzw. biologischen Silierzusätzen mit homofermentativen Milchsäurebakterien unterschieden sich mit 370 bis 379 l_N/kg oTM nur gering. Bei Berücksichtigung der Silierverluste glichen sich die Methanausbeuten aller Siliermittelvarianten weitestgehend an und lagen maximal bei 3 - 4 % (Abb. II.1.9-2). Eine eindeutige Vorzugsvariante bzw. höhere Methanausbeuten durch Aufschlusseffekte konnten nicht ermittelt werden.

Die Silierung unter Luftstress führte bei allen Varianten zu etwas höheren Silierverlusten bzw. einer bis zu 5 % geringeren Methanausbeute bei Berücksichtigung der Gärverluste. Die aerobe Lagerung hatte hingegen einen erheblichen Einfluss auf die Methanausbeuten der Grünschnittroggensilagen. Bei Instabilität verringerte sich die gemessene Methanausbeute um bis zu 25 % gegenüber der strikt anaerob gelagerten Silage. Zusätzlich traten hohe oTM-Verluste auf, so dass um bis zu 30 % weniger Methan bezogen auf die vor der Silierung vorhandene oTM erzeugt werden konnte. Hohe Verluste des Methanbildungspotenzials durch aerobe Umsetzungen traten dabei vor allem bei den Silagen mit Zusatz Chem. 1 und Biol. 1 mit den geringsten aeroben Stabilitäten bei Lagerung unter Luftstress auf.



ASTA… Test der aeroben Stabilität, 7-tägige Lagerung der Silage ohne Luftabschluss
1) Gärverluste sowie Verluste durch aerobe Umsetzungen

Abb. II.1.9-2: Im Batch-Gärtest gemessene Methanausbeuten, Methanausbeuten bei Berücksichtigung von Silierverlusten (Mittelwerte und Standardabweichung) und aerobe Stabilitäten der Grünschnittroggensilagen bei Zusatz verschiedener chemischer und biologischer Siliermittel nach 49-tägiger strikt anaerober Lagerung bzw. Lagerung unter Luftstress, sowie anschließender 7-tägiger aerober Lagerung

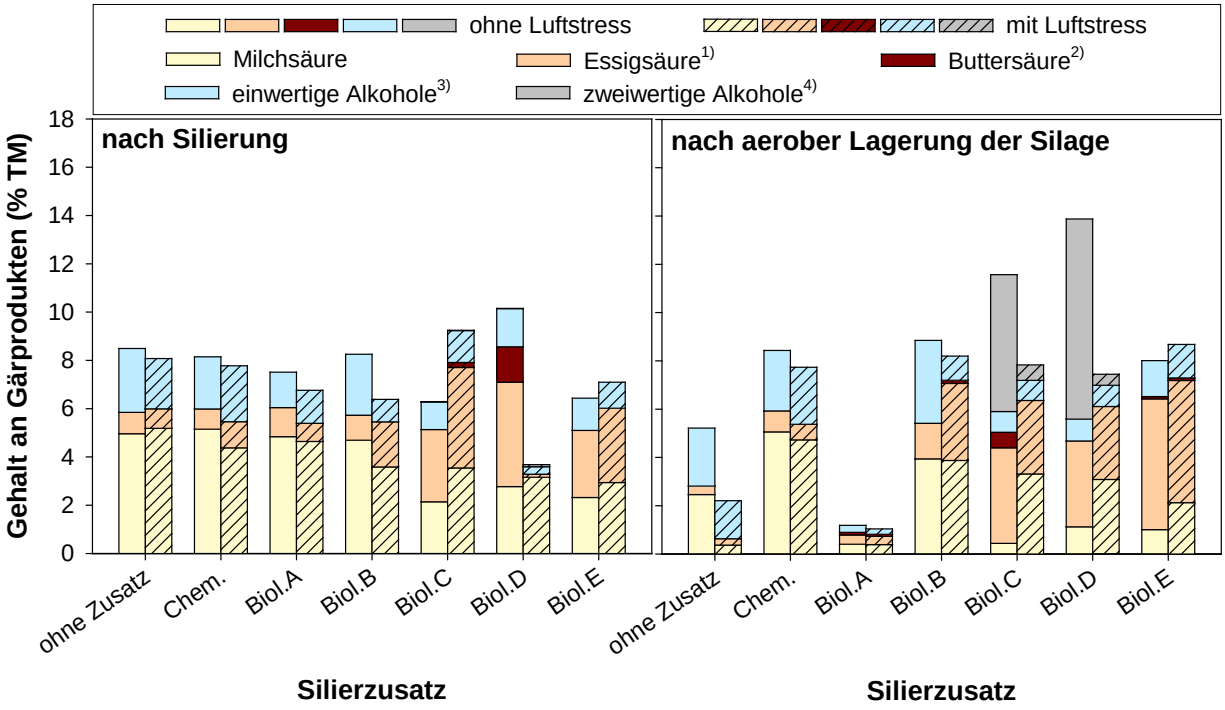
Die Untersuchung der Wirkung verschiedener Siliermittel im Grünschnittroggen hat insgesamt gezeigt, dass durch die geprüften Silierzusätze zur Verbesserung des Gärverlaufes die beabsichtigte Wirkung generell erzielt und die Gärqualitäten der Grünschnittroggensilage erhöht werden konnten. Dabei wurden Masseverluste bei der Silierung verringert, insgesamt war der Effekt auf die Methanbildung bei Berücksichtigung der Silierverluste jedoch gering. Besteht die Gefahr der Nacherwärmung z.B. aufgrund ungünstiger Bedingungen bezüglich Verdichtung der Silage, Siloabschluss und –abdeckung oder ist eine längere Zwischenlagerung nach Entnahme der Silage notwendig, dann sind Silierzusätze zur Verbesserung des Gärverlaufes, die hohe Milchsäuregehalte in den Silagen fördern, nicht bzw. nur in Kombination mit der Wirkrichtung „Verbesserung der aeroben Stabilität" zu empfehlen. Lange Feldliegezeiten beim Anwelken können einen hohen Besatz an Hefen und Schimmelpilzen im Siliergut bewirken und damit die Nacherwärmung bei Luftzutritt in die Silage begünstigen. Ein eindeutiger Vorteil der speziell für die Biogasproduktion angebotenen Siliermittel gegenüber Siliermitteln für Futtersilagen bezüglich der Methanbildung konnte im Grünschnittroggen nicht nachgewiesen werden.

Der Siliermitteleinsatz zur Konservierung von Energiepflanzen mit guter Siliereignung im mittleren bis oberen TM-Bereich wurde für Mais, *Sorghum*, Wintertriticale-GPS und den 2. Schnitt einer Weidelgrasmischung untersucht. Als Silierzusätze kamen ein chemisches sowie vier biologische Präparate zur Verbesserung der aeroben Stabilität zum Einsatz (Chem., Biol. B, Biol. C, Biol. D, Biol. E). Zum Vergleich wurde ein biologischer Silierzusatz mit homofermentativen Milchsäurebakterien zur Verbesserung des Gärverlaufes mitgeführt (Biol. A). Art und Wirkrichtung der geprüften Silierzusätze sind in Tabelle II.1.9-2 zusammengefasst. Im Folgenden werden die Ergebnisse am Beispiel des Versuches mit Mais vorgestellt.

Tab. II.1.9-2: Beschreibung der im Mais (Erntejahr 2010) geprüften Silierzusätze

Kürzel	**Wirksame Inhaltsstoffe**	**Anwendung**	**Anwendungsbereich**	**Applikationsrate**
Chem.	Natriumbenzoat, Natriumpropionat	Sicherung der aeroben Stabilität vom Mais-, CCM-, LKS und Ganzpflanzensilagen	Tierfütterung und Biogasproduktion	4,5 l/t FM TM 30-35 %
Biol. A	Homofermentative Milchsäurebakterien	Verbesserung der Vergärbarkeit von mittelschwer bis leicht silierbarem Futter; Verbesserung der Verdaulichkeit	Tierfütterung	$3{,}0 \cdot 10^5$ KbE/g FM
Biol. B	Heterofermentative Milchsäurebakterien, Enzyme (β-glucanase, α-amylase, xylanase)	Verbesserung der aeroben Stabilität	Tierfütterung	$2{,}55 \cdot 10^5$ KbE/g FM
Biol. C	Homo- und heterofermentative Milchsäurebakterien	Silierung von Energiepflanzen; Verbesserung der aeroben Stabilität	Biogasproduktion	$2{,}0 \cdot 10^5$ KbE/g FM
Biol. D	Homo- und heterofermentative Milchsäurebakterien	Silierung kohlenhydratreichen Erntegutes wahlweise für die Biogasproduktion oder Tierernährung	Biogasproduktion und Tierfütterung	$2{,}0 \cdot 10^5$ KbE/g FM
Biol. E	Heterofermentative Milchsäurebakterien	Verbesserung des enzymatischen Abbaus von Pflanzenfasern in der Biogasanlage, geringerer Eigenstromverbrauch; Verbesserung der aeroben Stabilität	Biogasproduktion	$1{,}1 \cdot 10^5$ KbE/g FM

Die über 49 Tage bei strikt anaerober Lagerung erzeugten Maissilagen wiesen sowohl ohne Silierzusatz als auch in den Varianten mit Silierzusatz fast ausschließlich ausreichend niedrige pH-Werte und sehr gute Gärqualitäten auf. Die oTM-Verluste lagen mit 4 bis 7 % vergleichsweise gering. Lediglich bei Zusatz des Siliermittels Biol. D waren eine schlechte Gärqualität der Silagen und Buttersäuregehalte von 1,5 % TM zu verzeichnen. In den Gärsäuremustern der Silagen ohne Zusatz, mit chemischem Silierzusatz sowie mit Zusatz Biol. A und Biol. B, die vorrangig für die Konservierung von Futtersilagen angeboten werden, dominierten hohe Milchsäuregehalte von 4,7 bis 5,2 % TM, während der Anteil an Essigsäure eher gering war. Trotz Zusatz heterofermentativer Milchsäurebakterien, die die verstärkte Bildung von Essigsäure bewirken, wurde bei der Maissilage mit Siliermittel Biol. B der Essigsäuregehalt nicht wesentlich erhöht. Durch Zusatz der biologischen Siliermittel Biol. C, Biol. D und Biol. E mit heterofermentativen Milchsäurebakterien für die Biogasproduktion wurden entsprechend der Wirkrichtung geringere Anteile an Milchsäure und deutlich höhere Gehalte an Essigsäure gebildet (Abb. II.1.9-3). Die heterofermentative Bildung von Milch- und Essigsäure ist mit etwas höheren Gärverlusten verbunden verglichen mit dem homofermentativen Umsetzungspfad (McDonald et al., 1991). Für die Maissilagen wurden bei Zusatz der Siliermittel mit heterofermentativen Milchsäurebakterien um 1-2 % (abs.) höhere oTM-Verluste gegenüber der Kontrolle sowie der Silage mit Zusatz homofermentativer Milchsäurebakterien und um 2-3 % (abs.) höhere oTM-Verluste verglichen mit den Silagen mit chemischem Zusatz ermittelt.



1) Summe aus Essig- und Propionsäure; [2)] Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure, Capronsäure; [3)] Summe aus Ethanol und Propanol; [4)] Summe aus 1,2-Propandiol und 2,3-Butandiol

Abb. II.1.9-3: Gehalte an Gärprodukten in den Maissilagen bei Zusatz eines chemischen und verschiedener biologischer Siliermittel nach 49-tägiger strikt anaerober Lagerung bzw. Lagerung unter Luftstress, sowie anschließender 7-tägiger aerober Lagerung (Mittelwerte aus jeweils 3 Wiederholungen)

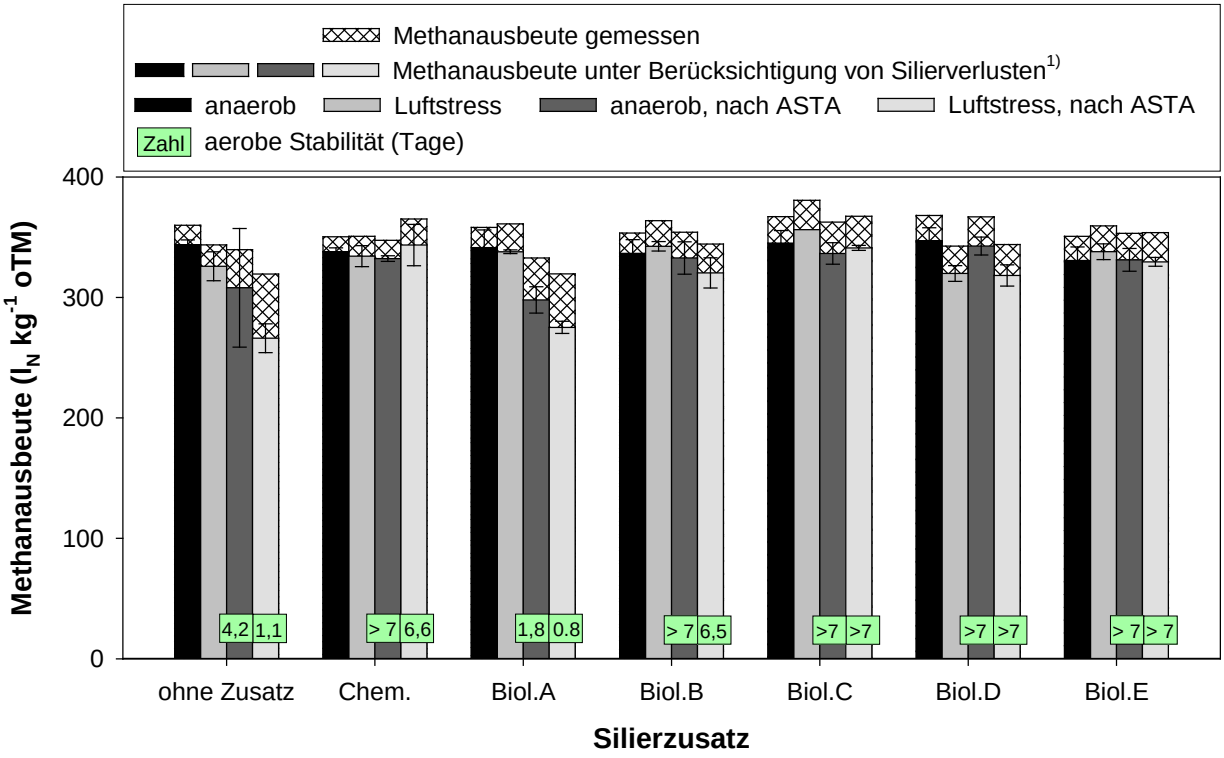
Die Silierung unter Luftstress bewirkte bei den Varianten ohne Zusatz sowie mit Zusatz Chem., Biol. A und Biol. B eine leichte Verringerung der Anteile an Gärprodukten in den Silagen. Bei den mit den Präparaten Biol. C und Biol. E konservierten Maissilagen nahmen die Gehalte an Gärprodukten hingegen leicht zu, während sich bei dem Zusatz Biol. D die Gärsäure- und Alkohohlgehalte deutlich verringerten (Abb. II.1.9-3). Bei allen unter Luftstress konservierten Silagen wurden um bis zu 2 % höhere oTM-Verluste gegenüber den strikt anaerob erzeugten Silagen gemessen. Der Luftstress wirkte sich zudem negativ auf die aerobe Stabilität der Silagen aus (Abb. II.1.9-4).

Die Maissilage ohne Silierzusatz wies bei strikt anaerober Silierung eine vergleichsweise gute aerobe Stabilität von 4,2 Tagen auf, die jedoch bei Konservierung unter Luftstress auf nur 1,1 Tage verringert wurde. Für alle geprüften Silierzusätze mit Wirkrichtung „Verbesserung der aeroben Stabilität“ (Chem., Biol. B, Biol. C, Biol. D und Biol. E) konnte eine deutliche Erhöhung der aeroben Stabilität des Maises nachgewiesen werden (Abb. II.1.9-4). Am stärksten positiv wirkten sich die speziell für die Biogasproduktion angebotenen biologischen Silierzusätze Biol. C, Biol. D und Biol. E auf die aerobe Stabilität der Maissilage aus, wobei trotz Silierung unter Luftstress über mehr als 7 Tage aerob stabile Silagen erzeugt wurden. Bei Zusatz des Siliermittels mit homofermentativen Milchsäurebakterien war hingegen, wie bereits bei Grünschnittroggen beobachtet, die geringste aerobe Stabilität zu verzeichnen. Erwärmung und aerobe Umsetzungen bei den Varianten ohne Zusatz und mit Zusatz Biol. A führten auch bei Mais zu einem Abbau der Gärprodukte der Silierung und damit verbunden zu einem Anstieg des pH-Wertes (Abb. II.1.9-3). Bei den stabilen Silagen ergaben sich nur geringe Änderungen im Gärsäuremuster, jedoch teilweise ein Umbau von Milch- zu Essigsäure und ein Anstieg der Alkoholgehalte (Abb. II.1.9-3).

Die Methanausbeuten der Silagen ohne und mit Berücksichtigung der Silierverluste sind der Abb. II.1.9-4 zu entnehmen. Bei strikt anaerober Konservierung lagen die gemessenen Methanausbeuten der Maissilagen mit für die Biogasproduktion angebotenen Silierzusätzen mit heterofermentativen Milchsäurebakterien um 1 bis 2 % über den gemessenen Methanausbeuten der Kontrolle ohne Zusatz. Die gemessene Methanausbeute der Variante mit chemischem Zusatz wies um 3 % niedrigere Werte auf als die Kontrolle. Bei Berücksichtigung der Silierverluste glichen sich die ohnehin geringen Unterschiede in der Methanausbeute weiter an, so dass unter anaeroben Bedingungen kein Effekt des Silierzusatzes auf die Methanausbeute festzustellen war. Eine Verbesserung der Methanbildung durch die Biogaspräparate konnte unter günstigen Silierbedingungen auch bei Mais nicht nachgewiesen werden.
Unter Lufteinfluss zeigte sich jedoch ein deutlicher Vorteil der Varianten mit Zusätzen zur Verbesserung der aeroben Stabilität bezüglich der Methanausbeute. Unter ungünstigen Bedingungen, d.h. Luftstress und 7-tägiger aerober Lagerung der Silagen, konnten durch diese Silierzusätze Verluste der Methanbildung bei Berücksichtigung der Masseverluste um 20 bis 29 % verhindert werden. Die Effekte der biologischen Siliermittel waren dabei vergleichbar mit den Effekten des chemischen Präparates. Bei den Varianten mit Luftstress und aerober Lagerung wurden die höchsten Methanausbeuten bei Berücksichtigung der Silierverluste für den biologischen Zusatz Biol. B und den chemischen Silierzusatz ermittelt (Abb. II.1.9-4).

Die Ergebnisse der Siliermittelversuche mit *Sorghum b. x s.*, Wintertriticale-GPS und Weidelgras stimmen im Wesentlichen mit den Ergebnissen des Maises überein. Ein deutlich positiver Effekt der Biogaspräparate auf die Methanausbeute bei anaeroben, günstigen Silier-

bedingungen konnte nicht ermittelt werden. Leicht höhere gemessene Methanausbeuten resultieren aus höheren Anteilen an Essigsäure und Alkoholen im Gärsäuremuster und werden durch etwas höhere Gärverluste bei der Silierung relativiert. Unter Lufteinfluss konnten durch die Präparate zur Verbesserung der aeroben Stabilität eine Erwärmung der Silage verzögert und hohe Verluste der Methanbildung verhindert werden. Insbesondere die Präparate Biol. C und Biol. E konnten positiv bezüglich der Sicherung des Methanbildungspotenzials bei unzureichendem Luftabschluss bewertet werden.

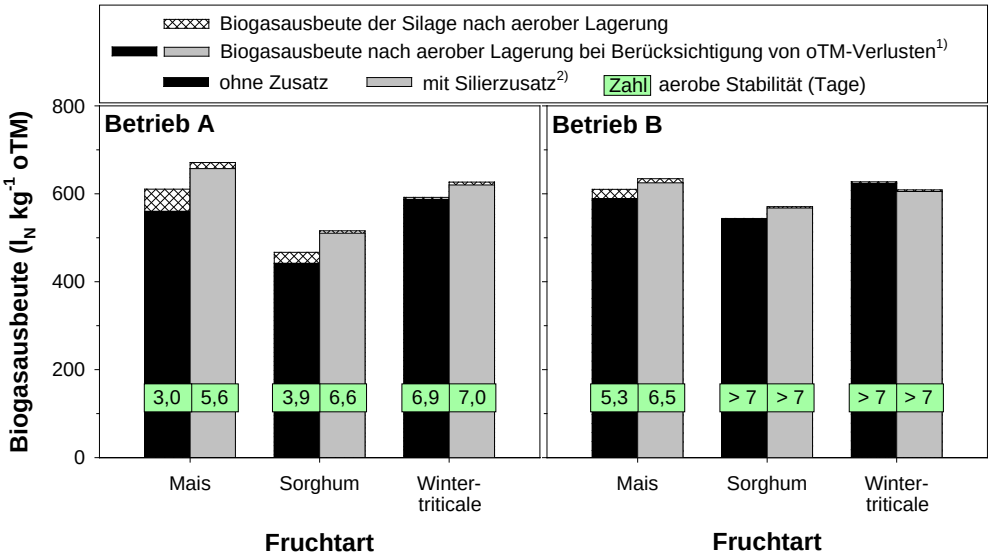


ASTA… Test der aeroben Stabilität, 7-tägige Lagerung der Silage ohne Luftabschluss
1) Gärverluste sowie Verluste durch aerobe Umsetzungen

Abb. II.1.9-4: Im Batch-Gärtest gemessene Methanausbeuten, Methanausbeuten bei Berücksichtigung von Silierverlusten (Mittelwerte und Standardabweichung) und aerobe Stabilitäten der Maissilagen bei Zusatz eines chemischen und verschiedener biologischer Siliermittel nach 49-tägiger strikt anaerober Lagerung bzw. Lagerung unter Luftstress, sowie anschließender 7-tägiger aerober Lagerung

Die Wirkung des Siliermittels Biol. C auf die aerobe Stabilität und die Vermeidung von Verlusten unter Lufteinfluss bei der Biogasproduktion aus energiereichen Silagen konnte auch in Praxisversuchen überprüft werden. Abb. II.1.9-5 fasst die gewichteten Mittelwerte der Biogasausbeuten von Praxissilagen ohne und mit Zusatz des Siliermittels Biol. C nach Entnahme und anschließender 7-tägiger aerober Lagerung für Mais, *Sorghum b. x s.* und Wintertriticale zusammen. Während direkt nach Entnahme der Silagen aus den Praxissilos die Unterschiede zwischen den Biogasausbeuten der Silagen ohne und mit Silierzusatz gering waren (vgl. Abb. II.1.3-6), hatte der Silierzusatz bei einer weiteren aeroben Lagerung der Silagen überwiegend einen erkennbar positiven Effekt auf die Biogasproduktion (Abb. II.1.9-5). Im Mittel waren die Maissilagen und die *Sorghum*silage in Betrieb A mit Silierzusatz um 1,2 bis 2,7 Tage länger aerob stabil als ohne Silierzusatz. Die Wintertriticalesilagen in beiden Be-

trieben sowie die *Sorghum*silage in Betrieb B wiesen hingegen sowohl ohne als auch mit Silierzusatz hohe aerobe Stabilitäten über die gesamte Dauer der aeroben Lagerung auf (Abb. II.1.9.5). Insgesamt wurden mit Ausnahme der Wintertriticalesilagen in Betrieb B um 5 bis 17 % höhere Biogasausbeuten im gewichteten Mittel bei Berücksichtigung der oTM-Verluste erreicht verglichen jeweils mit der Variante ohne Silierzusatz.

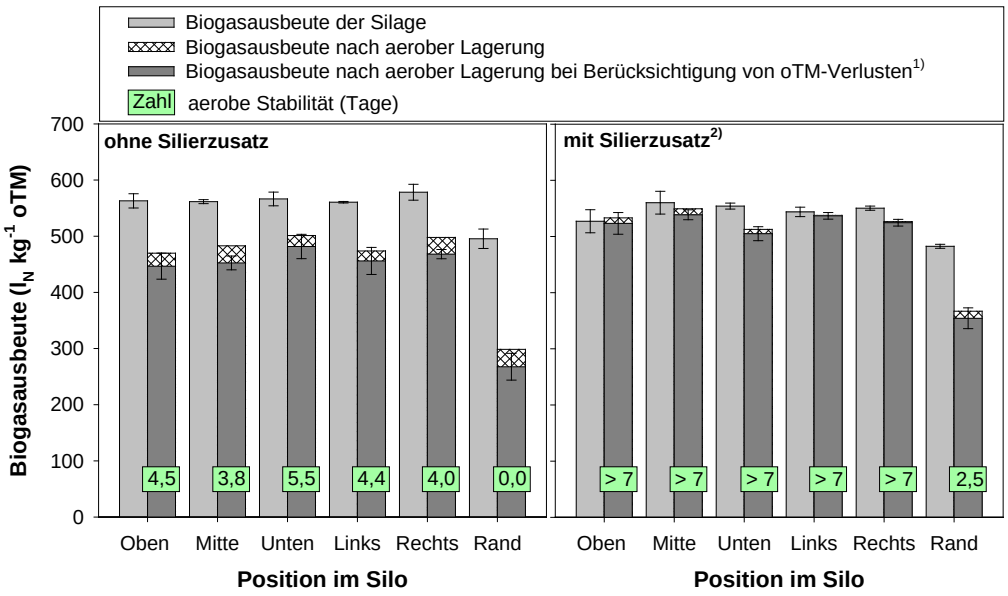


1) Verluste durch aerobe Umsetzungen

2) Silierzsatz Biol. C mit homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterien (Beschreibung in Tab. II.1.9-2)

Abb. II.1.9-5: Gewichtetes Mittel der Biogasausbeuten ohne und mit Berücksichtigung von oTM-Verlusten sowie aerobe Stabilitäten von Praxissilagen der Betriebe A und B nach 7-tägiger aerober Lagerung im Anschluss an die Entnahme aus dem Silo, jeweils ohne und mit Silierzusatz Biol. C

Auch mit Silierzusatz Biol. C wurden in den Randbereichen der Praxissilos bei der Entnahme der Silagen geringere Biogasausbeuten ermittelt als für die übrigen Positionen im Silo. Dies zeigt beispielhaft die Verteilung der Biogasausbeute über die unterschiedlichen Positionen im Silo mit *Sorghum b. x s.* in Betrieb A (Abb. II.1.9-6). Der Silierzusatz Biol. C bewirkte jedoch eine Verbesserung der aeroben Stabilität der Silagen für alle Positionen im Silo und damit geringe Verluste durch aerobe Umsetzungen bei einer weiteren aeroben Lagerung der Silagen (Abb. II.1.9-6).



1) Verluste durch aerobe Umsetzungen

2) Silierzsatz Biol. C mit homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterien (Beschreibung in Tab. II.1.9-2)

Abb. II.1.9-6: Biogasausbeuten von *Sorghum*-Silage in Betrieb A ohne und mit Silierzusatz bei unterschiedlicher Position im Praxissilo vor und nach 7-tägiger aerober Lagerung (jeweils 1. Probenahme der Varianten; Mittelwert ± Standardabweichung)

Fazit:

In Labor- und Praxisversuchen konnte eine positive Wirkung der Silierzusätze für Biogassilagen entsprechend ihrer Wirkrichtung, d.h. durch Verbesserung des Gärverlaufes bei der Silierung oder durch Erhöhung der aeroben Stabilität, nachgewiesen werden. Dabei konnten insbesondere durch Silierzusätze zur Verbesserung der aeroben Stabilität bei ungünstigen Silierbedingungen, d.h. bei Lufteinfluss während der Silierung bzw. aerober Lagerung der Silage, hohe Methanverluste von bis zu 29 % vermieden werden.

Bioloische Silierzusätze mit heterofermentativen Milchsäurebakterien bzw. einer Kombination aus homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterien zur Verbesserung der aeroben Stabilität von Biogassilagen zielen auf eine deutliche Erhöhung des Essigsäuregehaltes in den Silagen ab. Damit kann eine stärkere Wirkung hinsichtlich der Erhöhung der aeroben Stabilität erreicht werden als bei entsprechenden biologischen Silierzusätzen für die Tierernährung, bei welchen die angestrebten Essigsäuregehalte durch negative Effekte auf die Futteraufnahme begrenzt sind. Die Verbesserung der aeroben Stabilität durch biologische Silierzusätze für die Biogasproduktion war bei den durchgeführten Untersuchungen vergleichbar mit der Wirkung der chemischen Siliermittel.

Unter günstigen Silierbedingungen, d.h. bei strikt anaerober Lagerung, lagen die gemessenen Methanausbeuten bei Zusatz biologischer Siliermittel für die Biogasproduktion mit heterofermentativen Milchsäurebakterien überwiegend geringfügig über den Methanausbeuten der Vergleichssilagen ohne Silierzusatz. Dies ist vorrangig auf höhere Alkoholgehalte in den Silagen zurückzuführen. Eine signifikante Erhöhung der Methanausbeute unter Berücksichtigung der Silierverluste durch einen Aufschluss der Zellwandbestandteile des Pflanzenmate-

rials bei Zusatz spezieller, für die Biogasproduktion angebotener Siliermittel war bei den durchgeführten Untersuchungen nicht eindeutig nachweisbar.

Zur Sicherung bzw. dem Erhalt des Biogasbildungspotenzials eines Erntegutes ist vor allem die Verwendung von Silierzusätzen zur Verbesserung der aeroben Stabilität empfehlenswert, insbesondere wenn keine optimalen Silier- und Lagerbedingungen gewährleistet werden können bzw. ein konkretes Risiko für die Nacherwärmung der Silage besteht. Grobe siliertechnische Fehler können jedoch auch durch die Verwendung von Silierzusätzen nicht ausgeglichen werden.

II.1.10 Handlungsempfehlungen für die Praxis

Für die Konservierung von Fruchtarten und Mischungen zur Biogaserzeugung gelten grundsätzlich die gleichen Regeln und Empfehlungen wie für die Konservierung von Futterpflanzen. Nur aus qualitativ hochwertigen, aerob stabilen Silagen mit geringen TM-Verlusten können auch hohe Biogasausbeuten erzielt werden. Folgende Empfehlungen können für die Konservierung und Nutzung von Energiepflanzen für die Biogasproduktion gegeben werden:

- Einhaltung eines optimalen Ernte-/Schnittzeitpunktes: nicht zu früh, um ausreichend hohe TM-Gehalte für eine gute Siliereignung (ca. 28 bis 40 %) zu gewährleisten und hohe Methanhektarerträge zu erzielen; nicht zu spät, um eine gute Verdichtung im Silo zu erreichen und die Verringerung der Biogasausbeute durch fortschreitende Lignifizierung zu vermeiden
- Für Gräser oder Zwischenfrüchte mit geringem TM-Gehalt, bei denen ein Anwelken möglich ist: innerhalb kurzer Zeit (ein, höchstens zwei Tage) auf optimalen TM-Gehalt anwelken (ca. 30 bis 40 %)
- Zur Vermeidung von Buttersäuregärung bei der Silierung nur gesundes, unverdorbenes Siliergut sauber einsilieren
- Für hohe Biogasausbeuten und eine gute Silierbarkeit hohe Unkrautanteile im Erntegut vermeiden
- Für eine gute Verdichtung Siliergut zerkleinern und im Silo sorgfältig verteilen (Schichthöhe max. 30 cm)
- Silobefüllung in zwei, höchstens drei Tagen, bei längerer Dauer zwischendurch abdecken
- Silo nach der Befüllung sofort luftdicht mit geeigneten Materialen zudecken: Randfolie, Unterziehfolie, Silofolie, Siloschutzgitter und Silosäcke
- Aeroben Verderb unbedingt vermeiden – bereits das Eindringen geringer Sauerstoffmengen während der Silagelagerung führt zu deutlich geringeren aeroben Stabilitäten sowie partienweise zu aerobem Verderb und Verlusten des Biogasbildungspotenzials: Verletzungen der Silofolie z.B. durch Vögel kann durch Verwendung von Siloschutzgittern entgegengewirkt werden
- Siliermittel bei ungünstigen Siliervoraussetzungen, zur Qualitätsverbesserung und Sicherung der aeroben Haltbarkeit anwenden
- Auf ordnungsgemäße Entnahme achten: Anschnittflächen nicht unnötig auflockern, ausreichend hohen Entnahmevorschub (Winter > 1,50 m bzw. Sommer > 2,50 m pro Woche) durch an den Substratmix angepasste Silogrößen gewährleisten

- Zwischenlagerungen vermeiden; bei Verzögerungen/Pausen der Siloentnahme z.B. durch Defekt der Biogasanlage Silo unbedingt abdecken
- bei begrenzten Silokapazitäten oder zur Reduzierung der Anzahl gleichzeitig geöffneter Silos und damit zur Erhöhung des Vorschubes bei der Siloentnahme kann die Erstellung von Mischsilagen aus zeitgleich geernteten Energiepflanzen-Aufwüchsen sinnvoll sein
- Um bei Mischsilagen die Siliereigenschaften einzelner Mischungspartner zu verbessern und Gärverluste bei der Silierung zu verringern oder Sickersaft zu binden die Mischung so wählen, dass der resultierende TM-Gehalt oberhalb von 30 % liegt bzw. – sofern eine Abschätzung der Vergärbarkeit möglich ist – ein VK oberhalb von 45 erreicht wird.

II.1.11 Verwendung der Zuwendung

Die Zuwendung wurde gemäß dem im Antrag formuliertem Arbeitsplan (Anhang – Anlage 1) eingesetzt. Im Projektverlauf waren, wie in den jährlichen Zwischenberichten und Erfolgskontrollberichten dargelegt, keine Änderungen in der Zielsetzung sowie Aufgabenstellung notwendig.

II.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Die Zuwendung wurde bestimmungsgemäß verwendet. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind dem Verwendungsnachweis zu entnehmen.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Untersuchungen zum Einfluss von Pflanzenart und Silierung auf Substratqualität und Biogasertrag wurden im Rahmen definierter Anbau- und Fruchtfolgesysteme über die Ansätze von EVA1 hinaus fortgeführt, um mittels einer hohen Varianten- und Wiederholungszahl eine wissenschaftlich abgesicherte Datenbasis zu generieren. Die Optimierung der Biogasproduktion verschiedener Pflanzenarten in den EVA-Fruchtfolgeversuchen wurde anhand ihrer Methanbildungspotenziale in Laborversuchen geprüft. Darauf aufbauend wurde für die gesamte Bandbreite der in den EVA-Fruchtfolgen in den unterschiedlichen Regionen und Klimaräumen angebauten Fruchtarten systematisch, mittels einheitlicher Methode, Richtwerte für Methanausbeuten erarbeitet und den Verbundpartnern für die Berechnung von Methanhektarerträgen sowie für die ökonomische und ökologische Bewertung der Fruchtfolgen zur Verfügung gestellt.

In weiteren Arbeitsschwerpunkten wurde der Einfluss von neuen Siliermitteln zur Vermeidung aerober Instabilitäten, die gleichzeitige Silierung mehrerer Pflanzenarten (Mischsilagen) und die Auswirkungen von Unkrautbesatz auf Substratbereitstellung und Substratqualität identifiziert und quantifiziert. Die Laborexperimente wurden durch großflächige Anbauversuche mit definierten Fruchtfolgen und großtechnischen Silierversuchen in Praxisbetrieben sowie dem Monitoring und der Bewertung der anaeroben Vergärung der pflanzlichen Substrate in Praxisbiogasanlagen ergänzt. Die Gesamtbewertung erfolgte auf Basis dieser im Rahmen des EVA-Verbundes generierten Datenbasis und mündete in der Formulierung von Standards für die Qualität von Biogassilagen und Handlungsempfehlungen für die Landwirtschaft.

Während der Projektlaufzeit wurde mit dem Thema „Ernte und Silierung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung – Prozessgrundlagen und Bewertung" (Herrmann, 2010) eine Dissertation verfasst. Des Weiteren erfolgte die Veröffentlichung der Ergebnisse international in wissenschaftlichen Fachartikeln mit ordentlichem Peer-Review-Verfahren sowie auf nationaler Ebene in Form von Tagungsbei- und vorträgen, Broschüren und Internetbeiträgen (s. Kap. II.6), sodass die Daten unmittelbar von anderen Forschergruppen bzw. anderen Institutionen genutzt werden können.

Die Bearbeitungsdauer und die Höhe der gewährten Zuwendungen waren mit Blick auf den Neuheitswert des erzielten Ergebnisses zweifellos angemessen.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

Mit dem erfolgreichen Abschluss des Forschungsvorhabens können die erzielten Ergebnisse wirtschaftlich und wissenschaftlich verwertet werden. Die landwirtschaftlichen Betriebe parti-

zipieren insbesondere durch betriebswirtschaftliche und verfahrenstechnische Vorteile, d.h. durch die Steigerung der Biogasproduktion und -qualität aufgrund neuer Erkenntnisse hinsichtlich geeigneter Pflanzenarten sowie der optimalen Konservierung und Lagerung der Substrate. Die gewonnenen Erkenntnisse können durch Unternehmen für die Weiterentwicklung von Siliermitteln zur Verbesserung der Silagequalität für die Biogasproduktion genutzt werden.

Die zukünftige Veröffentlichung der erarbeiteten Ergebnisse erfolgt weiterhin sowohl im Rahmen des Verbundprojektes als auch durch das ATB, welches durch wissenschaftliche Publikationen und Fachvorträge die gewonnenen Erkenntnisse vermittelt. Des Weiteren sollen die mit Hilfe des Vorhabens erarbeiteten Ergebnisse gezielt in der Bioenergieberatung sowie in der Energie Technologie Initiative (ETI)-Öffentlichkeitsarbeit eingesetzt werden. Über das Land Brandenburg hinaus wird durch dieses Projektvorhaben bzw. mit dem EVA-Verbundprojekt ein Weg aufgezeigt, der für den Agrarsektor in der gesamten Bundesrepublik und in der Europäischen Union Leitcharakter haben kann.

II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Nach Kenntnisstand des Zuwendungsempfängers sind im Berichtszeitraum keine Fälle bekannt geworden, wo vergleichbare Arbeiten parallel zu den im Projekt durchgeführten Aufgaben bei anderen Stellen durchgeführt wurden.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Dissertation

HERRMANN, C. (2010): Ernte und Silierung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung – Prozessgrundlagen und Bewertung. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, Cuvillier Verlag Göttingen, ISBN: 978-3-86955-535-5, 332 S.

Buchkapitel

SCHOLZ, V.; HEIERMANN, M.; KAULFUSS, P. (2010): Sustainability of energy crop cultivation in Central Europe (Chapter 5), p. 109-145. In: Lichtfouse, E. (Ed.) (2010): Sociology, Organic Farming, Climate Change and Soil Science. Sustainable Agriculture Reviews, Springer Netherlands, p. 478.

Publikationen

AUST, J.-H.; BARTHELMES, G.; BROZIO, S.; EBEL, G.; HEIERMANN, M.; HERRMANN, C.; IDLER, C.; MÄRTIN, M.; PIOR, H.-P.; PLÖCHL, M.; SIERZPUTOWSKI, A. (2011): Einsatzstoffe für Biogasanlagen. In: Biogas in der Landwirtschaft – Leitfaden für Landwirte und Investoren im Land Brandenburg, Potsdam, 4. Auflage, S. 29-35, verfügbar unter http://www.eti-brandenburg.de/fileadmin/user_upload/Arbeitsgruppen/ Biogas/2_Kapitel_3_und_4_aus_Biogasleitfaden.pdf

EBEL. G.; BARTHELMES G.; HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2010): Auf den Erntetermin kommt es an. Neue Landwirtschaft, Heft 7, S. 55-57.

HEIERMANN, M.; HERRMANN, C., IDLER, C.; PLOGSTIES, V. (2012). Ermittlung des Einflusses der Substratqualität auf die Biogasausbeute in Labor und Praxis. 4. Zwischenbericht des Teilprojekt 4

im Rahmen des Verbundvorhabens „Standortangepasste Anbausysteme für die Produktion von Energiepflanzen – EVA II“; FKZ: 22013308, 34 S.

HEIERMANN, M.; HERRMANN, C., IDLER, C.; PLOGSTIES, V. (2012). Ermittlung des Einflusses der Substratqualität auf die Biogasausbeute in Labor und Praxis. 3. Zwischenbericht des Teilprojekt 4 im Rahmen des Verbundvorhabens „Standortangepasste Anbausysteme für die Produktion von Energiepflanzen – EVA II“; FKZ: 22013308, 34 S.

HEIERMANN, M.; IDLER, C.; HERRMANN, C. (2011). Ermittlung des Einflusses der Substratqualität auf die Biogasausbeute in Labor und Praxis. 2. Zwischenbericht des Teilprojekt 4 im Rahmen des Verbundvorhabens „Standortangepasste Anbausysteme für die Produktion von Energiepflanzen – EVA II“; FKZ: 22013308, 26 S.

HEIERMANN, M.; HERRMANN, C.; IDLER, C. (2010): Maximale Methanausbeuten – worauf kommt es an? Bauernzeitung, Sonderheft Ratgeber Biogas, S. 17-19.

HEIERMANN, M.; HERRMANN, C.; IDLER, C. (2010): Substratqualität und Biogasausbeute, S. 69-78. In: FNR (Hrg.) (2010): Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen, 3. Auflage, 116 S., verfügbar unter http://www.nachwachsenderohstoffe.de, Zugang am 02.07.2010.

HEIERMANN, M.; IDLER, C.; HERRMANN, C. (2010). Ermittlung des Einflusses der Substratqualität auf die Biogasausbeute in Labor und Praxis. 1. Zwischenbericht des Teilprojekt 4 im Rahmen des Verbundvorhabens „Standortangepasste Anbausysteme für die Produktion von Energiepflanzen – EVA II“; FKZ: 22013308, 17 S.

HEIERMANN, M.; HERRMANN, C.; IDLER, C. (2009): Silierung von Energiepflanzen. In: Vetter, A. (Hrsg.): Anbausysteme für Energiepflanzen, optimierte Fruchtfolgen + effiziente Lösungen. DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt/Main (978-3-7690-0701-5), S. 90-106.

HEIERMANN, M.; LINKE, B.; KLOCKE, M.; SCHOLZ, V:, GRUNDMANN, P. (2009): Biogas – effizient erzeugen und nachhaltig nutzen. Leibniz Forschungsreport, Heft 1/2009, S. 4-7.

HERRMANN, C; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2012): Silierung und Gasausbeuten, S. 80-81. In: FNR (Hrsg.) (2012): Energiepflanzen für Biogasanlagen - Regionalbroschüre Sachsen, 1. Auflage, 96 S., verfügbar unter http://mediathek.fnr.de/broschuren/ bioenergie/energiepflanzen/regionalbroschuren/energiepflanzen-fur-biogasanlagen-regionalbroschure-sachsen.html

HERRMANN, C; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2012): Silierung und Gasausbeuten, S. 59-60. In: FNR (Hrsg.) (2012): Energiepflanzen für Biogasanlagen - Regionalbroschüre Sachsen-Anhalt, 1. Auflage, 76 S., verfügbar unter http://mediathek.fnr.de/broschuren/ bioenergie/energiepflanzen/regionalbroschuren/energiepflanzen-fur-biogasanlagen-regionalbroschure-sachsen-anhalt.html

HERRMANN, C; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2012): Silierung und Gasausbeuten, S. 104-105. In: FNR (Hrsg.) (2012): Energiepflanzen für Biogasanlagen - Regionalbroschüre Bayern, 1. Auflage, 116 S., verfügbar unter http://mediathek.fnr.de/broschuren/ bioenergie/energiepflanzen/regionalbroschuren/energiepflanzen-fur-biogasanlagen-regionalbroschure-bayern.html

HERRMANN, C; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2012): Silierung und Gasausbeuten, S. 46-47. In: FNR (Hrsg.) (2012): Energiepflanzen für Biogasanlagen - Regionalbroschüre Brandenburg, 1. Auflage, 64 S., verfügbar unter http://mediathek.fnr.de/media/ downloadable/files/samples/f/n/fnr_energiepflanzen-brandenburg_web.pdf

HERRMANN, C; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2012): Silierung und Gasausbeuten, S. 67-68. In: FNR (Hrsg.) (2012): Energiepflanzen für Biogasanlagen - Regionalbroschüre Thüringen, 1. Auflage, 80 S., verfügbar unter http://mediathek.fnr.de/media/ downloadable/ files/samples/b/r/brosch.energiepflanzen-thueringen-web.pdf

HERRMANN, C; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2012): Silierung und Gasausbeuten, S. 51-52. In: FNR (Hrsg.) (2012): Energiepflanzen für Biogasanlagen – Regionalbroschüre Mecklenburg-Vorpommern, 1. Auflage, 64 S., verfügbar unter http://mediathek.fnr.de/ media/downloadable/files/samples/f/n/fnr_brosch.energiepflanzen-mv_web.pdf

HERRMANN, C; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2012): Silierung und Gasausbeuten, S. 69-70. In: FNR (Hrsg.) (2012): Energiepflanzen für Biogasanlagen – Regionalbroschüre Niedersachsen, 1. Auflage,

84 S., verfügbar unter http://mediathek.fnr.de/media/ downloadable/files/samples/b/r/brosch.energiepflanzen-niedersachsen-webpdf.pdf

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2012): Einfluss von Pflanzenart, Ernte und Silierung auf die Silagequalität und Gasausbeute - Worauf kommt es an? In: LTZ Augustenberg (Hrsg.), Tagungsband zum 6. Workshop Pflanzliche Rohstoffe zur Biogasgewinnung. Thema: Biodiversität und Wirtschaftlichkeit - ein Widerspruch? 16.10.2012, Rheinstetten-Forchheim, S. 7-1 – 7-12.

HERRMANN, C; HEIERMANN, M.; PROCHNOW, A.; IDLER, C. (2012): Particle size reduction during harvest of crop feedstock for biogas production: 1. Influence on ensiling process and methane yields. BioEnergy Research, Vol. 5, (4), 926-936, doi 10.1007/s12155-012-9206-2.

HERRMANN, C.; PROCHNOW, A.; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2012): Particle size reduction during harvest of crop feedstock for biogas production: 2. Energy balance, greenhouse gas balance and profitability. BioEnergy Research, Vol. 5, (4), 937-948, doi 10.1007/s12155-012-9207-1.

HERRMANN, C.; PROCHNOW, A.; HEIERMANN, M. (2011): Influence of chopping length on capacities, labour time requirement and costs in the harvest and ensiling chain of maize. Biosystems Engineering, 110 (3), p. 310-320.

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2011): Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops. Bioresource Technology, 102 (2011), p. 5153-5161.

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2009): Sorgfalt zahlt sich aus. Bauernzeitung, 50. Jahrgang, 37. Woche, S. 27-28.

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C.(2009): Silierbarkeit und Methanbildungspotenziale von Energiepflanzen. „2. Symposium Energiepflanzen“, FNR Berlin 17./18.11.09 http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_407-index.htm

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2009): Qualitätssilagen für die Biogasproduktion. In: Gülzower Fachgespräche, Tagungsband “Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“, Band 32, Veranstaltung am 15./16. September 2009 in Weimar, S. 314-324.

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C.; HERTWIG, F. (2009): Einfluss von Trockenmassegehalt (Abreife), Häcksellänge und Silierung auf die Biogasausbeute von Mais. Effect of dry matter content, chopping length and ensiling process on biogas yield of maize. Landbauforschung, Sonderheft 331, Optimierung des Futterwertes von Mais und Maisprodukten, S. 87-105.

HERRMANN, C.; IDLER, C.; HEIERMANN, M.; SCHOLZ, V. (2009): Einfluss der Silierung auf die Biogasbildung – Aktuelle Forschungsergebnisse. 18. Jahrestagung Fachverband Biogas e.V. „Biogas: dezentral erzeugen, regional profitieren, international gewinnen“, 03.-05.02.2009, Hannover, S. 27-35.

NEHRING, A.; VETTER, A.; STRAUSS, C.; EBEL, G.; BARTHELMES, G.; RIECKMANN, C.; WILKEN, F.; HEIERMANN, M.; HERRMANN, C.; IDLER, C. (2009): Getreideganzpflanzen – Ein starker Partner. Joule 3/2009, S. 45-49.

SCHOLZ, V.; HEIERMANN, M.; KERN, J.; BALASUS, A. (2011): Umweltwirkungen des Energiepflanzenanbaus (Environmental impact of energy crop cultivation); Archives of Agronomy and Soil Science, Volume 57, Number 8, 1 December 2011, pp. 805-837(33).

VETTER, A.; STRAUß, C.; NEHRING, A.; HERRMANN, C.; WILLMS, M.; GLEMNITZ, M. (2010): EVA sucht geeignete Anbausysteme. Biogas Journal, Sonderheft Energiepflanzen, S. 14-17.

Vorträge

HEIERMANN, M. HERRMANN, C.; IDLER, C.: Maximale Biogasausbeuten durch optimale Silierung und Aufbereitung von Energiepflanzen. 16. Internationale Fachtagung "Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe", 10.09.2010, Freiberg/Sachsen.

HEIERMANN, M. HERRMANN, C.; IDLER, C.: Silierung von Biogaspflanzen - Worauf kommt es an - Ergebnisse aus dem EVA-Projekt. Workshop Energiepflanzen für Praktiker, 23.02.2010, Seddiner See.

HEIERMANN, M.; HERRMANN, C.; IDLER, C.: Maximale Methanausbeuten – worauf kommt es an? 4. Biogas Workshop in Forchheim, 06.10.2009.

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2013): Silierung von Energiepflanzen für die Biogasproduktion – Worauf kommt es an? Vortragstagung der LLFG Sachsen-Anhalt „Pflanzenbau aktuell“, 21.01.2013, Bernburg-Strenzfeld.

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2012): Einfluss von Pflanzenart, Ernte und Silierung auf die Silagequalität und Gasausbeute - Worauf kommt es an? 6. Workshop Pflanzliche Rohstoffe zur Biogasgewinnung. Thema: Biodiversität und Wirtschaftlichkeit - ein Widerspruch? 16.10.2012, Rheinstetten-Forchheim.

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2012): Silierung und Methanproduktion: Gute Substratqualitäten sind entscheidend! 3. Forum Energiepflanzen „Anbausysteme für Biogassubstrate und Ergänzungen zu Mais“, 05.07.2012, Thüringer Landesanstalt, Jena.

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C.: „Einfluss der Konservierung und Lagerung von Energiepflanzen auf die Biogasausbeute“, 6. Biogas-Fachkongress „Welche Rolle spielt Biogas bei der Energiewende“, 24.11.2011, Hitzacker.

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C.: „Konservierung und Lagerung von Energiepflanzen für den Biogasprozess“, Internationale wissenschaftliche Konferenz „Regenerative Energien als Zukunftstechnologien“, 13.-14.10.2011, Köthen.

HERRMANN, C.; EBEL, G.; HEIERMANN, M.; IDLER, C. Pflanzen als Biogassubstrat - Wann ernten? Einfluss des Erntetermins auf Ertrag, Silagequalität und Methanausbeute - Ergebnisse aus dem EVA-Projekt. Feldtag Energiepflanzen, Körnermais und Sonnenblumen. Vortragsveranstaltung mit Feldbesichtigung, 12.08.2010, Güterfelde.

HERRMANN, C.: Ernte und Silierung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung – Prozessgrundlagen und Bewertung. ATB-Kolloquium, 01.03.2010, Potsdam.

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C.: Silierbarkeit und Methanbildungspotenziale von Energiepflanzen. „2. Symposium Energiepflanzen“, FNR Berlin, 18.11.2009, http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_407-index.htm

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2009): Qualitätssilagen für die Biogasproduktion. In: Gülzower Fachgespräche, Tagungsband “Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“, 16. September 2009 in Weimar.

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C.: Biogaserzeugnung aus Energiepflanzen – Einfluss der Silierung auf die Methanbildung. „Nachhaltiger Pflanzenbau in Trockengebieten“. Internationale wissenschaftliche Konferenz, 07.05.2009 in Bernburg-Strenzfeld, Hochschule Anhalt.

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C.; HERTWIG, F.: Einfluss von Trockenmassegehalt (Abreife), Häcksellänge und Silierung auf die Biogasausbeute von Mais. Deutsches Maiskomitee, Tagung des Ausschusses Futterkonservierung und Fütterung, 18.03.2009, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.

HERRMANN, C.; IDLER, C.; HEIERMANN, M.; SCHOLZ, V. (2009): Einfluss der Silierung auf die Biogasbildung – Aktuelle Forschungsergebnisse. 18. Jahrestagung Fachverband Biogas e.V. „Biogas: dezentral erzeugen, regional profitieren, international gewinnen“, 03.02.2009, Hannover.

Internetbeiträge

HERRMANN, C.; HEIERMANN, M.; IDLER, C. (2011):

http://www.eva-verbund.de/themen/silierung-und-methanausbeuten.html

http://www.eva-verbund.de/themen/silierung-und-methanausbeuten/fruchtarten-methanausbeuten.html

http://www.eva-verbund.de/themen/silierung-und-methanausbeuten/silierparameter-methanausbeuten.html

http://www.eva-verbund.de/themen/silierung-und-methanausbeuten/empfehlungen-fuer-praktiker.html

http://www.eva-verbund.de/themen/silierung-und-methanausbeuten/weiterfuehrende-informationen.html

Weitere Publikationen sind geplant für Fachpresse und Fachzeitschriften

Literaturverzeichnis

Barthelmes G., Benke M., Deumlich D., Deiglmayr K., Ebel G., et al. (2010). Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen. FNR [Hrsg.], 3. veränderte und erweiterte Auflage, Gülzow, 116 S.

FNR (2010). Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 5. vollständig überarbeitete Auflage, Gülzow, 272 S.

DLG (1997). DLG-Futterwerttabellen Wiederkäuer. DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main, 213 S.

DLG [Hrsg.] (2000). DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit. DLG-Verlag.

DLG-Schlüssel (2006). Grobfutterbewertung; Teil B: DLG-Schlüssel zur Beurteilung der Gärqualität von Grünfuttersilagen auf der Basis der chemischen Untersuchungen. Hrsg. DLG e.V., Ausschuss Futterkonservierung, DLG-Information 2/2006, 5 S.

Gerber M. (2009). Ganzheitliche stoffliche und energetische Modellierung des Biogasbildungsprozesses. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, 195 S.

Gross F.; Riebe K. (1974). Gärfutter. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

Herrmann C., Heiermann M., Idler C. (2011). Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops. Bioresource Technology, 102, S. 5153-5161.

Jänicke H. (2006). Pflanzenbauliche Maßnahmen zur Beeinflussung der Gärqualität. In: Praxishandbuch Futterkonservierung, 7. Auflage, DLG-Verlag-GmbH. Frankfurt am Main, Deutschland, S. 35-41.

Jänicke H. (2011). Grob- und Substraterzeugung. In: Bundesarbeitskreis Futterkonservierung [Hrsg.]: Praxishandbuch Futterkonservierung. 8. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 23-28.

Jeroch H., Flachowsky G., Weißbach F. [Hrsg.] (1993). Futtermittelkunde. G. Fischer Verlag Jena-Stuttgart.

Kalzendorf C. (2006). Siliermittelarten und ihre Wirkungsweisen. In: Praxishandbuch Futterkonservierung, 7. Auflage, DLG-Verlag-GmbH. Frankfurt am Main, Deutschland, S. 155-162.

Kaiser E., Weiß K: (2007). Nitratgehalt im Grünfutter-Bedeutung für Gärqualität und siliertechnische Maßnahmen. Übersichten Tierernährung, 35(1) S. 13-30.

Kaiser E. (1981). Einfluss von Nitratgehalt, Zuckerart und Lagertemperatur auf die Vorhersage des Gärungsverlaufes bei der Grünfuttersilierung. Habilitationsschrift. Humboldt-Universität zu Berlin.

KTBL (2009). Faustzahlen Biogas. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), 2. Auflage, Darmstadt, 240 S.

KWS Mais GmbH [Hrsg.] (2011). Sorghum Anbauplaner. URL: http://www.kws.de/aw/KWS/germany/Produkte/Sorghum/Fachbroschueren, besucht 29.5.2013.

McDonald P., Henderson A. R., Heron S. J. E. (1991). The biochemistry of silage. 2. Auflage, Chalcombe Publications, Marlow, England, 341 S.

Oude Elferink S. J. W. H., Krooneman J., Gottschal J. C., Spoelstra S. F., Faber F., Driehuis F. (2001). Anaerobic conversion of lactic acid to acetic acid and 1,2-propanediol by lactobacillus buchneri. Applied and Environmental Microbiology, 67, S. 125-132.

Pahlow G. (2006). Gärungsbiologische Grundlagen und biochemische Prozesse der Silagebereitung. In: Praxishandbuch Futterkonservierung, 7. Auflage, DLG-Verlag-GmbH. Frankfurt am Main, Deutschland, S. 11-20.

Peyker, W. (2003). Standpunkt zur Silierung von Grünfutterstoffen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft [Hrsg.], 1. Auflage.

Thaysen, J. (2011). Zuckerhirse und Sudangras. In: Bundesarbeitskreis Futterkonservierung [Hrsg.]: Praxishandbuch Futterkonservierung. 8. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 51-52.

Thaysen, J. (2012). Erfolgreich Leguminosen silieren. In: Elite Magazin für Milcherzeuger: www.elite-magazin.de, Beitrag online vom 29.6.2012.

Thaysen J., Wagner A. (2006). Allgemeine Grundsätze der Silierung. In: Praxishandbuch Futterkonservierung, 7. Auflage, DLG-Verlag-GmbH. Frankfurt am Main, Deutschland, S. 51-65.

Von Borstel, U.; Sommer, M.; Meyer, S. (2003). Untersuchungen zur Kennzeichnung der Gäreignung verschiedener Gräserarten. Mitteilungen Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau Bd. 5, S. 215-218.

Weiland P. (2001). Grundlagen der Methangärung - Biologie und Substrate. In: VDI [Hrsg.] Tagungsband der VDI-Tagung "Biogas als regenerative Energie - Stand und Perspektiven", VDI-Berichte, Hannover, 19.-20.06.2001, S. 19-32.

Weiß K. (2001). Gärungsverlauf und Gärqualität von Silagen aus nitratarmem Grünfutter. Dissertation,, Humboldt-Universität zu Berlin.

Weiß K., Krause R. (2011). Evaluierung des DLG-Schlüssels 2006 für Silagen mit heterofermentativer Milchsäuregärung (*Lactobacillus buchneri*- Typ). Proc. VDLUFA- Kongress, 13. - 16. 09. 2011, Speyer, Kongressband VDLUFA-Schriftenreihe 67, Tierische Produktion und Futtermittel; S. 601-607.

Weißbach F., Schmidt L., Hein E. (1974). Method of anticipation of the run of fermentation in silage making, based on the chemical composition of green fodder. Proceedings of the XII International Grassland Congress, Moskau, 11.-20. June 1974, S. 663-672.

Weißbach F. (1993). Grünfutter und Grünfutterkonservate. In: Futtermittelkunde.-Hrsg. Jeroch, H.; Flachowsky, G.; Weißbach, F., G. Fischer Verlag Jena- Stuttgart, S. 74 -154.

Weißbach F. (2002). Grundlagen und Praxis der Produktion guter Silagen.- URL: http://www.gumpenstein.at, Kategorie: Fachveranstaltungen / Tagungen/ Expertenforum/ Expertenforum 2002, besucht am 29.5.2013.

Weißbach F. (2007). Angaben zur Silierbarkeit von Sonnenblumen. URL: http://www.addcon.com/de/feed/siliermittel/siliertipps/sonnenblumen/ besucht am 26.5.2013.

Wilkinson J. M., Davies D. R. (2013). The aerobic stability of silage: Key findings and recent developments. Grass and Forage Science, 68, S. 1-19.

Wyss U.(2004). Silierbarkeit von verschiedenen Knaulgras- und Luzernesorten sowie Qualität der Silagen. In: Schriftenreihe Institut für Nutztierwissenschaften, ETH Zürich Kreuzer, M.; Wenk, C.; Lanzini T. [Hrsg], Band 25, S. 247-249, ISBN 3-906466-25-6.

Zeise K, Fritz M. (2011). Sorghum als Biogassubstrat. „Biogas Forum Bayern“. Nr. I – 1/2011, 2. Auflage, Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. [Hrsg.]

Anhang

Tab. A-1: Methodik der am ATB untersuchten Parameter in Frischmassen (FM), Silagen (S), Impfmaterial (I), Gülle (G) und Biogas (B)

Parameter	Kürzel	Probenart	Methode
Aerobe Stabilität	ASTA	S	Temperaturmethode nach Honig, 1990
Ammonium-Stickstoff	NH_4-N	S, I, G	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 4.8.1 [1)]
Biogaspotenzial		FM, S	Batch-Gärtest in 2 Liter Gefäßen bei 35°C über 30 Tage (VDI 4630)
Gärprodukte: Milchsäure Organische Säuren C2 bis C6 Ethanol, Propanol, 1,2-Propandiol, 2,3- Butandiol		FM, S, I	Hausmethode, mod. nach Block & Weißbach (1982)
Gärqualität		S	DLG (DLG, 2006)
Gärverluste		S	Differenz von Ein- und Auslagerungsgewicht der Modellsilos
Gasvolumen		B	Verdrängung von Sperrflüssigkeit in Nassgasometern (VDI 4630)
Kalium	K	FM, S, G	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 2.2.2.6 oder 10.2.1 bzw. gleichwertige Methode [1)]
Kohlendioxid		B	Infrarotabsorption, Gasanalysator GA94 (Fa. ANSYCO)
$Kohlenstoff_{elementar}$	C	FM, S	VDLUFA MB. Bd.3 Kap.4.1.2 [1)]
Leitfähigkeit	-	I	
Methangehalt		B	Infrarotabsorption, Gasanalysator GA94 (Fa. ANSYCO)
Modellsilierung		FM	DLG [Hrsg.] (2000): DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit. DLG-Verlag
Neutrale-Detergentien-Faser	NDF	FM, S	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 6.5.1
Nitrat	-	FM	Hausmethode FIA in Anlehnung an DIN EN ISO 13395
Phosphor	P	FM, S, G	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 2.2.2.6 oder 10.6.1 bzw. gleichwertige Methode [1)]
pH-Wert	pH	FM, S, I, G	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 18.1 [1)]
Pufferkapazität	PK	FM	Hausmethode, in Anlehnung an Weißbach (1967)
Rohasche		FM, S, I, G	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 8.1 [1)]
Rohfaser		FM, S, G	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 6.1.2 [1)]
Rohfett (mit Hydrolyse)		FM, S	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 5.1.1 [1)]
Sauerstoffgehalt		B	Elektrochemischer Sensor, Gasanalysator GA94 (Fa. ANSYCO)
Säure-Detergentien-Faser	ADF	FM, S	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 6.5.2
Säure-Detergentien-Lignin	ADL	FM, S	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 6.5.3
$Schwefelel_{elementar}$	S	FM, S	VDLUFA MB. Bd.3Kap.4.1.2[1)]
Schwefelwasserstoff		B	Elektrochemischer Sensor Gasanalysator GA94 (Fa. ANSYCO)
Stärke	-	FM, S	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 7.21.1 [1)]
$Stickstoff_{elementar}$	N	FM, S	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 4.1.2 [1)]
$Stickstoff_{Kjeldahl}$	-	I, G	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 4.1.1 [1)]
Trockenmasse	TM	FM, S, I, G	VDLUFA MB. Bd.3, Kap. 3.1 [1)]
Trockenmassekorrektur	$TM_{korr.}$	FM, S	nach Weißbach & Kuhla (1995), Weißbach & Strubel (2008a), Weißbach & Strubelt (2008b)
Wasserlösliche Kohlenhydrate	WLK	FM, S	Hausmethode, HPLC

[1)] geringfügige methodische Abweichungen

Block H. J., Weißbach F. (1982). Zur gaschromatographischen Bestimmung flüchtiger Fettsäuren in Silagen mit innerem Standard. Archiv für Tierernährung 32 (9), 693-702.

DIN EN ISO 13395:1996-12: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Nitritstickstoff, Nitratstickstoff und der Summe von beiden mit der Fließanalytik (CFA und FIA) und spektrometrischer Detektion (ISO 13395:1996); Deutsche Fassung EN ISO 13395:1996, Beuth Verlag, 1996.

DLG [Hrsg.] (2000). DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit. DLG-Verlag.

DLG-Schlüssel (2006). Grobfutterbewertung; Teil B: DLG-Schlüssel zur Beurteilung der Gär-qualität von Grünfuttersilagen auf der Basis der chemischen Untersuchungen. Hrsg. DLG e.V., Ausschuss Futterkonservierung, DLG-Information 2/2006, 5 S.

Honig H. (1990). Evaluation of aerobic stability. In: Lindgren, S.; Lundén, P. (Hrsg.): Proceedings of the EUROBAC Conference, Uppsala, 1986, Grovfoder Grass and Forage Reports 3, S. 76-82.

VDI 4630 (2006). Vergärung organischer Stoffe; Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdaten-erhebung, Gärversuche. Beuth Verlag GmbH, D-10772 Berlin.

Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten [Hrsg.] (1997). VDLUFA-Methodenbuch Band III „Die chemische Untersuchung von Futtermitteln“, 3. Auflage.

Weißbach F. (1967). Die Bestimmung der Pufferkapazität der Futterpflanzen und ihre Bedeutung für die Beurteilung der Vergärbarkeit. Tagungsbericht, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR 92, S. 211-220.

Weissbach F., Kuhla S. (1995). Stoffverluste bei der Bestimmung des Trockenmassegehaltes von Silagen und Grünfutter. Entstehende Fehler und Möglichkeiten der Korrektur. Übersicht Tierernährung 23, S. 189-214.

Weißbach F., Strubelt C. (2008a). Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Maissilagen als Substrat für Biogasanlagen, Landtechnik 63 (2) S. 82-83.

Weißbach F., Strubelt C. (2008b). Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Grasssilagen als Substrat für Biogasanlagen. Landtechnik 63 (4), S. 210-211.

A-2: Ermittlung der Vergärbarkeit

Da die Vergärbarkeit von sehr vielen Parametern beeinflusst wird, ist sie kein feststehender Wert für eine Pflanzenart, sondern ihre Ermittlung erlaubt lediglich eine Einordnung in leichter und schwerer vergärbar. Als Maß für die Vergärbarkeit gelten der Trockenmassegehalt sowie das Verhältnis von Zucker und Pufferkapazität (Z/PK- Quotient), die in folgendem Zusammenhang stehen:

$$VK = TM + 8\ Z/PK$$

Dabei sind:
- VK Vergärbarkeitskoeffizient
- TM Trockenmasse [%]
- Z/PK Zuckergehalt [g/ kg TM]/ Pufferkapazität [g Milchsäure/ kg TM]

Hinweise zur Analytik der Parameter vgl. Anhang, Tab. A-1.

Von allen zu silierenden Frischmassen wurden die Vergärbarkeitskoeffizienten ermittelt, bewertet und den tatsächlich erreichten Silagequalitäten gegenübergestellt. Es wurden dabei die gleichen Kriterien wie für die Bewertung der Vergärbarkeit von Futterpflanzen angewendet (Weißbach, et al., 1975, Weißbach, 1993, DLG, 2000). Vergärbarkeitskoeffizienten > 35 weisen auf eine sehr gute bis gute Vergärbarkeit hin. Siliergüter, deren Koeffizienten < als 35 sind, gelten als schwer vergärbar.

A-3: Bewertung der Silagequalität

Die Bewertung der Silagequalität erfolgte mittels des DLG-Schlüssels (DLG 2006) auf der Basis der chemischen Untersuchung. Dabei werden in erster Linie die Gehalte an den unerwünschten Abbauprodukten Butter- und Essigsäure berücksichtigt. Darüber hinaus wird der pH-Wert in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt zur Bewertung herangezogen. Bei der Bewertung der Silagequalität ist jedoch zu beachten, dass Silierzusätze, die heterofermentative Milchsäurebakterien enthalten, zu erhöhten Essigsäuregehalten in der Silage führen können, die jedoch nicht als Fehlgärungen zu bewerten sind (Weiß & Krause, 2011).

Bewertungskriterien der DLG auf der Grundlage der chemischen Untersuchungen (DLG, 2006)

1. Beurteilung des Buttersäuregehaltes(BS)[1)] und des Essigsäuregehaltes(ES)[2)]

BS in % TM von ... bis	Punkte	ES in % TM von ... bis	Punkte
0 - 0,3	90	bis 3,0	0
> 0,3 - 0,4	81	> 3,0 - 3,5	-10
> 0,4 - 0,7	72	> 3,5 – 4,5	-20
> 0,7 - 1,0	63	> 4,5 – 5,5	-30
> 1,0 - 1,3	54	> 5,5 – 6,5	-40
> 1,3 - 1,6	45	> 6,5 – 7,5	-50
> 1,6 – 1,9	36	> 7,5 – 8,5	-60
> 1,9 - 2,6	27	> 8,5	-70
> 2,6 – 3,6	18		
> 3,6 – 5,0	9		
> 5,0	0		

[1)] Buttersäuregehalt: Summe aus i- und n-Buttersäure, i- und n-Valeriansäure und n-Capronsäure
[2)] Essigsäuregehalt: Summe aus Essigsäure und Propionsäure

2. Berücksichtigung des pH-Wertes

Trockensubstanzgehalt					
unter 30 %		> 30 – 45 %		über 45%	
pH	Punkte	pH	Punkte	pH	Punkte
bis 4,0	10	bis 4,5	10	bis 5,0	10
> 4,0 – 4,3	5	> 4,5 – 4,8	5	> 5,0 – 5,3	5
> 4,3 – 4,6	0	>4,8	0	>5,3	0
>4,6	-5				

3. Bewertung der Silagequalität

Gesamtpunktzahl (Summe Tabellen 1 und 2)	Gärqualität Note	Urteil
90 - 100	1	sehr gut
89 - 72	2	gut
71 - 52	3	verbesserungsbedürftig
51 - 30	4	schlecht
< 30	5	sehr schlecht

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN ohne	2. Berichtsart **Schlussbericht**

3a. Titel des Berichts
Einfluss der Substratqualität auf die Biogasausbeute in Labor und in der Praxis; Teilvorhaben 4

3b. Titel der Publikation

4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Herrmann, Christine; Heiermann, Monika; Idler, Christine	5. Abschlußdatum des Vorhabens 31.01.2013
	6. Veröffentlichungsdatum
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) Max-Eyth-Allee 100 14469 Potsdam	9. Ber.Nr. Durchführende Insitution
	10. Förderkennzeichen *) 22013308
	11a. Seitenzahl Bericht 87
	11b. Seitenzahl Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) 11055 Berlin	12. Literaturangaben 45
	14. Tabellen 22
	15. Abbildungen 37

16. Zusätzliche Angaben

17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)
FNR, Gülzow, 01.07.2013

18. Kurzfassung: max. 2000 Zeichen

Ziel war es, im Rahmen definierter Anbau- und Fruchtfolgesysteme des EVA-Verbundes weiterführende Erkenntnisse zum Einfluss der Silierung und Substratqualität auf die Biogasproduktion aus Energiepflanzen zu gewinnen. Die Bewertung erfolgte anhand umfangreicher Untersuchungen im Labor- und Praxismaßstab.
Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Fruchtart ein Haupteinflussfaktor bezüglich der erzielbaren Biogasmenge und -qualität in der Biogasanlage ist, wobei vor allem Unterschiede im Ligningehalt zur Ernte die Biogasausbeute bestimmen. Für die gesamte Bandbreite der in den EVA-Fruchtfolgen angebauten Fruchtarten wurden Richtwerte für Methanausbeuten erarbeitet. Neben der Fruchtart beeinflussen auch die Sorte und Fruchtfolgestellung sowie Standort und Witterungsbedingungen im Anbaujahr das Biogasbildungspotenzial.
Eine gezielte Mischung und gemeinsame Silierung zeitgleich geernteter Fruchtarten kann die Vergärbarkeit schwer oder mittelschwer silierbarer Fruchtarten bei Zusatz zucker- oder trockenmassereicher Erntegüter verbessern. Ein erhöhter Anteil an Unkrautbiomasse im Erntegut wirkt sich negativ auf die Biogasbildung und, in Abhängigkeit von Kulturart sowie Art und Zusammensetzung der Begleitvegetation, negativ auf die Siliereignung aus. Ein genereller Verzicht auf Herbizide bei Biogaspflanzen ist daher nicht zu empfehlen, eine Reduzierung kann jedoch sinnvoll sein.
Hinsichtlich der Qualität von Silagen war festzustellen, dass aerobe Umsetzungen und Nacherwärmung durch hohe Masseverluste die Biogasbildung erheblich verringern. Daher kommt der Vermeidung von aerober Instabilität für die Nutzungsrichtung Biogasproduktion eine besondere Bedeutung zu. Die Verwendung von Silierzusätzen zur Verbesserung der aeroben Stabilität ist zur Sicherung des Biogasbildungspotenzials eines Erntegutes empfehlenswert, insbesondere wenn keine optimalen Silier- und Lagerbedingungen gewährleistet werden können.

19. Schlagwörter
Biogas, Methan, anaerobe Vergärung, Silierung , Fruchtfolge, Pflanzenarten, Mischfruchtanbau, Mischsilierung, Siliermittel, aerobe Stabilität, Nacherwärmung, Unkraut

20. Verlag	21. Preis

*) Auf das Förderkennzeichen des BMVEL soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Projekttitel: Einfluss der Substratqualität auf die Biogasausbeute in Labor und in der Praxis; Teilvorhaben 4

FKZ: 22013308

Projektbeschreibung: max. 2000 Zeichen

Die Untersuchungen im Teilprojekt knüpften an die in einem ersten Bewilligungszeitraum (EVA I, 2005 bis 2008) erzielten Ergebnisse an. Ziel war es, im Rahmen definierter Anbau- und Fruchtfolgesysteme des Verbundprojektes weiterführende Erkenntnisse zum Einfluss der Silierung und Substratqualität auf die Biogasproduktion aus Energiepflanzen zu gewinnen. Neben der Untersuchung der Effekte verschiedener Fruchtarten aus den Fruchtfolgen wurden insbesondere die Wirkung des Siliermitteleinsatzes zur Vermeidung aerober Instabilitäten, die gleichzeitige Silierung verschiedener Fruchtarten (Mischsilagen) und die Auswirkungen von Unkrautbesatz auf die Biogasproduktion vertiefend geprüft. Die Bewertung von Substratqualitäten und Biogasbildungspotenzialen erfolgte anhand umfangreicher Laborexperimente, die durch großflächige Anbauversuche und Silierversuche im Praxismaßstab sowie dem Monitoring und der Bewertung der anaeroben Vergärung pflanzlicher Biomassen in Praxisbiogasanlagen ergänzt wurden. Auf Basis der wissenschaftlich fundierten Untersuchungen im Labor- und Praxismaßstab konnten wesentliche Faktoren für qualitativ hochwertige Biogassilagen identifiziert und Handlungsempfehlungen für die Landwirtschaft hinsichtlich einer optimierten Bereitstellung und Nutzung von Energiepflanzen für die Biogasproduktion abgeleitet werden.

Die erzielten Ergebnisse können sowohl wirtschaftlich als auch wissenschaftlich verwertet werden. Für die Praxis ergeben sich betriebswirtschaftliche und verfahrenstechnische Vorteile. Die Biogasproduktion und die Qualität des gesamten Prozesses können aufgrund der Erkenntnisse bzgl. geeigneter Pflanzenarten, Fruchtfolgen und der optimalen Konservierung und Lagerung verbessert werden. Weiterhin ergeben sich mit dem vielfältigen Anbau von unterschiedlich verwertbaren Gütern eine Risikostreuung und eine Einkommensstabilisierung.

Projektergebnisse: max. 2000 Zeichen

Die Ergebnisse des Teilprojektes zeigen, dass die Wahl der Fruchtart ein Haupteinflussfaktor bezüglich der erzielbaren Biogasmenge und -qualität in der Biogasanlage ist, wobei vor allem Unterschiede im Ligningehalt zur Ernte die Biogasausbeute bestimmen. Für die gesamte Bandbreite der in den EVA-Fruchtfolgen angebauten Fruchtarten wurden Richtwerte für Methanausbeuten erarbeitet. Neben der Fruchtart beeinflussen auch die Sorte und Fruchtfolgestellung sowie Standort und Witterungsbedingungen im Anbaujahr das Biogasbildungspotenzial.

Eine gezielte Mischung und gemeinsame Silierung zeitgleich geernteter Fruchtarten kann die Vergärbarkeit schwer oder mittelschwer silierbarer Fruchtarten bei Zusatz zucker- oder trockenmassereicher Erntegüter verbessern. Dies führt zu einem verlustärmeren Verlauf der Silierung bzw. zur Vermeidung von Gärsaftbildung und damit zu einer verbesserten Ausnutzung der geernteten Biomasse. Ein erhöhter Anteil an Unkrautbiomasse im Erntegut wirkt sich negativ auf die Biogasbildung und, in Abhängigkeit von Kulturart sowie Art und Zusammensetzung der Begleitvegetation, negativ auf die Siliereignung aus. Ein genereller Verzicht auf Herbizide bei Biogaspflanzen ist daher nicht zu empfehlen, eine Reduzierung kann jedoch sinnvoll sein.

Hinsichtlich der Qualität von Silagen war festzustellen, dass aerobe Umsetzungen und Nacherwärmung durch hohe Masseverluste und Verringerung der Biogasausbeute die Biogasbildung erheblich verringern. Innerhalb weniger Tage der Lagerung unter Lufteinfluss kann bis zu 50 % der potenziellen Biogasproduktion aus der Silage verloren gehen. Der Vermeidung von aerober Instabilität für die Nutzungsrichtung Biogasproduktion kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Die Verwendung von Silierzusätzen zur Verbesserung der aeroben Stabilität ist zur Sicherung des Biogasbildungspotenzials eines Erntegutes empfehlenswert, insbesondere wenn keine optimalen Silier- und Lagerbedingungen gewährleistet werden können.

Project title: **The impact of feedstock quality on biogas yield - in lab-scale and farm-based experiments; subproject 4**

Project number: **22013308**

Project description: max. 2000 Zeichen

The investigations within this sub-project resume to the results obtained during the first project phase (EVA1, 2005 to 2008). Within the framework of defined cultivation and crop rotation systems the aim of the project was to gain further insight in the influence of ensiling and feedstock quality on biogas production from energy crops. The investigations included effects of selected crop species out of the crop rotation on biogas production. Special interest was on the influence of silage additives preventing aerobic instabilities, of the simultaneous preservation of crop species (mixed silages) and of the presence of weeds. Numerous lab-scale experiments were the basis for the assessment of feedstock quality and biogas potential yields supplemented by large-scale experiments of cropping and ensiling as well as the monitoring and evaluation of anaerobic digestion in full-scale biogas plants. Based on these scientifically sound investigations both in lab-scale and full-scale key factors for the quality of biogas silages as well as recommendations for the agriculture regarding an optimized supply and utilization of energy crops for biogas production were provided.

The results obtained can be used both in scientific and practical perspective. In practice there are advantages in economy and process design. Biogas production and process quality can be improved based on the knowledge of suitable crop species, crop rotations and optimized preservation and storage. In addition there is a risk diversion and stabilization of income due to the diversified cropping of different usable goods.

Project results: max. 2000 Zeichen

The choice of the crop species, as pointed out by the experimental results of the sub-project, is a key factor for quantity and quality of full-scale biogas production. Especially the lignin content at harvest has a strong influence on the methane yield. Orienting values for methane yields were obtained for full range of species within the EVA crop rotations. In addition to the crop species influences were found due to variety, position in crop rotation, site and weather conditions.

The preservation of difficult to hardly difficult ensiling crops can be improved by the specific mixing and simultaneous ensiling of these with crop species rich in sugar content or dry matter. The improvement is based on lower losses during ensiling and a lower formation of silo effluents and hence to an increased utilization of the harvested biomass. An increased share of weeds influences negatively biogas production and depending on the crop species as well as the species and composition of weeds the ensiling. Therefore it is not recommended to totally dispense with herbicides but to reduce their amount of application.

Aerobic deterioration and reheating of silages reduce significantly biogas yield due to mass losses and a decrease in biogas formation. There might be a loss of 50 % of the potential biogas yield within a few days of aerobic storage of the silage. The mitigation of aerobic instability is an important factor for the quality of biogas silages and the application of suitable silage additives is recommended, especially, if optimal conditions for ensiling and storage cannot be guaranteed.