

Christiane Herrmann

Ernte und Silierung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung – Prozessgrundlagen und Bewertung



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Ernte und Silierung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung - Prozessgrundlagen und Bewertung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum agriculturalarum
(Dr. rer. agr.)

**eingereicht an der
Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät
der Humboldt-Universität zu Berlin**

von

Dipl.-Ing. (BA) Christiane Herrmann
22.12.1980, Schleiz

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin:

Prof. Dr. Dr. h. c. Christoph Marksches

Dekan der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät:

Prof. Dr. Dr. h. c. Otto Kaufmann

Gutachter: 1. PD Dr. rer. agr. Annette Prochnow
2. Dr. rer. hort. Monika Heiermann
3. Prof. Dr. agr. Jürgen Hahn

eingereicht: 28.10.2009

Tag der mündlichen Prüfung: 03.06.2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2010

Zugl.: Berlin, Humboldt-Universität, Diss., 2010

978-3-86955-535-5

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2010

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2010

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-535-5

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt all denen, die durch ihre tatkräftige Hilfe und Ermutigung zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben.

Insbesondere danke ich Frau Dr. Monika Heiermann und Frau PD Dr. Annette Prochnow für die hervorragende Betreuung meiner Dissertation und die Förderung meiner Forschungsarbeiten in jeder Hinsicht. Großer Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Jürgen Hahn für die Übernahme des Korreferates.

Im Verlauf meiner Promotionszeit habe ich von vielen Mitarbeitern des ATB Unterstützung sowohl in fachlicher Hinsicht als auch bei der Datenerhebung erhalten. Stellvertretend hierfür sei Frau Dr. Christine Idler und Herrn Dr. Matthias Plöchl für die fachlichen Diskussionen und Anregungen gedankt.

Roland Schneider, Helmut Carl und Lars Eulenburg danke ich ganz besonders für die zuverlässige Mitarbeit bei der Durchführung der Laboruntersuchungen und ihr großes Engagement – wenn es nötig war auch außerhalb der regulären Arbeitszeiten.

Mein großer Dank gilt weiterhin der Arbeitsgruppe „Analytik“ am ATB, die unter Leitung von Giovanna Rehde die Vielzahl der chemischen Analysen ermöglicht und stets verlässlich bewältigt haben.

Ganz besonders bedanke ich mich auch bei den Mitarbeitern der Abteilung 2 am ATB, ohne deren Hilfe die aufwendigen Praxisuntersuchungen nicht möglich gewesen wären. Besonders hervorzuheben ist hier die Unterstützung von Ines Ficht, Jutta Venzke, Angelika Krüger und Ronny Becher bei den Feldversuchen und von Helen Jacobs bei der Auswertung der GPS-Daten. Für die vielfältige Unterstützung bei den Praxisuntersuchungen danke ich ebenfalls Hendrik Spikermann (Abteilung 3).

Bei Herrn Dr. Frank Hertwig, Herrn Karl-Heinz Wellenbrock und den Mitarbeitern der LVL in Paulinenaue möchte ich mich ganz herzlich für die Bereitstellung der Maisproben und die hervorragende Kooperation bedanken. Den Praxispartnern Herr Detlef May, Herr Martin Schulze, Herr Uwe Mertin und deren Mitarbeitern sei für die Bereitschaft zur Datenaufnahme bei den Praxisernten und die Ermöglichung und tatkräftige Mitwirkung bei der Versuchsanstellung gedankt.

Ohne die finanzielle Unterstützung durch das FNR-Projekt „EVA“ (FKZ: 22002605) hätte diese Arbeit nicht durchgeführt werden können.

Schließlich danke ich von ganzem Herzen Andreas Butters und meiner Familie in Thüringen für die Geduld und persönliche Unterstützung während meiner Promotionszeit.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole.....	V
Kurzfassung.....	XI
Abstract.....	XII
1 EINLEITUNG.....	1
2 PROBLEMSTELLUNG.....	2
2.1 Stand des Wissens.....	2
2.1.1 Nutzung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung.....	2
2.1.1.1 Methanbildung aus pflanzlicher Biomasse.....	2
2.1.1.2 Bedeutung der Substratzusammensetzung für die Biomethanisierung... ..	4
2.1.1.3 Bereitstellung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung.....	7
2.1.2 Silierung von Energiepflanzen.....	11
2.1.2.1 Grundlagen der Silierung.....	11
2.1.2.2 Silierverluste und deren Ursachen.....	15
2.1.2.3 Bedeutung des Erntezeitpunktes für die Silierung.....	18
2.1.2.4 Bedeutung der Häcksellänge des Erntegutes für den Silierverlauf.....	19
2.1.2.5 Verwendung von Silierzusätzen.....	22
2.1.3 Einfluss relevanter Parameter der Bereitstellungskette auf die Biomethanisierung..	25
2.1.3.1 Erntezeitpunkt.....	25
2.1.3.2 Häcksellänge.....	27
2.1.3.3 Silierung.....	30
2.2 Untersuchungsbedarf und Optimierungsansätze.....	32
3 ZIEL- UND AUFGABENSTELLUNG.....	33
4 UNTERSUCHUNGEN ZU DEN PROZESSGRUNDLAGEN DER BIO- METHANISIERUNG.....	34
4.1 Aufgabenstellung.....	34
4.2 Material und Methoden.....	36
4.2.1 Herkunft und Beschreibung der Substrate.....	36
4.2.2 Versuchsübersicht.....	38
4.2.3 Probenahme.....	39
4.2.4 Silierversuche im Labormaßstab.....	39
4.2.5 Bewertung der physikalischen Struktur.....	43
4.2.6 Chemische Analytik.....	44
4.2.7 Batch-Gärtests.....	48
4.2.8 Statistische Auswertung.....	52

4.3 Ergebnisse.....	53
4.3.1 Versuchsschwerpunkt I – Vergleich von Erntetermin und Häcksellänge bei drei Maissorten.....	53
4.3.1.1 Physikalische Struktur.....	53
4.3.1.2 Chemische Charakterisierung.....	58
4.3.1.3 Silierverluste und Gärqualität der Silagen.....	60
4.3.1.4 Methanbildung.....	62
4.3.1.5 Zusammenfassung.....	67
4.3.2 Versuchsschwerpunkt II – Häcksellängenvergleich bei drei Pflanzenarten.....	68
4.3.2.1 Physikalische Struktur.....	68
4.3.2.2 Chemische Charakterisierung.....	71
4.3.2.3 Silierverluste und Gärqualität der Silagen.....	73
4.3.2.4 Methanbildung.....	75
4.3.2.5 Zusammenfassung.....	80
4.3.3 Versuchsschwerpunkt III – Variation von Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer.....	81
4.3.3.1 Physikalische Struktur.....	81
4.3.3.2 Chemische Charakterisierung.....	83
4.3.3.3 Silierverluste und Gärqualität der Silagen.....	85
4.3.3.4 Methanbildung.....	92
4.3.3.5 Zusammenfassung.....	103
4.3.4 Versuchsübergreifende Ergebnisse.....	105
4.3.4.1 Zusammenhang zwischen chemischer Zusammensetzung und Methanbildung.....	105
4.3.4.2 Zusammenhang zwischen der Änderung der Substratzusammensetzung durch die Silierung und der Methanausbeute.....	106
4.3.4.3 Einfluss der Silierung auf den Methangehalt.....	108
4.3.4.4 Einfluss der Silierung auf die Geschwindigkeit der Methanbildung.....	109
4.3.4.5 Zusammenhang zwischen den Feinheitsmerkmalen der Häckselgüter... ..	109
4.3.4.6 Zusammenhang zwischen physikalischer Struktur und Methanausbeute ..	111
4.3.4.7 Zusammenhang zwischen Abreife bzw. Lignifizierung und der Wirkung der Zerkleinerung auf die Methanausbeute.....	114
4.3.4.8 Zusammenhang zwischen physikalischer Struktur und Geschwindigkeit der Methanbildung.....	115
4.3.4.9 Zusammenhang zwischen Abreife und Wirkung der Häcksellänge auf die Geschwindigkeit der Methanbildung.....	116
4.4 Diskussion.....	118
4.4.1 Substratzusammensetzung der geprüften Pflanzenarten.....	118
4.4.2 Biomethanisierung der geprüften Pflanzenarten.....	120
4.4.3 Einfluss der Silierung auf die Biomethanisierung.....	123
4.4.3.1 Einfluss der Silierung auf die Methanausbeute.....	123
4.4.3.2 Einfluss der Silierung auf den Methangehalt im Biogas.....	128
4.4.3.3 Einfluss der Silagequalität auf die Methanausbeute.....	129
4.4.3.4 Einfluss der Silierung auf die Geschwindigkeit der Methanbildung.....	131

4.4.4	Einfluss der Abreife auf die Silierung und Biomethanisierung bei Mais.....	133
4.4.4.1	Einfluss der Abreife auf die Silierung bei Mais.....	133
4.4.4.2	Einfluss der Abreife auf die Biomethanisierung von Mais.....	134
4.4.5	Einfluss der Häcksellänge auf die Silierung und Biomethanisierung.....	137
4.4.5.1	Einfluss der Häcksellänge auf die Silierung.....	137
4.4.5.2	Einfluss der Häcksellänge auf die Methanbildung des Siliergutes.....	139
4.4.5.3	Einfluss der Häcksellänge auf die Methanbildung der Silagen.....	142
4.4.5.4	Einfluss der Häcksellänge auf die Geschwindigkeit der Methanbildung..	144
4.4.5.5	Einfluss der Häcksellänge auf die Methanausbeute bei unterschiedlicher Abreife bzw. Lignifizierung.....	145
4.4.6	Einfluss der Lagerdauer.....	147
4.4.6.1	Einfluss der Lagerdauer auf die Silierverluste und das Gärsäuremuster..	147
4.4.6.2	Einfluss der Lagerdauer auf die Methanausbeute.....	148
4.4.6.3	Einfluss der Lagerdauer der Silagen bei unterschiedlichen Häcksellängen..	149
4.4.7	Einfluss von Silierzusätzen auf Silierverlauf und Biomethanisierung.....	150
4.4.7.1	Einfluss der Silierzusätze auf den Silierverlauf.....	150
4.4.7.2	Einfluss der Silierzusätze auf die Biomethanisierung.....	154
4.4.7.3	Einfluss der Silierzusätze bei unterschiedlicher Häcksellänge.....	157
4.4.8	Kritische Betrachtung der Versuchsdurchführung.....	158
4.4.8.1	Batch-Gärtest.....	158
4.4.8.2	Trockenmassekorrektur.....	161
4.4.8.3	Bildanalyse.....	163
4.5	Schlussfolgerungen.....	165
5	BEWERTUNG KÜRZERER HÄCKSELLÄNGEN.....	167
5.1	Aufgabenstellung.....	167
5.2	Material und Methoden.....	169
5.2.1	Grundlagen und Abfolge der Bewertungen.....	169
5.2.2	Beschreibung der Messvarianten.....	172
5.2.3	Datenerhebung während des Ernteprozesses und bei der Silageentnahme....	174
5.2.4	Kapazitätsbewertung.....	176
5.2.5	Basisdaten für die Bewertung von Energieaufwand, Emissionen und Wirtschaftlichkeit.....	183
5.2.6	Energiebilanz und Treibhausgasemissionen.....	185
5.2.7	Bewertung der Kosten und Erlöse.....	187
5.2.8	Sensitivitätsanalyse.....	189
5.3	Ergebnisse.....	190
5.3.1	Ergebnisse der Prozessbeobachtungen.....	190
5.3.2	Funktionsbewertung.....	191
5.3.2.1	Struktur des Siliergutes.....	191
5.3.2.2	Verdichtung im Silo.....	194

5.3.2.3	Siliererfolg.....	195
5.3.2.4	Methanbildung.....	197
5.3.3	Kapazitätsbewertung.....	198
5.3.4	Energetische Bewertung.....	200
5.3.5	Bewertung der Treibhausgasemissionen.....	202
5.3.6	Bewertung der Kosten und Erlöse.....	203
5.3.7	Sensitivitätsanalyse.....	205
5.3.8	Zusammenfassung.....	209
5.4	Diskussion.....	210
5.4.1	Ergebnisse der Prozessbeobachtungen.....	210
5.4.2	Funktionsbewertung.....	214
5.4.3	Kapazitätsbewertung.....	219
5.4.4	Bilanzierung.....	221
5.5	Schlussfolgerungen.....	225
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	226
7	ZUSAMMENFASSUNG.....	227
	Literaturverzeichnis.....	229
	Abbildungsverzeichnis.....	247
	Tabellenverzeichnis.....	251
	Anhang.....	253

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

Abkürzung/ Symbol	Einheit	Erläuterung
A	€*a ⁻¹	Abschreibung
AA		Alkohole
Abb.		Abbildung
abs.		absolut
ADF		Säure-Detergenz-Faser
ADL		Detergenz-Lignin-Gehalt
a _i		Impfmateriilverhältnis oTM _{Substrat} zu oTM _{Inoculum}
Akmin		Arbeitskraftminuten
A _O		Oberfläche
AP	€	Anschaffungspreis
ATB		Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
b	km	Breite des Schlages
b ₅₀	mm	mittlere Partikelbreite (Median)
BBCH		Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien
b _{eff}	m	effektive Arbeitsbreite
BHKW		Blockheizkraftwerk
BMU		Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
B _R		Faulraumbelastung
C		Kohlenstoff
c _{CH4}	Vol-%	Methangehalt
CCM		Corn-Cob-Mix
c _{CO2}	Vol-%	Kohlendioxidgehalt
CH ₄		Methan
c ^{korrr}		korrigierte Konzentration
C/N-Verhältnis		Verhältnis Kohlenstoff- zu Stickstoffgehalt
CO ₂		Kohlendioxid
CO ₂ äq		Kohlendioxid-Äquivalente
DLG		Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
DSM		Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen
E	t*ha ⁻¹	Ertrag
EE		Ernteeinheit
EEG		Erneuerbare Energien Gesetz
einw.		einwertig
ET		Erntetermin
EU		Europäische Union
EulOS		enzymlösliche organische Substanz
FFS		flüchtige Fettsäuren
FKZ		Förderkennzeichen
FM		Frischmasse
FM _{orig}		originale Frischmasse
FM _{zu}		zugeführte Frischmasse
FNR		Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
FoTS		fermentierbare organische Substanz
GC		Gaschromatographie
Gl.		Gleichung

Abkürzung/ Symbol	Einheit	Erläuterung
GP		Ganzpflanze
GPS		Global Positioning System
Gsr		Grünschnittroggen
GWP		Global Warming Potential (Treibhausgaspotenzial)
H ₂		Wasserstoff
HCl		Salzsäure
HL		Häcksellänge
H ₂ O		Wasser
HPLC		Hochdruck-Flüssig-Chromatographie
k	d ⁻¹	Geschwindigkeitskonstante
k ₄	%	Anteil der Störzeit an der erweiterten Grundzeit
k.A.		keine Angabe
K _A	t*h ⁻¹	Kapazitätsanspruch
K _{Aggr}	t*h ⁻¹	Kapazität des Aggregates
KbE		koloniebildende Einheiten
KEA		kumulierter Energieaufwand
k _{Pf}		Anzahl der Stufen eines Prüffaktors
k _R		Korrekturfaktor für Reparaturkosten einer Maschine
K _{T08}	t*h ⁻¹ ; ha*h ⁻¹	Kapazität in der Gesamtarbeitszeit
l	km	Länge des Schlages
l ₅₀	mm	mittlere Partikellänge (Median)
LD		Lagerdauer
LK	€*h ⁻¹ ; €*a ⁻¹	Lohnkosten
LKW		Lastkraftwagen
LVLf		Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flur- neuordnung
m _d	t	tägliche Erntemasse
MK	€*h ⁻¹ ; €*a ⁻¹	Maschinenkosten
m _L	t	mittlere Lademasse einer Transporteinheit
MS		Milchsäure
\dot{m}_{T02EE}	t*h ⁻¹	Durchsatz der Ernteeinheit in der Grundzeit
\dot{m}_{T02TE}	t*h ⁻¹	Transportkapazität in der Grundzeit
\dot{m}_{T025TE}	t*h ⁻¹	Transportkapazität in der erweiterten Grundzeit
\dot{m}_{T025VE}	t*h ⁻¹	Kapazität der Verdichtereinheit in der erweiterten Grundzeit
\dot{m}_{T08EE}	t*h ⁻¹	Durchsatz der Ernteeinheit in der Gesamtarbeitszeit
\dot{m}_{T08TE}	t*h ⁻¹	Transportkapazität in der Gesamtarbeitszeit
\dot{m}_{T08VE}	t*h ⁻¹	Kapazität der Verdichtereinheit in der Gesamtarbeitszeit
\dot{m}_{T1EE}	t*h ⁻¹	Durchsatz der Ernteeinheit in der Hauptzeit
MSB		Milchsäurebakterien
n		Anzahl der Messwiederholungen
n _A		Anzahl der geernteten Schläge pro Tag
n _{Aggr}		notwendige Anzahl an Aggregaten
n.b.		nicht berechenbar
NDF		Neutral-Detergenz-Faser
ND _n	a ; h	normative Nutzungsdauer
ND _r	a ; h	reale Nutzungsdauer
n _{EE}		Anzahl der Ernteeinheiten
N _{Ges}		Gesamtstickstoff
NfE		stickstofffreie Extraktstoffe

Abkürzung/ Symbol	Einheit	Erläuterung
NH ₃ -N		Ammoniak-Stickstoff
n _{HW}		Anzahl der Wechsel der Transporteinheiten
n _L		Anzahl der Transportumläufe / Anhängerladungen pro Tag
n.n.		nicht nachweisbar
n _{TE}		Anzahl der Transporteinheiten
n _{VE}		Anzahl der Verdichtereinheiten
n _W		Anzahl der Wendungen
O ₂		Sauerstoff
oTM	% TM	organische Trockenmasse
oTM _{orig}	% TM	originale organische Trockenmasse
oTM _{zu}	% TM	zugeführte organische Trockenmasse
p ₀	mbar	Normdruck
PD		1,2-Propandiol
p _W	mbar	Dampfdruck des Wassers
R	€*h ⁻¹	Reparaturkosten einer Maschine
R ²		Bestimmtheitsmaß
r _{CH4}	l _N *kg ⁻¹ *d ⁻¹	spezifische Methanrate
r _{CH4_max}	l _N *kg ⁻¹ *d ⁻¹	maximale spezifische Methanrate
rel.		relativ
RW	€	Restwert einer Maschine
S		Schwefel
s		Standardabweichung
s _{12TE}	km	Weg der Transporteinheit vom Feld zum Silo
s _{14TE}	km	Weg der Transporteinheit vom Silo zum Feld
s ₆₁₁	km	Weg vom Standort zum Arbeitsort
s ₆₁₂	km	Weg vom Arbeitsort zum Standort
s ₆₂	km	Weg zwischen Arbeitsorten
SP	€*l ⁻¹	Schmierstoffpreis
spez. projiz. Oberfläche	dm ² *(100 g TM) ⁻¹	spezifische projizierte Oberfläche
Sugr		Sudangras
SV	€*a ⁻¹	Steuern und Versicherung
SZ		Silierzusatz
t		Zeit
T ₀	K	Normtemperatur
T ₀₂	h	Grundzeit
T ₀₂₅	h	erweiterte Grundzeit
T ₀₄	h	Produktionsarbeitszeit
T ₀₇	h	Einsatzzeit
T ₀₈	h	Gesamtarbeitszeit
T ₁	h	Hauptzeit
T ₁₁	h	Beladezeit
T ₁₂	h	Zeit der Transporteinheit für die Lastfahrt zum Silo
t ₁₃	h	mittlere Entladezeit einer Transporteinheit je Ladung
T ₁₃	h	Entladezeit
T ₁₄	h	Zeit der Transporteinheit für die Leerfahrt zum Feldhäcksler
t _{1_VE}	h*t ⁻¹	Verdichtungszeitaufwand
t ₂₁	h	Zeit je Wendung am Feld
T ₂₁	h	Wendezeit

Abkürzung/ Symbol	Einheit	Erläuterung
T_{22}	h	Fahrzeit am Arbeitsort
t_{23}	h	Zeit je Wechsel der Transporteinheit
T_{23}	h	Zeit für technologischen Stillstand
T_{25}	h	zyklische verfahrensbedingte Verlustzeit
T_{25TE}	h	zyklische verfahrensbedingte Verlustzeit der Transporteinheit
T_3	h	Rüstzeit
T_{31}	h	Zeit für Pflege und Wartung während der Gesamtarbeitszeit
T_{32}	h	Zeit für die Vorbereitung der Maschine auf die Arbeit
T_{33}	h	Zeit für das Einstellen der Maschine
T_4	h	Störzeit
T_{41}/T_{42}	h	Zeit zur Beseitigung technischer und funktioneller Störungen
T_{43}	h	Wartezeit durch Störung anderer
T_{44}	h	Wartezeit abstimmungsbedingt
T_5	h	Erholungszeit
T_{61}	h	Zeit für Leerfahrten zwischen Standort und Arbeitsort
T_{611}	h	Leerfahrt Standort – Arbeitsort
T_{612}	h	Leerfahrt Arbeitsort – Standort
T_{62}	h	Zeit für Leerfahrten zwischen Arbeitsorten
T_7	h	Wartezeit bedingt durch Servicezeiten anderer
T_{81}	h	Standzeit aus organisatorischen Gründen
T_{82}	h	Standzeit witterungsbedingt
T_{83}	h	Standzeit aus anderen Gründen
Tab.		Tabelle
TE		Transporteinheit
THG		Treibhausgas
TM	% FM	Trockenmasse
TM_{gem}	% FM	gemessener Trockenmasse-Gehalt
TP	€*l ⁻¹	Treibstoffpreis
Trit		Triticale
$t(r_{CH4_max})$		Zeitpunkt der maximalen spezifischen Methanrate
T_U	h	Zeit des Transportumlaufes
T_{U02}	h	Zeit des Transportumlaufes (Grundzeit)
T_{U025}	h	Zeit des Transportumlaufes (erweiterte Grundzeit)
U	€*a ⁻¹	Kosten für die Unterbringung von Maschinen
u_r	h*a ⁻¹	jährlicher Maschineneinsatz
V	l*h ⁻¹	Treibstoffverbrauch
V_0	l _N	Normvolumen
VB	h*t ⁻¹	Verdichtungszeitbedarf
VE		Verdichtereinheit
VDLUFA		Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
v_{EE}	km*h ⁻¹	Arbeitsgeschwindigkeit der Ernteeinheit
verb.bed.		verbesserungsbedürftig
VK	€*h ⁻¹ ; €*a ⁻¹	Verfahrenskosten
v_{T12_TE}	km*h ⁻¹	mittlere Geschwindigkeit der Transporteinheit bei der Lastfahrt
v_{T14_TE}	km*h ⁻¹	mittlere Geschwindigkeit der Transporteinheit bei der Leerfahrt
v_{T_EE}	km*h ⁻¹	mittlere Geschwindigkeit der Ernteeinheit auf Wegen
v_{T_VE}	km*h ⁻¹	mittlere Geschwindigkeit der Verdichtereinheit auf Wegen
VS		Versuchsschwerpunkt

Abkürzung/ Symbol	Einheit	Erläuterung
Wro		Winterroggen
\bar{x}		Mittelwert
XA	% TM	Rohasche
XF	% TM	Rohfaser
XL	% TM	Rohfett
XP	% TM	Rohprotein
y	$I_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}$	Biogasausbeute
y_{CH_4}	$I_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}$	Methanausbeute
$y_{\text{CH}_4_max}$	$I_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{zu}$	maximal mögliche Methanausbeute
$y_{\text{CH}_4_orig}$	$I_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{orig}$	Methanausbeute bezogen auf oTM_{orig}
$y_{\text{CH}_4_zu}$	$I_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{zu}$	Methanausbeute bezogen auf oTM_{zu}
Z	$\text{€} \cdot \text{a}^{-1}$	Zinsanspruch

Kurzfassung

Die Biogasproduktion hat in den vergangenen Jahren als Verfahren zur nachhaltigen Erzeugung erneuerbarer Energien aus Biomasse stark an Bedeutung gewonnen. Dabei hat sich neben organischen Reststoffen die Nutzung von Energiepflanzen mit hohen Methanbildungspotenzialen als Substrate für die Biogaserzeugung etabliert. Für eine effektive Ausschöpfung des hohen energetischen Potenzials dieser Substrate ist eine optimale Gestaltung der gesamten Bereitstellungskette der Energiepflanzen anzustreben. Dies umfasst insbesondere die Ernte und Konservierung des Pflanzenmaterials.

Das Ziel der Dissertation ist die Erarbeitung grundlegender Kenntnisse zum Einfluss verschiedener Parameter bei der Ernte und Silierung von Ganzpflanzen auf die Biomethanisierung. Dabei sollen Optimierungspotenziale erkannt und Hinweise für eine optimale Gestaltung der Bereitstellungskette gegeben werden. Im Fokus eines zweiten Teils der vorliegenden Arbeit steht der Parameter Häcksellänge. Der zusätzliche Aufwand und Nutzen einer sehr kurzen Häcksellängeneinstellung am Feldhäcksler soll einer praxisüblichen Längeneinstellung gegenübergestellt werden. Zur Bearbeitung des Themas wurden systematische Untersuchungen im Labormaßstab durchgeführt. Hierbei kamen als etablierte Methoden Modellsilierungsversuche und Batch-Gärtests zur Anwendung. Die Bewertung sehr kurzer Längeneinstellungen am Feldhäcksler erfolgte über eine vergleichende Berechnung von Energie- und Treibhausgasbilanzen sowie der Kosten und Erlöse auf der Grundlage von Datenerhebungen bei Praxisernten und einer Modellberechnung zur Kapazitätsbewertung.

Die Ergebnisse der Laborversuche zeigen, dass sich vor allem die Bildung von Essigsäure und Alkoholen bei der Silierung sowie der Zusatz biologischer Siliermittel und eine längere Lagerdauer positiv auf die Methanausbeute mit Bezug auf die zugeführte organische Trockenmasse auswirken. Unter Berücksichtigung der Masseverluste, die bei der Silierung durch Fermentationsprozesse entstehen, ist jedoch keine signifikante Erhöhung der Methanbildung durch diese Silierparameter zu erwarten. Höhere Methanausbeuten bei Berücksichtigung der Silierverluste können hingegen durch die Einstellung einer kürzeren Häcksellänge zur Ernte erzielt werden. Im Bereich mittlerer Partikel­längen zwischen 33 und 6 mm ist eine maximale Erhöhung der Methanausbeute um 10 bis 13 % erreichbar. Für die Praxis empfehlen sich kurze theoretische Häcksellängen von 7 bis 8 mm. Eine weitere Verringerung der theoretischen Häcksellänge kann zu einer geringeren Netto-Energieproduktion und zu ökonomischen Verlusten führen, wobei dies bei gegenwärtigem Kenntnisstand vorab nicht gesichert abgeschätzt werden kann. Hierfür besteht weiterer Forschungsbedarf.

Abstract

In the recent years biogas production has gained importance as a process for biogenic sustainable energy resource. Beside of organic wastes energy crops with high methane formation potential became a leading feedstock for anaerobic digestion. In order to exploit this high energetic potential most efficiently it is obvious to optimise the entire process chain of energy crop provision with special emphasis on harvest and crop conservation.

The aim of this thesis is to work out the basic knowledge of the influence of various parameters during harvest and ensiling of whole crops on biomethanation, to reveal optimisation potential and to indicate points of optimisation in the process chain. A second focus of the thesis is on the parameter chopping length. The additional effort and benefit of a very short chopping length is assessed in comparison to chopping lengths common at forage harvesters in practice. The assessment based on systematic investigations in laboratory entailing well established methods as model ensiling and batch digestion tests. The theoretical evaluation comprised the comparison of energy and green house gas balances as well as the cost-benefit analysis of very short and common chopping lengths based on practice data of harvest and a model calculation of capacity evaluation.

Laboratory investigations showed that the methane formation related to organic dry matter will be increased due to the formation of acetic acid and alcohols during ensiling, the application of ensilage additives as well as prolonged storage duration. In total these positive effects will not significantly increase the methane yield if considering the mass losses due to fermentation during ensiling. Higher methane yields can be obtained by using shorter chopping lengths despite of ensilage losses. Chopping lengths of 33 to 6 mm increased the methane yield by 10 to 13 %. In practice, a theoretical chopping length - which can be adjusted at the forage harvester - of 7 to 8 mm can be recommended. A further reduction of the theoretical chopping length may lead to a lower net energy provision and hence, to economic losses. Nevertheless, this statement cannot be evaluated consistently with the current knowledge base. There is further demand for research in this context.

1 Einleitung

Eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts besteht vor dem Hintergrund des Umwelt- und Klimaschutzes sowie der Endlichkeit fossiler Energieträger in der nachhaltigen Erzeugung und dem sparsamen Einsatz von Energie. Die Nutzung erneuerbarer Energien kann hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten. Neben der Vermeidung klimaschädlicher Gase und der Substitution fossiler Energieträger tragen Energien aus solarer Strahlung, Wind, Wasserkraft, Erdwärme und Biomasse auch zu einer regionalen Wertschöpfung und stärkeren Unabhängigkeit von Importen bei. Im Jahr 2008 wurden bereits 7,1 % des Primärenergiebedarfs in Deutschland durch erneuerbare Energien gedeckt (BMU 2009a). Dabei kommt der Energieerzeugung aus Biomasse mit 5,3 % des Primärenergieverbrauches derzeit die größte Bedeutung zu. Nach der Richtlinie 2009/28/EG sollen bis 2020 20 % des Endenergieverbrauches der EU durch erneuerbare Energien gedeckt werden¹. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis 2020 auf 30 % und den Anteil an der Wärmebereitstellung auf 14 % zu steigern (BMU 2009b). Eine finanzielle Förderung der Erzeugung erneuerbarer Energien wird dabei durch das zuletzt im Jahr 2009 novellierte Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) geregelt.

Die Biogasproduktion nimmt unter den Verfahren zur nachhaltigen Energieerzeugung aus Biomasse eine zentrale Rolle ein. Als Folge der finanziellen Förderung der Stromerzeugung aus Biogas durch das EEG ist die Anzahl der Biogasanlagen in Deutschland von 1050 im Jahr 2000 auf 4099 im Jahr 2008 gestiegen (FNR 2009a). Zusätzliche Boni werden nach dem EEG von 2009 u.a. für die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen und Gülle gezahlt. Damit werden auch der Einsatz von Energiepflanzen und die Etablierung „neuer“ Pflanzenarten, spezieller Sorten und angepasster Fruchtfolgen für die Biogasproduktion unterstützt. Für eine effektive Ausschöpfung des energetischen Potentials von Biogaspflanzen ist jedoch eine optimale Gestaltung der gesamten Bereitstellungskette des pflanzlichen Substrates nötig. Neben dem Anbau umfasst dies die Ernte, Konservierung und Lagerung des Pflanzenaufwuchses. Grundvoraussetzung für hohe Methanerträge ist die Beschickung der Biogasanlage mit qualitätsgerechten Substraten. Die vorliegende Arbeit soll zu einer besseren Kenntnis der Wirkung verschiedener Parameter bei der Ernte, Konservierung und Lagerung von Biogaspflanzen auf die Substratqualität und Methanbildung beitragen und damit Hinweise für eine effiziente Gestaltung der Bereitstellungskette geben.

¹ Vgl. Europäisches Parlament/ Europäischer Rat (2009) Art.3, Ziff. 1

2 Problemstellung

2.1 Stand des Wissens

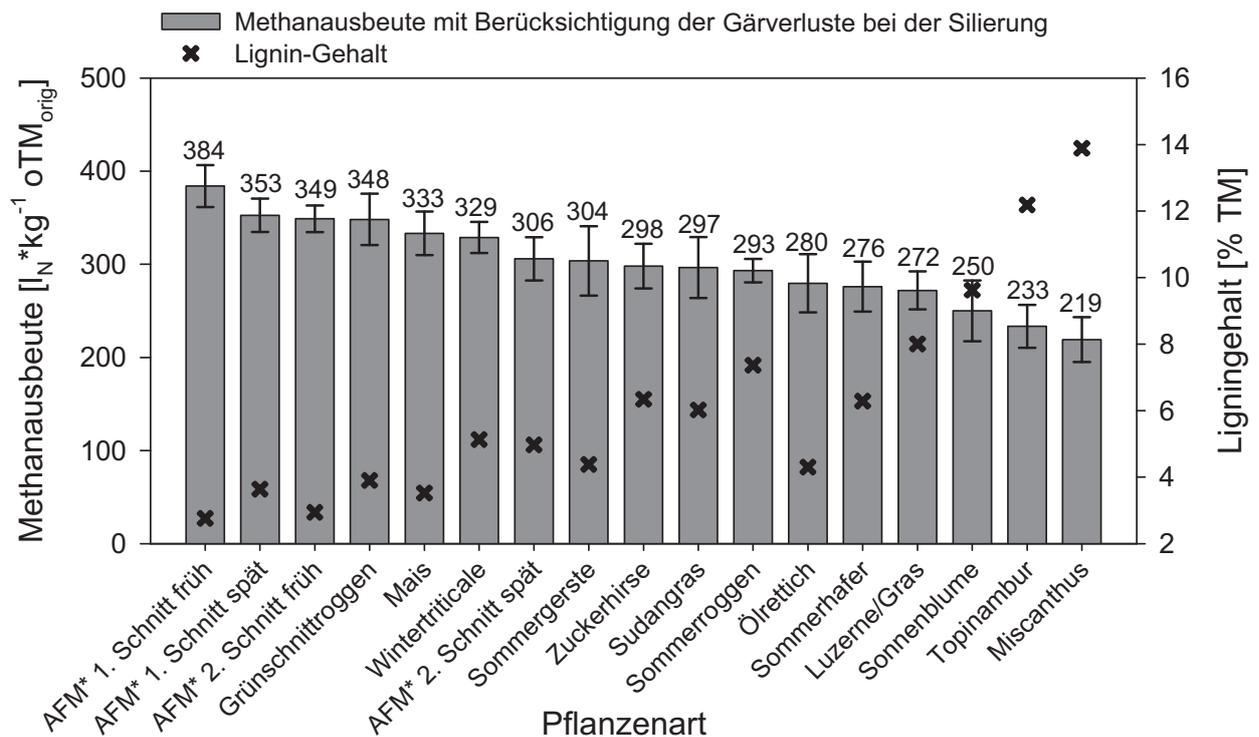
2.1.1 Nutzung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung

2.1.1.1 Methanbildung aus pflanzlicher Biomasse

Die Biomethanisierung ist ein komplexer anaerober Prozess, bei dem ein mikrobieller Umbau von organischer Substanz zu Methan und Kohlendioxid stattfindet. Dieser Gärprozess lässt sich nach heutigem Kenntnisstand in vier Stufen unterteilen (WEILAND 2001). Dabei sind an den einzelnen Abbauphasen unterschiedliche Mikroorganismen beteiligt, die in enger Wechselbeziehung zueinander stehen. In der ersten Stufe, der Hydrolyse, werden durch die Wirkung von Exoenzymen hydrolytischer Bakterien polymere Verbindungen wie Fette, Proteine und Kohlenhydrate, gespalten. Die dabei gebildeten Monomere werden in der zweiten Stufe, der Acidogenese, durch acidogene Bakterien zu organischen Säuren, Alkoholen sowie Wasserstoff und Kohlendioxid umgebaut. In der sich anschließenden dritten Stufe, der Acetogenese, erfolgt die Umsetzung der organischen Säuren und Alkohole zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid durch acetogene Bakterien. Diese Produkte werden wiederum in einer vierten Stufe, der Methanogenese, durch methanogene Archaeen zur Bildung von Methan und Kohlendioxid genutzt. Eine detaillierte Beschreibung der Gärprozesse und beteiligten Mikroorganismen wird u.a. von SAHM (1981), WEILAND (2001), AHRING (2003) und MADIGAN & MARTINGO (2006) gegeben. Das entstehende Biogas setzt sich bei einem ungestörten Prozess aus 50 – 70 % Methan und 29 – 49 % Kohlendioxid zusammen. Weiterhin können Spuren von Wasserstoff, Schwefelwasserstoff und Stickstoff in dem Gasgemisch enthalten sein (WEILAND 2001).

Die gebildete Menge und Qualität des Biogases ist in erster Linie von dem Einsatzstoff abhängig. Für die Biogaserzeugung sind sowohl tierische als auch pflanzliche Roh- und Reststoffe geeignet. Die ursprüngliche landwirtschaftliche Biogasanlage war auf die Verwertung von Gülle und Flüssigmist ausgelegt (WEILAND 2005). Die Kofermentation von Energiepflanzen begann erst um 1999, wobei bereits im Jahr 2003 mehr als 50 % aller seither in Betrieb genommenen Biogasanlagen Energiepflanzen zur Kofermentation nutzten (WEILAND 2003). Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) schätzt, dass im Jahr 2008 in Deutschland Energiepflanzen auf etwa 500 000 ha für die Biogasnutzung angebaut wurden (FNR 2009b). Die meisten konventionell verwerteten landwirtschaftlichen Pflanzenarten sind für die Biomethanisierung geeignet, wenn sie geerntet werden, bevor eine starke Lignifizierung der Biomasse beginnt (WEILAND 2003). Energiepflanzen zeichnen sich im Vergleich zu Gülle durch hohe

Methanbildungspotenziale aus. Nach WEILAND (2003) liegen die Methanausbeuten von Energiepflanzen bei 250 bis 450 l_N*kg⁻¹ oTM_{zu}. LEHTOMÄKI (2006) ermittelte Methanbildungspotenziale von 10 verschiedenen Pflanzenarten zwischen 170 und 490 l*kg⁻¹ oTM_{zu}, wobei der Hauptanteil der Messungen Methanausbeuten zwischen 300 und 400 l*kg⁻¹ oTM_{zu} ergab. **Abb. 1** zeigt beispielhaft Methanbildungspotenziale und Ligninanteile der Silagen verschiedener Pflanzenarten nach HERRMANN ET AL. (2009).



AFM... Ackerfuttermischung

Abb. 1: Methanausbeuten ($\bar{x} \pm s$) und Ligningehalte von Ganzpflanzensilagen verschiedener Pflanzenarten

Neben der Methanausbeute ist für den Landwirt insbesondere der Methanhektarertrag einer Pflanzenart von Interesse. Dieser ist jedoch stark von den Standort- und Anbaubedingungen abhängig und unterliegt entsprechend innerhalb einer Pflanzenart großen Schwankungen. Die höchsten Methanhektarerträge können von Futterrüben und Silomais sowie von mehrschnittig genutzten Pflanzenarten wie Weidelgras, Sudangras und Luzerne gewonnen werden (WEILAND 2003). Von OECHSNER ET AL. (2003) werden maximale Methanhektarerträge für Mais von bis zu 9920 m³*ha⁻¹*a⁻¹ und von AMON ET AL. (2007A) von bis zu 9039 m³*ha⁻¹*a⁻¹ angegeben.

Aufgrund des hohen Methanhektarertrages sowie der sehr gut etablierten Anbau- und Erntetechnik und der guten Silierbarkeit nimmt Mais als Energiepflanze für die Biogasproduktion eine herausragende Rolle ein. Eine aktuelle Auswertung der Betriebsdaten von Biogasanlagen in einem Bundesmessprogramm sowie eine Vollerhebung aus

Bayern im Jahr 2007 bestätigen, dass Mais die am häufigsten verwendete Pflanzenart für die Methanproduktion ist (Abb. 2, RÖHLING & WILD 2008, GEMMEKE ET AL. 2009).

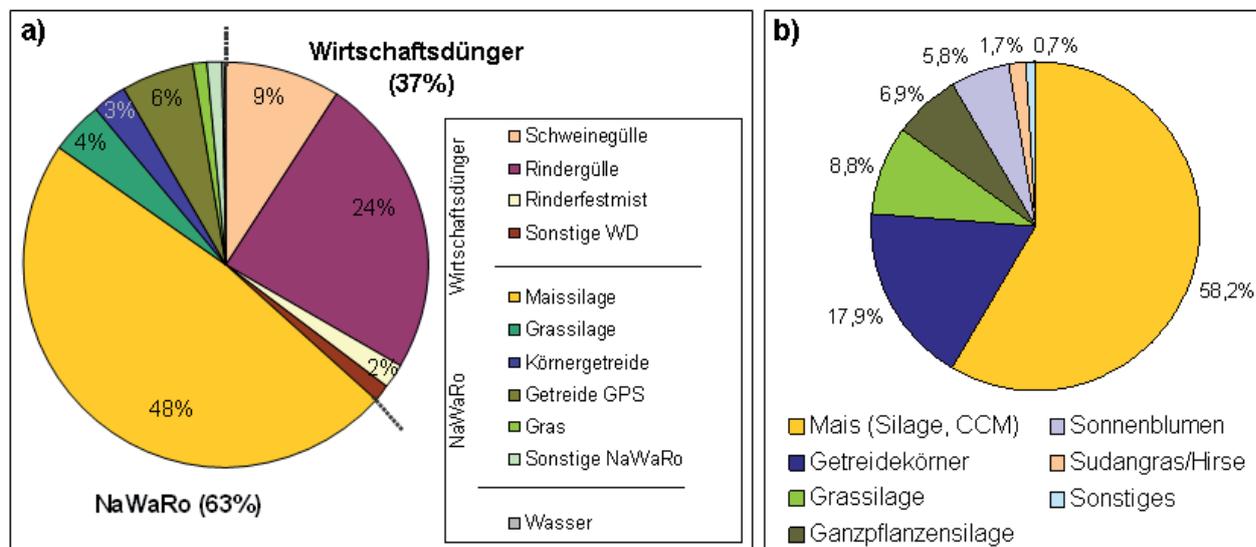


Abb. 2: Einsatzhäufigkeit von Energiepflanzen in Biogasanlagen nach a) GEMMEKE ET AL. (2009) und b) einer Vollerhebung in Bayern (RÖHLING & WILD 2008)

Für eine nachhaltige Nutzung der Anbaufläche ist jedoch bei der Produktion von Energiepflanzen nicht auf einzelne Pflanzenarten und Sorten, sondern auf standortangepasste Anbausysteme und Fruchtfolgen Wert zu legen. Ziel dabei ist es, eine hohe Produktivität und Ertragsstabilität zu erlangen sowie ökologische und ökonomische Risiken zu vermeiden oder zu mindern (KARPENSTEIN-MACHAN 2005). Verschiedene Nutzungskonzepte schließen den Anbau von mehrjährigen Fruchtarten, von Sommer- und Winterzwischenfrüchten sowie die Zweikulturnutzung ein und werden derzeit insbesondere für die Nutzungsrichtung Biogasproduktion intensiv erprobt (AMON ET AL. 2007B, SCHUHMACHER 2008, STRAUSS & VETTER 2008).

2.1.1.2 Bedeutung der Substratzusammensetzung für die Biomethanisierung

Die chemische Zusammensetzung eines Pflanzenmaterials sowie die Abbaubarkeit der organischen Inhaltsstoffe sind Schlüsselfaktoren für die Methanausbeute aus Energiepflanzen (AMON ET AL. 2007a). Die organischen Bestandteile pflanzlicher Biomasse lassen sich in die drei Stoffklassen Kohlenhydrate, Fette und Proteine einteilen. Dabei wird von Kohlenhydraten allgemein die niedrigste und von Fetten die höchste Methanausbeute erzielt (CZEPUCK ET AL. 2006). Je nach zugrunde gelegter Summenformel für die einzelnen Stoffklassen sind in der Literatur voneinander abweichende Angaben bezüglich der Höhe dieser Methanausbeuten zu finden (Tab. 1).

Tab. 1: Biogasausbeute und Methangehalt einzelner Stoffklassen pflanzlicher Biomasse

	Kohlenhydrate	Fette	Proteine	Quelle
Biogasausbeute [l*kg ⁻¹ oTM]	886	1535	587	(BADGER ET AL. 1979)
	790	1250	700	(BASERGA 1998)
	700-800	1000-1250	600-700	(WEILAND 2001)
	746	1390	790	(LINKE ET AL. 2006)
Methangehalt [Vol-%]	50	70	84	(BADGER ET AL. 1979)
	50	68	71	(BASERGA 1998)
	50-55	68-73	70-75	(WEILAND 2001)
	50	72	60	(LINKE ET AL. 2006)

Für den Gärprozess spielt das C/N-Verhältnis im Substrat eine wichtige Rolle. Zum Einen ist ausreichend Stickstoff notwendig, um die Zellvermehrung zu ermöglichen, zum anderen ist jedoch ein Stickstoffüberschuss, der zur Bildung toxischer NH₃-Konzentrationen führen kann, zu vermeiden (WEILAND 2001). Als optimales C/N-Verhältnis wird eine Spanne von 20 bis 30 angegeben (WEILAND 2001). In Untersuchungen von OECHSNER ET AL. (2003) erfolgte die Umsetzung organischer Masse zu Biogas bei einem C/N-Verhältnis von 37 bis 45 stärker als bei einem C/N-Verhältnis von 15. Neben Kohlenstoff und Stickstoff sind auch Phosphor und Schwefel als Makronährstoffe sowie eine Reihe von Mikronährstoffen, wie Nickel, Kobalt, Molybdän, Eisen, Wolfram und Selen für den Ablauf der Umsetzungsvorgänge essenziell (WEILAND 2001, KARPENSTEIN-MACHAN 2005). Andere Verbindungen wie Schwefelwasserstoff, flüchtige Fettsäuren, Ammoniakstickstoff, die vorwiegend als Stoffwechselprodukte des anaeroben Abbaus entstehen, und Schwermetalle wirken hingegen abhängig von ihrer Konzentration hemmend oder toxisch auf die Biozönose (WEILAND 2001).

Der vollständigen Verwertung der Kohlenstoffquellen in pflanzlichen Substraten ist vorrangig durch den Gehalt an Lignin Grenzen gesetzt. Lignin gilt als im Biogasprozess nicht abbaubar und mindert damit die Methanausbeute (WEILAND 2001, LEHTOMÄKI 2006). Zusätzlich kann durch Komplexbildung mit Cellulose bzw. Hemicellulose und durch Inkrustierung der Abbau verwertbarer Komponenten herabgesetzt werden. Nur frei liegende Komponenten sind dem mikrobiellen Abbau zugänglich (WEILAND 2001). Nach VAN SOEST (1981) schützt Lignin etwa das 1,4fache des eigenen Gewichtes an Zellwand-Kohlenhydraten vor mikrobieller Zersetzung. GHOSH & HENRY (1985) fanden bei der Biomethanisierung von Wasserhyazinthe und Bermudagrass Abbaugrade für Lignin von 0 %, für Cellulose von 31 – 43 % und für Hemicellulose von 81 – 86 %. BANEMANN ET AL. (2008c) ermittelten Abbaugrade für Hemicellulosen von 65 % sowie den Abbau des ADF-Anteils um 51 % und des NDF-Anteils um 57 %. Hemicellulosen besitzen eine leichter aufbrechbare Struktur als Lignocellulosen, für den Celluloseabbau sind jedoch weniger verschiedene Enzyme und Energie nötig (GHOSH & HENRY 1985).

Verschiedene Autoren beschreiben die Korrelation einzelner Inhaltsstoffe pflanzlicher Substrate mit der erzielbaren Methanausbeute bzw. geben Möglichkeiten zur Berechnung des Methanbildungspotenzials aus der stofflichen Zusammensetzung an. Nach BUSWELL & MUELLER lässt sich auf Grundlage der Elementarzusammensetzung organischer Materialien die Methanbildung berechnen (BUSWELL & MUELLER 1952, LINKE ET AL. 2006). Dabei wird jedoch von einem bei pflanzlichem Material nicht erreichbaren vollständigen Abbau ausgegangen. Untersuchungen von CZEPUCK ET AL. (2006) zeigen, dass mit der Formel nach BUSWELL & MUELLER errechnete Methanausbeuten um bis zu 22 % höher liegen als bei Analyse im Batch-Gärtest. Unter der Annahme, dass zwischen Abbauvorgängen in der Biogasanlage und Verdauungsvorgängen bei Wiederkäuern Parallelen bestehen, wird die Schätzung der Methanausbeute bei Kenntnis der Anteile an Rohfett, Rohfaser, Rohprotein und NfE in der pflanzlichen Biomasse durch Kombination der theoretischen Methanausbeuten dieser Stoffklassen (**Tab. 1**) mit Verdauungsquotienten vorgeschlagen (SCHATTAUER & WEILAND 2006). Den Rohfaser- und NfE-Bestandteilen wird dabei die theoretische Methanausbeute der Kohlenhydrate zugeordnet. GRUBER ET AL. (2004) stellen bei auf diese Weise berechneten Methanausbeuten eine Differenz von $\pm 5\%$ zu realen Methanausbeuten aus der Praxis fest. Nach CZEPUCK ET AL. (2006) liegen die Abweichungen gegenüber Messungen im Labormaßstab bei +12 bis -23 %. Die Gleichsetzung der Abbauvorgänge im Pansen von Wiederkäuern und in einer Biogasanlage ist kritisch zu bewerten (CZEPUCK ET AL. 2006). WEIßBACH (2008b) schlägt aktuell die Berechnung des Biogasbildungspotenzials verschiedener Pflanzenarten auf Grundlage der fermentierbaren organischen Trockensubstanz (FoTS), d.h., der bei der Biomethanisierung biologisch nutzbaren Substanz der Substrate vor. Die Schätzung der FoTS erfolgt auf Grundlage der Ausscheidungen bei Verdauungsversuchen mit Schafen, wobei die Ausscheidungen an Rohprotein und Rohfett je Art des pflanzlichen Substrates als konstant angesehen werden, während die Ausscheidungen an Kohlenhydraten über den Rohfasergehalt bzw. den Gehalt an enzymunlöslicher organischer Substanz (EulOS) berechnet werden (WEIßBACH 2008b).

Für einzelne, zum Teil umfangreiche Datensätze konnten über einfache bzw. multiple Regressionsmodelle Zusammenhänge mit Bestimmtheitsmaßen $R^2 > 0,9$ zwischen dem Methanbildungspotenzial und den Gehalten an löslichen Kohlenhydraten, Proteinen, Lignin, ADF bzw. den Rohnährstoffgehalten der einfachen oder erweiterten Weender-Analyse gefunden werden (HABIG 1985, AMON ET AL. 2003b, AMON ET AL. 2007b, GUNASEELAN 2007, KAISER 2007). Die ermittelten Regressionsgleichungen sind jedoch zumeist nur für einzelne Pflanzenarten gültig und nur schwer auf andere Datensätze übertragbar (WELLENBROCK ET AL. 2007).

2.1.1.3 Bereitstellung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung

Die gesamte Prozesskette zur Produktion von Energiepflanzen für die Biomethanisierung umfasst Anbau, Ernte und Bergung, Transport und Konservierung. Die Grundlagen für den Anbau von Biogaspflanzen sind identisch mit denen für die Futter- und Nahrungsmittelproduktion, Abweichungen ergeben sich jedoch in den Anbausystemen und agrotechnischen Maßnahmen (STRAUSS ET AL. 2009). Entsprechend können sich z.B. Sortenwahl, Saatstärke, Düngung, Pflanzenschutz und Erntetermin je nach Nutzungsrichtung unterscheiden. Für die Biogasproduktion erfolgt üblicherweise die Ernte der Gesamtpflanze. Von AMON ET AL. (2007A) konnte am Beispiel von Mais gezeigt werden, dass bei Nutzung der Ganzpflanze deutlich höhere Methanhektarerträge erzielt werden verglichen mit CCM bzw. der ausschließlichen Nutzung des Korns. Der Betrieb einer Biogasanlage macht eine ganzjährige Beschickung mit dem pflanzlichen Substrat notwendig. Dabei sollte eine gleichbleibend hohe Qualität gewährleistet sein. Hohe Anteile an leicht abbaubaren Kohlenhydraten im saisonal anfallenden Erntegut können bei suboptimaler Lagerung leicht verloren gehen. Daher besteht die Forderung nach einer schonenden und verlustarmen Konservierung und Lagerung des Pflanzenbestandes über einen langen Zeitraum. Die übliche und geeignete Form der Konservierung bei Ernte der Ganzpflanze ist die Silierung (EGG ET AL. 1993).

Für die Nutzungsrichtung Biogasproduktion ist im Vergleich zur Futtermittelproduktion häufig eine größere Vielfalt an Erntegütern zu bewältigen. Weiterhin hat eine intensivere mechanische Aufbereitung an Bedeutung gewonnen. Steigende Erntemengen machen eine hohe Maschinenkapazität notwendig und stellen neue Herausforderungen an Management und Logistik der Verfahrensketten (CIELEJEWSKI 2007).

Für die Ernte und Bergung existiert eine Reihe von Verfahren, die sich nach SONNEN (2006) voneinander unterscheiden durch

- die Art des Erntegutes (Körnerfrüchte, Siliergüter, Hackfrüchte, Erzeugung von Stückgütern: Pressballen),
- die Art der Erntegutbe- und -entladung,
- der Puffermöglichkeit und Anbindung des Puffers an die Ernteeinheit (parallele, bedingt absätzig und absätzig Verfahren),
- den Zeitpunkt und Ort des Gutumschlages und
- den Ort der Lagerstätte.

Als Standardverfahren für die Ernte und Bergung von Siliergütern für die Biogaserzeugung gilt die Häckselkette. Wird zur Ernte der für einen guten Silierverlauf notwendige Mindest-TM-Gehalt nicht erreicht, kann dem Häckseln das Mähen, Anwelken und Schwaden des Bestandes zur Erhöhung der Trockenmasse vorangehen. Je nach Pflanzenart kann die Ernte auch über Ladewagen- oder Ballenkettens erfolgen (**Abb. 3**).

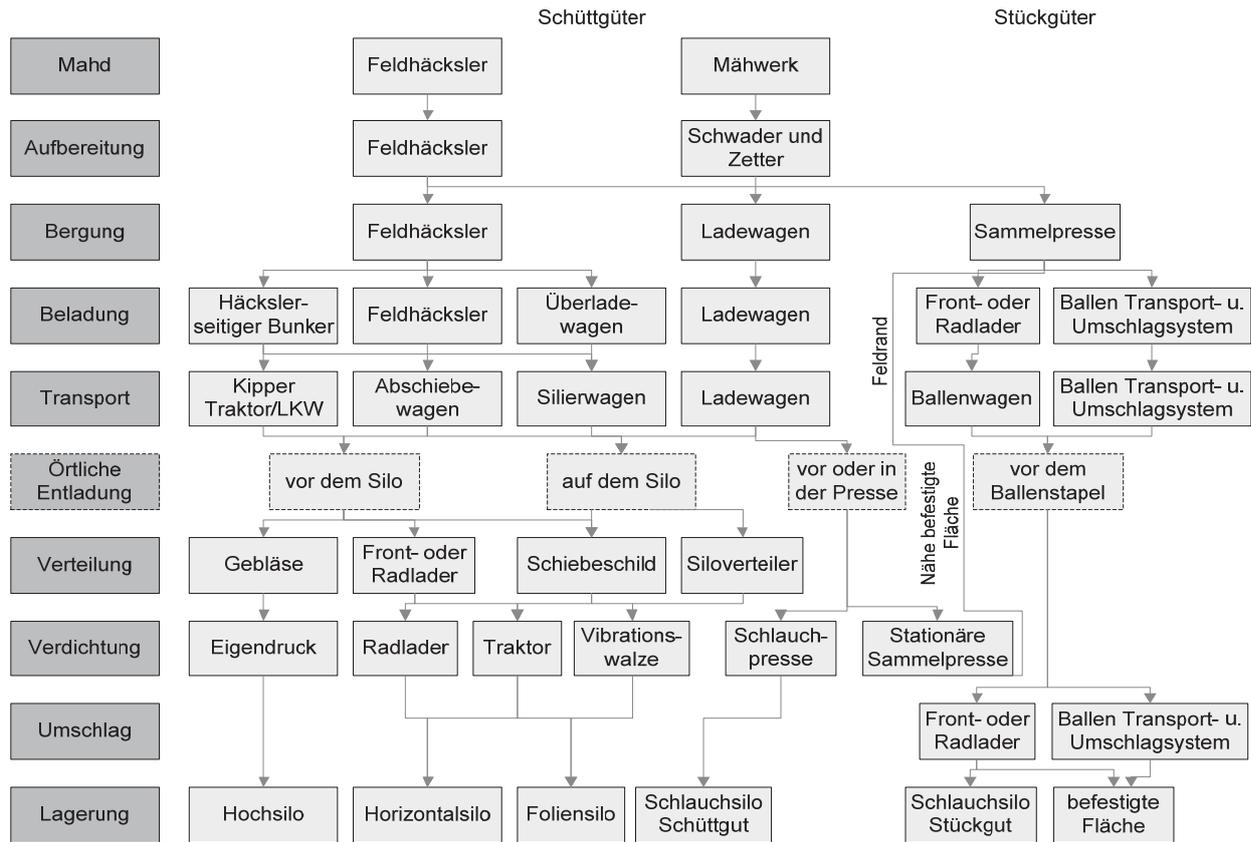


Abb. 3: Verfahren zur Ernte und Einbringung von Siliergütern nach SONNEN (2006)

In der Häckselkette übernimmt vorwiegend der selbstfahrende Feldhäcksler die Aufgabe des Mähens, Aufbereitens, Aufnehmens und Ladens silierfähiger Schüttgüter. Durch die Adaption verschiedener Erntevorsätze wie Maisschneidwerke, Getreideschneidwerke, Pick-Up-Vorsätze zur Aufnahme von Anwelkgut, Maispflückern u.ä. wird die optimale Anpassung an ein breites Einsatzspektrum gewährleistet. Weiterhin kann über Nachzerkleinerungseinrichtungen eine zusätzliche Aufbereitung des Erntegutes, insbesondere der Aufschluss von Körnern, erfolgen. Feldhäcksler werden mit Motornennleistungen von 250 bis 720 kW angeboten. Abhängig von Ertrag, Arbeitsbreite und Arbeitsgeschwindigkeit können Massendurchsätze von $> 70 \text{ t FM} \cdot \text{h}^{-1}$ für Anwelkgut und $> 300 \text{ t FM} \cdot \text{h}^{-1}$ für Mais erzielt werden (FÜRL ET AL. 2007). Die Arbeitsgeschwindigkeit wird wiederum von einer Reihe von Faktoren bestimmt. Zu nennen sind hier die installierte Motorleistung, Art und Drehzahlen der einzelnen Trenn-, Förder- und Aufbereitungsaggregate, Art und Leistungsvermögen des Fahrantriebes und der Aufbau der Gesamtmaschine (SONNEN 2006). Für eine effiziente Nutzung des Feldhäckslers sind durch Anpassung von Transport- und Verdichterkapazitäten Wartezeiten möglichst zu minimieren.

Etwa 70 % der Energie des Feldhäckslers werden für den Häcksel- und Aufbereitungsprozess benötigt (GARBERS & FRERICHS 2001). Die mittels Exaktfeldhäcksler erzeugte

theoretische Häcksellänge wird von der Schnittfrequenz (Drehzahl des Schneidorgans und Anzahl der Messer) und der Einzugsgeschwindigkeit des zu erntenden Gutes bestimmt. Sie kann üblicherweise zwischen 4 und 22 mm zum Teil stufenlos verstellt werden. Tatsächlich wird jedoch keine einheitliche Länge, vielmehr eine Verteilung von Partikellängen erzeugt, die u.a. auch durch die Eigenschaften und Lage des Gutes beim Häckseln sowie durch Einzugsschlupf und Schärfe der Messer des Feldhäckslers beeinflusst wird (HASSEBRAUCK & MORTASAWI 1966). Die Einstellung einer kürzeren Häcksellänge ist mit einem höheren Kraftstoffverbrauch und geringeren Massedurchsätzen des Feldhäckslers verbunden (DERNEDE & HONIG 1977).

Bei geringen Feld-Silo-Entfernungen kommt für die Bergung des gehäckselten Gutes vorrangig das Parallelverfahren zum Einsatz. Dabei erfolgt die Ernte auf parallel zum Feldhäckslers fahrende Transportfahrzeuge. Hierfür kommen von Traktoren gezogene Kippanhänger, Häckseltransportwagen, Kombiwagen oder Abschiebewagen zum Einsatz. Für größere Transportentfernungen werden derzeit Verfahren entwickelt, um Feld- und Straßentransport zu trennen (NÄGELE 2009). Hierbei werden LKW eingesetzt, die am Feldrand aus auf dem Feldhäckslers aufgebauten Bunkern bzw. aus traktor-gezogenen Überladewagen gefüllt werden. Die Transportkapazität einer logistischen Kette ist u.a. von der Anzahl der Transporteinheiten, dem Ladevolumen, dem Füllgrad, der Schüttdichte des Erntegutes, den Transportentfernungen, der Fahrgeschwindigkeit und von Verlustzeiten abhängig (HAHN & FRÖBA 2009). Eine Verringerung der theoretischen Häcksellänge zur Ernte bewirkt höhere Schüttdichten und damit eine höhere Ladekapazität. Die Anzahl der Transporteinheiten und ggf. das Ladevolumen wird in der Regel der Erntemaschine angepasst.

Parallel zur Bergung wird das Erntegut üblicherweise in Horizontal- oder Schlauchsilos eingelagert. Wesentliche Forderungen an das Silierverfahren bestehen in einer zügigen Befüllung des Silos, einer gleichmäßigen hohen Verdichtung und einem luftdichten Verschluss, um einen guten Gärverlauf zu gewährleisten und Verluste durch Fehlgärungen und Nacherwärmung zu vermeiden. Im Horizontalsilo erfolgt die Verdichtung mit Walzschleppern, Vibrationswalzen oder Radladern (THAYSEN & WAGNER 2006, HÄBLER ET AL. 2008). Entscheidend für den Walzdruck ist die Radlast, die sich aus Gewicht, Reifendruck und Reifenaufstandsfläche ergibt (THAYSEN & WAGNER 2006). Um eine Mindestverdichtung für einen angestrebten Gasaustausch $< 20 \text{ l} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ im Silo zu erreichen, werden eine Reihe von Empfehlungen gegeben (THAYSEN & WAGNER 2006):

- die maximale Schichtdicke sollte 30 cm betragen
- die Walzgeschwindigkeit sollte bei $4 - 6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ liegen
- eine mindestens dreimalige Überfahrt ist anzustreben
- der Verdichtungsaufwand sollte $2 - 3 \text{ min} \cdot \text{t}^{-1}$ betragen
- je Walzfahrzeug sollte die Bergeleistung $15 - 20 \text{ t TM} \cdot \text{h}^{-1}$ bei Gras und $20 - 25 \text{ t TM} \cdot \text{h}^{-1}$ bei Mais nicht überschreiten.

Um sowohl den Anforderungen an die Verdichtung als auch den vom Feldhäcksler kommenden Masseströmen gerecht zu werden, werden bei begrenzten Silobreiten häufig mehrere Horizontalsilos gleichzeitig befüllt.

Bei der Schlauchsilierung wird das Erntegut in eine Aufnahmewanne gegeben und über einen Pressrotor kontinuierlich entgegen dem Bremsdruck der Maschine in einem Schlauch aus Silofolie verdichtet (WAGNER & WEBER 2008). Die technische Leistung von Folienschlauchpressen liegt abhängig von Erntegut und Schlauchdurchmesser bei 25 – 70 t FM*h⁻¹ bis zu 150 – 300 t FM*h⁻¹ (THAYSEN & WAGNER 2006).

Auch für die Entnahme der Silage sind verschiedene Systeme und Techniken wählbar. Vorteilhaft zur Vermeidung von Nacherwärmung sind Entnahmetechniken, wie der Siloblocksneider, die einen möglichst geringen Grad der Auflockerung an der Anschnittfläche bewirken gegenüber stärker auflockernden Systemen, wie dem Frontlader mit Greifschaufel (THAYSEN & WAGNER 2006).

2.1.2 Silierung von Energiepflanzen

2.1.2.1 Grundlagen der Silierung

Die Silierung ist als Verfahren der Konservierung von feuchtem Erntegut ausführlich aus der Futtermittelkunde bekannt und wird hier seit Mitte des 20. Jahrhunderts weitverbreitet angewandt (WILKINSON ET AL. 2003). Das Prinzip der Silagebereitung besteht darin, den aeroben Stoffabbau durch Lagerung des Pflanzenmaterials unter Luftabschluss möglichst rasch zu unterbinden sowie den anaeroben Stoffabbau so zu steuern, dass er energiesparend vonstatten geht und von selbst zum Erliegen kommt (MÜLLER & BAUER 2006). Als Produkte der Fermentationsprozesse unter anaeroben Bedingungen werden organische Säuren, vorwiegend Milchsäure gebildet, die den pH-Wert senken und die Vermehrung unerwünschter Mikroorganismen hemmen. Dies geschieht durch epiphytisch an den Pflanzen vorkommende milchsäureproduzierende Bakterien (MSB), die entsprechend ihrer biochemischen Eigenschaften in drei Gruppen unterteilt werden (MCDONALD ET AL. 1991, PAHLOW 2003):

- Gruppe 1: Obligat homofermentative MSB fermentieren Hexosen fast ausschließlich zu Milchsäure, können jedoch keine Pentosen verwerten.
- Gruppe 2: Fakultativ heterofermentative MSB setzen Hexosen über den gleichen Weg um wie Gruppe 1, können jedoch zusätzlich auch Pentosen verwerten.
- Gruppe 3: Obligat heterofermentative MSB setzen Hexosen zu Milchsäure und anderen Produkten, wie Essigsäure, Ethanol und Kohlendioxid um.

Wesentliche Fermentationswege homo- und heterofermentativer MSB sowie die damit verbundenen TM- und Energieverluste sind in **Tab. 2** zusammengefasst.

Tab. 2: Wichtige Umsetzungswege homo- und heterofermentativer MSB und damit verbundene TM- und Energieverluste (MCDONALD ET AL. 1991)

Umsetzungsweg	TM-Verlust	Energieverlust
<i>homofermentativ:</i>		
Glucose oder Fructose → 2 Milchsäure + 2 H ₂ O	0 %	0,7 %
<i>homo- und heterofermentativ:</i>		
Xylose oder Arabinose → Milchsäure + Essigsäure + 2 H ₂ O	0 %	k.A.
2 Citrat → Milchsäure + 3 Essigsäure + 3 CO ₂	29,7 %	+ 1,5 %
Malate → Milchsäure + CO ₂	32,8 %	+ 1,8 %
<i>heterofermentativ:</i>		
Glucose → Milchsäure + Ethanol + CO ₂ + H ₂ O	24 %	1,7 %
3 Fructose → Milchsäure + Essigsäure + 2 Mannitol + CO ₂ + H ₂ O	4,8 %	1,0 %

Die in Silagen vorkommenden Arten von MSB gehören vorwiegend den Gattungen *Lactobacillus*, *Enterococcus*, *Pediococcus* und *Leuconostoc* an (JEROCH ET AL. 1999). Anzahl und dominierende Spezies variieren sehr stark, ändern sich mit dem Verlauf der Silierung und sind von vielen, die Silierung beeinflussenden Faktoren abhängig.

MCDONALD ET AL. (1991) schlussfolgert in Zusammenfassung verschiedener Ergebnisse aus der Literatur, dass *Lactobacillus plantarum* die am häufigsten gefundene Spezies ist. Allgemein sind MSB sehr säuretolerant, wobei das Optimum des Wachstums im leicht sauren Milieu bei einem pH-Wert von 6,4 bis 4,5 liegt. Als Temperaturoptimum wird 30°C angegeben, wobei ein Wachstum bei den meisten Spezies auch zwischen 5 und 50°C möglich ist.

Erfolgt die Absenkung des pH-Wertes durch MSB nicht schnell genug, können sich andere unerwünschte Mikroorganismen entwickeln, die um Nährstoffe konkurrieren, die Stabilität von Silagen herabsetzen und Endprodukte bilden, die den Nährwert der Silage mindern (MCDONALD ET AL. 1991). Hierzu zählen vorrangig Clostridien, Enterobakterien, Hefen und Schimmelpilze. **Tab. 3** fasst die Charakteristik der wichtigsten Gärschädlinge zusammen.

Verlauf und Ausmaß der Fermentationsvorgänge bei der Silierung werden von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, als Haupteinflussfaktor gilt jedoch die Zusammensetzung des Ausgangsmaterials. Hier spielen insbesondere der Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten, die Pufferkapazität sowie der TM-Gehalt im Siliergut eine Rolle.

Als wasserlösliche Kohlenhydrate werden die nichtstrukturellen Kohlenhydrate im pflanzlichen Material bezeichnet, die von den MSB sofort verwertet werden können, wenn sie verfügbar sind (MCDONALD ET AL. 1991). Um bei der Silierung eine ausreichende Säuerung durch Milchsäuregärung zu erreichen und damit Buttersäuregärung zu vermeiden, ist ein Mindestgehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten nötig (WEIßBACH ET AL. 1974). Dieser ist wiederum von der Pufferkapazität und dem TM-Gehalt des Siliergutes abhängig. Die Pufferkapazität bezeichnet den Widerstand eines Pflanzenmaterials, der der Absenkung des pH-Wertes bei der Silierung entgegengesetzt wird. Puffernde Substanzen im Erntegut zwischen pH 4 und pH 6 sind vor allem Anionen der organischen Säuren sowie Orthophosphate, Sulfate, Nitrate, Chloride und Pflanzenproteine (PLAYNE & MCDONALD 1966). Mit steigender Pufferkapazität steigt die notwendige Menge an wasserlöslichen Kohlenhydraten im Pflanzenmaterial (WEIßBACH 1974). Niedrige TM-Gehalte fördern das Wachstum von Clostridien. Mit steigendem TM-Gehalt nimmt die Säureempfindlichkeit der Verderberreger zu (WEIßBACH 1974). Entsprechend ist bei niedrigeren TM-Gehalten eine stärkere Säuerung des pflanzlichen Materials notwendig, um Fehlgärungen zu vermeiden. Nach WEIßBACH (1974) steht der notwendige Mindest-TM-Gehalt zur Vermeidung von Buttersäuregärung in einem direkten Verhältnis zu Zuckergehalt und Pufferkapazität des Siliergutes (Gl. 1).

$$\text{TM-Gehalt}_{\min} [\%] = 45 - 8 * (\text{Zuckergehalt} * \text{Pufferkapazität}^{-1})$$

Gl. 1

Tab. 3: Charakteristik der wichtigsten Gärstäbchen bei der Silierung nach McDONALD ET AL. (1991), JEROCH ET AL. (1999) und PAHLOW ET AL. (2003)

Mikroorganismengruppe	Arten (Beispiele)	Beschreibung	optimale Wachstumsbedingungen	Aktivitätsgrenzen	Substrate des Stoffwechsels	Produkte des Stoffwechsels	unerwünschte Wirkungen
Clostridien							
Saccharolyt	<i>C. butyricum</i> , <i>C. tyrobutyricum</i> , <i>C. paraputificum</i>	Gram-positiv, stäbchenförmig, freilebend, sporenbildend, obligat anaerob	pH 7,0 - 7,4	pH 4,2 - 4,4	Zucker, organische Säuren	Buttersäure, CO ₂ , H ₂	Abbau von Milchsäure und Proteinen hohe TM- und Energieverluste
Proteolyt	<i>C. bifermentans</i> , <i>C. sporogenes</i>				Aminosäuren	Amine, Ammoniak, CO ₂ , Carbonsäuren	kann bis zu einem völligem Verderb der Silage führen
Enterobakterien (coliforme Keime)	<i>Hafnia alvei</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Citrobacter freundii</i>	Gram-negativ, stäbchenförmig, fakultativ anaerob		pH 4,3 - 4,5	Zucker, Nitrat	Milchsäure, Essigsäure, Succinate, Ameisensäure, Ethanol, Acetoin, 2,3-Butandiol, CO ₂ , H ₂ , Ammoniak	Konkurrenz um Nährstoffe mit MSB Bildung von Ammoniak Bildung von Endotoxinen Erhöhung der Pufferkapazität
Hefen	<i>Candida krusei</i> , <i>Candida lambicola</i> , <i>Hansenula anomala</i>	eukaryotisch, heterotroph, einzellige Wuchsform, aerob bis fakultativ anaerob	pH 3,5 - 6,5	pH 1,3 - 2,2	Zucker, Polysaccharide, organische Säuren, Ethanol	Ethanol, Propanol, Essig-, Propion-, Butter-, Milchsäure	Konkurrenz um Nährstoffe mit MSB Ursache für aeroben Verderb
Schimmelpilze	<i>Penicillium roquefortii</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Fusarium</i> spp., <i>Cladosporium herbarum</i>	eukaryotisch, heterotroph, mehrzellige Wuchsform, obligat aerob	ca. pH 5 25 - 35°C	pH 2,5 - 3,0	Zucker, Milchsäure, Cellulose	Konkurrenz um Nährstoffe Abbau von Milchsäure Bildung von Mykotoxinen Ursache für aeroben Verderb	
Essigsäurebakterien	<i>Acetobacter</i> ssp.	Gram-negativ, obligat aerob, stäbchenförmig			Milchsäure, Essigsäure, Ethanol	CO ₂ , H ₂ O, Essigsäure	Einleitung des aeroben Verderbs Abbau von Milch- und Essigsäure
Listerien	<i>Listeria monocytogenes</i>	aerob o. fakultativ anaerob	an der Silageoberfläche	pH 4,5 - 5,6	k.A.	k.A.	Pathogen im Tierfutter
Bacilli	<i>Bacillus licheniformis</i> , <i>B. lentus</i> , <i>B. polymyxa</i>	Gram-positiv, sporenbildend, (fakultativ) aerob			Zucker	organ. Säuren, Ethanol, Glycerol, 2,3-Butandiol	stehen in Verbindung mit aerobem Verderb

Die Silierung kann im Wesentlichen in vier aufeinanderfolgende Phasen unterteilt werden (PAHLOW ET AL. 2003).

Phase 1: Die **anfängliche aerobe Phase** dauert nach gründlicher Verdichtung und Abdeckung des Silos nur wenige Stunden und ist durch die Veratmung des im Silostock eingeschlossenen Restsauerstoffs charakterisiert. Pflanzenenzyme und obligat und fakultativ aerobe Mikroorganismen sind noch aktiv und bewirken den Abbau von Proteinen sowie die Erhöhung wasserlöslicher Kohlenhydrate. Durch intensives Häckseln und Verdichten kann die anfängliche aerobe Phase verkürzt werden.

Phase 2: Die **Hauptgärphase** kann abhängig von den Pflanzeigenschaften und Silierbedingungen innerhalb einer Woche abgeschlossen sein, sie kann jedoch auch länger als einen Monat andauern. Die Dauer korreliert eng mit der Geschwindigkeit der Milchsäurebildung und pH-Wert-Absenkung. In dieser Phase konkurrieren fakultativ und obligat anaerobe Mikroorganismen wie Enterobakterien, Clostridien, Bacilli und Hefen mit Milchsäurebakterien um verfügbare Nährstoffe. Bei erfolgreicher Silierung bilden sich die Milchsäurebakterien als dominante Population heraus. Als Folge der Fermentationsvorgänge entstehen Gase und Sickersaft.

Phase 3: Die **Lagerphase** setzt bei abklingender Intensität der Fermentationsvorgänge ein. In dieser Phase finden nur noch wenige Änderungen im Pflanzenmaterial, wie die langsame Hydrolyse von Struktur- und Speicherkohlenhydraten durch säuretolerante Enzyme statt. Die Population der MSB wird deutlich reduziert. Einige andere Mikroorganismen überleben diese Phase in inaktiver Form (Hefen) oder als Endosporen (Bacilli, Clostridien). Bei noch ausreichend vorhandenem fermentierbarem Substrat und konsequentem Luftabschluss ist die Dauer der stabilen Phase theoretisch unbegrenzt.

Phase 4: Die **Entnahmephase** beginnt nach Siloöffnung und ermöglicht das Eindringen von Sauerstoff in den Silostock. Dies führt zu einer rasanten Vermehrung von Hefen, Schimmelpilzen und Essigsäurebakterien, die zur Erwärmung der Silage und Änderungen der chemischen Zusammensetzung beitragen. Es erfolgt der Abbau von Milchsäure verbunden mit dem Anstieg des pH-Wertes und hohen Verlusten. Der aerobe Verderb in der Entnahmephase kann durch einen ausreichend hohen Entnahmevorschub, eine hohe Lagerdichte sowie eine saubere Entnahme der Silage minimiert werden (THAYSEN & WAGNER 2006).

In Abhängigkeit von der Silierdauer ist entsprechend des Silierverlaufes eine unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Silagen gegeben, die sich bei Nutzung von Silagen für die Biogasproduktion auch auf die Methanbildung auswirken könnte. Systematische Untersuchungen hierzu fehlen bisher.

2.1.2.2 Silierverluste und deren Ursachen

Verluste können im Verlauf der Silierung zu verschiedenen Zeitpunkten und in unterschiedlicher Form und Höhe auftreten. Dies ist in **Abb. 4** schematisch dargestellt. Die Verluste werden im Wesentlichen in Feldverluste, Sickersaftverluste und Verluste durch Restatmung und Fermentation unterteilt (MCDONALD ET AL. 1991).

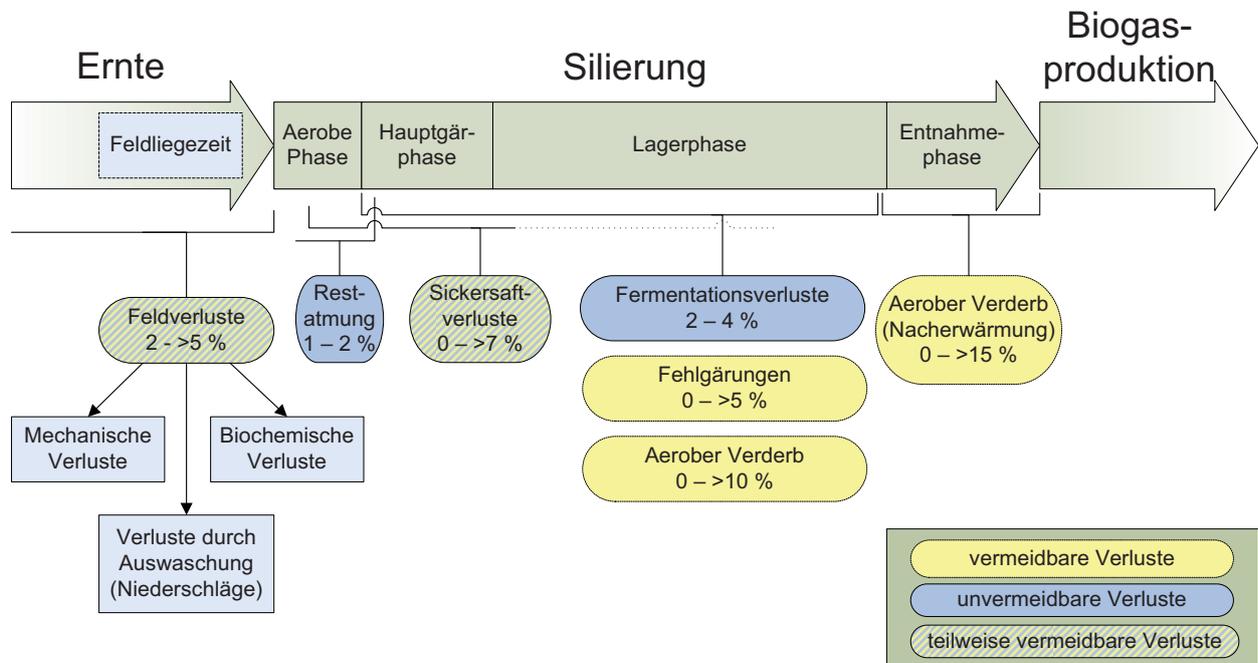


Abb. 4: Schematische Darstellung der Verluste bei der Silierung und Höhe der Energieverluste nach ZIMMER (1980 zitiert in MCDONALD ET AL. 1991)

Zu den Feldverlusten zählen mechanische Verluste, biochemische Verluste und Verluste durch Auswaschung. Bei direkter Ernte treten fast ausschließlich mechanische Verluste auf. Dabei liegen die TM-Verluste üblicherweise nicht über 5 % (JOHNSON ET AL. 1984). Die Feldverluste steigen, wenn das Erntegut angewelkt wird (MAYNE & GORDON 1986, CHARMLEY & THOMAS 1987). Zusätzliche mechanische Verluste entstehen durch Zetten, Wenden und Schwaden und steigen mit der Häufigkeit dieser Arbeitsgänge (MUCK ET AL. 2003). Biochemische Verluste beim Anwelken sind auf Restatmung und Enzymaktivität in den Pflanzenzellen zurückzuführen und nehmen mit geringerem TM-Gehalt des Erntegutes, sowie mit steigender Temperatur und Dauer des Anwelkens zu (MCDONALD ET AL. 1991). Niederschläge während der Feldliegezeit können zudem durch Auswaschung von Nährstoffen und Reaktivierung der Pflanzenenzyme die Feldverluste deutlich erhöhen (MUCK ET AL. 2003).

Sickersaftverluste entsprechen dem überschüssigen Wasser sowie dem Zellsaft, der während der Silierung aus dem Pflanzenmaterial vorwiegend durch den Druck der darüberliegenden Schichten im Silo austritt (GORDON 1967). Sickersaftverluste sind in erster Linie von dem TM-Gehalt des Siliergutes abhängig (MILLER & CLIFTON 1965). Weiterhin haben auch Pflanzenart, Art und Höhe des Silos sowie die Dauer der

Lagerung und die Häcksellänge zur Ernte einen Einfluss auf die Menge an gebildetem Sickersaft (MILLER & CLIFTON 1965, GORDON 1967, ZIMMER 1967b, MUCK ET AL. 2003). McDONALD ET AL. (1991) fassen in Auswertung mehrerer Literaturquellen zusammen, dass bei sehr feuchtem Erntegut Verluste von über 10 % auftreten können, während ab einem TM-Gehalt von 25 bis 35 % Sickersaftverluste kaum mehr gemessen werden. Durch Anwelken des Erntegutes sowie durch Zusatz von absorbierenden Substanzen können Sickersaftverluste reduziert oder verhindert werden (GORDON 1967).

In der Phase der Silofüllung wird Sauerstoff in den Silostock mit eingeschlossen. Dieser wird gemeinsam mit Zuckern unter Bildung von Kohlendioxid, Wasser und Wärme veratmet. Dabei entstehen Verluste, die jedoch bei schneller Silofüllung und effizienter Abdichtung des Silos sehr gering sind (MUCK 1988). Üblicherweise wird der Sauerstoff innerhalb von wenigen Stunden verbraucht. Die Verluste durch Restatmung machen daher bei ausreichender Dichtigkeit des Silos nur etwa 10 % der gesamten gasförmigen Verluste aus (ZIMMER 1967b). Verluste durch Restatmung sind im Allgemeinen nicht von Fermentationsverlusten zu trennen.

Die Fermentationsverluste sind Verluste, die durch die Gärprozesse der an der Silierung beteiligten Mikroorganismen entstehen. Sie sind abhängig von den verwerteten Nährstoffen und den verantwortlichen Mikroorganismen (McDONALD ET AL. 1991). TM-Verluste durch die biochemischen Umsetzungspfade der MSB liegen zwischen 0 und 33 %, während jedoch kaum Energieverluste auftreten (**Tab. 2**). Die Nutzung von Glucose und Fructose als Gärsubstrat erfolgt durch homofermentative MSB ohne TM-Verluste und damit wesentlich effektiver als durch heterofermentative MSB (**Tab. 2**). Bei einem durch homofermentative MSB dominierten Silierverlauf sollten die Fermentationsverluste zwischen 2 und 4 % liegen, die Energieverluste noch deutlich darunter (McDONALD ET AL. 1991). Bei praxisüblicher Mischgärung werden die Verluste durch Umsetzung von Zuckern mit etwa 5 % angegeben (MÜLLER & BAUER 2006). Erheblich höhere Verluste entstehen, wenn die Silierung von der Aktivität von Enterobakterien, Clostridien oder Hefen dominiert wird (**Tab. 4**). Dabei auftretende Fehlgärungen und aerober Verderb führen zu einer starken Bildung von Ammoniak und Kohlendioxid, wobei letzteres direkt mit der Höhe der TM-Verluste in Verbindung steht (WOOLFORD 1990).

Tab. 4: Wichtige Umsetzungswege von Clostridien, Enterobakterien und Hefen sowie damit verbundene TM- und Energieverluste (McDONALD ET AL. 1991)

Umsetzungsweg	TM-Verlust	Energieverlust
<i>Clostridien:</i>		
2 Milchsäure → Buttersäure + 2 CO ₂ + 2 H ₂ + H ₂ O	51,1 %	18,4 %
Glucose → Buttersäure + 2 CO ₂ + 2 H ₂ + 3 H ₂ O	k.A.	k.A.
<i>Enterobakterien:</i>		
Glucose → 3 Essigsäure + Ethanol + 2 CO ₂ + 2 H ₂ + 2 H ₂ O	41,1 %	16,6 %
<i>Hefen:</i>		
Glucose → 2 Ethanol + 2 CO ₂ + 2 H ₂ O	48,9 %	0,2 %

Luft hat einen zerstörenden Einfluss auf Silage, da sie das Wachstum unerwünschter Mikroorganismen ermöglicht. Die daraus resultierenden Verluste können die der übrigen Verlustursachen noch deutlich überschreiten (**Abb. 4**, DERNEDDE & HONIG 1977). Luft kann sowohl während der Lagerphase als auch in der Entnahmephase in das Silo diffundieren. Dies wird während der Lagerung von unzureichender bzw. fehlerhafter Siloabdeckung sowie von unzureichender Verdichtung gefördert (REES ET AL. 1983). Nach WOOLFORD (1990) ist bereits der Eintritt von 100 bis 150 mg O₂*kg⁻¹ TM*d⁻¹ in das Silo ausreichend, um Silage anfällig für aeroben Verderb während und nach der Lagerung zu machen. Ursache des aeroben Verderbs sind Pilze, vor allem Hefen, aber auch Essigsäurebakterien, Bacillusarten, MSB und Actinomycetes (WOOLFORD 1990). Bei Überschreiten eines kritischen Keimbesatzes von 10⁵ KbE milchsäureabbauende Hefen je Gramm Silage ist bei Siloöffnung mit einer sprunghaften Vermehrung der Hefen und dem Abbau der Gärsäuren zu Kohlendioxid und Wasser bei spürbarer Erwärmung der Silage zu rechnen. Durch den daraus folgenden Anstieg des pH-Wertes werden günstige Bedingungen für die Vermehrung anderer Gärschädlinge geschaffen (MUCK ET AL. 2003). Vor allem gut konservierte Silagen mit hohen Milchsäure- und Restzuckergehalten sind anfällig für Nacherwärmung. Silagen mit schlechter Gärqualität, d.h. hohen Gehalten an Buttersäure und Ammoniak und geringen Gehalten an Milchsäure, sind aerob sehr stabil, da Buttersäure und höherwertige Fettsäuren hemmend auf Hefen und Schimmelpilze wirken (WOOLFORD 1990). Die TM-Verluste durch Nacherwärmung können bei bis zu 15 – 30 % insgesamt bzw. bei 3 – 5 % pro Tag liegen (HONIG 1975, PAHLOW ET AL. 2003). Aerober Verderb kann vor allem durch das Silagemanagement, insbesondere durch schnelles Befüllen des Silos, starke Verdichtung, effektive Siloabdeckung und einem ausreichend hohem Vorschub bei einer sauberen Siloentnahme minimiert werden (HONIG 1975, WOOLFORD 1990). Langes Anwelken fördert das Wachstum von Hefen und sollte vermieden werden. Zudem können Silierzusätze zur Verbesserung der aeroben Stabilität der Nacherwärmung entgegenwirken (Abschnitt 2.1.2.5).

Die Gesamtverluste bei der Silierung liegen, abhängig von dem Gärverlauf und den Silierbedingungen, zumeist bei 3 bis 25 %, können jedoch potentiell auch 70 % erreichen (RUPPEL ET AL. 1995). ZIMMER (1967b) bewertete TM-Verluste von 504 Horizontal- und Hochsilos mit verschiedenen Pflanzenarten. Dabei wurden ein mittlerer TM-Verlust von 19,4 % und eine Spanne von 0,8 bis 71,1 % ermittelt. Untersuchungen von 30 Fahrsilos in 12 Betrieben ergaben TM-Verluste von im Mittel 8 % bei einer Spanne von 0 bis 43 % (RUPPEL ET AL. 1995). Bei der Analyse von 39 Schlauchsilos wurden TM-Verluste zwischen 0 und 40 % bestimmt, wobei die mittleren TM-Verluste bei Mais 14 % betragen (MUCK & HOLMES 2006).

2.1.2.3 Bedeutung des Erntezeitpunktes für die Silierung

Mit zunehmender Reife einer Pflanze ändern sich deren TM-Gehalt, der Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten sowie die Pufferkapazität als bedeutende Parameter der Siliereignung eines Pflanzenmaterials. Folglich hat der Erntezeitpunkt und damit verbunden die Reife des Bestandes zur Ernte einen wesentlichen Einfluss auf die Silierung.

Die zunehmende Reife einer Pflanze resultiert generell in einer Erhöhung der TM-Konzentration bei allen Fruchtarten (BUXTON & O'KIELY 2003). Zu niedrige TM-Gehalte und damit zu hohe Wasseranteile verlängern die Fermentation, fördern das Wachstum von Clostridien und führen zu hohem Sickersaftanfall, wodurch wertvolle Nährstoffe aus der Silage verloren gehen können (MCDONALD ET AL. 1991). Hohe TM-Gehalte hingegen machen Silagen anfällig für das Wachstum von Hefen und Schimmelpilzen (BUXTON & O'KIELY 2003). Nach XICCATO ET AL. (1994) nehmen ab einem TM-Gehalt von 40 % bei Mais die TM-Verluste aufgrund von Schwierigkeiten bei Ernte und Verdichtung und stark fallenden Gehalten an fermentierbaren Zuckern erheblich zu. Als optimaler TM-Gehalt zur Ernte von Silomais wird 30 – 35 % in der Gesamtpflanze bzw. 60 – 65 % im Korn sowie weniger als 24 % in der Restpflanze angesehen (AMLER 2006). Für Getreide-Ganzpflanzensilage wird der Übergang von Milch- zu Teigreife mit einem TM-Gehalt von 32 – 38 % als optimaler Erntezeitpunkt angegeben (STEINHÖFEL & THAYSEN 2006)

Die Änderung der Konzentration an fermentierbaren Zuckern mit der Reife einer Pflanze ist von Fruchtart zu Fruchtart verschieden und korreliert mit der Entwicklung des Masse-Verhältnisses einzelner Pflanzenbestandteile. Bei Getreideganzpflanzen und Mais erhöht sich der Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten bis zum Beginn der Milchreife. Mit der Entwicklung des Kornes nehmen die Zuckergehalte bei gleichzeitigem Anstieg der Stärkegehalte in der Ganzpflanze anschließend rasch ab (MACGREGOR & EDWARDS 1968, GIARDINI ET AL. 1976, NADEAU 2007, SCHITTENHELM 2008).

Die Pufferkapazität eines Siliergutes wird unter anderem vom Proteingehalt in dem Pflanzenmaterial beeinflusst. Mit zunehmender Reife wird allgemein die Abnahme des