

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

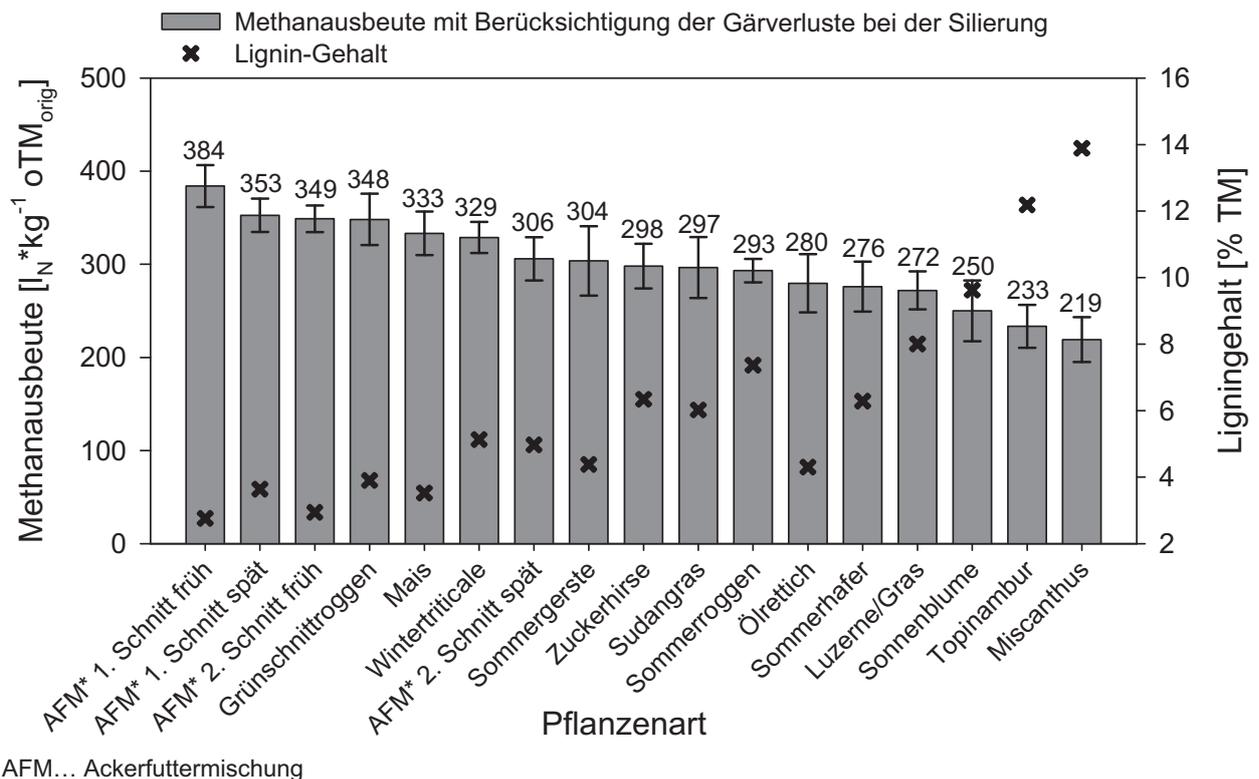
2.1.1 Nutzung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung

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).

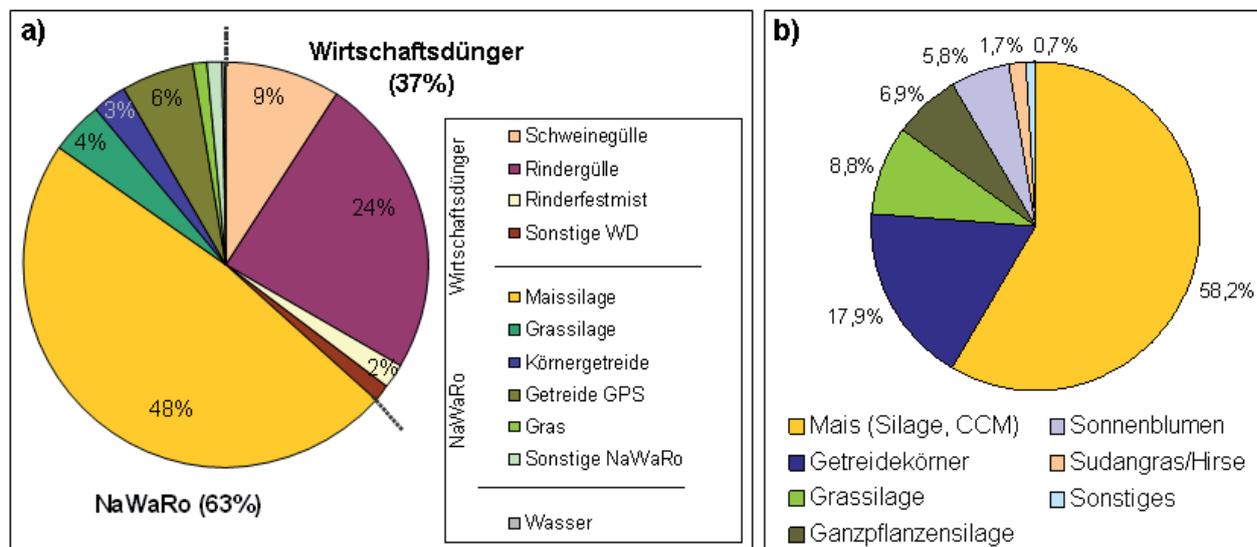


Abb. 2: Einsatzhäufigkeit von Energiepflanzen in Biogasanlagen nach a) GEMMEKE ET AL. (2009) und b) einer Vollerhebung in Bayern (RÖHLING & WILD 2008)

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**).

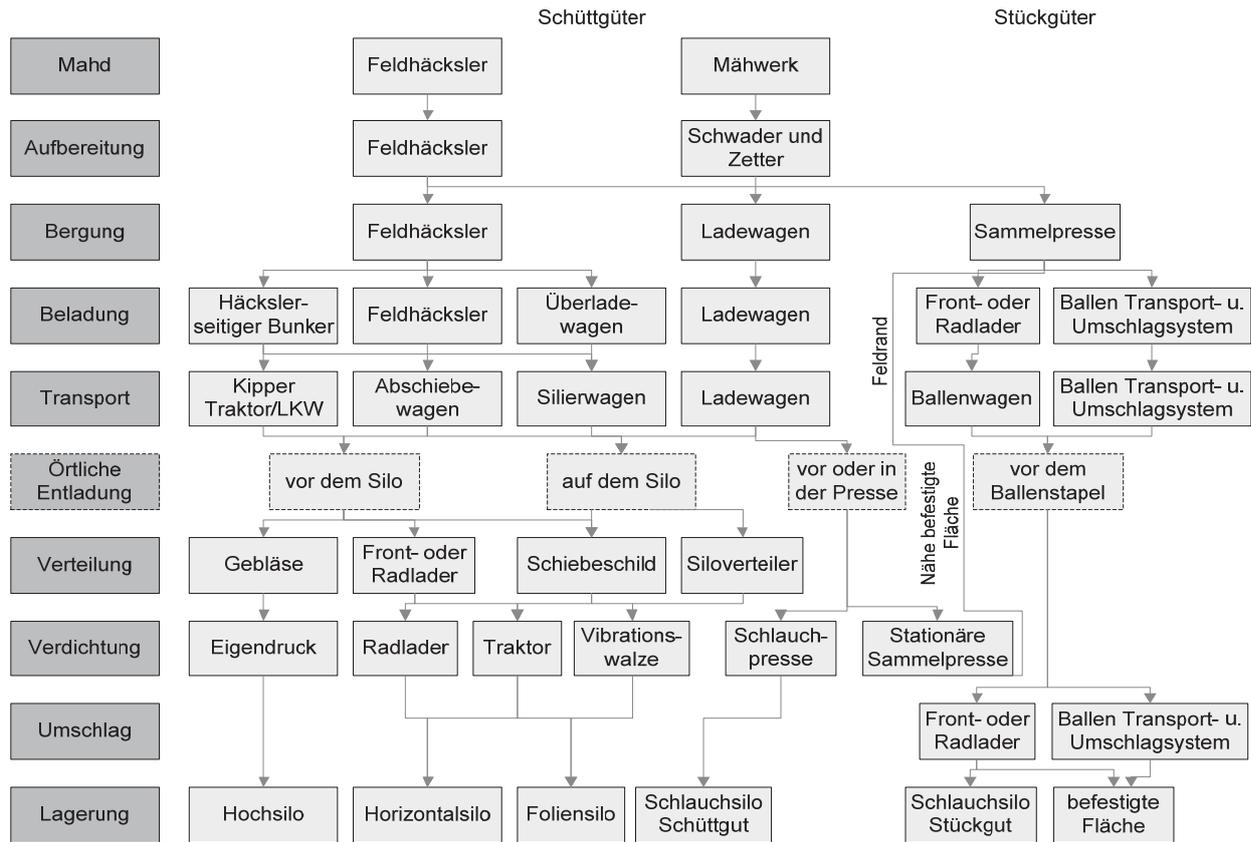


Abb. 3: Verfahren zur Ernte und Einbringung von Siliergütern nach SONNEN (2006)

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 | | | | | | | |
| Saccharolyten | <i>C. butyricum</i> , <i>C. tyrobutyricum</i> , <i>C. paraputificum</i> | Gram-positiv, stäbchenförmig, freibeweglich, 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 |
| Proteolyten | <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).

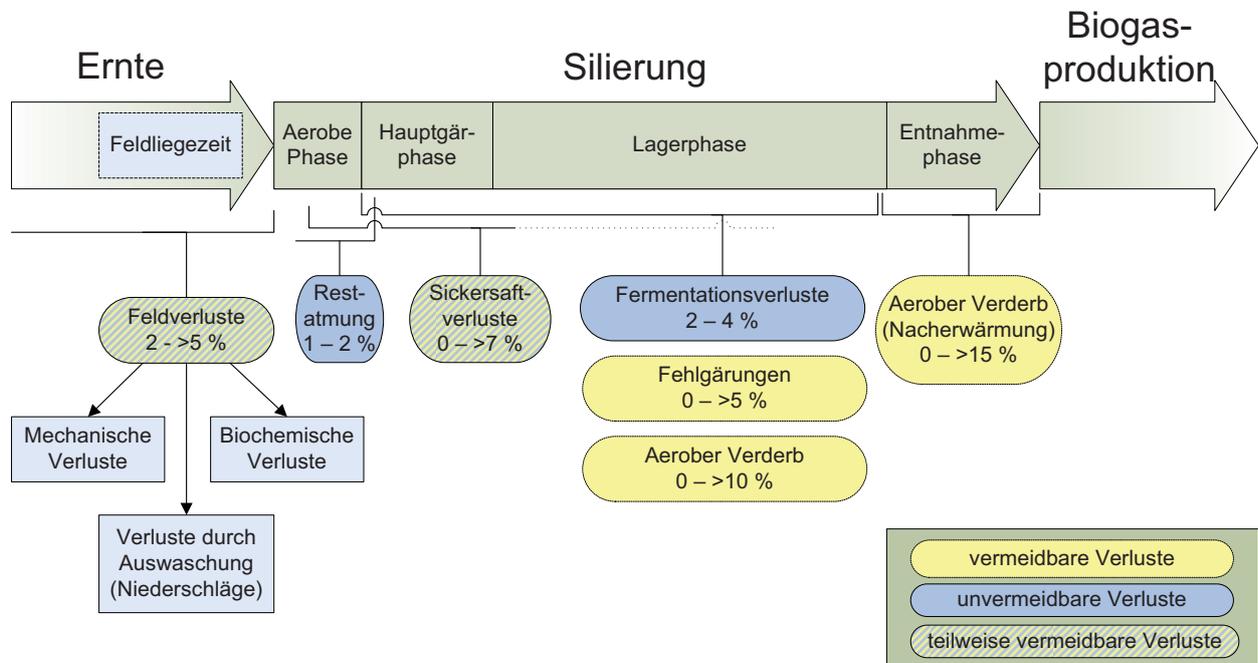


Abb. 4: Schematische Darstellung der Verluste bei der Silierung und Höhe der Energieverluste nach ZIMMER (1980 zitiert in MCDONALD ET AL. 1991)

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

Proteingehaltes bei verschiedenen Pflanzenarten berichtet (WAITE & GORROD 1959, EDWARDS ET AL. 1978, BLACK ET AL. 1980). Ebenso ist von einer Abnahme der Pufferkapazität mit zunehmender Reife auszugehen (MACGREGOR & EDWARDS 1968, WILKINSON & PHIPPS 1979 zitiert in McDONALD ET AL. 1991). Durch die höheren Pufferkapazitäten und höheren Gehalte an leicht fermentierbaren Zuckern stimmen die meisten Ergebnisse aus der Literatur in einer stärkeren Fermentation zum zeitigeren Erntetermin überein. Dies ist verbunden mit höheren Milch- und Essigsäure- bzw. Gesamtsäuregehalten, niedrigeren pH-Werten und höheren Verlusten bei geringeren TM-Gehalten (z.B. MACGREGOR & EDWARDS 1968, GIARDINI ET AL. 1976, DERNEDDE & HONIG 1977, BODINE ET AL. 1983, PANDITHARATNE ET AL. 1986, XICCATO ET AL. 1994, BAL ET AL. 1997, JOHNSON ET AL. 2003b, NADEAU 2007).

Zum Einfluss des Erntezeitpunktes auf den Silierverlauf, die Silierverluste und die chemische Zusammensetzung von Silagen liegen umfangreiche Erkenntnisse vor. Über die Wirkungen des Erntezeitpunktes auf die Änderungen der Substratzusammensetzung bei der Silierung ist von einem indirekten Einfluss auf die Methanbildung auszugehen. Bei Bewertung des Erntezeiteffektes auf die Biomethanisierung wird der Einfluss auf die Silierung jedoch üblicherweise nur randlich erwähnt bzw. bleibt unberücksichtigt. Detaillierte Untersuchungen hierzu sind nicht bekannt.

2.1.2.4 Bedeutung der Häcksellänge des Erntegutes für den Silierverlauf

Die Häcksellänge des Erntegutes wirkt sich im Wesentlichen über zwei Wege auf die Silierung aus (HONIG & ROHR 1982). Zum einen wird durch die Zerkleinerung des Pflanzenmaterials ein Aufschluss erzielt, der eine direkte Verbesserung der Gärbedingungen zur Folge hat (DERNEDDE & HONIG 1977). Der Austritt nährstoffhaltigen Zellsaftes bei Zerstörung des Zellgewebes ermöglicht den MSB, sofort und intensiv mit der Produktion organischer Säuren zu beginnen (ZIMMER 1967a). Die Verringerung der Häcksellänge oder Intensivierung der Aufbereitung des Erntegutes ist demnach mit einer schnelleren und nachhaltigeren Säurebildung, einer schnelleren pH-Wert-Absenkung und geringeren Stoffumsetzungen verbunden (**Abb. 5**, ZIMMER 1967a). Das Risiko für Fehlgärungen ist gemindert (PÖTSCH & RESCH 2002). ZIMMER (1967a) geht zudem davon aus, dass die Gleichmäßigkeit des Materials verbessert und damit die Verteilung von Zusätzen optimiert wird.

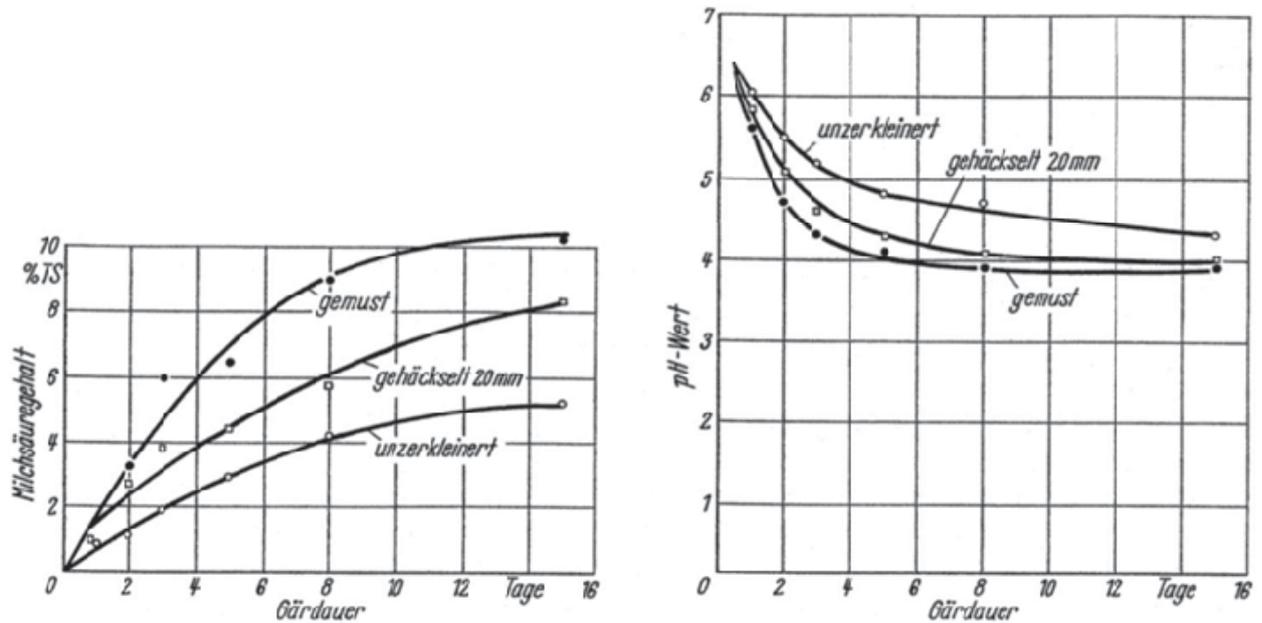


Abb. 5: Intensität der Säurebildung in Abhängigkeit von der Gärdauer bei verschiedenem Zerkleinerungsgrad am Beispiel Klee gras (MURDOCH 1955, zitiert in ZIMMER 1967a)

MUCK ET AL. (2003) schlussfolgern jedoch aus einer umfassenden Auswertung der Literatur, dass der Einfluss der Häcksellänge auf die Fermentation vorrangig in Laborsilos nachgewiesen wurde. Im praxisnahen Maßstab wurde hingegen häufig kein oder kein eindeutiger Einfluss der Häcksellänge gemessen (GORDON 1982, GUTH 1995, SCHWAB ET AL. 2002, JOHNSON ET AL. 2003a, COOKE & BERNARD 2005). Ein Grund hierfür könnten höhere Dichten und Drücke in Praxissilos und damit eine gleichmäßigere Bereitstellung von Zuckern auch bei gröberen Häcksellängen sein (BAXTER ET AL. 1966). Die erhöhte Freisetzung von Flüssigkeit bei der mechanischen Aufbereitung kann bei entsprechenden TM-Gehalten zudem eine erhöhte Sickersaftbildung bewirken bzw. die Rate der Sickersaftproduktion beeinflussen (MESSER & HAWKINS 1977).

Eine weitere positive Wirkung kürzerer Häcksellängen auf die Silierung beruht auf der Verbesserung der Dichtlagerung und dem verringerten Porenvolumen im Silo (HONIG & ROHR 1982). Dadurch ist bereits zu Beginn der Silierung weniger Restsauerstoff im Silo vorhanden, was zu einer geringeren Stoffumsetzung durch Restatmung führt (Abb. 6a, ZIMMER 1967a). Schädliche Luft wird bei kürzerer Häcksellänge und höherer Dichte auch während der übrigen Silierphasen stärker am Eindringen in den Silostock gehindert. Dies spielt insbesondere bei der Entnahme der Silage aus dem Silo eine Rolle, indem das Risiko von Stoff- und Energieverlusten durch Nacherwärmung reduziert wird (WAGNER ET AL. 2004).

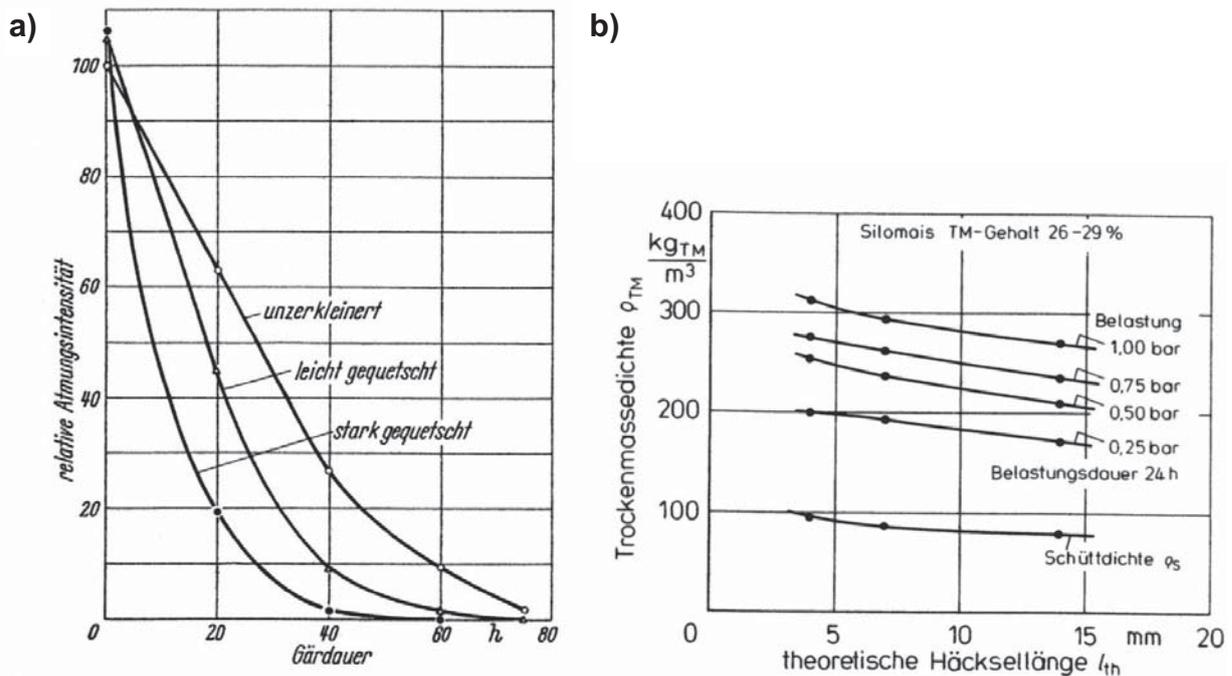


Abb. 6: a) Atmungsintensität in Abhängigkeit von der Gärdauer bei verschiedenem Zerkleinerungsgrad (nach SIMPSON 1961, zitiert in ZIMMER 1967a) und b) Einfluss der Häcksellänge auf die Trockenmassedichte (DERNEDDE & HONIG 1977)

DERNEDDE & HONIG (1977) gehen von einem linearen Anstieg der Verdichtbarkeit des Häckselgutes mit Abnahme der Häcksellänge aus (**Abb. 6b**). Bei Verringerung der theoretischen Häcksellänge von 14 auf 4 mm bei Mais ermittelten sie eine Erhöhung der TM-Dichte im Silo um 12 % bei einem TM-Gehalt von 27 % und um 16 % bei einem TM-Gehalt von 36 %. Die Energieverluste nahmen jedoch nur bei der Variante mit 36 % TM-Gehalt mit kürzerer Häcksellänge ab. In einer Studie von JOHNSON ET AL. (2003a) wurden für Silomais mit einem TM-Gehalt von 31 bis 34 % bei 11 mm theoretischer Häcksellänge um 9 % höhere TM-Dichten und um 36 % geringere Verluste (rel.) gemessen als bei 39,7 mm theoretischer Häcksellänge. Untersuchungen bei einem TM-Gehalt des Silomaises von 38 % ergaben 7 % höhere TM-Dichten und 29 % geringere Verluste (rel.) bei 27,8 mm verglichen mit 37,9 mm theoretischer Häcksellänge. Der Einsatz eines Corncrackers bewirkte die Zunahme der TM-Dichte bei theoretischer Häcksellänge von 12,7 mm um bis zu 14 % und die Abnahme der TM-Verluste um bis zu 9 % (rel.) (JOHNSON ET AL. 2002). Durch die zusätzliche mechanische Aufbereitung wurde die aerobe Stabilität der Maissilage verbessert. Der Anstieg der Temperatur in der Silage von 1,7 °C über die Ausgangstemperatur wurde um 9 bis 15 h verzögert (JOHNSON ET AL. 2002). WAGNER ET AL. (2005) ermittelten eine um 16 % höhere TM-Dichte von Mais mit 5,5 mm theoretischer Häcksellänge verglichen mit 21 mm theoretischer Häcksellänge in Horizontalsilos und eine um 19 % höhere TM-Dichte in Schlauchsilos. Ein eindeutiger Einfluss auf die Nacherwärmung konnte bei einem Vor-schub von 4 m/Woche und niedrigen Außentemperaturen nicht festgestellt werden

(WAGNER ET AL. 2004). Weitere Ergebnisse aus der Literatur beschreiben die positive Wirkung kurzer Häcksellängen auf die Lagerdichte und die Verluste bei der Silierung von Mais (MESSER & HAWKINS 1977, GUTH 1995) und anderen Pflanzenarten (DE BOEVER ET AL. 1993a, MÜLLER UND FÜBBEKER 1997).

Aus siliertechnischer Sicht ist aufgrund der dargelegten Vorteile insbesondere bei hohen TM-Gehalten die Einstellung einer möglichst kurzen Häcksellänge empfehlenswert (HONIG & ROHR 1982). Der Einsatz intensiver Erntetechnik verursacht jedoch energetischen Mehraufwand (PÖTSCH & RESCH 2002). Häcksellängenempfehlungen aus der Literatur liegen für die Verwertungsrichtung „Biogaserzeugung“ für Mais bei 4 – 8 mm (THAYSEN & JÄNICKE 2006) bzw. 5 mm (NUSSBAUM 2006). Für Grünschnittroggen wird eine theoretische Häcksellänge von 20 – 50 mm und für Sudangras von 10 – 20 mm empfohlen (NUSSBAUM 2006). Andere Empfehlungen orientieren sich an zusätzlichen Anforderungen der Tierernährung, die für die Nutzung der Silage in der Biogasanlage keine Bedeutung haben.

Ebenso wie bei dem Silierparameter Erntetermin ist auch der indirekte Einfluss des Parameters Häcksellänge über die Silierung auf die Biomethanisierung bisher nicht näher untersucht worden.

2.1.2.5 Verwendung von Silierzusätzen

Die Anwendung von Silierzusätzen ist eine ergänzende Maßnahme zur Verbesserung der Gärqualität von Silagen und zur Reduzierung von Nährstoffverlusten. Dabei wird vorrangig die Entwicklung unerwünschter Mikroorganismen eingeschränkt, was zu geringerem Nährstoffabbau und der Verbesserung des Konservierungserfolges führt. In der Tierernährung können zusätzliche Effekte, wie die Verbesserung der Futteraufnahme und Verdaulichkeit und erhöhte Nährstoff- und Energiegehalte der Silagen eine Erhöhung der tierischen Leistung bewirken. Die Verwendung von Silierzusätzen erfolgt daher zu folgenden Zwecken (PÖTSCH & RESCH 2002):

- Risikominimierung bei Problemsilagen (Vermeidung von Fehlgärungen, Vermeidung von Nacherwärmung)
- Verbesserung von Qualitätssilagen unter günstigen Silierbedingungen.

Siliermittel werden im Wesentlichen zu den zwei Wirkrichtungen „Verbesserung des Gärverlaufes“ und „Sicherung der aeroben Stabilität“ angeboten. Weniger üblich sind Silierzusätze zur Erhöhung des Nährstoffgehaltes von Silagen oder zur Verhinderung des Sickersaftanfalls bei niedrigen TM-Gehalten. Die Systematik der Siliermittel nach Wirkrichtung und Wirkprinzipien zeigt **Abb. 7**.



Abb. 7: Systematik der Silierzusätze nach McDONALD ET AL. (1991) und WEISSBACH (2005, zitiert in KALZENDORF 2006)

Die natürliche Population an MSB auf pflanzlichem Material ist zahlenmäßig oft gering bzw. sehr unterschiedlich und von heterofermentativen MSB dominiert (KUNG ET AL. 2003). Biologische Siliermittel zur Verbesserung des Gärverlaufes umfassen vorrangig homofermentative MSB mit hoher Stoffwechselaktivität und Konkurrenzkraft. Durch Zusatz dieser Impfkulturen wird die Anzahl an homofermentativen MSB erhöht, was bei Vorhandensein von leicht nutzbaren Kohlenhydratquellen zu einer raschen und verlustarmen Milchsäurebildung und zu niedrigen pH-Werten führt (KALZENDORF 2006). Ein Mangel an vergärbaren Kohlenhydraten kann zusätzlich durch Kohlenhydratquellen wie Melasse oder durch Enzyme aus der Familie der Cellulasen und Hemicellulasen, die über einen Aufschluss von Zellwandbestandteilen Kohlenhydrate verfügbar machen, behoben werden.

Chemische Silierzusätze zur Verbesserung des Gärverlaufes sind anorganische Säuren bzw. konzentrierte organische Säuren oder Salze dieser Säuren, die eine direkte Senkung des pH-Wertes und damit eine unspezifische Hemmung von Gärtschädlingen bewirken. Organische Säuren besitzen zudem spezifische antimikrobielle Eigenschaften. Andere Substanzen, wie Natriumnitrit, unterdrücken die Aktivität von Clostridien durch bei der Silierung frei werdende stickstoffhaltige Gase (KALZENDORF 2006). In der Praxis

ist der Einsatz von Säuren aufgrund der schlechteren Handhabbarkeit rückläufig, während die Anwendung der weniger korrosiven Siliersalze zunimmt.

Ein weiterer unerwünschter Aspekt der Silagebereitung ist die Nacherwärmung von Silagen, die vorwiegend durch Hefen und Schimmelpilze verursacht wird. Verschiedene organische Säuren, wie Essig-, Propion-, Sorbin- oder Benzoesäure bzw. die Salze dieser Säuren wirken direkt hemmend auf Hefen und Schimmelpilze und mindern damit das Nacherwärmungsrisiko. Sie können in Form chemischer Siliermittel als Säuren oder Salze zugesetzt werden. Darüber hinaus ist auch die Applikation von heterofermentativen MSB oder Propionsäurebakterien als biologische Siliermittel möglich, die die Bildung von Essig- oder Propionsäure während des Silierprozesses bewirken. Letztere sind jedoch wenig säuretolerant, strikt anaerob und besitzen eine geringe Wachstumsrate, weshalb sie häufig unwirksam sind (KUNG ET AL. 2003).

Siliermittel bestehen oft nicht nur aus einem Wirkstoff, sondern aus Wirkstoffmischungen. Nach KALZENDORF (2006) sind derzeit vor allem Mischungen aus homo- und heterofermentativen MSB, Kombinationen aus homofermentativen MSB und chemischen Wirkstoffen zur Unterdrückung von Hefen und Schimmelpilzen, sowie Kombinationen verschiedener chemischer Wirkstoffe, die sich im Gärverlauf ergänzen, praktisch von Bedeutung.

Die Wirksamkeit verschiedenster Silierzusätze wurde in einer Vielzahl von Versuchen mit unterschiedlichen Pflanzenarten und unter unterschiedlichen Bedingungen geprüft. BLACK ET AL. (1980) schlussfolgern in Bewertung von Versuchen mit Silierzusätzen aus der Literatur, dass Ergebnisse zur Wirkung der Siliermittel oft uneinheitlich sind. Sie reichen von keinem Einfluss auf die Silierung bis hin zu hoch signifikanten Verbesserungen der Konservierung von Nährstoffen und der Zusammensetzung der Silagen (BLACK ET AL. 1980). Auswertungen von THAYSEN & HONIG (2006) ergaben bei der Grasilierung die größte Wirkung auf die Verbesserung des Gärverlaufes durch chemische Silierzusätze, gefolgt von Silierzusätzen mit homofermentativen MSB. Mit zunehmender Vergärbarkeit verringerte sich die Wirkung der Siliermittel. Bei der Silierung von Mais war die Wirkungshöhe und -sicherheit zur Verbesserung der aeroben Stabilität bei Anwendung von Kombinationsprodukten am größten, gefolgt von chemischen Silierzusätzen und Zusätzen mit homo- und heterofermentativen MSB.

Aufgrund der Wirkung der Silierzusätze auf den Silierverlauf, das Gärsäuremuster und die Silierverluste sind übergreifende Effekte auf die Methanbildung zu erwarten. Obwohl bereits Silierzusätze speziell für die Biogasproduktion auf dem Markt angeboten werden, ist der Einfluss des durch die Silierzusätze geänderten Gärsäuremusters auf die Biomethanisierung noch nicht hinreichend erforscht.

2.1.3 Einfluss relevanter Parameter der Bereitstellungskette auf die Biomethanisierung

2.1.3.1 Erntezeitpunkt

Mit zunehmender Reife einer Pflanze ändern sich deren botanische Eigenschaften sowie deren chemische Charakteristik (z.B. EDWARDS ET AL. 1968, BADGER ET AL. 1979, NADEAU 2007, SCHITTENHELM 2008). Demnach sind sowohl der Zeitpunkt der Ernte des Pflanzenmaterials als auch die Schnitthäufigkeit bei mehrschnittiger Ernte für die Biomethanisierung von Bedeutung. Dies wird durch zahlreiche Ergebnisse aus der Literatur belegt, wobei im Folgenden nur Beispiele aufgeführt werden. Die Stärke des Ernteeffektes ist vor allem von der Pflanzenart und den Unterschieden im Entwicklungsstadium abhängig. Die in der Literatur angeführten Tendenzen bezüglich steigenden oder sinkenden Methanausbeuten zwischen verschiedenen Entwicklungsstadien einer Pflanzenart sind zum Teil widersprüchlich.

AMON ET AL. (2003b) ermittelten einen signifikanten Unterschied in der Methanausbeute von Kleegrasmischungen bei Ernte vor der Blüte und nach der Blüte. Zum späteren Erntetermin wurde eine um 24 bis 26 % niedrigere Methanausbeute bezogen auf oTM_{zu} gemessen. KAPARAJU ET AL. (2002) geben für Klee zur Blüte eine um 33 % geringere Methanausbeute gegenüber Klee im vegetativen Entwicklungsstadium an. LEHTOMÄKI (2006) kam nach Untersuchung der Methanbildung aus verschiedenen Energiepflanzen, die jeweils im vegetativen Entwicklungsstadium bzw. zu Beginn der Blüte sowie zur vollen Blüte geerntet wurden, zu dem Ergebnis, dass das Methanbildungspotenzial bezogen auf die FM zum zweiten Erntetermin fast ausschließlich zunimmt, zum Teil um mehr als 135 %. Die Änderung der Methanausbeute bezogen auf oTM_{zu} variierte zwischen den Pflanzenarten und nahm bei Gräsern um 3 – 26 % zum späteren Erntetermin zu, während bei Leguminosen eine Abnahme um 2 – 14 % beobachtet wurde. Durch eine andere Studie werden hingegen sowohl für Klee als auch für Gras bei Ernte zur Blüte um 45 bzw. 48 % höhere Methanausbeuten bezogen auf oTM_{zu} angegeben verglichen mit der Ernte im vegetativen Stadium (POUECH ET AL. 1998).

Nach Untersuchungen von PROCHNOW ET AL. (2005) fiel die Methanausbeute von Landschaftspflegeaufwuchs vom Schnittzeitpunkt Mitte Juni zum weit späteren Schnitt im Februar um bis zu 48 %. Mit unterschiedlichem Schnittregime wurden von Grünland auf zwei verschiedenen Standorten in Österreich Unterschiede in der Methanausbeute von 42 und 52 % gemessen (AMON ET AL. 2007b). Differenzen in der Methanausbeute von ein- bis dreischnittig geerntetem Napiergras und Zuckerrohr für die energetische Nutzung lagen bei 16 bis 24 % (CHYNOWETH ET AL. 1993).

Für verschiedene Getreidearten ermittelten AMON ET AL. (2006a) bei fünf unterschiedlichen Erntezeitpunkten zwischen 3-4-Knoten-Stadium und Totreife Differenzen in der

Methanausbeute von 19 bis 49 %. Die höchsten Methanausbeuten wurden zum Ährenschieben bzw. zur Milchreife der Körner erreicht. Mit weiterem Vegetationsverlauf nahmen die Methanausbeuten tendenziell ab, was durch eine zunehmende Verholzung des Pflanzenmaterials und die Bildung von Stärke im Korn auf Kosten anderer methanogener Inhaltsstoffe begründet wird. Die von HEIERMANN ET AL. (2002b) zum Entwicklungsstadium Blüte bis Teigreife geprüften unsilierten Gerste-, Roggen- und Triticaleproben wiesen Unterschiede in der Methanausbeute bezogen auf oTM_{zu} von 30 bis 37 % auf. Von Roggen und Gerste wurde dabei die höchste Methanausbeute zur Milchreife, von Triticale zur Blüte erzielt.

Untersuchungen an 13 verschiedenen Maissorten zu jeweils drei Ernteterminen zwischen Milch- und Vollreife ergaben maximale Differenzen in der Methanausbeute von 27 % zwischen den Zeitpunkten. Mit späterem Erntetermin nahm die Methanausbeute überwiegend ab (AMON ET AL. 2006). Auch von KAISER (2007) wurde eine Abnahme der Methanausbeute mit zunehmender Reife und steigendem TM-Gehalt des Mais ab 20 % ermittelt. Ausgehend vom Methanhektarertrag wird dennoch als optimaler Erntetermin für frühe bis mittelfrühe Maissorten das Entwicklungsstadium Ende Teigreife, für späte Maissorten die Vollreife angesehen (AMON ET AL. 2007a). AMON ET AL. (2006a) bestimmten aus gemessenen Biomasseerträgen und über das Methanenergiewertmodell berechneten Methanausbeuten ein Optimum des Methanhektarertrages bei 33 % TM in der Mais-Ganzpflanze. Zu diesem Zeitpunkt ist auch eine optimale Silierung erreicht (AMON ET AL. 2006).

Momentan sind keine eindeutigen Aussagen hinsichtlich der Stärke des Erntezeiteffektes auf die Biomethanisierung möglich. Es besteht die Notwendigkeit, entwicklungsphysiologisch bedingte Effekte wie z.B. die chemische Zusammensetzung des Pflanzenmaterials und die Verfügbarkeit der organischen Komponenten im Rahmen systematischer Untersuchungen und im Zusammenhang mit den Effekten auf die Silierung zu ermitteln. Erst dann können eindeutige Aussagen hinsichtlich der Relevanz des Erntetermins in der Bereitstellungskette von Ganzpflanzen für die Biogasproduktion getroffen werden.

2.1.3.2 Häcksellänge

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass das Methanbildungspotenzial organischer Substrate allgemein mit geringerer Partikelgröße und größerer spezifischer Oberfläche steigt (GUNASEELAN 1997, BADGER ET AL. 1979, HILLS & NAKANO 1984, SHARMA ET AL. 1988, MSHANDETE ET AL. 2006, WEIß & BRÜCKNER 2008). Nach PALMOWSKI (2000) erfolgen durch den Zerkleinerungsvorgang sowohl ein Zellaufschluss als auch die Reduktion der Partikelgröße und damit die Schaffung neuer Oberflächen. Dadurch werden zum einen Lösungsvorgänge unterstützt, zum anderen erhöht sich die Angriffsfläche für Mikroorganismen und Enzyme. Hieraus ergibt sich eine erhöhte Abbaugeschwindigkeit und eine Steigerung des Abbaugrades. SHARMA ET AL. (1988) begründen die positive Wirkung der Zerkleinerung auf die Methanbildung mit der Zerstörung von Lignin. Lignin dient als „Schutz“ der Cellulose und verhindert deren Abbau. Durch Zerkleinerung des organischen Materials wird der Oberflächenanteil der Cellulose und damit deren Verfügbarkeit erhöht (SHARMA ET AL. 1988).

Die Ermittlung des Einflusses von am Feldhäcksler variierten Längeneinstellungen zur Ernte ist nur aus einer Studie von WEIß & BRÜCKNER (2008) bekannt. Hierin wurde bei der „geringsten Längeneinstellung am Feldhäcksler“ mit $368 \text{ l} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}$ eine um 11% höhere Methanausbeute bei Maissilage erzielt im Vergleich zu einer „üblichen Längeneinstellung“ ($332 \text{ l} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}$), wobei die theoretisch eingestellten Häcksellängen nicht näher definiert sind. Bei weiteren, in **Tab. 5** aufgeführten Untersuchungen erfolgte die Zerkleinerung organischer Materialien durch verschiedene technische Einrichtungen im Labor (BADGER ET AL. 1979, CHYNOWETH ET AL. 1993, MOORHEAD & NORDSTEDT 1993, KAPARAJU ET AL. 2002, MSHANDETE ET AL. 2006) bzw. nach der Silierung mittels Doppelschneckenextruder und Multischroter (WEIß & BRÜCKNER 2008). Unterschiedliche Partikelgrößen wurden zum Teil durch Trennen eines Materials in verschiedene Fraktionen mittels Siebung erzielt (HILLS & NAKANO 1984, GOLLAKOTA & MEHER 1988, LLABRÉS-LUENGO & MATA-ALVARES 1988, SHARMA ET AL. 1988).

Die Ergebnisse aus der Literatur (**Tab. 5**) zeigen zum Teil einen deutlichen Trend zu höheren Methanausbeuten bei abnehmender Partikelgröße (HILLS & NAKANO 1984, SHARMA ET AL. 1988, MSHANDETE ET AL. 2006). Es wird davon ausgegangen, dass sich die Methanausbeute umgekehrt proportional zur Partikelgröße verhält (MSHANDETE ET AL. 2006). Die Unterschiede in der Methanausbeute durch die Zerkleinerung werden teilweise als geringfügig bezeichnet (LLABRÉS-LUENGO & MATA-ALVARES 1988), zum Teil werden signifikante Unterschiede nachgewiesen (SHARMA ET AL. 1988, MSHANDETE ET AL. 2006). HILLS & NAKANO (1984) analysierten einen Anstieg der Methanausbeute um 71 % durch Zerkleinerung fester Tomatenabfälle, bei SHARMA ET AL. (1988) lag der Unterschied in der Methanausbeute zwischen größter und kleinster Partikelgröße bei 11 – 65 % für verschiedene Substrate.

Tab. 5: Einfluss der Partikelgröße auf die Biogas- bzw. Methanbildung und den anaeroben Abbau organischer Materialien – Ergebnisse aus der Literatur (Auswahl)

| Substrat | Häcksellänge/ Partikelgröße [mm] Zerkleinerung | y [l*kg ⁻¹ oTM _{zu}] | y _{CH₄} [l*kg ⁻¹ oTM _{zu}] | oTM- Abbau [%] | Versuchs- bedingungen | Literatur | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|---|---|----------------------|---|--|---------------------------|----------|-----|-------------------|------|--|--------------------------|----------|-----|-------------------|------|---------------------------|--------|-----|------|------|--|--------------------------|---------|-----|------|------|--------|-----|------|------|-------------------------|---------|------|------|-------|---|-----------------------------|--------------|-------------------------|-------------------|------|------|--------------|---|-----------------------------|-------------------|-------------------|------|--------------|-------------------|-------------------|------|---------|-------------------|-------------------|------|--------------------------------------|---------|-------------------|------|------|--|--|-------------------|-------------------|------|--|--|-------|-------------------|-----|------|--------------------------------------|-------|-------------------|-------------------|------|------|-------------|----------|-------------------|-----|------|-------------|--|-------------------------|--------|------|--|-------------------------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|------------|------|------------|------|--------------|----------|--------------|----------|-----|------|------|--|--|--------|--------|-----|------|--------|--------|-----|------|--------|--------|-----|------|------------|------------|-----|------|-------------------------------|------------|-------------------------------|------------|------|--|----------------------------|--------|------|--|----------------------------|--------|------|-----|------|---------|--------|------|------|---------|--------|------|--------|------|-----|------|-----------------|--------|------|-----|------|---|--------------------------------|-----------------|--------|-----|------|---------|---|--------------------------------|--------|------|------|------|------|---------|--|---------------------------|-------|------|------|------|-------|------|-----|------|------------|--|---------------------------|-------|------|--|--|-------|------|-------|------|-------|------|------------|------|-------|------|------|------|------|--|--|-------|-------|------|------|-------|-------|
| Gras (Heu) | original | 497 | 268 ¹⁾ | 73 | Batch, 1 Liter, 37°C, Versuchs- dauer 30 d | (BADGER ET AL. 1979) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | gemahlen | 546 | 295 ¹⁾ | 70 | | | Weizenstroh | original | 440 | 255 ¹⁾ | 79 | | | gemahlen | 564 | 327 ¹⁾ | 91 | feste Toma- tenabfälle | 1,3 mm | 453 | k.A. | 60,3 | konti., 4 Liter, 35 °C, B _R =3 g oTM*I ⁻¹ *d ⁻¹ , Ver- weilzeit 18 d, Dauer 120 d | (HILLS & NAKANO 1984) | 2,4 mm | 383 | k.A. | 51,1 | 3,2 mm | 253 | k.A. | 35,2 | 12,7 mm | 160 | k.A. | 26,2 | 30 mm | 133 | k.A. | 21,1 | Rizinus- Presskuchen | <0,5 mm | 260 | k.A. | k.A. | kontinuierlich, 5 Liter, 30°C, B _R =4 g TM*I ⁻¹ *d ⁻¹ , Verweilzeit 15 d Dauer 2 a | (GOLLAKOTA & MEHER 1988) | 0,5 – 1,0 mm | 200 ²⁾ | k.A. | k.A. | 1,0 – 1,4 mm | 215 ²⁾ | k.A. | k.A. | 1,4 – 2,0 mm | 275 ²⁾ | k.A. | k.A. | >2,0 mm | 255 ²⁾ | k.A. | k.A. | 40 % oTM Stroh + 30 % FM Inoculum | 10 mm | 429 ¹⁾ | 327 | 12,5 | Batch, 1,5 Liter, Versuchsdauer 60 d | (LLABRÉS-LUENGO & MATA-ALVARES 1988) | 5 mm | 455 ¹⁾ | 343 | 16,8 | 20 % oTM Stroh + 15 % FM Inoculum | 10 mm | 425 ¹⁾ | 344 | 14,5 | | | 5 mm | 414 ¹⁾ | 334 | 20,4 | Weizenstroh | 0,088 mm | 362 | 249 | k.A. | Batch, 5 Liter, 37 °C, Versuchsdauer 56 d | (SHARMA ET AL. 1988) | 0,4 mm | 360 | 248 | k.A. | 1,0 mm | 350 | 241 | k.A. | 6,0 mm | 330 | 227 | k.A. | ungemahlen | 235 | 162 | k.A. | Bermudagrass | 0,088 mm | 280 | 226 | k.A. | | | 0,4 mm | 282 | 228 | k.A. | 1,0 mm | 265 | 214 | k.A. | 6,0 mm | 253 | 205 | k.A. | ungemahlen | 170 | 137 | k.A. | Zuckerrohr („Energierohr“) | Kugelmühle | k.A. | 320 | k.A. | Batch, 35 °C, Versuchsdauer 46 d | (CHYNOWETH ET AL. 1993) | 0,8 mm | k.A. | 240 | k.A. | 8,0 mm | k.A. | 290 | k.A. | Sorghum | 1,6 mm | k.A. | 410 | k.A. | | | 8,0 mm | k.A. | 420 | k.A. | Wasserhyazinthe | 1,6 mm | 240 | 160 | k.A. | Batch, 55 Liter, 35°C, Versuchs- dauer 60 d | (MOORHEAD & NORDSTEDT 1993) | 6,4 mm | 280 | 180 | k.A. | 12,7 mm | 220 | 140 | k.A. | Klee | 5 mm | k.A. | 200 | k.A. | Batch, 1 Liter, 35°C Versuchs- dauer 155 d | (KAPARAJU ET AL. 2002) | 10 mm | k.A. | 140 | k.A. | 20 mm | k.A. | 210 | k.A. | Gras (Heu) | 5 mm | k.A. | 320 | k.A. | | | 10 mm | k.A. | 350 | k.A. | 20 mm | k.A. | 270 | k.A. | Hafer | 5 mm | k.A. | 260 | k.A. | | | 10 mm | k.A. | 250 | k.A. | 20 mm | k.A. |
| Weizenstroh | original | 440 | 255 ¹⁾ | 79 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | gemahlen | 564 | 327 ¹⁾ | 91 | | | feste Toma- tenabfälle | 1,3 mm | 453 | k.A. | 60,3 | konti., 4 Liter, 35 °C, B _R =3 g oTM*I ⁻¹ *d ⁻¹ , Ver- weilzeit 18 d, Dauer 120 d | (HILLS & NAKANO 1984) | 2,4 mm | 383 | k.A. | 51,1 | | 3,2 mm | 253 | k.A. | 35,2 | | | 12,7 mm | 160 | k.A. | 26,2 | 30 mm | 133 | k.A. | 21,1 | Rizinus- Presskuchen | <0,5 mm | 260 | k.A. | k.A. | kontinuierlich, 5 Liter, 30°C, B _R =4 g TM*I ⁻¹ *d ⁻¹ , Verweilzeit 15 d Dauer 2 a | (GOLLAKOTA & MEHER 1988) | 0,5 – 1,0 mm | | 200 ²⁾ | k.A. | k.A. | 1,0 – 1,4 mm | | | 215 ²⁾ | k.A. | k.A. | 1,4 – 2,0 mm | 275 ²⁾ | k.A. | k.A. | >2,0 mm | 255 ²⁾ | k.A. | k.A. | 40 % oTM Stroh + 30 % FM Inoculum | 10 mm | 429 ¹⁾ | 327 | 12,5 | Batch, 1,5 Liter, Versuchsdauer 60 d | (LLABRÉS-LUENGO & MATA-ALVARES 1988) | 5 mm | 455 ¹⁾ | 343 | 16,8 | 20 % oTM Stroh + 15 % FM Inoculum | 10 mm | 425 ¹⁾ | 344 | 14,5 | | | 5 mm | 414 ¹⁾ | 334 | 20,4 | Weizenstroh | 0,088 mm | 362 | 249 | k.A. | | Batch, 5 Liter, 37 °C, Versuchsdauer 56 d | (SHARMA ET AL. 1988) | 0,4 mm | 360 | | | 248 | k.A. | 1,0 mm | 350 | 241 | k.A. | 6,0 mm | 330 | 227 | k.A. | ungemahlen | 235 | 162 | k.A. | Bermudagrass | 0,088 mm | | 280 | 226 | k.A. | | | | | 0,4 mm | 282 | 228 | k.A. | 1,0 mm | 265 | 214 | k.A. | 6,0 mm | 253 | 205 | k.A. | ungemahlen | 170 | 137 | | k.A. | Zuckerrohr („Energierohr“) | Kugelmühle | k.A. | | | 320 | k.A. | Batch, 35 °C, Versuchsdauer 46 d | (CHYNOWETH ET AL. 1993) | 0,8 mm | k.A. | 240 | k.A. | 8,0 mm | k.A. | 290 | k.A. | Sorghum | 1,6 mm | k.A. | 410 | k.A. | | | | 8,0 mm | k.A. | 420 | k.A. | | | Wasserhyazinthe | 1,6 mm | 240 | 160 | k.A. | Batch, 55 Liter, 35°C, Versuchs- dauer 60 d | (MOORHEAD & NORDSTEDT 1993) | 6,4 mm | | 280 | 180 | k.A. | 12,7 mm | | | 220 | 140 | k.A. | Klee | 5 mm | k.A. | 200 | k.A. | | Batch, 1 Liter, 35°C Versuchs- dauer 155 d | (KAPARAJU ET AL. 2002) | 10 mm | k.A. | | | 140 | k.A. | 20 mm | k.A. | 210 | k.A. | Gras (Heu) | 5 mm | | k.A. | 320 | k.A. | | | | | 10 mm | k.A. | 350 | k.A. | 20 mm |
| feste Toma- tenabfälle | 1,3 mm | 453 | k.A. | 60,3 | konti., 4 Liter, 35 °C, B _R =3 g oTM*I ⁻¹ *d ⁻¹ , Ver- weilzeit 18 d, Dauer 120 d | (HILLS & NAKANO 1984) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2,4 mm | 383 | k.A. | 51,1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3,2 mm | 253 | k.A. | 35,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 12,7 mm | 160 | k.A. | 26,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 30 mm | 133 | k.A. | 21,1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rizinus- Presskuchen | <0,5 mm | 260 | k.A. | k.A. | kontinuierlich, 5 Liter, 30°C, B _R =4 g TM*I ⁻¹ *d ⁻¹ , Verweilzeit 15 d Dauer 2 a | (GOLLAKOTA & MEHER 1988) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 0,5 – 1,0 mm | 200 ²⁾ | k.A. | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1,0 – 1,4 mm | 215 ²⁾ | k.A. | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1,4 – 2,0 mm | 275 ²⁾ | k.A. | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | >2,0 mm | 255 ²⁾ | k.A. | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 % oTM Stroh + 30 % FM Inoculum | 10 mm | 429 ¹⁾ | 327 | 12,5 | Batch, 1,5 Liter, Versuchsdauer 60 d | (LLABRÉS-LUENGO & MATA-ALVARES 1988) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 5 mm | 455 ¹⁾ | 343 | 16,8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 % oTM Stroh + 15 % FM Inoculum | 10 mm | 425 ¹⁾ | 344 | 14,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 5 mm | 414 ¹⁾ | 334 | 20,4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Weizenstroh | 0,088 mm | 362 | 249 | k.A. | Batch, 5 Liter, 37 °C, Versuchsdauer 56 d | (SHARMA ET AL. 1988) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 0,4 mm | 360 | 248 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1,0 mm | 350 | 241 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 6,0 mm | 330 | 227 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | ungemahlen | 235 | 162 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bermudagrass | 0,088 mm | 280 | 226 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 0,4 mm | 282 | 228 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1,0 mm | 265 | 214 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 6,0 mm | 253 | 205 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | ungemahlen | 170 | 137 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zuckerrohr („Energierohr“) | Kugelmühle | k.A. | 320 | k.A. | Batch, 35 °C, Versuchsdauer 46 d | (CHYNOWETH ET AL. 1993) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 0,8 mm | k.A. | 240 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 8,0 mm | k.A. | 290 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sorghum | 1,6 mm | k.A. | 410 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 8,0 mm | k.A. | 420 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Wasserhyazinthe | 1,6 mm | 240 | 160 | k.A. | Batch, 55 Liter, 35°C, Versuchs- dauer 60 d | (MOORHEAD & NORDSTEDT 1993) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 6,4 mm | 280 | 180 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 12,7 mm | 220 | 140 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Klee | 5 mm | k.A. | 200 | k.A. | Batch, 1 Liter, 35°C Versuchs- dauer 155 d | (KAPARAJU ET AL. 2002) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 10 mm | k.A. | 140 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 20 mm | k.A. | 210 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Gras (Heu) | 5 mm | k.A. | 320 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 10 mm | k.A. | 350 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 20 mm | k.A. | 270 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hafer | 5 mm | k.A. | 260 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 10 mm | k.A. | 250 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 20 mm | k.A. | 250 | k.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tab. 5: Fortsetzung

| Substrat | Häcksellänge/ Partikelgröße [mm] | y [l*kg ⁻¹ oTM _{zu}] | y _{CH₄} [l*kg ⁻¹ oTM _{zu}] | oTM- Abbau [%] | Versuchs- bedingungen | Literatur |
|--------------------|-------------------------------------|---|---|----------------------|---|----------------------------|
| Sisalfaser Abfälle | 2 mm (Labormühle) | k.A. | 216 | k.A. | Batch, 1 Liter, 33 °C, Versuchs- dauer 65 d | (MSHANDETE ET AL. 2006) |
| | 5 mm | k.A. | 205 | k.A. | | |
| | 10 mm | k.A. | 203 | k.A. | | |
| | 30 mm | k.A. | 202 | k.A. | | |
| | 50 mm | k.A. | 192 | k.A. | | |
| | 70 mm | k.A. | 190 | k.A. | | |
| | 100 mm | k.A. | 178 | k.A. | | |
| | unbehandelt | k.A. | 176 | k.A. | | |
| Maissilage | original | 525 | 299 | k.A. | Batch, 1 Liter, 37°C, Versuchs- dauer 30 d | (WEIß & BRÜCKNER 2008) |
| | Extruder grob | 568 | 320 | k.A. | | |
| | Extruder fein | 620 | 340 | k.A. | | |
| Grassilage | original | 448 | 258 | k.A. | | |
| | Extruder grob | 533 | 308 | k.A. | | |
| | Extruder fein | 580 | 327 | k.A. | | |
| Gerste (Korn) | original | 732 | 414 | k.A. | | |
| | Multischroter grob | 831 | 449 | k.A. | | |
| | Multischroter mittel | 876 | 487 | k.A. | | |
| | Multischroter fein | 902 | 503 | k.A. | | |

k.A. ... keine Angabe; ¹⁾ kalkuliert aus Autorenangaben, ²⁾ Angaben in [l*kg⁻¹ TM]

Andere Autoren erzielten um 10 und 28 % höhere Methanausbeuten bei Verringerung der Partikelgröße von Gras und Weizenstroh und um 23 % höhere Methanausbeuten bei Zerkleinerung von Sisalfaserabfällen (BADGER ET AL. 1979, MSHANDETE ET AL. 2006). HARTMANN ET AL. (2000) ermittelte einen Anstieg der Biogasausbeute von Gülle um 5 bis 25 % durch Einsatz eines Macerators in Biogasanlagen. Der Trend zur Erhöhung der Methanausbeute bei Verringerung der Partikelgröße war jedoch auch bei einem Teil der Untersuchungen nicht nachweisbar bzw. nicht eindeutig. So wurde bei Wasserhyazinthe und Gras die höchste Methanausbeute bei mittlerer Partikelgröße analysiert, während bei Klee und Zuckerrohr das schlechteste Ergebnis bei mittlerer Partikelgröße gemessen wurde (CHYNOWETH ET AL. 1993, MOORHEAD & NORDSTEDT 1993, KAPARAJU ET AL. 2002). GOLLAKOTA & MEHER (1988) erklären die höchste Biogasausbeute bei feinsten und gröbster Fraktion von Rizinus-Presskuchen durch eine unterschiedliche Verteilung der abbaubaren Anteile in den einzelnen Siebfraktionen.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist der Einfluss der Häcksellänge zur Ernte auf die Methanbildung aus Energiepflanzen nicht geklärt. Vereinzelt Ergebnisse zur Partikelgröße verschieden aufbereiteter organischer Materialien stehen isoliert und sind nicht konsistent. Grundlegende Untersuchungen zu Auswirkungen unterschiedlicher Häcksellängen auf die Methanausbeute von Silagen und die Abbaugeschwindigkeit im Biomethanisierungsprozess fehlen. Weiterhin bleibt die übergreifende Wirkung des Parameters Häcksellänge im Silier- und Biomethanisierungsprozess unberücksichtigt.

2.1.3.3 Silierung

Zum Einfluss der Silierung auf die Biomethanisierung von pflanzlichen Substraten liegen bisher nur wenige systematische Untersuchungen vor. In der Literatur sind im Wesentlichen zwei widersprüchliche Aussagen zu finden. Zum Einen wird davon ausgegangen, dass die Silierung die im pflanzlichen Material enthaltene Energie erhält und damit die Methanausbeute nicht signifikant verändert (GUNNARSON ET AL. 1984, POUECH ET AL. 1998, CHYNOWETH ET AL. 1993, MÄHNERT ET AL. 2002) bzw. die Methanausbeute nicht erhöhen kann (WEIßBACH 2008a). Zum Anderen wird die Silierung als Vorbehandlungsstufe der Biomethanisierung angesehen, die die Methanbildung aus pflanzlichem Material potenziell positiv beeinflusst (ZUBR 1986, EGG ET AL. 1993, HEIERMANN & PLÖCHL 2004, NEUREITER ET AL. 2005). Vergleichende Ergebnisse zu Methanausbeuten von frisch geerntetem und siliertem pflanzlichen Material aus der Literatur (**Tab. 6**) zeigen vorwiegend höhere Methanausbeuten nach der Silierung, es wurden jedoch zum Teil auch deutlich niedrigere Methanausbeuten gemessen. ZUBR (1986) geht davon aus, dass geringere Gasausbeuten nach der Silierung durch Verluste entstehen, höhere Gasausbeuten sind auf die Hydrolyse von Strukturpolymeren zu bei der Biomethanisierung vollständig verwertbaren organischen Säuren zurückzuführen. Andere Autoren gehen ebenfalls von einer besseren Verfügbarkeit der Inhaltsstoffe für die Biomethanisierung nach der Silierung aus (NEUREITER ET AL. 2005, LEHTOMÄKI 2006, AMON ET AL. 2007a). Die Berechnung der Gasausbeuten erfolgte allerdings insbesondere bei älteren Untersuchungen häufig ohne Berücksichtigung der Silierverluste (**Tab. 6**). Zudem gehen bei der üblicherweise verwendeten Methode der TM-Bestimmung im Trockenschrank die in den Silagen enthaltenen flüchtigen Substanzen verloren, was zu einer Unterschätzung des TM-Gehaltes und damit zu einer falschen Bezugsbasis führt (MUKENGELE & OECHSNER 2007). Wird keine Korrektur des auf diese Weise ermittelten TM-Gehaltes durchgeführt, kann dies in einer Überschätzung der Gasausbeute von Silagen bezogen auf die TM oder oTM resultieren (WEIßBACH & STRUBELT 2008a).

Tab. 6: Vergleich der Methanausbeute von frischem und siliertem Pflanzenmaterial - Ergebnisse aus der Literatur (Auswahl)

| Pflanzenart | TM-Korrektur | y_{CH_4} unsiliert [$^*\text{kg}^{-1}$ oTM _{zu}] | y_{CH_4} siliert [$^*\text{kg}^{-1}$ oTM _{zu}] | Δy_{CH_4} zu [%] | y_{CH_4} siliert [$^*\text{kg}^{-1}$ oTM _{orig}] | Δy_{CH_4} orig [%] | Literatur |
|-----------------|--------------|---|---|------------------------------------|---|--------------------------------------|-------------------------|
| Topinamburkraut | k.A. | 250 | 265 | + 6 % | k.A. | k.A. | (GUNNARSON ET AL. 1984) |
| Topinamburkraut | | 307 | 281 | - 8 % | k.A. | k.A. | |
| Topinamburkraut | k.A. | 309 | 301 | - 3 % | k.A. | k.A. | (ZUBR 1986) |
| Senfkraut | | 300 | 326 | + 9 % | k.A. | k.A. | |
| Weißer Kohl | | 382 | 343 | - 10 % | k.A. | k.A. | |
| Rhabarberkraut | | 316 | 345 | + 9 % | k.A. | k.A. | |
| Energierohr | k.A. | 245 | 265 | + 8 % | k.A. | k.A. | |
| Napiergras | | 260 | 310 | + 19 % | k.A. | k.A. | (CHYNOWETH ET AL. 1993) |

Tab. 6: Fortsetzung

| Pflanzenart | TM-Korrektur | y_{CH_4} [l*kg ⁻¹ oTM _{zu}] unsiliert | y_{CH_4} [l*kg ⁻¹ oTM _{zu}] siliert | Δy_{CH_4} zu [%] | y_{CH_4} [l*kg ⁻¹ oTM _{orig}] siliert | Δy_{CH_4} orig [%] | Literatur |
|--------------------------|--------------|---|---|---------------------------------|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Mangoschale | k.A. | 210 ^{1,2)} | 312 ¹⁾ | + 49 % | k.A. | k.A. | (MADHUKARA ET AL. 1993) |
| Grüne Bohnenschale | k.A. | 210 ¹⁾ | 243 ¹⁾ | + 16 % | k.A. | k.A. | (MADHUKARA ET AL. 1997) |
| Deutsches Weidelgras | k.A. | 390 | 409 | + 5 % | k.A. | k.A. | (POUECH ET AL. 1998) |
| Gerste (Blüte) | nein | 438 | 462 | + 5 % | k.A. | k.A. | (HEIERMANN ET AL. 2002b) |
| Gerste (Milchreife) | | 503 | 658 | + 31 % | k.A. | k.A. | |
| Roggen (Blüte) | | 370 | 476 | + 29 % | k.A. | k.A. | |
| Roggen (Milchr.) | | 410 | 492 | + 20 % | k.A. | k.A. | |
| Triticale (Blüte) | | 534 | 555 | + 4 % | k.A. | k.A. | |
| Triticale (Milchr.) | | 461 | 509 | + 10 % | k.A. | k.A. | |
| Kleegras | k.A. | 240 | 326 | + 36 % | k.A. | k.A. | (AMON ET AL. 2003b) |
| Ananasschale | k.A. | 292 ¹⁾ | 440 ¹⁾ | + 51 % | k.A. | k.A. | (RANI & NAND 2004) |
| Mais (44 d siliert) | k.A. | 383 | 338 | - 12 % | 320 ¹⁾ | - 16 % | (NEUREITER ET AL. 2005) |
| Mais (119 d siliert) | | 383 | 480 | + 25 % | 466 ¹⁾ | + 22 % | |
| Gras | k.A. | 230 | 230 | ± 0 % | 190 | - 17 % | (LEHTOMÄKI 2006) |
| Zuckerrübe | | 310 | 360 | + 16 % | 270 | - 13 % | |
| Mais | k.A. | 225 | 289 | + 28 % | k.A. | k.A. | (AMON ET AL. 2007a) |
| Gras | k.A. | 286 | 291 | + 2 % | k.A. | k.A. | (IDLER ET AL. 2007) |
| Gras | | 288 | 236 | - 18 % | k.A. | k.A. | |
| Grünland | nein | 200 - 417 | 243 - 424 | -34 bis +45 % | k.A. | k.A. | (KAISER 2007) |
| Gras | | 215 - 374 | 209 - 443 | -36 bis +85 % | k.A. | k.A. | |
| Leguminosen | | 199 - 359 | 200 - 346 | -31 bis +41 % | k.A. | k.A. | |
| Miscanthus | | 205 | 223 | + 9 % | k.A. | k.A. | |
| Rübenblatt | | 376 | 216 | - 43 % | k.A. | k.A. | |
| Hopfenhäcksel | | 141 | 181 | + 28 % | k.A. | k.A. | |
| Mais | ja | 284 | 350 | + 23 % | k.A. | k.A. | (SCHUMACHER ET AL. 2007) |
| Triticale | | 328 | 376 | + 15 % | k.A. | k.A. | |
| Weidelgras | k.A. | 410 | 470 | +15 % | 334 ¹⁾ | - 9 % | (PAKARINEN ET AL. 2008) |
| Weidelgras ³⁾ | | 410 | 410 | ±0 % | 333 ¹⁾ | -19 % | |
| Gras | | 360 | 420 | +17 % | 338 ¹⁾ | -6 % | |
| Gras ³⁾ | | 360 | 510 | +42 % | 402 ¹⁾ | -12 % | |
| Weidelgras ³⁾ | k.A. | 480 | 390 | - 19 % | 323 ¹⁾ | - 33 % | (PAKARINEN ET AL. 2008) |
| Gras | | 470 | 490 | + 4 % | 448 ¹⁾ | - 5 % | |
| Gras ³⁾ | | 410 | 480 | + 17 % | 343 ¹⁾ | - 16 % | |
| Luzerne | ja | 214 | 226 | + 6 % | 201 ¹⁾ | - 6 % | (ZACHARIAS 2008) |
| Gras | | 267 | 374 | + 40 % | 324 ¹⁾ | + 22 % | |
| Mais | | 320 | 364 | + 14 % | 347 ¹⁾ | + 9 % | |

k.A. ... keine Angabe; ¹⁾ kalkuliert aus Autorenangaben; ²⁾ getrocknetes Material; ³⁾ angewelkt

Zum Einfluss der Silierung auf die Biogasbildung besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Bisherige Ergebnisse unterscheiden sich deutlich in ihrer Aussage. Mittels systematischer Untersuchungen ist zu klären, inwieweit die durch mikrobielle Umsetzungsvorgänge bei der Silierung verursachten Änderungen in Menge und Zusammensetzung der organischen Bestandteile auf die Methanbildung wirken.

2.2 Untersuchungsbedarf und Optimierungsansätze

Der Einsatz von Energiepflanzen kann die Methanproduktion einer Biogasanlage erhöhen und damit die Auslastung und Wirtschaftlichkeit der Anlage verbessern. Voraussetzung hierfür sind jedoch eine möglichst kostengünstige Substratbereitstellung und maximale Methanhektarerträge. Ansatzpunkt zur Optimierung der Substratbereitstellung ist neben der Verbesserung der Flächennutzung, der Erhöhung des Biomasseertrages durch pflanzenbauliche Maßnahmen und der optimalen Gestaltung der Prozessführung und Betriebsparameter der Biogasanlage auch die Erhöhung des Methanbildungspotenzials des Pflanzenmaterials. Letzteres ist wiederum von vielfältigen Einflussfaktoren entlang der Bereitstellungskette des pflanzlichen Substrates abhängig. Optimierungspotenzial bieten unter anderem Einflussfaktoren bei der Ernte und Silierung. Hierzu sind jedoch zum Teil Grundlagen nicht oder nicht hinreichend bekannt.

Untersuchungen zur Methanbildung aus Energiepflanzen berücksichtigen die Silierung bisher kaum, obwohl das Verfahren Ganzpflanzenernte und Silierung für die Biogasnutzung in der Praxis üblich ist und empfohlen wird. Zum Einfluss der Silierung auf die Biogasbildung liegen nur unzureichende und teilweise widersprüchliche Erkenntnisse vor. Eine Reihe von Faktoren entlang der Bereitstellungskette von Energiepflanzen beeinflussen sowohl die Silierung als auch die Biomethanisierung. Hierzu zählen die Wahl der Pflanzenart und des Erntetermins. Beide haben einen Einfluss auf die Silierbarkeit des Erntegutes und damit auf Umsetzungsvorgänge, Verluste bei der Silierung und die Konservatqualität. Durch Effekte auf die chemische Zusammensetzung und die Verfügbarkeit des organischen Materials sind die Pflanzenart und der Erntetermin ebenfalls wesentliche Faktoren der Biomethanisierung. Die Häcksellänge eines Siliergutes ist als wichtiger Silierparameter aus der Futtermittelkunde bekannt. Indessen fehlen bislang eindeutige Erkenntnisse zum Einfluss der Häcksellänge auf die Methanbildung und eine übergreifende Betrachtung des Einflusses auf die Silierung und die Biomethanisierung. Zudem bewirkt eine kürzere Häcksellängeneinstellung zur Ernte einen erhöhten Bedarf an Kraftstoff sowie geringere Arbeitsgeschwindigkeiten des Feldhäckslers. Die Empfehlung einer optimalen Häcksellänge muss daher auch unter Beachtung energetischer und ökonomischer Gesichtspunkte erfolgen.

Weitere Silierparameter, wie die Silierdauer und die Verwendung von Silierzusätzen, haben Einfluss auf den Silierverlauf, das Gär säuremuster und die Verluste bei der Silierung. Über die Änderung der organischen Bestandteile der Silagen ist auch mit einem Effekt auf die Biomethanisierung zu rechnen. Die Kenntnis über qualitative und quantitative Effekte der einzelnen Faktoren wäre Grundlage für eine gezielte Beeinflussung des Silierverlaufes für die Sicherung maximaler Methanausbeuten.

3 Ziel- und Aufgabenstellung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, für die Optimierung der Biogasproduktion aus Energiepflanzen entlang der Bereitstellungskette die Wirkung ausgewählter Einflussparameter auf die Methanbildung zu charakterisieren. Die Wahl der Einflussparameter konzentriert sich dabei auf Aspekte bei der Ernte und Konservierung von Ganzpflanzen. Da zwischen den Einflussparametern eine Vielzahl von Verknüpfungen bestehen, sollen nicht nur Einzelaspekte betrachtet, sondern auch Wechselwirkungen zwischen den Parametern identifiziert werden. Hierfür sind in einem ersten Teil unter Nutzung etablierter Methoden Grundlagen im Labormaßstab zu erarbeiten. Darauf aufbauend sollen in einem zweiten Teil ausgewählte Aspekte hinsichtlich ihrer Wirkung auf Funktion, Kapazität und die energetischen und ökonomischen Bilanzen der Prozesskette von der Ernte bis hin zur Biogasproduktion bewertet werden, um praxisorientierte Empfehlungen geben zu können.

Im Einzelnen wird die Beantwortung der folgenden Fragestellungen angestrebt:

- In welcher Weise beeinflussen die Silierung und die dabei auftretenden Änderungen im Substrat die Biomethanisierung?
- Wie wirkt sich die Abreife (Sorte, Erntetermin) auf die Silierung und Biomethanisierung aus?
- Wie wirkt sich die Häcksellänge zur Ernte auf die Silierung und auf die Biomethanisierung aus? Wie beeinflusst die Häcksellänge Aufwand und Kapazität der Häcksel- und Silierkette? Sind sehr kurze Häcksellängen energetisch und ökonomisch sowie hinsichtlich der Minderung von THG-Emissionen sinnvoll?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Lignifizierung (Pflanzenart, Sorte und Erntetermin) und der Wirkung der Häcksellänge auf die Biomethanisierung?
- Inwiefern beeinflusst die Dauer der Lagerung von Silage unter optimierten Bedingungen die Biomethanisierung?
- Kann die Biomethanisierung durch die Änderung des Gärsäuremusters beim Einsatz von Siliermitteln positiv beeinflusst werden?
- Kann im Hinblick auf die untersuchten Einflussfaktoren Abreife, Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz auch unter Beachtung energetischer und ökonomischer Gesichtspunkte eine Optimierung der Bereitstellung von Energiepflanzen erfolgen?

Als Ergebnis sollen Empfehlungen hinsichtlich einer optimierten Bereitstellung von Energiepflanzen für die Biomethanisierung gegeben werden.

4 Untersuchungen zu Prozessgrundlagen der Biomethanisierung

4.1 Aufgabenstellung

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit werden Grundlagen zum Einfluss verschiedener Parameter der Ernte und Silierung auf die Biomethanisierung erarbeitet. Als Einflussparameter werden

- die Abreife (Sorte und Erntetermin),
- die Häcksellänge,
- die Silierung (Änderung der Substratzusammensetzung durch die Silierung),
- die Lagerdauer von Silagen unter anaeroben Bedingungen und
- der Zusatz von Siliermitteln

untersucht. Weiterhin soll das Zusammenwirken dieser Parameter, vorrangig die Wirkung

- der Häcksellänge bei unterschiedlicher Abreife,
- der Silierung bei unterschiedlicher Häcksellänge,
- der Lagerdauer bei unterschiedlicher Häcksellänge sowie
- des Silierzusatzes bei unterschiedlicher Häcksellänge

im Bezug auf die Biomethanisierung eruiert werden. Hierfür werden am Beispiel der Pflanzenarten Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale Untersuchungen im Labormaßstab durchgeführt, die in drei Versuchsschwerpunkte untergliedert sind.

In Versuchsschwerpunkt I wird unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge das Erntegut von drei Maissorten siliert. Um den Umfang der Untersuchungen zu reduzieren, ist dieser Versuch auf die Pflanzenart Mais begrenzt. Es sollen Aussagen zu den Effekten von Abreife und Häcksellänge auf die Silierung und Biomethanisierung getroffen werden.

Der Versuchsschwerpunkt II umfasst einen Vergleich von mit unterschiedlicher Häcksellänge aufbereitetem Siliergut sowie den daraus erstellten Silagen bei Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale. Die Aufbereitung erfolgt mittels Laborhäcksler, um den grundlegenden Einfluss der Häcksellänge über einen weiten Längenbereich ermitteln zu können. Es sollen Aussagen zu den Effekten von Pflanzenart und Häcksellänge auf die Silierung und Biomethanisierung getroffen werden.

In Versuchsschwerpunkt III werden Biomassen der vier Pflanzenarten unter Variation von Häcksellänge, Silierzusatz und Silierdauer geprüft. Das Häckseln erfolgt mit praxisrelevanten kurzen und sehr kurzen Längeneinstellungen am Feldhäcksler. Es sollen Aussagen zu den Effekten der physikalischen Struktur sowie des durch Silierzusatz und

Lagerdauer beeinflussten Gärsäuremusters der Silagen auf die Biomethanisierung getroffen werden. Die Ergebnisse des Versuchsschwerpunktes III dienen als Grundlage für die Verfahrensbewertung im zweiten Teil der vorliegenden Dissertation.

Die Untersuchungen wurden überwiegend im Rahmen des von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. geförderten Forschungsprojektes „Ermittlung des Einflusses der Pflanzenart und der Silierung auf Substratqualität und Biogasausbeute im Labor und in der Praxis“ (FKZ: 22002605) durchgeführt. Das Projekt ist Teil des Verbundprojektes „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“ (EVA).

4.2 Material und Methoden

4.2.1 Herkunft und Beschreibung der Substrate

Die in den Versuchsschwerpunkten I bis III untersuchten Substrate wurden an drei Standorten in Brandenburg gewonnen, die im Folgenden näher charakterisiert werden. Die Untersuchungen in Versuchsschwerpunkt I erfolgten in Kooperation mit der Landesanstalt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung Brandenburg (LVLF), Referat Ackerbau und Grünland in Paulinenaue. Der zu analysierende Mais (*Zea mays*) entstammt einer im Jahr 2006 durchgeführten Sortenprüfung.

Grundlage für die Wahl der untersuchten Pflanzenarten in Versuchsschwerpunkt II und III war eine Fruchtfolge bestehend aus

- Mais (*Zea mays*) als Hauptfrucht im Jahr 2005,
- Grünschnittroggen (*Secale cereale*) als Winterzwischenfrucht
- gefolgt von einer Sudangrashybride (*Sorghum sudanense x bicolor*) als Zweitfrucht im Jahr 2006 und
- Wintertriticale (*x Triticosecale*) als Hauptfrucht im Jahr 2007.

Diese Fruchtfolge wurde im Rahmen des Projektes „EVA“ in den beiden Praxisbetrieben A und B angebaut. Für die Untersuchungen im Labormaßstab in Versuchsschwerpunkt II und III wurde je Pflanzenart Erntegut aus dem Bestand eines der beiden Betriebe entnommen und entsprechend weiter behandelt. Ausnahme war der 2005 angebaute Mais. Hier erfolgten keine Untersuchungen zur Analyse der Prozessgrundlagen im ersten Teil der vorliegenden Arbeit. Ersatzweise wurden im Versuchsschwerpunkt III Untersuchungen an im Jahr 2007 in Betrieb A angebautem Mais durchgeführt.

Versuchsschwerpunkt I

Der Mais in Versuchsschwerpunkt I wurde in Paulinenaue auf einem sickerwasserbeeinflussten humosen Sandstandort (Ackerzahl 30) angebaut. Daten zu Anbau und Bestandesführung sind in der Tab. A1 im Anhang aufgeführt. Für die Untersuchungen wurde je eine Maissorte mit früher, mittelfrüher und mittelspäter Siloreifezahl ausgewählt (**Tab. 7**). Die Wahl des Erntetermins orientierte sich an der Vorgabe eines mittleren TM-Gehaltes von 25 % zum ersten, 30 % zum zweiten und 35 % zum dritten Erntetermin. Erntetermine und Entwicklungsstadien der geprüften Varianten sind der **Tab. 7** zu entnehmen. Das Erntegut wurde vor Ort mit den drei verschiedenen Längeneinstellungen „grob“, „mittel“ und „fein“ zerkleinert. Die grobe Häcksellänge wurde dabei mit dem Feldhäcksler E281-C (Fa. FORTSCHRITT) erzeugt. Für die Ernte des Maises bei mittlerer und feiner Längeneinstellung kam ein Parzellenmaisernter der Fa. HALDRUP mit Schneidwerk Champion 1200 (Fa. KEMPER) zum Einsatz.

Tab. 7: Beschreibung des in Versuchsschwerpunkt I geprüften Maises

| Sorte | Siloreifezahl | Nr. Erntetermin | Datum der Ernte | Entwicklungsstadium zur Ernte |
|---------|-----------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|
| Oldham | S 220 (früh) | 1. Erntetermin | 24.08.2006 | Späte Milchreife (BBCH 78) |
| | | 2. Erntetermin | 07.09.2006 | Teigreife (BBCH 85) |
| | | 3. Erntetermin | 21.09.2006 | Physiologische Reife (BBCH 87) |
| LG3237 | S 250 (mittelfrüh) | 1. Erntetermin | 24.08.2006 | Milchreife (BBCH 75) |
| | | 2. Erntetermin | 07.09.2006 | Teigreife (BBCH 85) |
| | | 3. Erntetermin | 21.09.2006 | Physiologische Reife (BBCH 87) |
| Benicia | S 280 (mittelspät) | 1. Erntetermin | 24.08.2006 | Milchreife (BBCH 75) |
| | | 2. Erntetermin | 07.09.2006 | Frühe Teigreife (BBCH 83) |
| | | 3. Erntetermin | 21.09.2006 | Teigreife (BBCH 85) |

Versuchsschwerpunkte II und III

Der Anbau der in Versuchsschwerpunkt II und III geprüften Pflanzenarten erfolgte auf für das Bundesland Brandenburg typischen ertragsschwachen Standorten mit leichten Böden und geringen jährlichen Niederschlägen. Im Praxisbetrieb A wurde hierfür eine 6 ha große Fläche (lehmiger Sand, Ackerzahl 37) mit Mais und eine 4 ha große Fläche (lehmiger Sand, Ackerzahl 42) mit Sudangras bewirtschaftet. Im Praxisbetrieb B kamen Grünschnittroggen und Triticale auf einer 11 ha großen Fläche (lehmiger Sand, Ackerzahl 34) zum Anbau. Die mittleren jährlichen Niederschläge der beiden Standorte werden mit 490 und 486 mm angegeben. Die Daten zu Anbau und Bestandesführung können der Tab. A2 des Anhangs entnommen werden. **Tab. 8** fasst die Erntetermine und Entwicklungsstadien der Pflanzen zur Ernte zusammen.

Tab. 8: Beschreibung der in Versuchsschwerpunkt II und III geprüften Erntegüter

| Pflanzenart | Herkunft | Sorte | Datum der Ernte | Entwicklungsstadium zur Ernte |
|-------------------|-----------|----------------|-------------------|-------------------------------|
| Mais | Betrieb A | Nescio (S 220) | 14.09.2007 | Vollreife (BBCH 89) |
| Grünschnittroggen | Betrieb B | Vitallo | 30.05.-01.06.2006 | Beginn der Blüte (BBCH 61) |
| Sudangras | Betrieb A | Susu | 09.10.-10.10.2006 | Frühe Milchreife (BBCH 73) |
| Triticale | Betrieb B | Grenado | 18.06.-19.06.2007 | Teigreife (BBCH 85) |

Die Ernte erfolgte je Pflanzenart mit zwei unterschiedlichen Einstellungen der theoretischen Häcksellänge. Dabei wurde als gröbere Häcksellänge jeweils eine übliche Einstellung des Praxisbetriebes für die entsprechende Pflanzenart und als feinere Häcksellänge eine sehr kurze Einstellung gewählt. Für Mais, Sudangras und Triticale entsprach die feine Häcksellänge der kürzesten Längeneinstellung des Feldhäckslers. Der Mais in Betrieb A wurde mittels eines selbstfahrenden Feldhäckslers (Jaguar Speedstar 870, Fa. CLAAS) mit 8-reihigem Maisgebiss geerntet. Der Häcksler war mit Korncracker ausgestattet, wobei der Abstand der Quetschwalzen 2 mm betrug. Die theoretische Häcksellänge wurde zwischen 4 und 8 mm variiert. Das Sudangras in Betrieb A wurde gemäht und im Schwad abgelegt. Nach einer Anwelkzeit von 19 Stunden über Nacht erfolgte

die Aufnahme und Zerkleinerung des Sudangrases durch einen mit Pick-Up ausgestatteten selbstfahrenden Feldhäcksler (Jaguar 840, Fa. CLAAS) bei theoretischen Häcksellängen von 4 und 7 mm. Grünschnittroggen und Triticale wurden in Betrieb B mit selbstfahrendem Feldhäcksler (Jaguar 690 SL, Fa. CLAAS) und Ganzpflanzen-Schneidwerk ohne Anwelken geerntet. Die theoretische Häcksellänge wurde bei Grünschnittroggen auf 6,8 und 11 mm und bei Triticale auf 4 und 8 mm eingestellt.

4.2.2 *Versuchsübersicht*

Die **Tab. 9** gibt einen Überblick über die durchgeführten Versuche zur Analyse der Prozessgrundlagen der Biomethanisierung im ersten Teil der vorliegenden Arbeit.

Tab. 9: Übersicht der durchgeführten Versuche zur Analyse der Prozessgrundlagen – Versuchsschwerpunkt I bis III

| Herkunft | | Betrieb A | Betrieb B | Paulinenaue | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|---|--|---|-----------------|-----------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|---|------------------|---|
| Fruchtfolge | zusätzlich | | | | | | | | | | | | | |
| Pflanzenart, Jahr | | | | Versuchsschwerpunkt I | | | | | | | | | | |
| | Mais 2006 | | | <table border="1"> <tr> <th>Prüffaktor</th> <th>k_{Pf}</th> </tr> <tr> <td>1. Sorte</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>2. Erntetermin</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>3. Häcksellänge</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>4. Konservierung</td> <td>2</td> </tr> </table> | Prüffaktor | k _{Pf} | 1. Sorte | 3 | 2. Erntetermin | 3 | 3. Häcksellänge | 3 | 4. Konservierung | 2 |
| Prüffaktor | k _{Pf} | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Sorte | 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 2. Erntetermin | 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 3. Häcksellänge | 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 4. Konservierung | 2 | | | | | | | | | | | | | |
| Versuchsschwerpunkt II | | | | | | | | | | | | | | |
| | Grünschnitt- roggen 2006 | | <table border="1"> <tr> <th>Prüffaktor</th> <th>k_{Pf}</th> </tr> <tr> <td>1. Häcksellänge</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>2. Konservierung</td> <td>2</td> </tr> </table> | Prüffaktor | k _{Pf} | 1. Häcksellänge | 4 | 2. Konservierung | 2 | | | | | |
| Prüffaktor | k _{Pf} | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Häcksellänge | 4 | | | | | | | | | | | | | |
| 2. Konservierung | 2 | | | | | | | | | | | | | |
| | Sudangras 2006 | <table border="1"> <tr> <th>Prüffaktor</th> <th>k_{Pf}</th> </tr> <tr> <td>1. Häcksellänge</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>2. Konservierung</td> <td>2</td> </tr> </table> | Prüffaktor | k _{Pf} | 1. Häcksellänge | 5 | 2. Konservierung | 2 | | | | | | |
| Prüffaktor | k _{Pf} | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Häcksellänge | 5 | | | | | | | | | | | | | |
| 2. Konservierung | 2 | | | | | | | | | | | | | |
| | Triticale 2007 | | <table border="1"> <tr> <th>Prüffaktor</th> <th>k_{Pf}</th> </tr> <tr> <td>1. Häcksellänge</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>2. Konservierung</td> <td>2</td> </tr> </table> | Prüffaktor | k _{Pf} | 1. Häcksellänge | 4 | 2. Konservierung | 2 | | | | | |
| Prüffaktor | k _{Pf} | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Häcksellänge | 4 | | | | | | | | | | | | | |
| 2. Konservierung | 2 | | | | | | | | | | | | | |
| Versuchsschwerpunkt III | | | | | | | | | | | | | | |
| | Mais 2007 | <table border="1"> <tr> <th>Prüffaktor</th> <th>k_{Pf}</th> </tr> <tr> <td>1. Häcksellänge</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>2. Silierzusatz</td> <td>5*</td> </tr> <tr> <td>3. Konservierung¹⁾</td> <td>5*</td> </tr> </table> | Prüffaktor | k _{Pf} | 1. Häcksellänge | 2 | 2. Silierzusatz | 5* | 3. Konservierung ¹⁾ | 5* | | | | |
| Prüffaktor | k _{Pf} | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Häcksellänge | 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 2. Silierzusatz | 5* | | | | | | | | | | | | | |
| 3. Konservierung ¹⁾ | 5* | | | | | | | | | | | | | |
| | Grünschnitt- roggen 2006 | | <table border="1"> <tr> <th>Prüffaktor</th> <th>k_{Pf}</th> </tr> <tr> <td>1. Häcksellänge</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>2. Silierzusatz</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>3. Konservierung¹⁾</td> <td>5*</td> </tr> </table> | Prüffaktor | k _{Pf} | 1. Häcksellänge | 2 | 2. Silierzusatz | 3 | 3. Konservierung ¹⁾ | 5* | | | |
| Prüffaktor | k _{Pf} | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Häcksellänge | 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 2. Silierzusatz | 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 3. Konservierung ¹⁾ | 5* | | | | | | | | | | | | | |
| | Sudangras 2006 | <table border="1"> <tr> <th>Prüffaktor</th> <th>k_{Pf}</th> </tr> <tr> <td>1. Häcksellänge</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>2. Silierzusatz</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>3. Konservierung¹⁾</td> <td>5*</td> </tr> </table> | Prüffaktor | k _{Pf} | 1. Häcksellänge | 2 | 2. Silierzusatz | 3 | 3. Konservierung ¹⁾ | 5* | | | | |
| Prüffaktor | k _{Pf} | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Häcksellänge | 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 2. Silierzusatz | 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 3. Konservierung ¹⁾ | 5* | | | | | | | | | | | | | |
| | Triticale 2007 | | <table border="1"> <tr> <th>Prüffaktor</th> <th>k_{Pf}</th> </tr> <tr> <td>1. Häcksellänge</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>2. Silierzusatz</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>3. Konservierung¹⁾</td> <td>5*</td> </tr> </table> | Prüffaktor | k _{Pf} | 1. Häcksellänge | 2 | 2. Silierzusatz | 3 | 3. Konservierung ¹⁾ | 5* | | | |
| Prüffaktor | k _{Pf} | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Häcksellänge | 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 2. Silierzusatz | 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 3. Konservierung ¹⁾ | 5* | | | | | | | | | | | | | |

k_{Pf}... Anzahl der Stufen des Prüffaktors; * nicht alle Stufen bei allen Prüffaktoren; ¹⁾ Lagerdauer

4.2.3 *Probenahme*

In Versuchsschwerpunkt I wurde das gesamte den Parzellen entnommene und gehäckselte Erntegut direkt nach der Ernte in das Labor des ATB transportiert und siliert (Abschnitt 4.2.4). Die Probenahme in Versuchsschwerpunkt II erfolgte auf den Praxisflächen des Betriebes A bzw. B jeweils einen Tag vor der Praxisernte. Hierbei wurden verteilt über die Fläche Ganzpflanzen in einer Höhe von 10 bis 20 cm über dem Boden manuell geschnitten und nach dem Transport in das Labor des ATB mittels Laborhäcksler (Fa. HEGE) unterschiedlich zerkleinert. Die Probenahme in Versuchsschwerpunkt III erfolgte durch Entnahme einer Zahl von Einzelproben verteilt über die Dauer der Praxisernte getrennt nach Häcksellänge. Dabei wurde von jedem Transportzug eine Einzelprobe direkt beim bzw. nach dem Abkippen des Anhängers an verschiedenen Stellen des Schüttgutes mittels Schaufel oder per Hand entnommen. Die Einzelproben wurden im Labor zu einer Sammelprobe vereint und gründlich vermengt. Für die folgenden Untersuchungen wurden der Sammelprobe Stichproben bzw. Teilproben entnommen.

4.2.4 *Siliversuche im Labormaßstab*

Durchführung der Siliversuche im Labormaßstab

Die Silierung des Erntegutes wurde im Labormaßstab in 1,5 Liter Gläsern (Fa. WECK) in Anlehnung an die DLG-Richtlinie für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichenfähigkeit (DLG 2000) durchgeführt. Dies erfolgte unmittelbar nach dem Transport des frisch gehäckselten Erntegutes ins Labor des ATB bzw. nach Zerkleinerung geernteter Ganzpflanzen mit Hilfe eines Laborhäckslers (Fa. HEGE, Laborhäcksellängen des Versuchsschwerpunktes II). Die Verdichtung im Laborsilo wurde nach intensivem Durchmischen des Siliergutes manuell durchgeführt, wobei mehrere Lagen des Siliergutes im WECK-Glas mit Hilfe einer Verdichtungsapparatur (Eigenbau ATB, **Abb. 8**) komprimiert wurden. Nach dem Befüllen des Glases wurde dieses sorgfältig mit einem Glasdeckel mit Gummiring, gehalten von vier Klammern, luftdicht verschlossen. Durch Wägung der leeren und gefüllten Gläser mit der Exaktwaage XB 6200 D (Fa. PRECISA, $d = 0,1 \text{ g}$) wurde die eingelagerte Probenmenge bestimmt. Die Lagerung der Laborsilos erfolgte in einem dunklen temperierten Raum bei 25°C über einen definierten Zeitraum von 90 Tagen bzw. über Zeiträume von 10 bis 365 Tagen im Versuchsschwerpunkt III. Für jede Variante wurde Siliergut in dreifacher Wiederholung in Laborsilos konserviert.



Abb. 8: Verdichtungsapparatur zur Silierung im Labormaßstab (links) und Lagerung der Siliergläser (rechts)

Zur Ermittlung der Silierverluste wurden die Laborsilos nach Ablauf der Lagerdauer erneut gewogen. Anschließend wurde das silierte Pflanzenmaterial aus den Gläsern entfernt und bei -18°C für die chemische Analytik und für Gärtests eingefroren.

Applikation von Siliermitteln

Vor dem Verdichten im Laborsilo wurden im Versuchsschwerpunkt III laut Versuchsplan Silierzusätze appliziert. Hierfür kamen kommerziell erhältliche Siliermittel zum Einsatz (**Tab. 10**):

Tab. 10: Art und Menge der Silierzusätze in Versuchsschwerpunkt III

| Typ | Bezeichnung | Pflanzenart | Wirkstoffe | Menge |
|---------------------------|-------------|--|---|--|
| chemisches Siliermittel | Chem. A | Mais | Natriumbezoat, Natriumpropionat | $4 \text{ l}^* \text{ t}^{-1}$ |
| chemisches Siliermittel | Chem. B | Grünschnittroggen, Sudangras, Triticale | Natriumnitrit, Hexamethylentetramin | bis 25 % TM: $3,5 \text{ l}^* \text{ t}^{-1}$ 25 – 30 % TM: $4 \text{ l}^* \text{ t}^{-1}$ < 35 % TM: $4,5 \text{ l}^* \text{ t}^{-1}$ |
| biologisches Siliermittel | MSB-komb. A | Mais, Grünschnittroggen, Sudangras, Triticale | homo- und heterofermentative Milchsäurebakterien | $1 \text{ g}^* \text{ t}^{-1}$ ($2 \cdot 10^5 \text{ KbE/g}$) |
| biologisches Siliermittel | MSB-ho | Mais | homofermentative Milchsäurebakterien | $1 \text{ g}^* \text{ t}^{-1}$ ($3 \cdot 10^5 \text{ KbE/g}$) |
| biologisches Siliermittel | MSB-komb. B | Mais | homo- und heterofermentative Milchsäurebakterien | $1 \text{ g}^* \text{ t}^{-1}$ ($2,5 \cdot 10^5 \text{ KbE/g}$) |

Die applizierten Siliermittelmengen pro kg Siliergut wurden nach Empfehlung der Siliermittelhersteller gewählt. Die Siliermittel wurden in Wasser gelöst bzw. mit Wasser verdünnt, so dass jeweils einheitlich eine Flüssigkeitsmenge von 15 ml Lösung pro kg FM appliziert wurde. Bei den biologischen Siliermitteln wurde bei jeder Applikation kontrolliert, ob die gewünschte Konzentration an Milchsäurebakterien in der Lösung

enthalten war. Neben den mit den Silierzusätzen konservierten Silagen wurde zu jeder Siliermittelvariante auch frisches Siliergut mit dem applizierten Siliermittel eingefroren und hinsichtlich chemischer Zusammensetzung (Abschnitt 4.2.6) und Biogasbildung (Abschnitt 4.2.7) analysiert.

Beschreibung der Silierzusätze

Das chemische Siliermittel Chem. A enthält $250 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ Natriumbenzoat und $100 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ Natriumpropionat (SPIEKERS 2006). Im Gärverlauf werden daraus Benzoesäure und Propionsäure freigesetzt, die eine Unterdrückung von Hefen und Schimmelpilzen bewirken. Wirkungsrichtung nach DLG-Gütesiegel ist die Verbesserung der aeroben Stabilität insbesondere bei Maissilagen (DLG 2009a).

Die Wirkstoffe des chemischen Siliermittels Chem. B zielen auf die Hemmung von Clostridien und Enterobakterien ab. Dabei wirkt Natriumnitrit ($300 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$) zunächst in der frühen Gärphase und erhält damit Nährsubstrate für die Milchsäurebakterien. Nach Einsetzen der natürlichen Milchsäuregärung und Absinken des pH-Wertes wird das Hexamethylentetramin ($200 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$) aktiviert, wodurch Clostridien und Enterobakterien lang anhaltend gehemmt werden. Entsprechend DLG-Gütesiegel (DLG 2009a) bewirkt das chemische Siliermittel B nachweislich eine Verbesserung des Gärverlaufes von schwer silierbarem und mittelschwer bis leicht silierbarem Futter im unteren TM-Bereich sowie eine erhöhte Futteraufnahme und die Verhinderung der Vermehrung von Clostridien.

Das biologische Siliermittel MSB-komb. A wird speziell für die Konservierung von Energiepflanzen für die Biogasproduktion angeboten. Nach Angaben des Herstellers wird durch die ausgewählten homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterienstämme ein spezifisches Gärsäuremuster mit erhöhten Essigsäuregehalten erzeugt, das ein früheres Einsetzen der Biogasbildung sowie höhere Methanausbeuten zur Folge hat. Zudem wird durch die höheren Essigsäuregehalte eine starke Vermehrung von Hefen unterdrückt und damit die aerobere Stabilität verbessert (SCHAUMANN 2009). Das Präparat besitzt kein DLG-Gütesiegel.

In dem biologischen Siliermittel MSB-ho sind die homofermentativen Milchsäurebakterienstämme *Lactobacillus plantarum* DSM² 8862 und *Lactobacillus plantarum* DSM 8866 enthalten. Diese Stämme weisen nach Herstellerangaben hohe Vermehrungsraten sowohl bei hohen als auch bei geringen TM-Gehalten auf. Sie bewirken eine schnelle Milchsäuregärung und Absenkung des pH-Wertes, eine Erhöhung des Milchsäure- und eine Verringerung des Essigsäuregehaltes in den Silagen und damit die Verringerung von Gärverlusten (Dr. PIEPER TUP GMBH 2007). Das DLG-Gütesiegel bescheinigt dem Präparat die Verbesserung des Gärverlaufes von mittelschwer bis

² Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen

leicht silierbarem Futter im oberen und im unteren TM-Bereich, sowie die Erhöhung der Futteraufnahme, der Verdaulichkeit und die Verbesserung der Milchleistung (DLG 2009a).

Das biologische Siliermittel MSB-komb. B ist ein speziell für Maissilage entwickeltes Präparat. Es enthält homofermentative Milchsäurebakterienstämme von *Lactobacillus plantarum* und *P. pentosaceus*, die eine erhöhte Milchsäurebildung in der Startphase bewirken, sowie einen heterofermentativen Milchsäurebakterienstamm von *Lactobacillus buchneri*, der über erhöhte Essigsäuregehalte die aerobe Stabilität der Silage positiv beeinflusst (SPIEKERS 2006). Die nachgewiesene Wirkrichtung nach DLG-Gütesiegel ist die Verbesserung der aeroben Stabilität (DLG 2009a).

Berechnung der Silierverluste und Bewertung der Gärqualität der Silagen

Die TM- bzw. oTM-Verluste bei der Silierung wurden aus der Differenz der Gewichte zur Einlagerung und zum Ende der Lagerdauer über eine Trockenmassebilanz berechnet. Die angeführten Silierverluste umfassen damit im Wesentlichen Verluste durch Restatmung und Fermentationsprozesse nach Verschluss des Silos.

Für die Beurteilung des Siliererfolges wurde eine Bewertung der Gärqualität der Silagen nach DLG-Bewertungsschlüssel 2006 (DLG 2006) durchgeführt. Die Gärqualität ergibt sich dabei aus den Gehalten unerwünschter Stoffabbauprodukte in den Silagen. Im Wesentlichen werden hierfür die Gehalte an Buttersäure und Essigsäure sowie der pH-Wert in Abhängigkeit vom TM-Gehalt herangezogen und mit Punktzahlen belegt. Aus der Gesamtpunktzahl wird ein zusammenfassendes Urteil abgeleitet, wobei sich mit steigender Punktzahl eine bessere Gärqualität ergibt. Als Maximalzahl können 100 Punkte erreicht werden. Ergänzend wurde eine Sinnenprüfung entsprechend DLG (2004) auf Auffälligkeiten bei Geruch, Gefüge sowie Färbung der Silage und Schimmelbildung vorgenommen. Die Beobachtung entsprechender Auffälligkeiten ist bei Darstellung der Gärqualitäten im Folgenden angemerkt. Die Bewertung der Gärqualität stammt aus dem Bereich der Tierernährung und beurteilt zusammenfassend die Lagerstabilität der Silage unter anaeroben Bedingungen, das Ausmaß entstandener Nährstoffverluste, die Abnahme des Nährstoff- und Energiegehaltes sowie Auswirkungen auf Verzehr, Milchqualität und Tiergesundheit (DLG 2006).

4.2.5 Bewertung der physikalischen Struktur

Für die Bewertung der physikalischen Struktur des Siliergutes wurden bildanalytische Vermessungen durchgeführt. Hierfür wurden je Variante in fünffacher Wiederholung Einzelproben von jeweils ca. 10, 15 bzw. 20 g frischen Siliergutes mittels Riffelteiler fraktioniert, gewogen und die gesamten Partikel der Probe als digitale Bilder gescannt. Dies erfolgte mit Hilfe des Scanners Perfection 4870 Photo (Fa. EPSON), wobei beim Auflegen der Partikel auf den Scanner darauf geachtet wurde, dass sich die einzelnen Partikel nicht berühren oder überlagern (**Abb. 9**). Entsprechend wurden je Einzelprobe im Mittel 9 Bilder (minimal 3 und maximal 21 Bilder) gescannt. Die Wahl der Probenmenge erfolgte nach der Anzahl der vermessenen Partikel. Insgesamt sollten je Probe mindestens ca. 1000 Partikel vermessen werden.

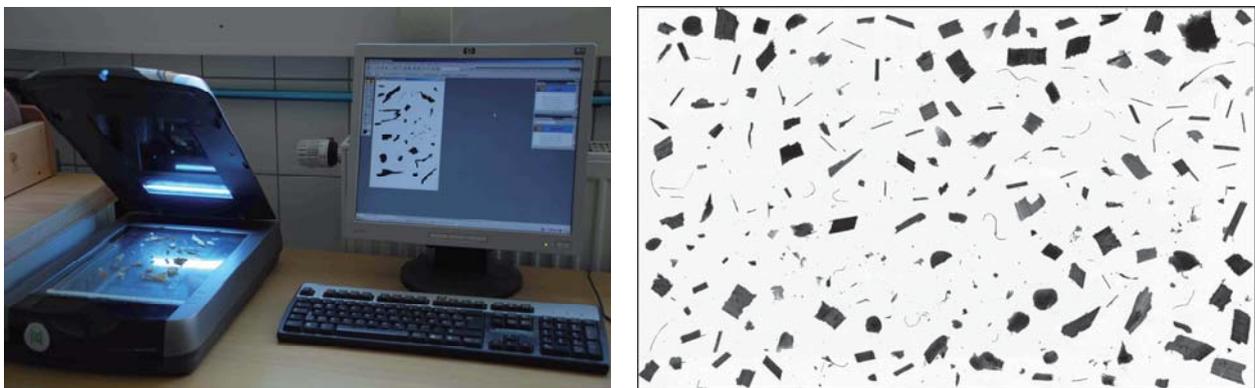


Abb. 9: Versuchsaufbau der Bildanalyse (links) und Beispiel eines für die Bildanalyse gescannten Bildes einer Maisprobe (rechts, Maßstab 1 : 4)

Für die Analyse der Bilder nach visuellen Kriterien wurde die Software Fibreshape 4.3.8 (Fa. IST) im Messmodus „Short fibres“ angewendet. Hierbei wurden von den Partikeln $> 500 \mu\text{m}$ der Proben die Feinheitsmerkmale Länge, Breite und projizierte Oberfläche bestimmt. Die Bewertung der erzeugten Häufigkeitsverteilungen dieser Merkmale erfolgte flächengewichtet. Es wurden aus den Flächenverteilungssummen jeweils der Medianwert (50 %) als „mittleres“ Feinheitsmerkmal sowie die unteren (25 %) und oberen Quartile (75 %) als charakteristische Kenngrößen ermittelt. Zur Einschätzung der Breite der Häufigkeitsverteilung wird der Interquartilabstand berechnet. Als Grobanteil wird analog zu den Untersuchungen von LEURS (2005) der prozentuale Anteil der Fläche angegeben, die von Partikeln mit einer Länge $> 25 \text{ mm}$ erzeugt wird. Als Feinanteil wird der Flächenanteil von Partikeln mit einer Länge $< 4 \text{ mm}$ definiert. Das mittlere Verhältnis Länge zu Breite ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der Einzelverhältnisse aller Partikel einer Probe. Zur Berechnung der spezifischen projizierten Oberfläche wird die Gesamtoberfläche der Partikel auf die Trockenmasse der eingewogenen Probe bezogen.

4.2.6 Chemische Analytik

Die chemische Analytik erfolgte durch die „Arbeitsgruppe Analytik“ am ATB. Zur Ermittlung chemischer Parameter wurde das bei -18°C eingefrorene Siliergut bzw. das gefrorene silierte Material bei Raumtemperatur aufgetaut und nach den folgenden Methoden analysiert:

Organische Säuren und niedere Alkohole

Die Bestimmung der Gehalte an Ethanol, Propanol, Essigsäure, Propionsäure, i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure erfolgte aus einem gefilterten Kaltwasserextrakt. Hierfür wurden jeweils 50 g des zu untersuchenden Materials mit 200 ml destilliertem Wasser sowie 1 ml Toluol versetzt und für 24 Stunden bei 4°C gelagert. Anschließend wurde das filtrierte Eluat (Einmalfilter $22\ \mu\text{m}$, Fa. ROTH) mit 85 %-iger Phosphorsäure versetzt. Die Messung des Gärssäurespektrums erfolgte am Gaschromatographen GC 8360 (Fa. FISIONS INSTRUMENTS) mit Hilfe einer DB-FFAP-Säule (Fa. J&W SCIENTIFIC, $30\ \text{m} \times 0,53\ \text{mm}$, Filmdicke $0,25\ \mu\text{m}$), Helium als Trägergas und einem Flammenionisationsdetektor.

Der Milchsäuregehalt wurde ebenfalls aus dem Kaltwasserextrakt mittels Hochdruck-Flüssig-Chromatographie (HPLC, Fa. DIONEX) detektiert. Hierfür kamen eine Eurokat H Säule (Fa. KNAUR, $300 \times 8\ \text{mm}$, Filmdicke $10\ \mu\text{m}$) sowie $0,01\ \text{N}\ \text{H}_2\text{SO}_4$ als mobile Phase mit einem Fluss von $0,8\ \text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ zum Einsatz. Als Detektor wurde der Brechungsindex-Detektor RI 71 (Fa. SHODEX) verwendet.

pH-Wert

Die Messung des pH-Wertes erfolgte, nachdem das zu untersuchende Pflanzenmaterial im Verhältnis 1:10 mit destilliertem Wasser verdünnt und für 20 min durch Schütteln homogenisiert wurde, mit der pH-Elektrode Sen Tix 41 (Fa. WTW). Hierbei wurde die Konzentration an H^+ -Ionen durch eine Spannungsdifferenz zwischen zwei Elektroden erfasst.

Ammoniak-/Ammonium-Stickstoff

Das in der Probe enthaltene Ammonium (NH_4) wurde bei der Bestimmung des Ammonium-Stickstoffs durch Zugabe von Magnesiumoxid in Ammoniak umgesetzt und mittels Wasserdampfdestillation mit der Anlage Vodapest 20 (Fa. GERHARDT) in eine Vorlage aus Borsäure überführt. Durch Rücktitration mit Schwefelsäure auf den Ausgangs-pH-Wert erfolgte die quantitative Messung des Ammoniaks.

Trockenmasse, Rohasche und organische Trockenmasse

Die Trockenmasse (TM) wurde entsprechend VDLUFA Methodenbuch Band III Kap. 3.1 (NAUMANN ET AL. 1976) durch Trocknen einer Probe über zwei Tage bei 60°C im Trockenschrank (UT 20, Fa. HERAEUS), anschließendem Vermahlen der Probe auf < 2 mm mit Hilfe einer Schneidmühle (Fa. RETSCH) und erneutem Trocknen bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz ermittelt. Die Wägung des Rückstandes und der Bezug zur eingewogenen Probemenge ergeben den TM-Gehalt. Bei der Trocknung gehen flüchtige Bestandteile verloren, wodurch fälschlicherweise ein zu geringer TM-Gehalt gemessen wird. Insbesondere bei Silagen, die hohe Anteile an leicht flüchtigen Säuren und niederen Alkoholen enthalten, kann dies zu falschen Ergebnissen führen (MUKENGELE & OECHSNER 2007). Daher wurde in der vorliegenden Arbeit der gemessene TM-Gehalt TM_{gem} entsprechend den Gleichungen 2 bis 6 nach WEISSBACH & KUHLA (1995) korrigiert:

$$\text{pH bis 4,0: } TM = TM_{gem} + 0,94 FFS + 0,08 MS + AA + 0,16 NH_3 \quad \text{Gl. 2}$$

$$\text{pH 4,01 – 4,5: } TM = TM_{gem} + 0,80 FFS + 0,08 MS + AA + 0,32 NH_3 \quad \text{Gl. 3}$$

$$\text{pH 4,51 – 5,0: } TM = TM_{gem} + 0,68 FFS + 0,08 MS + AA + 0,48 NH_3 \quad \text{Gl. 4}$$

$$\text{pH 5,01 – 5,5: } TM = TM_{gem} + 0,58 FFS + 0,08 MS + AA + 0,64 NH_3 \quad \text{Gl. 5}$$

$$\text{pH > 5,5: } TM = TM_{gem} + 0,50 FFS + 0,08 MS + AA + 0,80 NH_3 \quad \text{Gl. 6}$$

TM... korrigierter TM-Gehalt [% FM]

TM_{gem} ... gemessener TM-Gehalt [% FM]

FFS... Summe der Gehalte an flüchtigen Fettsäuren (C₂ – C₆) [% FM]

MS... Gehalt an Milchsäure [% FM]

AA... Gehalte an einwertigen Alkoholen (Ethanol + Propanol) [% FM]

NH₃... Gehalt an Ammoniak [% FM]

Alle chemischen Parameter, die mit Bezug auf den TM-Gehalt angegeben werden, sind auf die korrigierte TM bezogen. Alle in getrockneten Proben gemessenen Parameter wurden durch Multiplikation mit dem Faktor TM_{gem}/TM neu berechnet.

Zur Bestimmung der organischen Trockenmasse (oTM) wurde die bei 105°C getrocknete Probe über fünf Stunden im Muffelofen (CWF 1100, Fa. CARBOLITE) bei 550°C verascht. Der Rückstand als Anteil der eingewogenen getrockneten Probe entspricht dem Rohaschegehalt in % TM. Der Gehalt an oTM ist die Differenz der Rohasche von 100 %.

Kohlenstoff, Gesamtstickstoff und Schwefel

Die Gehalte an Kohlenstoff (C), Gesamtstickstoff (N_{ges}) und Schwefel (S) wurden aus den bei 60°C getrockneten und vermahlenden Pflanzenproben mittels CNS-Elementaranalysator Vario EL (Fa. ELEMENTAR) analysiert. Hierbei erfolgte eine katalytische Rohverbrennung der Proben unter Sauerstoffzufuhr, wobei die Verbrennungsgase vollständig oxidiert wurden. Nach Reinigung von störenden Fremdgasen wurden die Messkomponenten durch spezifische Adsorption über beheizbare Säulen getrennt und mittels Wärmeleitfähigkeitsdetektor quantitativ bestimmt. Als Trägergas diente Helium.

Rohprotein und Rohfett

Der Gehalt an Rohprotein (XP) wurde aus dem im Pflanzenmaterial bestimmten Gehalt an Gesamtstickstoff durch Multiplikation mit dem Faktor 6,25 errechnet.

Die Analyse des Rohfettes wurde mittels Ankom-Fett-Analyser XT¹⁰ und „FilterBag“-Technik (Fa. ANKOM TECHNOLOGY CORP.) durchgeführt. Dabei führt ein Aufschluss des bei 60 °C getrockneten und vermahlenden Probenmaterials mit 3 N Salzsäure (HCl) zur Spaltung komplexer Lipide, die anschließend mit Fettlösemittel extrahierbar sind. Nach der sauren Hydrolyse wurde der Filter Bag zunächst bei 110°C getrocknet. Anschließend erfolgte die Extraktion mit einer Mischung aus Petrolether, Diethylether und Ethanol bei einer Temperatur von 90°C für 40-60 min und das erneute Trocknen der Probe. Der Fettgehalt errechnet sich aus der Gewichts Differenz der Probe nach der Hydrolyse und der Probe nach der Extraktion bezogen auf die eingewogene Probenmasse.

Zucker und Stärke

Der Gehalt an Zucker entspricht bei der durchgeführten Analyse im Wesentlichen dem Gehalt an Fructose, Glucose und Saccharose. Er wurde aus 2 bis 5 g Einwaage der bei 60°C getrockneten und vermahlenden Pflanzenproben bestimmt. Nach Homogenisierung des Probenmaterials mit destilliertem Wasser, Zugabe von Carrez I und II und dem Filtrieren der Lösung wurde der Zuckergehalt mittels HPLC ermittelt. Die Geräteparameter der HPLC entsprechen den bei der Milchsäurebestimmung aufgeführten Parametern.

Die Stärkebestimmung erfolgte mittels polarimetrischem Verfahren nach der Methodik von EWERS, wie von LENGERKEN & ZIMMERMANN (1991) beschrieben. Hierbei wurde die Stärke durch eine Hydrolyse mit 1,124 %iger HCl zu optisch rechtsdrehenden Verbindungen (v.a. Dextrine) abgebaut. Nach Zugabe von Carez I und II wurde die optische Rotation in der filtrierten Dispersion mit Hilfe eines Polarimeters (FA. WOLFGANG GLOCK AG) gemessen. Optisch aktive Begleitstoffe wurden ohne Hydrolyse der Stärke als Blindwert erfasst und in der Bestimmung berücksichtigt.

Rohfaser, Säure-Detergenz-Faser, Neutral-Detergenz-Faser und Säure-Detergenz-Lignin

Zur Bestimmung des Rohfasergehaltes, des Gehaltes an Neutral-Detergenz-Faser (NDF) und des Gehaltes an Säure-Detergenz-Faser (ADF) wurden der ANKOM^{A2000} Faseranalysator sowie die „FilterBag“-Technik (Fa. ANKOM TECHNOLOGY CORP.) verwendet.

Der Rohfasergehalt wurde dabei als organischer Rückstand bestimmt, der nach dem Aufschluss mit 0,255 N H₂SO₄ und 0,131 N NaOH verbleibt. Hierzu wurde das bei 60°C getrocknete und vermahlene Probenmaterial in FilterBags eingewogen, in Petrolether extrahiert und dem Aufschluss unterzogen. Nach Spülen der FilterBags mit Aceton erfolgten die Trocknung der Probe bei 102°C im Trockenschrank und die Veraschung der Probe bei 600°C im Muffelofen. Aus der Gewichts Differenz zwischen getrockneter und veraschter Probe (organischer Rückstand) bezogen auf die eingewogene Probenmasse wurde der Rohfasergehalt errechnet.

Für die Bestimmung des Gehaltes an NDF und ADF wurde bei 60°C getrocknetes und vermahlene Probenmaterial in FilterBags eingewogen, in einer Neutraldetergenz-Lösung unter Zugabe von Amylase und Na₂SO₃ bzw. in einer Säuredetergenz-Lösung aufgeschlossen (VAN SOEST ET AL. 1991), anschließend mit Aceton gespült und bei 102°C im Trockenschrank getrocknet. Der Gehalt an NDF bzw. ADF ergibt sich jeweils aus dem Gewicht der getrockneten Probe nach dem Aufschluss unter Beachtung des Blindwertes des FilterBags bezogen auf die eingewogene Probenmasse. Zur Ermittlung des Säure-Detergenz-Lignin-Gehaltes (ADL) der Probe wurde der FilterBag aus der ADF-Analyse für drei Stunden in gekühlte 72 %-ige Schwefelige Säure gegeben. Nach dem Spülen des FilterBags erfolgten die Trocknung der Probe bei 105°C im Trockenschrank und die Veraschung bei 550°C im Muffelofen. Aus der Gewichts Differenz der getrockneten und veraschten Probe bezogen auf die eingewogene Probenmasse wurde der ADL-Gehalt bestimmt.

Der Gehalt an Hemicellulose wird als Differenz aus dem NDF- und ADF-Gehalt errechnet, der Gehalt an Cellulose ergibt sich aus der Differenz von ADF und ADL.

4.2.7 Batch-Gärtests

Versuchsaufbau und –durchführung der Batch-Gärtests

Zur Ermittlung der Biogas- bzw. Methanbildung aus frischer und silierter pflanzlicher Biomasse wurden Gärtests im Batch-Verfahren nach VDI 4630 durchgeführt (VDI 2006, **Abb. 10**). Hierfür wurden 2 Liter Faulflaschen aus Glas mit jeweils 1500 g Inoculum zur Gewährleistung eines stabilen Gärprozesses sowie 50 g des zu untersuchenden Substrates gefüllt und bei $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ im Wasserbad temperiert.

Das erzeugte Biogas wurde in kalibrierten Nassgasometern aufgefangen und dessen Volumen mindestens einmal täglich gemessen. Zeitgleich erfolgte die Dokumentation von Raumtemperatur und Luftdruck als Ausgangsdaten für die Umrechnung des Gasvolumens auf Normbedingungen (Gl. 7). Für die Analyse der Gaszusammensetzung war gerätebedingt eine Mindestgasmenge von 300 ml erforderlich, so dass der Methan-, Kohlendioxid-, Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas nicht täglich, jedoch wenigstens achtmal je Gärtestansatz ermittelt wurde. Hierfür kam der Gasanalysator GA94 (Fa. ANSYCO) mit Infrarot- und elektrochemischem Sensor (Genauigkeit der CO_2 - und CH_4 -Messung bei 5-15 Vol-%: $\pm 1,0$ %; bei 15-100 Vol-%: $\pm 3,0$ Vol-%) zum Einsatz.

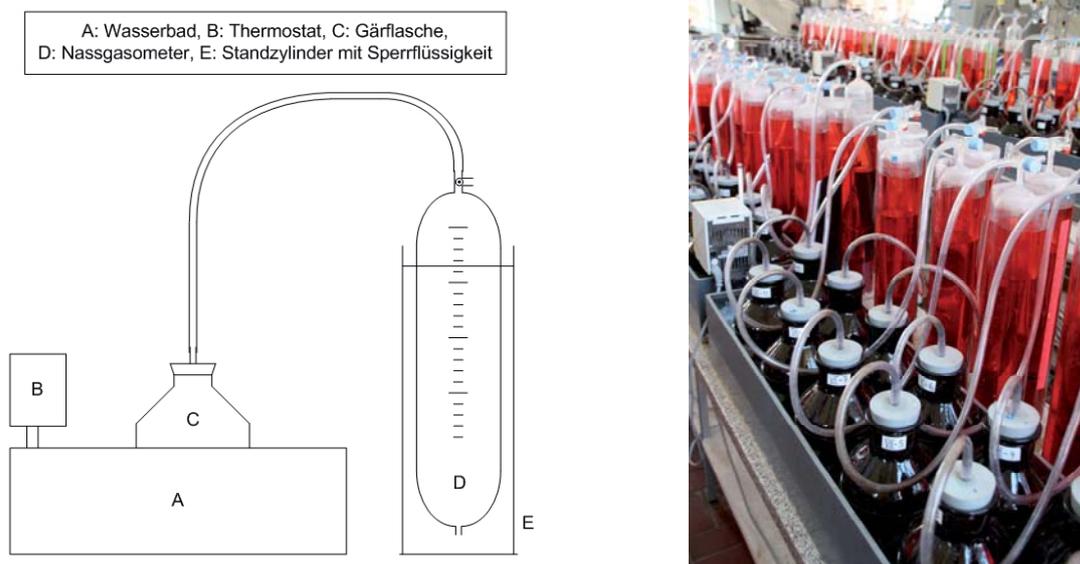


Abb. 10: Schematische (links) und fotografische Darstellung (rechts) der Batch-Gärtests

Das verwendete Inoculum bestand aus Gärresten vorheriger Batch-Gärtests mit pflanzlichen Substraten, die mittels eines Siebes mit 2 mm Lochweite von groben Bestandteilen befreit wurden. Die chemische Charakterisierung des Inoculums ist der **Tab. 11** zu entnehmen. Im Mittel wies das Inoculum einen TM-Gehalt von 3,8 % sowie einen oTM-Gehalt von 59,4 % TM auf (**Tab. 11**). Bei Zusatz von einheitlich 50 g Substrat zu 1500 g Inoculum lag das Verhältnis $\text{oTM}_{\text{Substrat}}$ zu $\text{oTM}_{\text{Inoculum}}$ (a_i) zwischen 0,3 und 0,5.

Die Werte des Substrat-Inoculum-Verhältnisses a_i eines jeden Versuches sind im Ergebnisteil (Abschnitt 4.3) aufgeführt. Die Gasbildung des Inoculums wurde als Kontrolle bei jedem Versuchsdurchlauf in fünf- bis neunfacher Wiederholung gemessen und von der Gasbildung der Gärtests mit Substrat bei jeder Messung subtrahiert. Um eine ausreichende Aktivität des Inoculums sicherzustellen, wurde je Versuchsansatz zusätzlich die Biogasbildung aus mikrokristalliner Cellulose (Ph. Eur. 5, Fa. EURO OTC PHARMA GMBH) als Referenzsubstrat getestet.

Tab. 11: Chemische Charakterisierung des Inoculums für Batch-Gärtests, n=41

| Parameter | Einheit | \bar{x} | $\pm s$ |
|--------------------|--------------------|-----------|------------|
| TM-Gehalt | % | 3,76 | $\pm 0,32$ |
| oTM-Gehalt | %TM | 59,42 | $\pm 2,02$ |
| pH | - | 8,12 | $\pm 0,17$ |
| NH ₄ -N | g*kg ⁻¹ | 1,43 | $\pm 0,19$ |
| N _{Ges} | g*kg ⁻¹ | 2,79 | $\pm 0,31$ |
| Organische Säuren | g*kg ⁻¹ | 1,44 | $\pm 0,40$ |

Um Schwimmschichten zu resuspendieren und eine ausreichende Durchmischung von Substrat und Inoculum zu erreichen wurden, die Faulflaschen einmal täglich von Hand geschüttelt. Jeder Versuchsansatz wurde über einen definierten Zeitraum von 30 Tagen durchgeführt. Die Untersuchung der Substratvarianten erfolgte als Dreifachbestimmung.

Quantitative Auswertung

Die quantitative Auswertung der Versuchsergebnisse beinhaltete die Umrechnung des täglich gemessenen und um die Gasbildung aus dem Inoculum korrigierten Gasvolumens auf Normbedingungen (Normdruck $p_0 = 1013,25$ mbar; Normtemperatur $T_0 = 273,15$ K; trockenes Gas) nach Gl. 7:

$$V_0^{tr} = V_1 \cdot \frac{(p_1 - p_w) \cdot T_0}{p_0 \cdot T_1} \tag{Gl. 7}$$

- V_0^{tr} ... Volumen des trockenen Gases bei Normdruck p_0 und Normtemperatur V_0 [l_N]
- V_1 ... gemessenes Gasvolumen [l]
- p_1 ... Druck der Gasphase zum Zeitpunkt der Messung (entspricht bei vorliegendem Versuchsaufbau dem Luftdruck zum Zeitpunkt der Messung) [mbar]
- p_w ... Dampfdruck des Wassers abhängig von T_1 [mbar]
- T_0 ... Normtemperatur [K]
- p_0 ... Normdruck [mbar]
- T_1 ... Temperatur der Gasphase zum Zeitpunkt der Messung (entspricht bei vorliegendem Versuchsaufbau der Temperatur des umgebenden Raumes zum Zeitpunkt der Messung)

Weiterhin wurden die gemessenen Konzentrationen an Methan und Kohlendioxid im Biogas bei jeder Messung einer Kopfraumkorrektur nach VDI 4630 unterzogen (VDI

2006). Hierbei kann die durch das Volumen im Kopfraum der Gärtestapparatur entstehende Verdünnung der Komponenten im gebildeten Biogas bei zeitgleicher Messung von Methan und Kohlendioxid nach Gl. 8 korrigiert werden.

$$c_{CH_4(bzw.CO_2)}^{korr} = c_{1CH_4(bzw.CO_2)} \cdot \frac{100}{c_{1CH_4} + c_{1CO_2}} \quad \text{Gl. 8}$$

| | |
|---------------------------------|---|
| $c_{CH_4(bzw.CO_2)}^{korr}$... | korrigierte Konzentration der Biogaskomponente Methan (bzw. Kohlendioxid) im trockenen Biogas [Vol-%] |
| $c_{1CH_4(bzw.CO_2)}$... | gemessene Konzentration an Methan (bzw. Kohlendioxid) im Biogas [Vol-%] |

Da die wesentliche, für die energetische Verwertung bedeutende Komponente im Biogas das Methan ist, wurden die Auswertung und Darstellung der Gasbildung im Folgenden auf Methanausbeuten bzw. den Verlauf der Methanbildung konzentriert. Für die Errechnung der Methanausbeute $y_{CH_4_zu}$ wurde die über die Versuchsdauer von 30 Tagen produzierte Methanmenge aufsummiert und auf die dem Gärtest zugegebene organische Trockenmasse (oTM_{zu}) bzw. Frischmasse (FM_{zu}) bezogen. Neben den direkt dem Gärtest zugegebenen Massen wurde als weitere Bezugsbasis die „organische Trockenmasse original“ (oTM_{orig}) bzw. die „Frischmasse original“ (FM_{orig}) definiert. Diese Parameter sind insbesondere für Silagen von Bedeutung. Sie kennzeichnen die jeweiligen Massen an Siliergut (Ausgangsmaterial vor der Silierung), die den im Gärtest verwendeten Massen der Silagen zuzuordnen sind. Demzufolge sind bei der Methanausbeute bezogen auf oTM_{orig} die in den Laborsilos gemessenen Silierverluste berücksichtigt (Gl. 9).

$$y_{CH_4_orig} = \frac{y_{CH_4_zu}}{\left(1 + \left(\frac{Verl}{100}\right)\right)} \quad \text{Gl. 9}$$

| | |
|----------------------|---|
| $y_{CH_4_orig}$... | Methanausbeute bezogen auf oTM_{orig} [$l_N \cdot kg^{-1} oTM_{orig}$] bzw. FM_{orig} [$l_N \cdot kg^{-1} FM_{orig}$] |
| $y_{CH_4_zu}$... | Methanausbeute bezogen auf oTM_{zu} [$l_N \cdot kg^{-1} oTM$] bzw. FM_{zu} [$l_N \cdot kg^{-1} FM$] |
| Verl... | oTM -Verluste bzw. FM -Verluste bei der Silierung [%] |

Bei Untersuchung der frischen Biomasse entsprechen die Methanausbeuten bezogen auf oTM_{zu} bzw. FM_{zu} den Methanausbeuten bezogen auf oTM_{orig} bzw. FM_{orig} .

Der mittlere Methangehalt im Biogas eines Batch-Gärtests c_{CH_4} errechnet sich aus dem Anteil der über den gesamten Versuchszeitraum summierten Methanausbeute an der summierten Biogasausbeute.

Weiterhin wurden an den zeitlichen Verlauf der Methanbildung empirisch Kurven angepasst, um eine Berechnung kinetischer Parameter zu ermöglichen. Über Anpassung einer exponentiellen Funktion mit zwei Parametern (Reaktion 1. Ordnung; Gl. 10) als einfachstes Modell lässt sich eine Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k ermitteln

(TONG ET AL. 1990, CHYNOWETH ET AL. 1993). Dabei bleiben jedoch Verzögerungen in der Anfangsphase (Lag-Phase) unberücksichtigt (MÄHNERT 2007).

$$y_{CH_4}(t) = y_{CH_4_max} \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad \text{Gl. 10}$$

| | |
|-----------------------|--|
| $y_{CH_4}(t) \dots$ | Methanausbeute (Summe) zum Zeitpunkt t [$l_N \cdot kg^{-1}$] |
| $y_{CH_4_max} \dots$ | maximal mögliche Methanausbeute [$l_N \cdot kg^{-1}$] |
| t... | Zeit [d] |
| k... | Reaktionsgeschwindigkeitskonstante [d^{-1}] |

Mit Hilfe dieser Exponentialfunktion kann auch die maximal mögliche Biogas- bzw. Methanausbeute berechnet werden. Nach MÄHNERT ET AL. (2002, 2005) lassen sich jedoch die HILL-Funktion (Gl. 11) sowie die CHAPMAN-Funktion mit drei Parametern mit einem höheren Bestimmtheitsmaß an die Biogas- bzw. Methan-Summenkurven anpassen.

$$y_{CH_4}(t) = y_{CH_4_max} \cdot \frac{t^b}{c^b + t^b} \quad \text{Gl. 11}$$

| | |
|-----------------------|--|
| $y_{CH_4}(t) \dots$ | Methanausbeute (Summe) zum Zeitpunkt t [$l_N \cdot kg^{-1}$] |
| $y_{CH_4_max} \dots$ | maximal mögliche Methanausbeute [$l_N \cdot kg^{-1}$] |
| t... | Zeit [d] |
| b, c... | Parameter der Kurvenanpassung |

Für die durchgeführten Batch-Gärtests wurden Parameter der drei genannten Kurvenanpassungen ermittelt. Dabei werden für die Auswertung im Folgenden die Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k für den Verlauf der Methan-Summenkurve $y_{CH_4_zu}(t)$ sowie alle Parameter der HILL-Funktion einschließlich des Bestimmtheitsmaßes dargestellt. Da die Kurvenanpassung der CHAPMAN-Funktion mit drei Parametern bei 98 % aller durchgeführten Batch-Gärtests geringere Anpassungsgenauigkeiten als die HILL-Funktion aufwies, wurde auf deren Darstellung verzichtet.

Neben dem Verlauf der Methanausbeute wurde aus der Anpassung der HILL-Funktion zudem der Verlauf der spezifischen Methanrate $r_{CH_4}(t)$ abgeleitet. Dieser ergibt sich aus der ersten Ableitung der HILL-Funktion (Gl. 12). Um weitere Kennwerte, die den Verlauf der Methanbildung beschreiben, zu ermitteln, wurde über die zweite Ableitung der HILL-Funktion (Gl. 13) der Zeitpunkt $t(r_{CH_4_max})$ errechnet, bei dem die spezifische Methanrate ein Maximum bildet ($y''(t)=0$). Durch Einsetzen der mittels empirischer Kurvenanpassung gefundenen Parameter sowie des $t(r_{CH_4_max})$ in Gl. 12 wurde die maximale Methanrate $r_{CH_4_max}$ berechnet.

$$r_{CH_4}(t) = y'_{CH_4}(t) = y_{CH_4_max} \cdot \frac{b \cdot c^b \cdot t^{b-1}}{(c^b + t^b)^2} \quad \text{Gl. 12}$$

$$y''_{CH_4}(t) = \frac{b \cdot y_{CH_4_max} \cdot t^{b-2} \cdot (c^b \cdot (b-1) - t^b \cdot (b+1))}{(c^b + t^b)^3} \quad \text{Gl. 13}$$

| | |
|---------------------|---|
| $r_{CH_4}(t)$... | spezifische Methanrate zum Zeitpunkt t [$N \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$] |
| $y_{CH_4}(t)$... | Methanausbeute (Summe) zum Zeitpunkt t [$N \cdot kg^{-1}$] |
| $y_{CH_4_max}$... | maximal mögliche Methanausbeute [$N \cdot kg^{-1}$] |
| t ... | Zeit [d] |
| b, c ... | Parameter der Kurvenanpassung |

Die Berechnung der maximalen Methanrate $r_{CH_4_max}$ ist nicht in jedem Fall möglich. Nimmt der Parameter b der Kurvenanpassung einen Wert < 1 an, so nimmt die Methanrate von Beginn des Batch-Gärtests an ab. Der Zeitpunkt $t(r_{CH_4_max})$ liegt daher vor der ersten Messung und kann nicht rechnerisch bestimmt werden. In diesem Fall wird $r_{CH_4_max}$ mit „n.b.“ (nicht berechenbar) angegeben.

4.2.8 Statistische Auswertung

Die in Abschnitt 4.2.7 dargelegten Anpassungen der exponentiellen Funktion sowie der Funktionen nach HILL und CHAPMAN an den gemessenen Verlauf der Methanausbeute im Batch-Gärtest wurden mit Hilfe der Software SigmaPlot 10.0 durchgeführt. Die Software kam ebenfalls für die Regressionsanalysen zur Beschreibung des stochastischen Zusammenhangs zwischen Substratzusammensetzung bzw. den Merkmalen der physikalischen Struktur und der Methanbildung (Abschnitt 4.3.4) zur Anwendung. Die Schätzwerte für die Parameter der Regressionsfunktionen wurden numerisch ermittelt, so dass die Summe der Abweichungsquadrate der beobachteten Werte von der Regressionsfunktion einen minimalen Wert annimmt. Die Stärke des Zusammenhangs wird über das Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben.

Für Korrelationsanalysen und Mittelwertvergleiche wurde die Software SAS 9.1.3 verwendet. Die Korrelationsanalyse erfolgte mit Hilfe der SAS-Prozedur CORR, wobei die Stärke linearer Zusammenhänge und deren Signifikanz über Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten (Pearsonsche Korrelationskoeffizienten) geschätzt wurden.

Für multiple Mittelwertvergleiche wurde die SAS-Prozedur MIXED angewandt. Paarweise Vergleiche wurden zwischen zwei Stufen eines Einflussfaktors bei jeweils gleichen Stufen der anderen Faktoren durchgeführt, um sachlich relevante lineare Kontraste zu schätzen. Dies erfolgte mit Hilfe des Testverfahrens SIMULATE, das die Verteilung der kritischen Quantile zur Einhaltung des versuchsbezogenen Signifikanzniveaus auf Basis häufig gezogener Zufallsstichproben simuliert (WESTFALL ET AL. 1999, MOLL & STAUBER 2008). In Versuchsschwerpunkt III wurde die Auswertung des Einflussfaktors Lagerdauer auf die Stufen 0, 10 und 90 Tage begrenzt, um stark unbalancierte Daten zu vermeiden.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Versuchsschwerpunkt I – Vergleich von Erntetermin und Häcksellänge bei drei Maissorten

4.3.1.1 Physikalische Struktur

Im Folgenden ist die physikalische Struktur des Siliergutes einer frühen (Oldham, S 220), mittelfrühen (LG3237, S 250) und mittelspäten Silomaisorte (Benicia, S 280) mit unterschiedlicher Behandlung bezüglich Erntetermin und Häcksellänge beschrieben. Als Ergebnis bildanalytischer Vermessungen sind Daten zu Partikellänge, Partikelbreite und projizierter Oberfläche dargestellt (**Abb. 11 – Abb. 13**; Tab. A3 – A11).

Die Verteilung der Anzahl der Partikel über der Partikellänge ergab bei allen untersuchten Proben einen stark asymptotischen Verlauf mit einem Maximum bei sehr niedrigen Partikellängen. Dabei lag der 50 %-Wert der Partikelanzahl nicht über einer Länge von 1,9 mm (Tab. A3 – A11). Durch den großen Einfluss des zahlenmäßigen Anteils an feinen Partikeln auf diesen Wert waren keine eindeutigen Änderungen bei Variation der Längeneinstellung messbar, obwohl bei der Verteilung der Partikellänge in den größeren Längengebieten deutliche Unterschiede zwischen den Varianten bestanden. Da die sehr feinen Partikel nur einem geringen Gewichtsanteil der Gesamtprobe entsprechen und dieser sich vielmehr proportional zur Fläche der Partikel verhält, erfolgt die weitere Bewertung der Struktur der Proben anhand der Verteilung der projizierten Oberfläche.

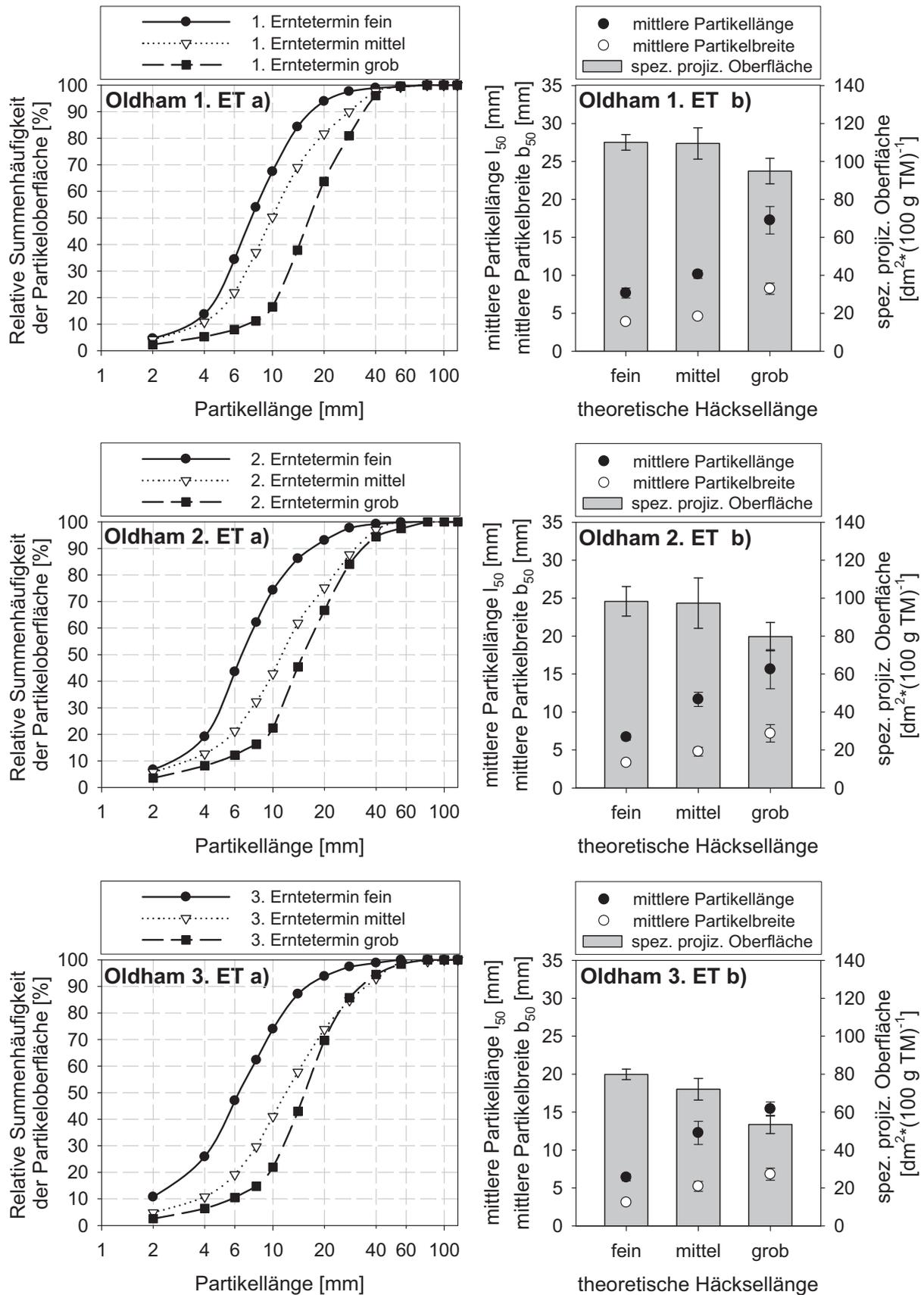
Die flächengewichtete Auswertung zeigt bei allen geprüften Sorten und Ernteterminen einen deutlichen Zusammenhang zwischen Zerkleinerungsgrad und mittlerer Partikellänge des Erntegutes (**Abb. 11 – Abb. 13**; Tab. A3 – A11). Dies bestätigt den optischen Eindruck von geringeren Partikellängen bei stärkerer Zerkleinerung (fotografische Darstellungen Abb. A1 – A9). Bei grober Längeneinstellung wurden 50 % der projizierten Oberfläche bei einer Partikellänge von 14,4 bis 17,4 mm abgebildet. Bei mittlerer Längeneinstellung lag dieser Wert bei einer Partikellänge von 9,3 bis 12,3 mm und bei feiner Zerkleinerung bei einer Partikellänge von 6,1 bis 7,7 mm. Ein wesentlich niedrigerer Interquartilabstand der Flächenverteilung über der Partikellänge bei den feinen Varianten deutet auf eine gleichmäßigere Zerkleinerung hin verglichen mit den groben und mittleren Varianten. Die feine Zerkleinerungsstufe zeichnete sich weiterhin durch einen hohen Feinanteil < 4 mm von im Mittel 24 % der projizierten Oberfläche und einen geringen Grobanteil > 25 mm von im Mittel 3 % aus. Im Vergleich hierzu wies die grobe Zerkleinerungsstufe einen deutlich geringeren Feinanteil von im Mittel 5 % und einen deutlich höheren Grobanteil von im Mittel 22 % der projizierten Oberfläche auf.

Die mittleren Partikelbreiten des Mais variierten zur Ernte zwischen 8,2 und 2,8 mm (**Abb. 11 – Abb. 13**). Mit stärkerer Zerkleinerung nahmen die mittleren Partikelbreiten in

ähnlichem Verhältnis wie die mittleren Partikellängen bei allen Sorten und Ernteterminen ab. Die mittleren Partikelbreiten der fein gehäckselten Varianten wiesen um 45 bis 54 % niedrigere Werte auf als die mittleren Partikelbreiten der grob gehäckselten Varianten. Durch die gleichzeitige Abnahme von Partikellänge und Partikelbreite ändert sich das mittlere Verhältnis von Länge zu Breite der Partikel mit dem Zerkleinerungsgrad nur geringfügig (Tab. A3 – A11).

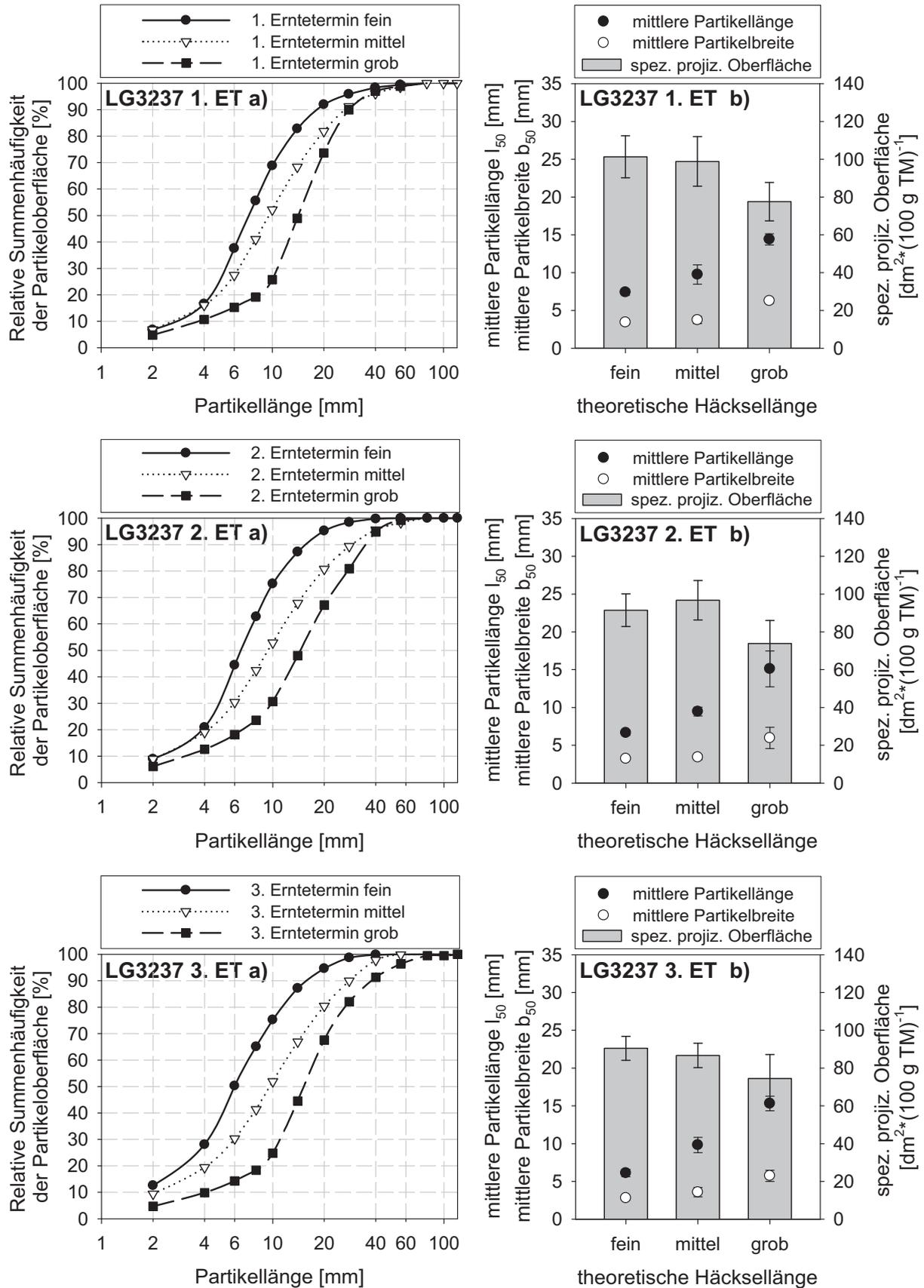
Die gleichzeitige Abnahme von Partikellänge und Partikelbreite mit stärkerem Zerkleinerungsgrad begründet zudem die noch deutlichere Abnahme der mittleren projizierten Oberfläche des feinen Häckselgutes gegenüber dem grob gehäckselten Material (Tab. A3 – A11). Die Differenzen zwischen den groben und feinen Varianten lagen hier bei 72 bis 82 %, wobei bei grober Häcksellänge mittlere projizierte Oberflächen von 57 bis 89 mm² und bei feiner Häcksellänge mittlere projizierte Oberflächen von 11 bis 18 mm² bestimmt wurden. Die spezifische projizierte Oberfläche änderte sich ebenfalls mit dem Zerkleinerungsgrad, jedoch weniger deutlich (**Abb. 11 – Abb. 13**). Die fein gehäckselten Varianten wiesen im Mittel 20 % höhere spezifische projizierte Oberflächen auf als die entsprechenden grob gehäckselten Varianten.

Im Vergleich der geprüften Maissorten wurden bei der mittelfrühen Sorte LG3237 die geringsten mittleren Partikellängen, Partikelbreiten und projizierten Oberflächen sowie die höchsten Feinanteile der Flächenverteilungen bestimmt. Die spezifischen projizierten Oberflächen der Sorte LG3237 waren jedoch nicht deutlich verschieden von den übrigen Sorten. Die spezifische projizierte Oberfläche bezieht sich auf die Trockenmasse und nahm entsprechend mit späterem Erntetermin und steigenden TM-Gehalten ab. Zwischen der mittleren Partikellänge, Partikelbreite oder projizierten Oberfläche und dem Erntetermin konnte hingegen kein eindeutiger Zusammenhang nachgewiesen werden. Auffällig war jedoch ein Anstieg des Feinanteils mit späterem Erntetermin, der insbesondere bei den fein gehäckselten Varianten erkennbar war (Tab. A3 – A11).



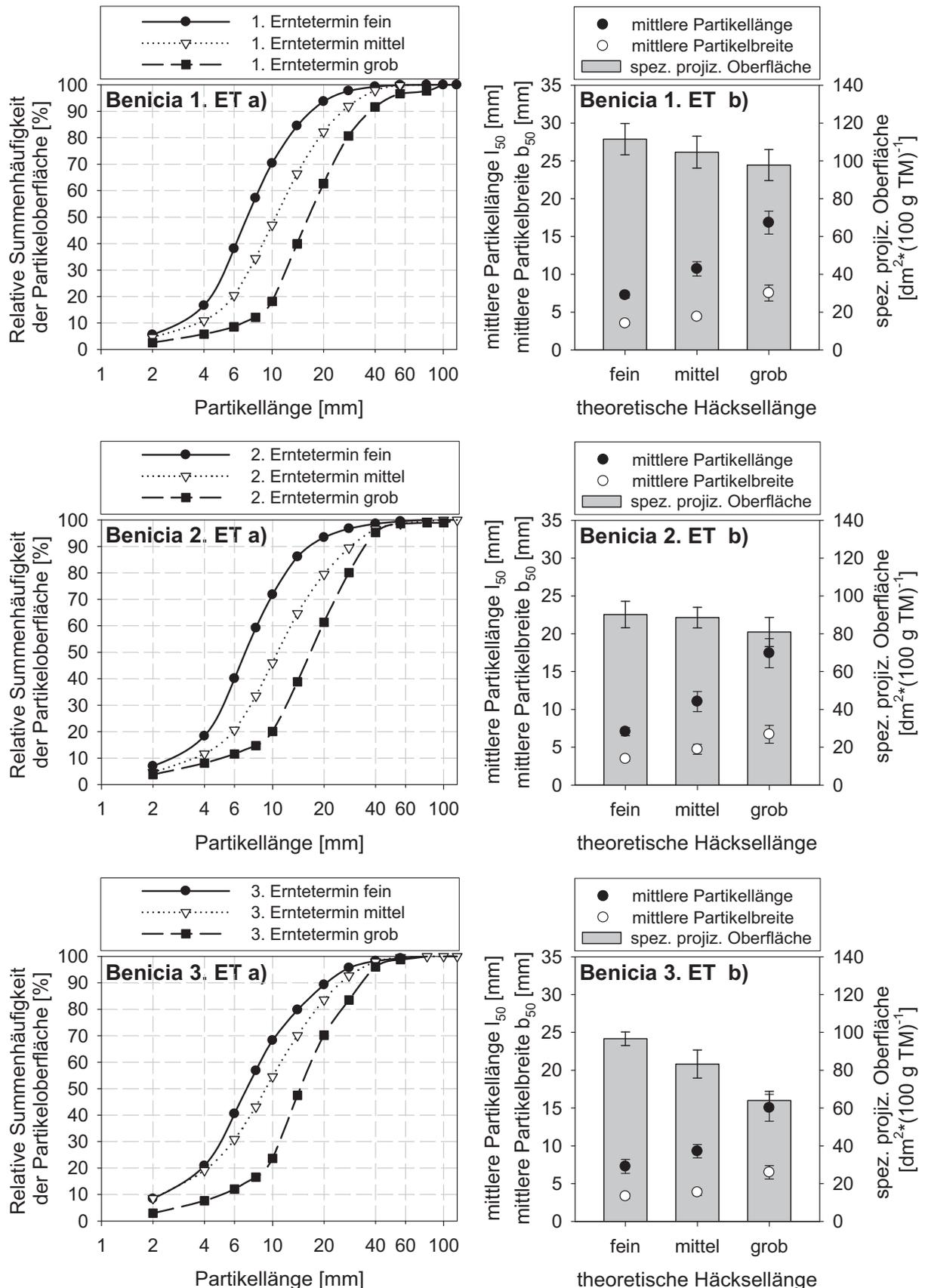
ET ... Erntetermin

Abb. 11: a) Summenverteilung der projizierten Oberfläche über die Länge der Partikel sowie b) mittlere Partikellänge, -breite und spezifische projizierte Oberfläche ($\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen) der Sorte Oldham bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge



ET ... Erntetermin

Abb. 12: a) Summenverteilung der projizierten Oberfläche über die Länge der Partikel sowie b) mittlere Partikellänge, -breite und spezifische projizierte Oberfläche ($\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen) der Sorte LG3237 bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge



ET ... Erntetermin

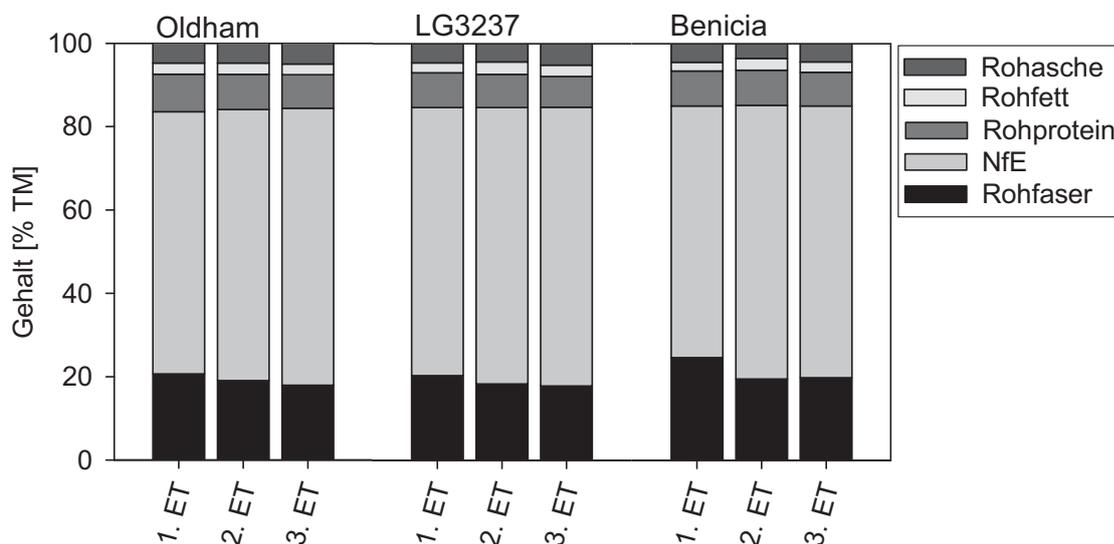
Abb. 13: a) Summenverteilung der projizierten Oberfläche über die Länge der Partikel sowie b) mittlere Partikellänge, -breite und spezifische projizierte Oberfläche ($\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen) der Sorte Benicia bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge

4.3.1.2 Chemische Charakterisierung

Die Ergebnisse der chemischen Analyse der geprüften Maissorten bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge sind in **Abb. 14** und **Abb. 15** sowie den Tabellen A19 bis A21 des Anhangs aufgeführt und im Folgenden zusammenfassend beschrieben.

Die erste Ernte der untersuchten Maissorten fand bei einem TM-Gehalt von 22 bis 24 % statt. Zum zweiten Erntetermin wurde ein auf 26 bis 28 % gestiegener TM-Gehalt und zum dritten Erntetermin ein auf 33 bis 36 % gestiegener TM-Gehalt des Siliergutes analysiert. Die TM-Gehalte der frühen und mittelfrühen Sorte unterschieden sich dabei kaum, während die mittelspäte Sorte zum gleichen Erntezeitpunkt jeweils die geringsten TM-Gehalte aufwies (Tab. A19 – A21). Durch die Silierung wurden die TM-Gehalte um bis zu 1,9 % (abs.) verringert.

Die geprüften Maisvarianten zeigten nur geringe Unterschiede im Gehalt an Rohasche bzw. oTM, Rohfett und Rohprotein (**Abb. 14**, Tab. A19 – A21). Die Gehalte an Rohasche variierten zwischen 2,9 und 5,5 % TM, die Gehalte an Rohfett zwischen 1,8 und 3,2 % TM und die Gehalte an Rohprotein zwischen 7,3 und 9,7 % TM. Mit späterem Erntetermin war eine leichte Abnahme des Rohproteingehaltes festzustellen. Etwas deutlicher waren die Unterschiede im Rohfasergehalt zwischen den Maisvarianten (**Abb. 14**). Dieser lag bei 15,8 bis 26,8 % TM und nahm mit späterem Erntetermin um 2,5 bis 4,8 % TM im Siliergut ab. Im Vergleich der Sorten wurden bei Benicia jeweils die höchsten Rohfasergehalte gemessen.

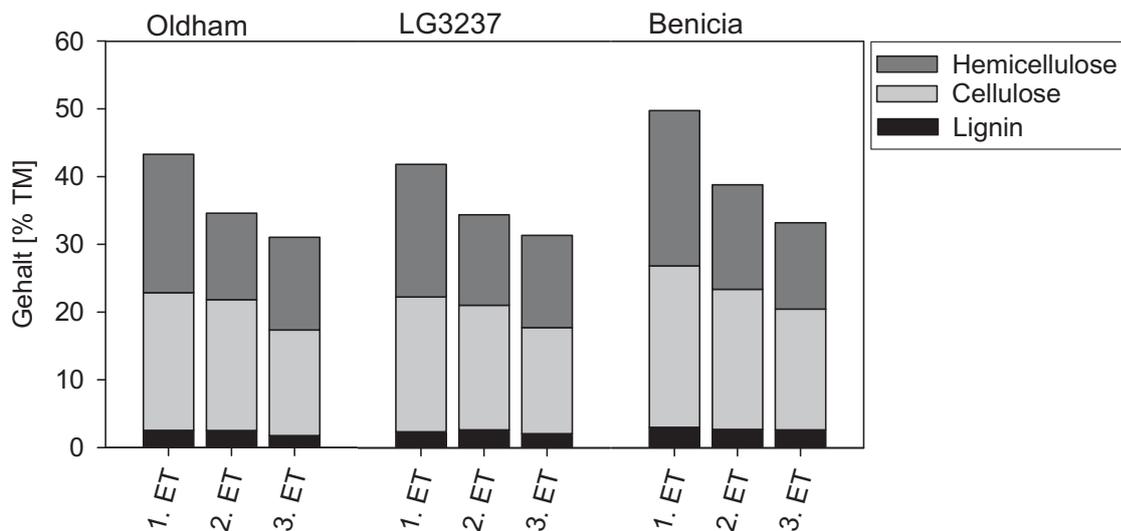


ET ... Erntetermin

Abb. 14: Rohnährstoffgehalte des Siliergutes Mais der Sorten Oldham, LG3237 und Benicia zu jeweils 3 Ernteterminen

Bei Analyse der Gerüstsubstanzen wurden insbesondere bei den Maissilagen Unterschiede in den prozentualen Anteilen an Lignin, Cellulose und Hemicellulose mit Variation von Sorte und Erntetermin deutlich (**Abb. 15**). Von dem ersten zum dritten Erntetermin

nahm der Gehalt an Hemicellulose im Mittel um 7,6 % TM, der Gehalt an Cellulose im Mittel um 5,0 % TM und der Gehalt an Lignin im Mittel um 0,5 % TM ab. Analog zum Rohfasergehalt lagen auch die Gehalte an Lignin, Cellulose und Hemicellulose bei der Sorte Benicia höher als bei den beiden früher reifenden Sorten. Ein gerichteter Einfluss des Zerkleinerungsgrades auf die Rohnährstoffgehalte oder Anteile an Gerüstsubstanzen war nicht erkennbar (Tab. A19 – A21).



ET ... Erntetermin

Abb. 15: Anteile an Gerüstsubstanzen der Maissilagen der Sorten Oldham, LG3237 und Benicia zu jeweils 3 Ernteterminen

Die Zuckergehalte des Siliergutes änderten sich ebenfalls vorrangig mit der Abreife der Maispflanzen und nahmen von 17,5 bis 20,1 % TM zum ersten Erntetermin auf 5,2 bis 5,6 % TM zum dritten Erntetermin stetig ab. Gleichzeitig war eine Zunahme des Stärkeanteils von 9,9 bis 15,9 % TM zum ersten Erntetermin auf 25,6 bis 28,3 % TM zum dritten Erntetermin zu beobachten. Durch die Gärprozesse bei der Silierung wurden die Zuckergehalte zum ersten und zweiten Erntetermin im Mittel um 43 % (rel.) und zum dritten Erntetermin im Mittel um 5 % (rel.) verringert. Auffällig waren etwas geringere Zuckergehalte im Siliergut bei der feinen Häcksellänge und deutlich niedrigere Zuckergehalte in den Silagen der fein gehäckselten Varianten. Gleichzeitig wurden Essigsäuregehalte und Ethanolgehalte von jeweils bis zu 0,7 % TM im Siliergut und deutlich erhöhte Essigsäure- und Ethanolgehalte in den Silagen (Abschnitt 4.3.1.3) analysiert.

4.3.1.3 Silierverluste und Gärqualität der Silagen

Die **Tab. 12** bis **Tab. 14** zeigen wesentliche Parameter und Summenparameter der Gärqualität von Maissilagen einer frühen, mittelfrühen und mittelspäten Silomaisorte aus Laborversuchen mit unterschiedlicher Behandlung bezüglich Erntetermin und Häcksellänge.

Die erstellten Maissilagen des Versuchsschwerpunktes I waren durch niedrige pH-Werte bis maximal 3,8, hohe Anteile an Milchsäure im Gärsäurespektrum und sehr gute Gärqualitäten nach DLG-Schlüssel gekennzeichnet. Die TM-Verluste lagen zwischen 0,6 und 9,6 % und nahmen mit späterem Erntetermin tendenziell ab. Am deutlichsten war diese Tendenz bei der frühen Sorte Oldham (**Tab. 12**) ausgeprägt, am wenigsten bei der mittelspäten Sorte Benicia (**Tab. 14**). Mit späterem Erntetermin und steigendem TM-Gehalt verringerten sich die Milchsäuregehalte in den Silagen. Buttersäure wurde nur in niedrigen Konzentrationen bis 0,3 % TM und vorwiegend bei den Silagen des 1. und 2. Erntetermins nachgewiesen.

Tab. 12: TM-Verlust und Gärqualität von Maissilagen (Laborsilo) der Sorte Oldham (S220) bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge; n=3

| Erntetermin | Häcksellänge | TM-Verlust | pH-Wert | Milchsäure | Essigsäure ¹⁾ | Buttersäure ²⁾ | einw. Alkohole ³⁾ | DLG-Punkte ⁴⁾ | DLG-Note ⁴⁾ |
|----------------|--------------|------------|---------|------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------|
| | | [%] | [-] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [-] | [-] |
| 1. Erntetermin | fein | 3,9 | 3,8 | 6,6 | 1,8 | n.n | 2,8 | 100 | sehr gut |
| | mittel | 5,4 | 3,7 | 6,7 | 1,3 | 0,1 | 0,5 | 100 | sehr gut |
| | grob | 9,6 | 3,7 | 5,9 | 1,3 | 0,1 | 1,5 | 100 | sehr gut |
| 2. Erntetermin | fein | 2,7 | 3,7 | 6,2 | 1,9 | n.n | 2,6 | 100 | sehr gut |
| | mittel | 4,6 | 3,6 | 6,5 | 1,4 | 0,1 | 0,3 | 100 | sehr gut |
| | grob | 4,6 | 3,6 | 6,4 | 1,5 | 0,2 | 0,4 | 94 | sehr gut |
| 3. Erntetermin | fein | 1,0 | 3,7 | 5,0 | 1,0 | n.n | 1,3 | 100 | sehr gut |
| | mittel | 0,6 | 3,7 | 5,3 | 1,2 | n.n | 0,9 | 100 | sehr gut |
| | grob | 3,9 | 3,7 | 4,6 | 1,0 | n.n | 1,3 | 100 | sehr gut |

¹⁾Summe aus Essig- und Propionsäure; ²⁾Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; ³⁾Summe aus Ethanol und Propanol; ⁴⁾DLG-Schlüssel 2006; einw. ... einwertig; n.n. ... nicht nachweisbar

Bei der Sorte Oldham wurden mit Abnahme der Häcksellänge tendenziell geringere TM-Verluste gemessen. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Milchsäuregehalt und Häcksellänge war nicht gegeben, bei den fein gehäckselten Silagen wurden jedoch zum ersten und zweiten Erntetermin um 0,4 bis 0,5 % TM höhere Gehalte an Essigsäure und um 1,3 bis 2,3 % TM höhere Gehalte an Ethanol im Vergleich zu den gröber gehäckselten Silagen analysiert (**Tab. 12**). Buttersäure wurde nur bei den Silagen mit grober und mittlerer Häcksellänge in geringen Konzentrationen nachgewiesen.

Tab. 13: TM-Verlust und Gärqualität von Maissilagen (Laborsilo) der Sorte LG3237 bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge; n=3

| Ernte-termin | Häcksel-länge | TM-Verlust | pH-Wert | Milch-säure | Essig-säure ¹⁾ | Butter-säure ²⁾ | einw. Alkohole ³⁾ | DLG-Punkte ⁴⁾ | DLG-Note ⁴⁾ |
|-----------------|---------------|------------|---------|-------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------|
| | | [%] | [-] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [-] | [-] |
| 1. Ernte-termin | fein | 6,2 | 3,7 | 6,3 | 2,0 | n.n | 2,7 | 100 | sehr gut |
| | mittel | 8,5 | 3,6 | 6,5 | 1,3 | 0,1 | 0,4 | 100 | sehr gut |
| | grob | 3,4 | 3,6 | 6,5 | 1,6 | 0,1 | 0,4 | 100 | sehr gut |
| 2. Ernte-termin | fein | 4,4 | 3,7 | 6,3 | 1,7 | n.n | 2,3 | 100 | sehr gut |
| | mittel | 5,7 | 3,7 | 5,6 | 0,9 | 0,1 | 0,2 | 100 | sehr gut |
| | grob | 3,7 | 3,6 | 6,1 | 1,0 | n.n | 0,6 | 100 | sehr gut |
| 3. Ernte-termin | fein | 3,9 | 3,8 | 5,1 | 1,0 | n.n | 1,6 | 100 | sehr gut |
| | mittel | 5,8 | 3,7 | 4,9 | 1,2 | n.n | 0,5 | 100 | sehr gut |
| | grob | 1,2 | 3,7 | 5,3 | 1,2 | n.n | 0,6 | 100 | sehr gut |

¹⁾Summe aus Essig- und Propionsäure; ²⁾Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; ³⁾Summe aus Ethanol und Propanol; ⁴⁾DLG-Schlüssel 2006; einw. ... einwertig; n.n. ... nicht nachweisbar

Die Silagen der Sorten LG3237 (**Tab. 13**) und Benicia (**Tab. 14**) zeigten keinen gerichteten Einfluss der Häcksellänge auf den TM-Verlust und Milchsäuregehalt. Die fein gehäckselten Silagen unterschieden sich ebenfalls von den Silagen mit mittlerer und grober Zerkleinerung durch um 0,3 bis 1,0 % TM erhöhte Essigsäuregehalte und um 1,6 bis 2,3 % TM erhöhte Ethanolgehalte zum ersten und zweiten Erntetermin. Zum dritten Erntetermin lagen nur die Ethanolgehalte um 1,0 bis 1,3 % TM höher. Buttersäure wurde bei den fein gehäckselten Silagen nicht nachgewiesen.

Tab. 14: TM-Verlust und Gärqualität von Maissilagen (Laborsilo) der Sorte Benicia bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge; n=3

| Ernte-termin | Häcksel-länge | TM-Verlust | pH-Wert | Milch-säure | Essig-säure ¹⁾ | Butter-säure ²⁾ | einw. Alkohole ³⁾ | DLG-Punkte ⁴⁾ | DLG-Note ⁴⁾ |
|-----------------|---------------|------------|---------|-------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------|
| | | [%] | [-] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [-] | [-] |
| 1. Ernte-termin | fein | 5,2 | 3,7 | 6,6 | 1,9 | n.n | 2,3 | 100 | sehr gut |
| | mittel | 4,9 | 3,6 | 7,3 | 1,6 | n.n | 0,5 | 100 | sehr gut |
| | grob | 5,4 | 3,6 | 7,2 | 1,5 | 0,1 | 0,7 | 100 | sehr gut |
| 2. Ernte-termin | fein | 3,3 | 3,6 | 5,9 | 2,1 | n.n | 1,8 | 100 | sehr gut |
| | mittel | 4,0 | 3,5 | 6,2 | 1,1 | 0,1 | 0,2 | 100 | sehr gut |
| | grob | 1,9 | 3,5 | 6,5 | 1,2 | n.n | 0,4 | 100 | sehr gut |
| 3. Ernte-termin | fein | 1,4 | 3,6 | 5,2 | 1,2 | n.n | 1,7 | 100 | sehr gut |
| | mittel | 5,3 | 3,7 | 4,5 | 1,0 | 0,3 | 0,5 | 94 | sehr gut |
| | grob | 3,1 | 3,6 | 5,0 | 1,2 | n.n | 0,4 | 100 | sehr gut |

¹⁾Summe aus Essig- und Propionsäure; ²⁾Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; ³⁾Summe aus Ethanol und Propanol; ⁴⁾DLG-Schlüssel 2006; einw. ... einwertig; n.n. ... nicht nachweisbar

4.3.1.4 Methanbildung

Die gemessenen Methanausbeuten sowie die Methanausbeuten unter Berücksichtigung der oTM-Verluste bei der Silierung sind für das Siliergut und die Silagen der frühen, mittelfrühen und mittelspäten Maissorte in **Abb. 17** bis **Abb. 19** dargestellt. Die Daten zu den Methanausbeuten, Methangehalten und den Geschwindigkeiten der Methanbildung sind in den Tabellen A29 – A34 des Anhangs enthalten.

Die Methanbildungskurven der untersuchten Proben des Versuchsschwerpunktes I zeigten ausschließlich typische Verläufe mit raschem Anstieg der kumulierten Methanmenge und ohne Hinweise auf eine Hemmung des Substratabbaus bzw. auf einen verzögerten Abbau. Dies ist in **Abb. 16** beispielhaft für das frische und silierte Pflanzenmaterial der Maissorte Oldham zum 1. Erntetermin dargestellt.

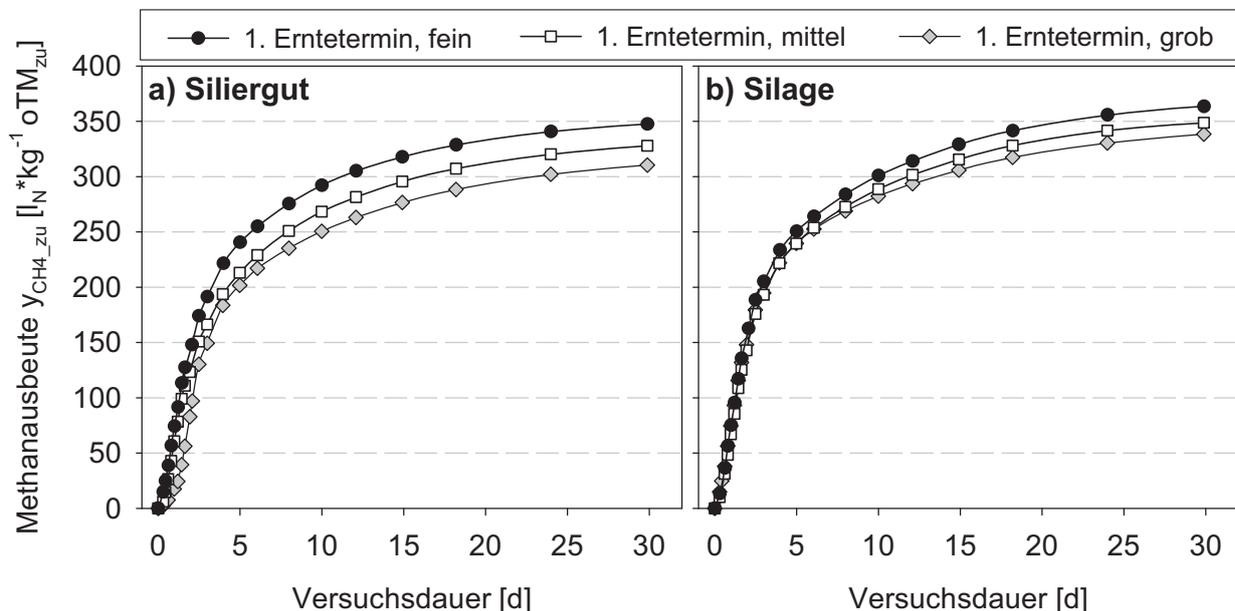
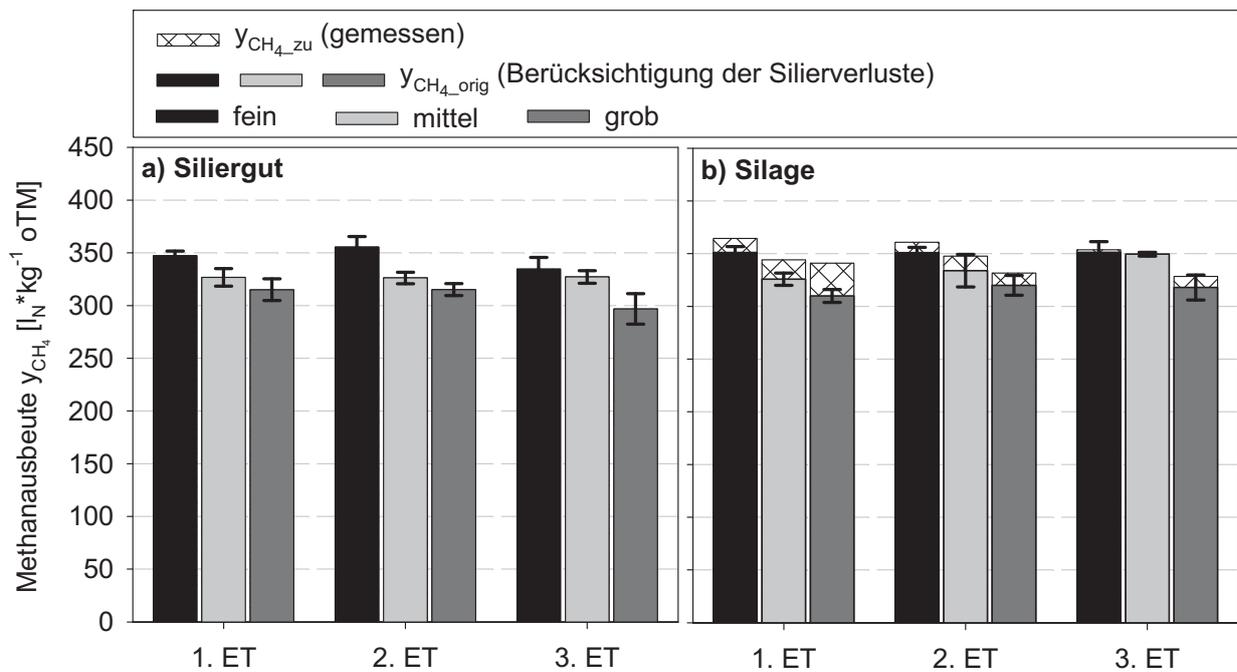


Abb. 16: Zeitlicher Verlauf der Methanausbeute am Beispiel von a) Siliergut und b) Silage der Maissorte Oldham zum 1. Erntetermin (dargestellt ist jeweils die mittlere Wiederholung einer Variante)

Methanausbeuten

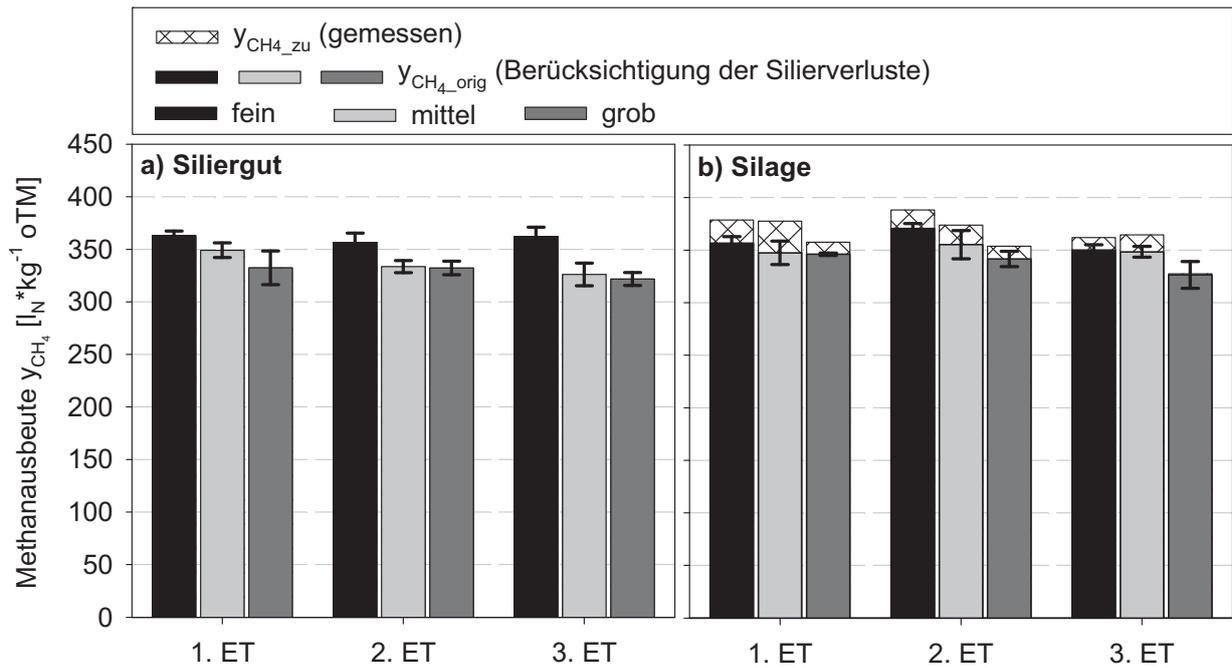
Die im Batch-Gärtest gemessenen Methanausbeuten $y_{CH_4_zu}$ der im Versuchsschwerpunkt I untersuchten Maisvarianten wiesen eine Spanne von 297 bis 388 $N \cdot kg^{-1} oTM$ auf. Dabei wurden von der mittelfrühen Sorte LG3237 überwiegend leicht (um maximal 8 %) höhere Methanausbeuten gemessen als von den Sorten Oldham und Benicia. Die frühe Sorte Benicia wies im Mittel die geringsten Methanausbeuten auf. Die Methanausbeuten der geprüften Maissorten wurden von dem Erntetermin, der Häcksellänge und der Konservierung beeinflusst.

Der Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute mit Bezugsbasis oTM war verhältnismäßig gering. Bei der Sorte Oldham wurden sowohl ohne als auch mit Beachtung der Silierverluste keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den drei Ernteterminen ermittelt (Tab. A29). Bei der Sorte LG3237 nahm die Methanausbeute $y_{CH_4_zu}$ von dem 1. zum 3. Erntetermin im Mittel um 4 % ab. Mit Beachtung der Silierverluste lagen die mittleren Unterschiede in der Methanausbeute noch geringer bei 3 % (**Abb. 18**). Bei der Sorte Benicia wurde bei der groben und mittleren Häcksellänge eine Abnahme der Methanausbeute vom 1. zum 3. Erntetermin von im Mittel 5 % gemessen, bei der feinen Häcksellänge war dieser Trend nicht eindeutig. Aufgrund der Zunahme der TM-Gehalte mit späterem Erntetermin von 22 bis 24 % auf 33 bis 36 % ist von einem höheren TM-Ertrag zur späteren Ernte auszugehen. Die geringen Unterschiede in der Methanausbeute bezogen auf die oTM würden in Verbindung mit einem höheren TM-Ertrag eine deutliche Zunahme des Methanhektarertrages vom 1. zum 3. Erntetermin bewirken.



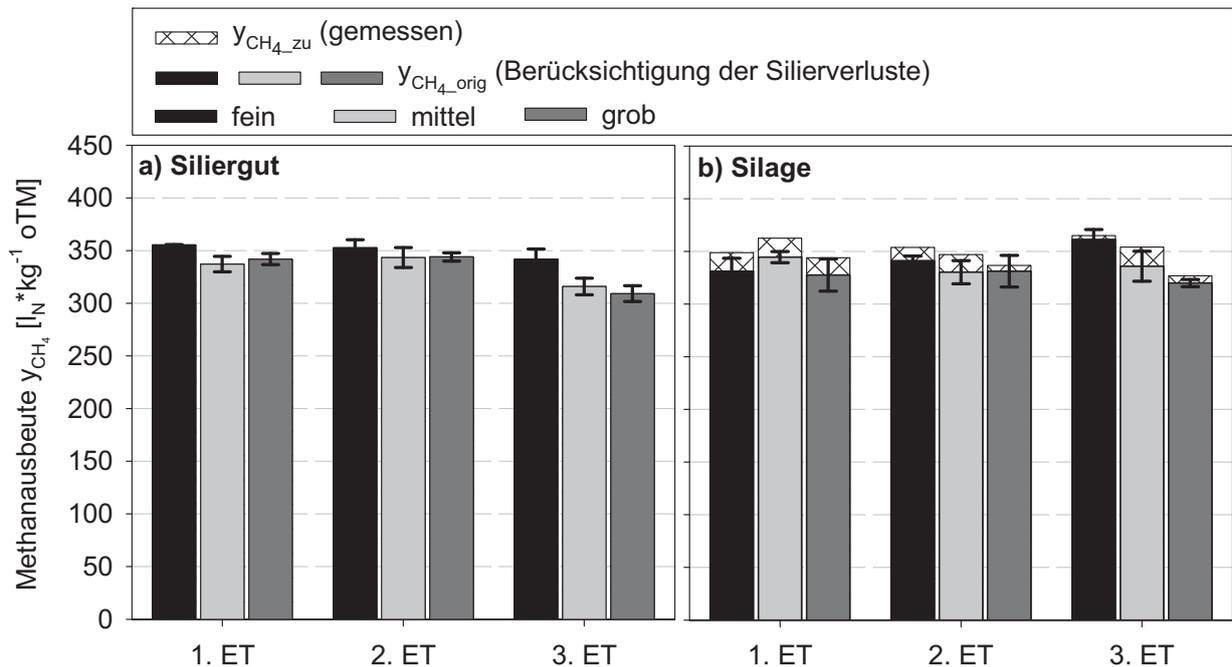
ET ... Erntetermin

Abb. 17: Methanausbeuten von a) Siliergut und b) Silage der Maissorte Oldham unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; n = 3



ET ... Erntetermin

Abb. 18: Methanausbeuten von a) Siliergut und b) Silage der Maissorte LG3237 unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; n = 3



ET ... Erntetermin

Abb. 19: Methanausbeuten von a) Siliergut und b) Silage der Maissorte Benicia unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; n = 3

Eine kürzere Häcksellänge wirkte sich bei den drei untersuchten Maissorten positiv auf die Methanausbeute aus. Bei dem Siliergut der Sorte Oldham wurden um 10 bis 13 % höhere Methanausbeuten mit Bezugsbasis oTM bei feiner Häcksellänge ermittelt im Vergleich zu den grob gehäckselten Varianten. Bei der Sorte LG3237 lag dieser

Unterschied bei 7 bis 13 % und bei der Sorte Benicia bei 3 bis 11 %. Generell waren die größten Unterschiede in den Methanausbeuten zwischen den Häcksellängenvarianten zum spätesten Erntetermin zu verzeichnen. Bei den Silagen waren die Unterschiede in den Methanausbeuten etwas geringer. Dennoch wurden auch bei den Silagen mit Beachtung der Silierverluste bei der frühen Sorte zu den drei Ernteterminen, bei der mittelfrühen und mittelspäten Sorte zum 2. bzw. 3. Erntetermin eine signifikant höhere Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ bei feiner Häcksellänge gegenüber der groben Häcksellänge nachgewiesen (Tab. A29, A31 und A33).

Bei Vergleich der frischen und silierten Maisproben wurde durch die Silierung fast ausschließlich eine Zunahme der Methanausbeute mit Bezug auf die dem Gärtest zugeführte organische Trockenmasse ermittelt (Tab. A29, A31 und A33). Dabei lagen die Methanausbeuten der Silagen der Sorte Oldham im Mittel um 6 %, der Sorte LG3237 im Mittel um 7 % und der Sorte Benicia im Mittel um 3 % über den Methanausbeuten des dazugehörigen Siliergutes. Die Unterschiede waren vorwiegend zum 3. Erntetermin und bei der groben bzw. mittleren Häcksellänge statistisch signifikant (Tab. A29, A31 und A33). Dieser Effekt war jedoch nur zu finden, wenn die bei der Silierung aufgetretenen Fermentationsverluste in die Berechnung der Methanausbeute nicht mit einbezogen wurden. Mit Bezug auf die oTM des Ausgangsmaterials, d.h. bei Beachtung der Silierverluste, wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ des Siliergutes und der entsprechenden Silagen ermittelt (Tab. A29, A31 und A33).

Methangehalte

Der gemessene mittlere Methangehalt im Biogas lag bei den im Versuchsschwerpunkt I untersuchten Maisvarianten zwischen 53 und 58 Vol-% (Tab. A29, A31 und A33). Der Methangehalt wurde durch den Erntetermin sowie durch die Silierung beeinflusst. Bei der Sorte LG3237 wurden die höchsten Methangehalte zum 2. Erntetermin, bei der Sorte Benicia zum 3. Erntetermin gemessen. Entsprechend wurde kein einheitlicher Trend beim Einfluss des Erntetermins auf den Methangehalt gefunden. Im Mittel wiesen die Silagen einen um 0,6 bis 0,7 Vol-% höheren Methangehalt als die Siliergutproben auf. Die Unterschiede im Methangehalt zwischen Siliergut und Silage waren jedoch überwiegend nicht signifikant (Tab. A29, A31 und A33).

Geschwindigkeiten der Methanbildung

Die Geschwindigkeit der Methanbildung wurde bei den im Versuchsschwerpunkt I untersuchten Maisvarianten von dem Erntetermin, der Häcksellänge und der Konservierung beeinflusst (Tab. A29, A31 und A33).

Mit späterem Erntetermin wurden bei den Siliergütern der drei Maissorten geringere Geschwindigkeitskonstanten und damit eine langsamere Methanbildung ermittelt. Ebenso nahmen die maximalen Methanraten $r_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ der Siliergüter mit späterem Erntetermin um bis zu $34 \text{ l} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM} \cdot \text{d}^{-1}$ ab. Allerdings stieg mit späterem Erntezeitpunkt durch höhere TM-Gehalte des Substrates auch das Verhältnis $\text{oTM}_{\text{Substrat}}$ zu $\text{oTM}_{\text{Inoculum}}$ a_i im Batch-Gärttest von 0,3 auf 0,5 an. Bei den Silagen war der Einfluss des Erntetermins auf die Geschwindigkeit der Methanbildung weniger deutlich.

Mit kürzerer Häcksellänge wurden bei dem Siliergut der Sorte Oldham grundsätzlich höhere Geschwindigkeitskonstanten, bei dem Siliergut der Sorten LG3237 und Benicia zum 2. und 3. Erntetermin höhere Geschwindigkeitskonstanten ermittelt (Tab. A29, A31 und A33). Bei den Silagen war dieser Trend nur teilweise zu finden. Dabei waren die Unterschiede der Geschwindigkeitskonstanten zwischen den Häcksellängenvarianten geringer als bei dem Siliergut. Auffällig waren die sehr niedrigen Geschwindigkeitskonstanten der fein gehäckselten Silagen der Sorte Oldham zum 3. Erntetermin. Die maximalen Methanraten $r_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ wurden ebenso wie die Geschwindigkeitskonstanten von der Häcksellänge beeinflusst. Bei dem Siliergut nahmen die maximalen Methanraten im Mittel um $22 \text{ l} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM} \cdot \text{d}^{-1}$ bei der feinen Häcksellänge verglichen mit der groben Häcksellänge zu (Tab. A30, A32, A34).

Bei den drei untersuchten Maissorten nahm die Geschwindigkeit der Methanbildung durch die Silierung fast ausschließlich zu. Die Unterschiede in der Geschwindigkeitskonstante zwischen frischem und siliertem Mais waren insbesondere bei der groben Häcksellänge signifikant (Sorte Oldham, Tab. A29; Sorte Benicia, Tab. A33). Die maximalen Methanraten $r_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ lagen bei den Silagen im Mittel um 10 bis $12 \text{ l} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM} \cdot \text{d}^{-1}$ über den maximalen Methanraten des Siliergutes (Tab. A30, A32, A34). Auch hier waren die Differenzen bei der groben Häcksellänge am größten.

Methanbildungspotenziale

Die durch Anpassung der HILL-Funktion an den gemessenen Kurvenverlauf ermittelten Methanbildungspotenziale $y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ wichen mit 309 bis $400 \text{ l}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ im Versuchsschwerpunkt I nur geringfügig von den gemessenen Methanausbeuten von 297 bis $388 \text{ l}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ nach 30 Tagen im Batch-Gärttest ab (Tab. A30, A32, A34). Nur bei einer Variante wurde ein deutlich höheres Methanbildungspotenzial im Vergleich zu der gemessenen Methanausbeute im Batch-Gärttest berechnet (Silage der Sorte Benicia, 2. Erntetermin, grobe Häcksellänge). Auch nach theoretisch unendlich langer Zeit blieben die Unterschiede in der Methanausbeute zwischen den Häcksellängenvarianten erhalten. Die mittleren Unterschiede in der Methanausbeute zwischen der groben und der feinen Häcksellänge lagen nach 30 Tagen im Batch-Gärttest bei 12 und 8 %, 10 und 9 % sowie 4 und 4 % (jeweils Siliergut und Silage der Sorte Oldham, LG3237 sowie Benicia). Die

Methanbildungspotenziale $y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ dieser Varianten zeigten mit 12 und 8 %, 9 und 10 % sowie 4 und 6 % (jeweils Siliergut und Silage der Sorte Oldham, LG3237 sowie Benicia) nahezu die gleichen Differenzen.

4.3.1.5 Zusammenfassung

Vom Entwicklungsstadium der Milchreife bis zur physiologischen Reife des geprüften Maises nahm mit späterem Erntetermin der prozentuale Anteil der Faserbestandteile in der Ganzpflanze ab. Der Erntezeitpunkt im Bereich dieser Entwicklungsstadien hatte nur einen geringen Einfluss auf die Methanausbeute mit Bezug auf die oTM. Durch den TM-Zuwachs ist jedoch von einer deutlichen Zunahme des Methanhektarertrages mit späterem Erntetermin auszugehen. Mit späterem Erntetermin wurde zudem eine Verringerung der Geschwindigkeit der Methanbildung bei den durchgeführten Versuchen ermittelt.

Über die gemessenen Feinheitsmerkmale konnte die Abnahme der Partikelgröße und die Zunahme des Feinanteils mit stärkerer Zerkleinerung nachgewiesen und quantifiziert werden. Mit geringerer Partikelgröße stiegen die Methanausbeuten und Geschwindigkeitskonstanten bei der Methanbildung. Dabei wurde der Einfluss der Häcksellänge vor allem bei spätem Erntetermin und früher Maissorte deutlich. Die Unterschiede in der Methanausbeute verursacht durch die Variation der Häcksellänge blieben auch nach theoretisch unendlich langer Zeit im Gärtest (Kurvenanpassung nach HILL) erhalten.

Die Silierung hatte vorrangig einen positiven Einfluss auf die Geschwindigkeit der Methanbildung. Der konservierte Mais wies zudem erhöhte Methanausbeuten mit Bezug auf die zugeführte oTM auf. Bei Beachtung der bei der Silierung aufgetretenen Verluste waren jedoch keine signifikanten Unterschiede in der Methanausbeute zwischen Siliergut und Silage gegeben.

4.3.2 Versuchsschwerpunkt II – Häcksellängenvergleich bei drei Pflanzenarten

4.3.2.1 Physikalische Struktur

Zur Beschreibung der physikalischen Struktur von Grünschnittroggen-, Sudangras- und Triticaleproben, deren Zerkleinerungsgrad mit Hilfe eines Laborhäckslers im Bereich 4 bis 16 mm variiert wurde, sind als Ergebnis bildanalytischer Vermessungen Daten zu Partikellänge, Partikelbreite und projizierter Oberfläche dargestellt (**Abb. 20**; Tab. A12 – A14).

Ebenso wie in Versuchsschwerpunkt I zeigte sich auch in Versuchsschwerpunkt II die geringe Eignung der Verteilung der Anzahl der Partikel über der Partikellänge als Merkmal für die Bewertung des Zerkleinerungserfolges. Die nach optischer Einschätzung steigende Länge der Partikel mit Zunahme der theoretischen Häcksellänge (fotografische Darstellungen Abb. A10 – A12) findet sich nicht in den nach der Partikelzahl ausgewerteten mittleren Partikellängen wieder (Tab. A12– A14).

Die flächengewichtete Auswertung zeigt hingegen bei allen drei Pflanzenarten einen deutlichen Zusammenhang zwischen den gemessenen Feinheitsmerkmalen und den theoretischen Häckselvarianten. Der **Grünschnittroggen** wurde mit theoretischen Häcksellängen von 4 mm, 8 mm, 12 mm und 16 mm geprüft. Bei der Einstellung 4 mm wurde bei Grünschnittroggen 50 % der gemessenen projizierten Oberfläche der Proben von Partikeln mit einer Länge $\leq 6,6$ mm abgebildet. Bei Einstellung 8 mm lag dieser Wert um 106 %, bei 12 mm um 194 % und bei 16 mm um 223 % höher (**Abb. 20**; Tab. A12). Die Verteilung der Oberfläche über der Länge der 4 mm-Variante hebt sich durch einen geringeren Interquartilabstand von 7,5 mm verglichen mit 12,3 bis 15,5 mm und damit durch größere Gleichmäßigkeit der gehäckselten Partikel von den übrigen Varianten ab. Der Feinanteil lag mit 21,9 % ebenfalls deutlich über und der Grobanteil mit 5,6 % deutlich unter dem der übrigen Varianten. Entsprechend wurde eine geringe mittlere projizierte Oberfläche von $9,9 \text{ mm}^2$ gemessen, die sich bei Zunahme der theoretischen Häcksellänge von 4 auf 16 mm um das sechsfache bis auf $62,7 \text{ mm}^2$ erhöhte. Ursache für die bei allen Grünschnittroggen-Varianten niedrigen mittleren Partikelbreiten von 2,3 bis 3,4 mm sind die verhältnismäßig dünnen Halme des Roggens, wodurch auch bei größeren Häcksellängeneinstellungen keine wesentliche Zunahme der Partikelbreite zu verzeichnen war. Ein ähnlicher Effekt wurde auch bei Triticale gemessen (Tab. A14). Durch die geringe Änderung der Partikelbreite und die deutliche Änderung der Partikellänge nahm das arithmetische Mittel des Verhältnisses von Länge zu Breite von 5,2 bei 4 mm auf 12,6 bei 16 mm theoretischer Häcksellänge zu.

Die Untersuchung des **Sudangrases** erfolgte an mit fünf verschiedenen Häckseleinstellungen zerkleinertem Material. Dabei wurden von Einstellung 4 mm bis 16 mm steigende mittlere Partikellängen von 7,6 auf 26,4 mm mit deutlichen Unterschieden

zwischen den Varianten 4, 6, 12 und 16 mm ermittelt. Zwischen den Varianten 6 und 8 mm wurden hingegen nur sehr geringere Unterschiede hinsichtlich der mittleren Partikellänge und -breite und der spezifischen projizierten Oberfläche gemessen (**Abb. 20**). Das Häckseln der 6 mm-Variante erfolgte etwas gleichmäßiger als das der 8 mm-Variante, wie anhand des geringeren Grob- und Feinanteils und des kleineren Interquartilabstandes der Verteilung der projizierten Oberfläche über der Partikellänge erkennbar ist (Tab. A13). Im Gegensatz zu den Varianten des Grünschnittroggens nahm mit gröberer Längeneinstellung die mittlere Partikelbreite bei Sudangras merklich um bis zu 97 % (rel.) zu. Dies führte zu geringeren Änderungen im Längen-Breitenverhältnis bei Erhöhung der theoretischen Häcksellänge verglichen mit Grünschnittroggen. Ebenso war damit eine stärkere Zunahme der mittleren projizierten Oberfläche von 15,3 mm² um fast das zehnfache auf 149,3 mm² verbunden. Eine ähnliche Tendenz wurde auch bei Mais im Versuchsschwerpunkt I ermittelt. Die Analyse der spezifischen projizierten Oberfläche ergab um 18 bis 45 % (rel.) geringere Werte als bei Grünschnittroggen mit vergleichbarer Längeneinstellung.

Bei der Zerkleinerung von **Triticale** mit den Einstellungen 6 mm, 8 mm, 12 mm und 16 mm des Laborhäckslers wurden mittlere Partikellängen von jeweils 13,3 mm, 15,3 mm, 25,3 mm und 33,1 mm analysiert (**Abb. 20**; Tab. A14). Alle Varianten wiesen einen geringen Feinanteil von weniger als 2,5 % auf, während der Grobanteil mit steigender theoretischer Häcksellänge um bis zu 52 % (abs.) zunahm. Die Flächenverteilungen über der Partikellänge der Triticaleproben waren bei allen Varianten durch höhere Interquartilabstände gekennzeichnet als bei den übrigen untersuchten Pflanzenarten. Die mittleren Partikelbreiten lagen mit 3,1 bis 3,7 mm ähnlich niedrig wie die des Grünschnittroggens und änderten sich mit zunehmender theoretischer Häcksellänge nur geringfügig. Entsprechend hoch war das arithmetische Mittel des Verhältnisses von Länge zu Breite (Tab. A14). Die mittlere projizierte Oberfläche variierte mit 29 bis 127 mm² zwischen kleinster und größter Längeneinstellung um 77 % (rel. vom Maximum). Verglichen mit den anderen untersuchten Pflanzenarten wurden bei den Triticaleproben bei gleichen Längeneinstellungen die höchsten mittleren Partikellängen und die geringsten spezifischen projizierten Oberflächen gemessen.

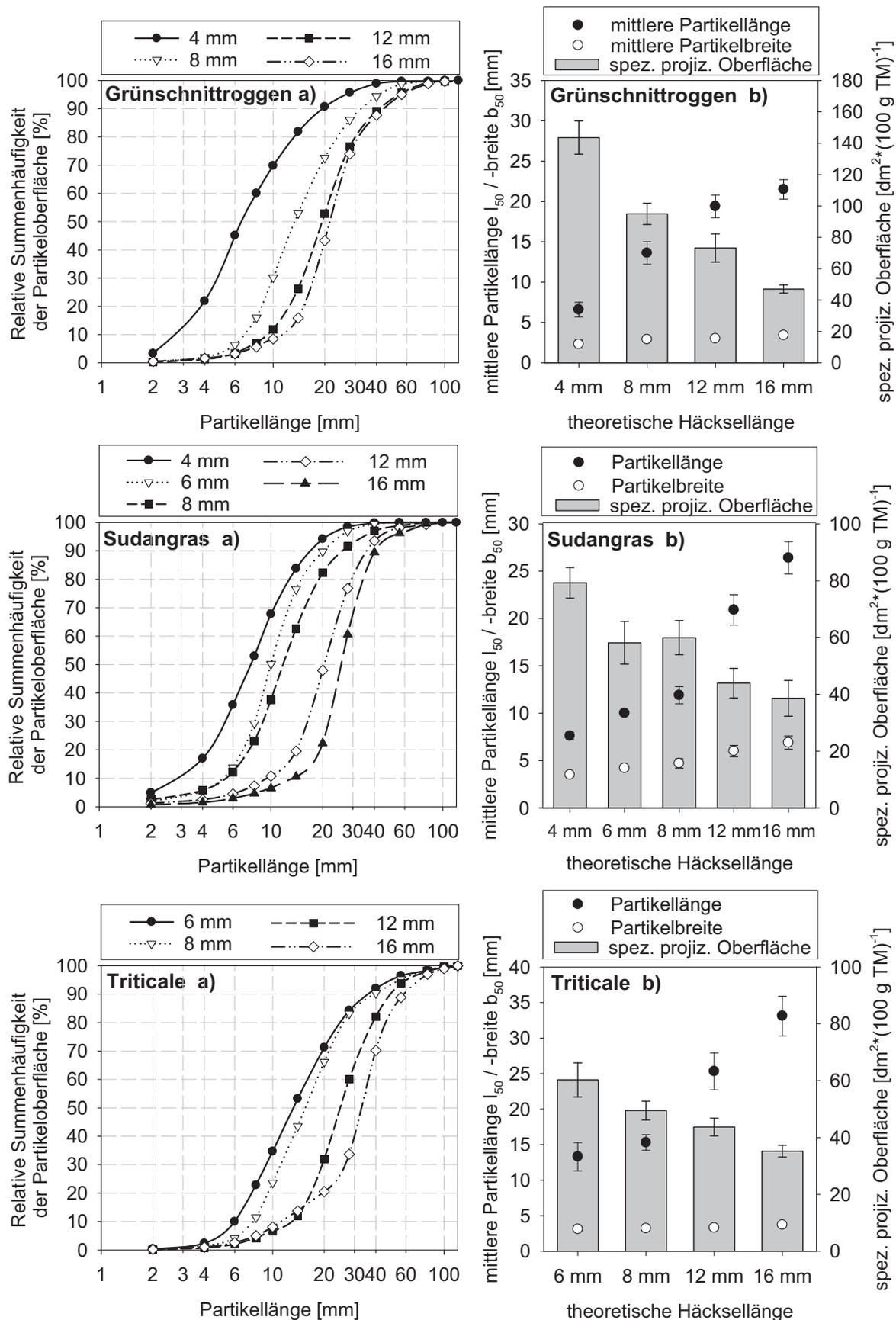


Abb. 20: a) Summenverteilung der projizierten Oberfläche über die Länge der Partikel sowie b) mittlere Partikellänge, -breite und spezifische projizierte Oberfläche ($\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen) bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Laborhäcksler) von Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale

4.3.2.2 Chemische Charakterisierung

Die Ergebnisse der chemischen Analyse des Siliergutes und der Silagen von Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale bei Variation der theoretischen Häcksellänge im Labor sind im Folgenden erläutert. Die Datensätze hierzu sind in den Tabellen A22 bis A24 des Anhangs aufgeführt.

Das Siliergut des Grünschnittroggens wies einen für die Silierung niedrigen TM-Gehalt von 24,1 % auf (Tab. A22). Durch die Silierung verringerte sich der TM-Gehalt um 0,6 bis 1,9 % (abs.). Der TM-Gehalt des Sudangrases variierte zur Ernte zwischen 28,5 und 30,6 % (Tab. A23) und lag damit im für die Silierung optimalen Bereich. Nach der Silierung wurde ein um 0,9 bis 3,1 % (abs.) niedrigerer TM-Gehalt gemessen. Die Analyse des Siliergutes der Fruchtart Triticale ergab gleichmäßig hohe TM-Gehalte von im Mittel 36,5 % (Tab. A24). Die Silierung hatte eine Abnahme dieser TM-Gehalte um 2,6 bis 3,9 % (abs.) zur Folge.

Bei dem Siliergut des Grünschnittroggens wurde ein hoher Anteil Rohfaser von 40 % TM analysiert (**Abb. 21**). Die Rohfasergehalte von Sudangras und Triticale lagen mit im Mittel 27 bis 29 % TM etwas niedriger. Das Siliergut der drei Pflanzenarten wies generell einen geringen Rohfettgehalt von im Mittel 1,5 bis 1,9 % TM auf. Die mittleren Gehalte an Rohprotein reichten von 4,6 % TM bei Sudangras bis zu 9,6 % TM bei Triticale (**Abb. 21**).

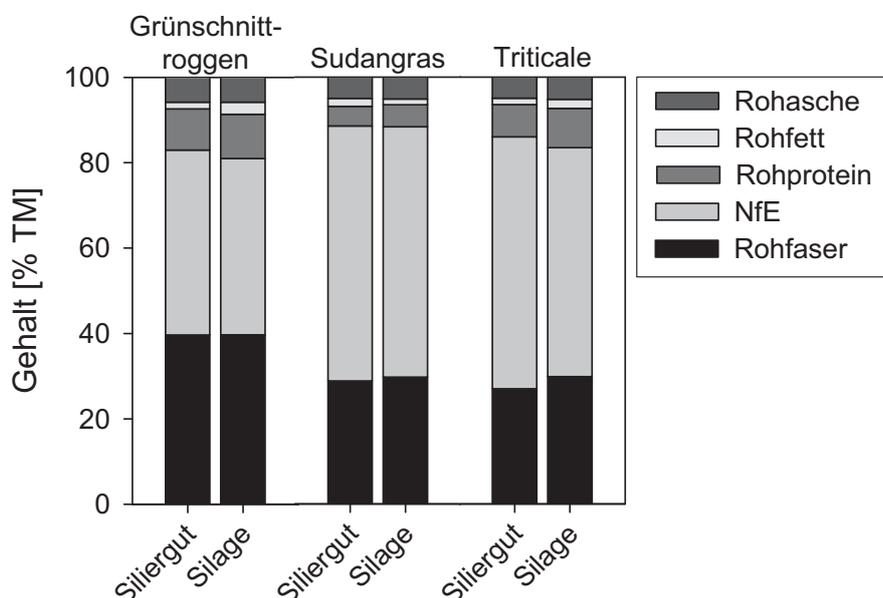


Abb. 21: Mittlere Rohnährstoffgehalte des Siliergutes und der Silagen von Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale in Versuchsschwerpunkt II

Durch Verluste bei der Silierung wurde bei den drei geprüften Pflanzenarten eine relative Zunahme der Gehalte an nicht für die Fermentation genutzten Inhaltsstoffen gemessen. Entsprechend nahm der Rohproteingehalt um 0,1 bis 2,0 % TM und der Rohfettgehalt um 0 bis 1,9 % TM relativ zum Siliergut leicht zu. Bei Sudangras und Triticale erhöhte

sich der Gehalt an Rohfaser in den Silagen verglichen mit dem Siliergut. Bei Grünschnittroggen änderte sich hingegen der Rohfasergehalt durch die Silierung nicht eindeutig.

Mit der Silierung war weiterhin eine deutliche Abnahme des Zuckergehaltes von 6,5 % TM auf 1,5 bis 2,7 % TM bei Grünschnittroggen verbunden. Der Zuckergehalt des Sudangrases lag mit 22 bis 29 % TM um das zwei- bis vierfache höher als bei Grünschnittroggen und Triticale und wurde durch Fermentationsvorgänge bei der Silierung auf 7,1 bis 8,1 % TM um 64 bis 73 % (rel.) reduziert. Bei Triticale waren hingegen hohe Zuckergehalte in den Silagen auffällig, die die Zuckergehalte des Siliergutes um 0,7 bis 2,6 % TM überstiegen.

Der Vergleich der chemischen Zusammensetzung von Siliergut und Silage macht auch Änderungen bei den Gerüstsubstanzen deutlich (**Abb. 22**). Bei Grünschnittroggen wurden in den Silagen im Mittel 4,3 % TM geringere Gehalte an Hemicellulose und 1,8 % TM geringere Gehalte an Cellulose analysiert. Die Differenzen im Gehalt an Hemicellulose zwischen Siliergut und Silagen bei Sudangras betragen im Mittel 8,9 % TM mit einheitlich niedrigeren Werten der Silagen. Die Triticalesilagen wiesen im Mittel um 2,3 % TM niedrigere Hemicellulosegehalte auf verglichen mit dem Siliergut. Eine eindeutige relative Abnahme des Cellulosegehaltes war bei Sudangras und Triticale nicht gegeben.

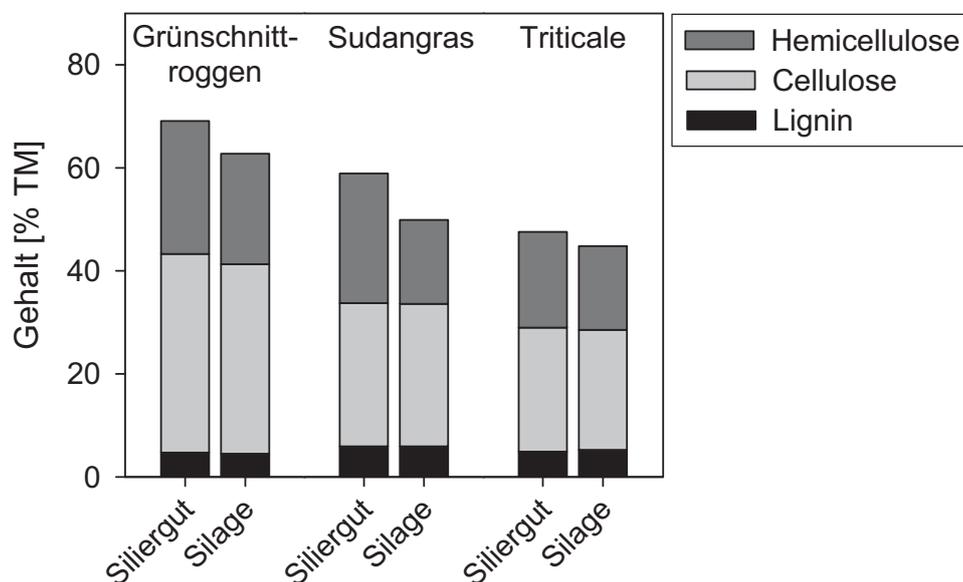


Abb. 22: Mittlere Anteile der Gerüstsubstanzen des Siliergutes und der Silagen von Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale in Versuchsschwerpunkt II

Zwischen den Häcksellängenvarianten der drei geprüften Pflanzenarten konnten keine klaren Trends hinsichtlich Zu- bzw. Abnahme der Inhaltsstoffe quantifiziert werden (Tab. A22-A24).

4.3.2.3 Silierverluste und Gärqualität der Silagen

In **Tab. 15** bis **Tab. 17** sind TM-Verluste, wesentliche Parameter und Summenparameter der Gärqualität sowie die Bewertung nach DLG-Schlüssel für Grünschnittroggen-, Sudangras- und Triticalesilagen mit unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen aufgeführt.

Die TM-Verluste bei der Silierung des **Grünschnittroggens** lagen mit 1,1 bis 1,9 % bei den Häcksellängenvarianten 4 bis 12 mm verhältnismäßig niedrig (**Tab. 15**). Mit zunehmender Häcksellänge wurde ein Anstieg der TM-Verluste analysiert, wobei die 16 mm Variante mit einem mittleren TM-Verlust von 6,0 % deutlich schlechter abschnitt als die kürzer gehäckselten Varianten.

Tab. 15: TM-Verlust und Gärqualität von Grünschnittroggensilagen (Laborsilo) unterschiedlicher theoretischer Häcksellängen; n=3

| Häcksellänge | TM-Verlust | pH-Wert | Milchsäure | Essigsäure ¹⁾ | Buttersäure ²⁾ | einw. Alkohole ³⁾ | DLG-Punkte ⁴⁾ | DLG-Note ⁴⁾ |
|--------------|------------|---------|------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------|
| | [%] | [-] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [-] | [-] |
| 4 mm | 1,1 | 4,0 | 8,7 | 1,1 | 0,1 | 0,3 | 100 | sehr gut |
| 8 mm | 1,9 | 4,0 | 5,8 | 1,1 | n.n | 0,3 | 95 | sehr gut |
| 12 mm | 1,9 | 4,1 | 7,4 | 1,2 | n.n | 0,4 | 95 | sehr gut |
| 16 mm | 6,0 | 4,0 | 4,2 | 1,0 | n.n | 0,4 | 98 | sehr gut |

¹⁾Summe aus Essig- und Propionsäure; ²⁾Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; ³⁾Summe aus Ethanol und Propanol; ⁴⁾DLG-Schlüssel 2006; einw. ... einwertig; n.n. ... nicht nachweisbar

Die untersuchten Grünschnittroggensilagen wiesen nach DLG-Bewertungsschlüssel „sehr gute“ Gärqualitäten auf (**Tab. 15**). Fehlgärungen wurden trotz geringem TM-Gehalt im Ausgangsmaterial in den Laborsilos nicht beobachtet. Der pH-Wert lag mit 4,0 bis 4,1 ausreichend niedrig. Für die Absenkung des pH-Wertes wurden insbesondere bei der kurzen Häcksellängenvariante hohe Anteile an Milchsäure gebildet. Mit zunehmender Häcksellänge nahmen die Milchsäuregehalte in den Silagen tendenziell ab. Buttersäure wurde lediglich bei der 4 mm Variante in sehr geringer Konzentration nachgewiesen. Die Essigsäuregehalte und Gehalte an Ethanol lagen im unteren Bereich, wobei kein Einfluss der Häcksellänge sichtbar war.

Ähnliche Tendenzen wurden auch bei **Sudangrassilagen** mit unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen beobachtet (**Tab. 16**). TM-Verluste lagen mit 4,0 bis 11,3 % höher als bei den Grünschnittroggensilagen und nahmen ebenfalls mit steigender Häcksellänge deutlich zu. Die höchsten Milchsäuregehalte mit durchschnittlich 5,0 % TM wiesen die Silagen mit 4 mm Häcksellänge auf. Mit zunehmender Häcksellänge wurden geringere Milchsäuregehalte in den Silagen sowie leicht steigende pH-Werte und Ethanolgehalte analysiert. Die Unterschiede im Essigsäuregehalt waren gering und zeigten keinen gerichteten Einfluss der Häcksellänge.

Tab. 16: TM-Verlust und Gärqualität von Sudangrassilagen (Laborsilo) unterschiedlicher theoretischer Häcksellängen; n=3

| Häcksellänge | TM-Verlust | pH-Wert | Milchsäure | Essigsäure ¹⁾ | Buttersäure ²⁾ | einw. Alkohole ³⁾ | DLG-Punkte ⁴⁾ | DLG-Note ⁴⁾ |
|--------------|------------|---------|------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------|
| | [%] | [-] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [-] | [-] |
| 4 mm | 4,0 | 3,8 | 5,0 | 1,2 | 0,5 | 0,8 | 85 | gut |
| 6 mm | 6,3 | 4,0 | 3,9 | 1,1 | 0,1 | 1,1 | 98 ⁵⁾ | sehr gut |
| 8 mm | 8,6 | 4,0 | 3,8 | 0,8 | 0,3 | 1,1 | 89 ⁵⁾ | sehr gut |
| 12 mm | 8,6 | 4,0 | 3,9 | 1,1 | 0,4 | 1,3 | 91 ⁶⁾ | sehr gut |
| 16 mm | 11,3 | 4,1 | 3,6 | 1,1 | 0,4 | 1,3 | 85 ⁶⁾ | gut |

¹⁾Summe aus Essig- und Propionsäure; ²⁾Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; ³⁾Summe aus Ethanol und Propanol; ⁴⁾DLG-Schlüssel 2006; ⁵⁾veränderte Farbe und Geruch der Silage; ⁶⁾oberflächliche Schimmelbildung; einw. ... einwertig

In den Sudangrassilagen wurden relativ geringe Buttersäuregehalte von 0,1 bis 0,5 % nachgewiesen. Nach DLG-Schlüssel wurden die Silagen im Mittel mit „gut“ bis „sehr gut“ bewertet. Zwischen den Wiederholungen der gleichen Häcksellängen-Varianten waren jedoch zum Teil deutliche Unterschiede in der Gärqualität vorhanden. Bei den Sudangrassilagen mit 4 mm und 6 mm Häcksellänge wurden zum Teil veränderter Geruch und eine dunkle Färbung beobachtet, während bei den 8 mm- und 12 mm-Silagen zum Teil oberflächlich Schimmelbildung auftrat (**Tab. 16**).

Die **Triticalesilagen** im Versuchsschwerpunkt II wiesen deutliche Fehlgärungen auf. Verhältnismäßig geringe Milchsäuregehalte von 1,6 bis 2,3 % TM, Buttersäuregehalte in dieser Größenordnung sowie unzureichend abgesunkene pH-Werte von 4,8 bis 5,0 führten zu einer „schlechten“ bis „sehr schlechten“ Beurteilung der Gärqualität bei den Varianten 8 bis 16 mm (**Tab. 17**). Entsprechend hoch waren die TM-Verluste mit 10,2 bis 13,3 %. Nur bei der Variante mit der kürzesten Häcksellänge wurden etwas niedrigere pH-Werte und Buttersäuregehalte sowie leicht höhere Milchsäuregehalte analysiert. Dies wurde nach DLG-Schlüssel mit „guter“ Gärqualität bewertet. Der mittlere TM-Verlust lag hier bei 8,8 %.

Tab. 17: TM-Verlust und Gärqualität von Triticalesilagen (Laborsilo) unterschiedlicher theoretischer Häcksellängen; n=3

| Häcksellänge | TM-Verlust | pH-Wert | Milchsäure | Essigsäure ¹⁾ | Buttersäure ²⁾ | einw. Alkohole ³⁾ | DLG-Punkte ⁴⁾ | DLG-Note ⁴⁾ |
|--------------|------------|---------|------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------|
| | [%] | [-] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [-] | [-] |
| 6 mm | 8,8 | 4,4 | 3,6 | 0,5 | 0,6 | 2,0 | 82 ⁵⁾ | gut |
| 8 mm | 13,3 | 4,8 | 2,3 | 0,6 | 2,1 | 1,8 | 29 ⁵⁾ | sehr schlecht |
| 12 mm | 12,3 | 5,0 | 1,6 | 0,3 | 1,9 | 1,4 | 36 ⁵⁾ | schlecht |
| 16 mm | 10,2 | 4,9 | 2,0 | 0,2 | 1,5 | 1,4 | 42 ⁵⁾ | schlecht |

¹⁾Summe aus Essig- und Propionsäure; ²⁾Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; ³⁾Summe aus Ethanol und Propanol; ⁴⁾DLG-Schlüssel 2006; ⁵⁾oberflächliche Schimmelbildung; einw. ... einwertig

4.3.2.4 Methanbildung

Die zeitlichen Verläufe der Methanbildung von Siliergut und Silagen der Pflanzenarten Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale bei Variation der theoretischen Häcksellänge im Labor sind in **Abb. 23** bis **Abb. 25** dargestellt. Die Daten zu den Methanausbeuten, Methangehalten und den Geschwindigkeiten der Methanbildung sind in den Tab. A35-A40 des Anhangs zusammengefasst.

Die Methanbildungskurven der untersuchten Proben des Versuchsschwerpunktes II zeigten ebenso wie die des Versuchsschwerpunktes I ausschließlich typische Verläufe ohne Hinweise auf eine Hemmung des Substratabbaus bzw. auf einen verzögerten Abbau.

Methanausbeuten

Die im Versuchsschwerpunkt II ermittelten Methanausbeuten wiesen bei Grünschnittroggen eine Spanne von 317 bis 377 $\text{I}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$, bei Sudangras eine Spanne von 278 bis 330 $\text{I}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ und bei Triticale eine Spanne von 302 bis 376 $\text{I}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ auf (Tab. A35, A37 und A39).

Die Methanausbeuten mit Basis oTM_{zu} des **Grünschnittroggens** wurden durch die Häcksellänge und die Silierung beeinflusst. Das Siliergut des Grünschnittroggens wies nach 30 Tagen im Batch-Gärtest mit Abnahme der theoretischen Häcksellänge eine steigende Methanausbeute auf (**Abb. 23a**). Die Differenz der Methanausbeute zwischen kürzester und längster Häcksellänge war signifikant und lag bei 11 %. Im Gegensatz dazu zeigte der mit unterschiedlicher Häcksellänge silierte Grünschnittroggen keine signifikanten Unterschiede in der Methanausbeute auf der Basis von oTM_{zu} (**Abb. 23b**, Tab. A35). Mit Bezug auf oTM_{orig} , also unter Beachtung der Silierverluste, war jedoch auch bei den Silagen ein signifikanter Einfluss der Häcksellänge festzustellen (Tab. A35). Die größte Spanne von 7 % war zwischen der Methanausbeute der 4 mm-Variante und der Methanausbeute der 16 mm-Variante gegeben.

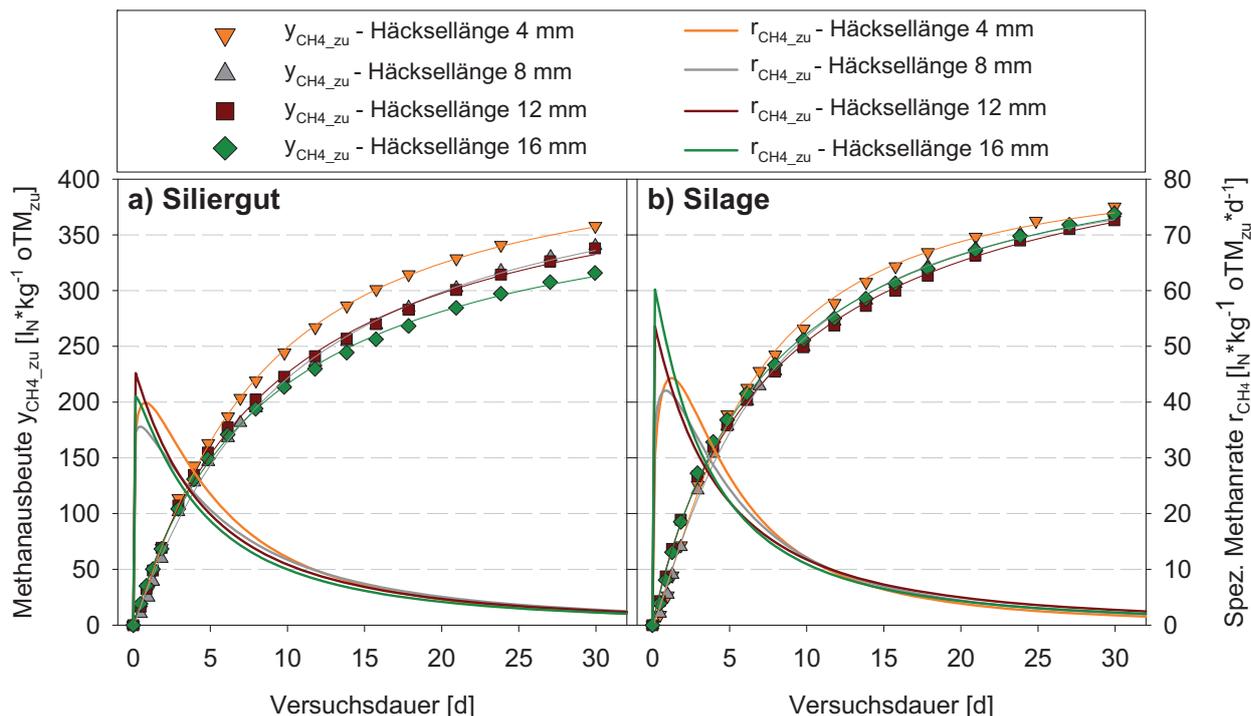


Abb. 23: Summe der Methanausbeute sowie spezifische Methanrate von a) Siliergut und b) Silagen des Grünschnittroggens bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (dargestellt ist jeweils die mittlere Wiederholung einer Variante)

Die Methanausbeuten des **Sudangrases** lagen unter denen des Grünschnittroggens. Dennoch wurden sehr ähnliche Tendenzen zu Einfluss von Häcksellänge und Silierung ermittelt. Die Methanausbeuten des Siliergutes bezogen auf oTM_{zu} nahmen ebenfalls mit abnehmender theoretischer Häcksellänge zu (**Abb. 24a**). Ausnahme waren die Längen 6 mm und 8 mm, die sich entsprechend ihrer geringen Differenz bei der Partikel-längenverteilung (Abschnitt 4.3.2.1) auch in der Methanausbeute kaum voneinander unterschieden. Die Differenz der Methanausbeute zwischen der größten Häcksellänge von 16 mm und der kleinsten Häcksellänge von 4 mm lag ebenso wie bei dem Grünschnittroggen bei 11 % und ist statistisch gesichert (Tab. A37). Bei den Silagen war dieser Trend weniger ausgeprägt. Hier wiesen die Häcksellängenvarianten 12 mm und 16 mm signifikant niedrigere Methanausbeuten auf als die Varianten 4 bis 8 mm (Tab. A37). Zwischen den Varianten 4, 6 und 8 mm sowie den Varianten 12 und 16 mm wurden keine Unterschiede in der Methanausbeute bezogen auf oTM_{zu} analysiert.

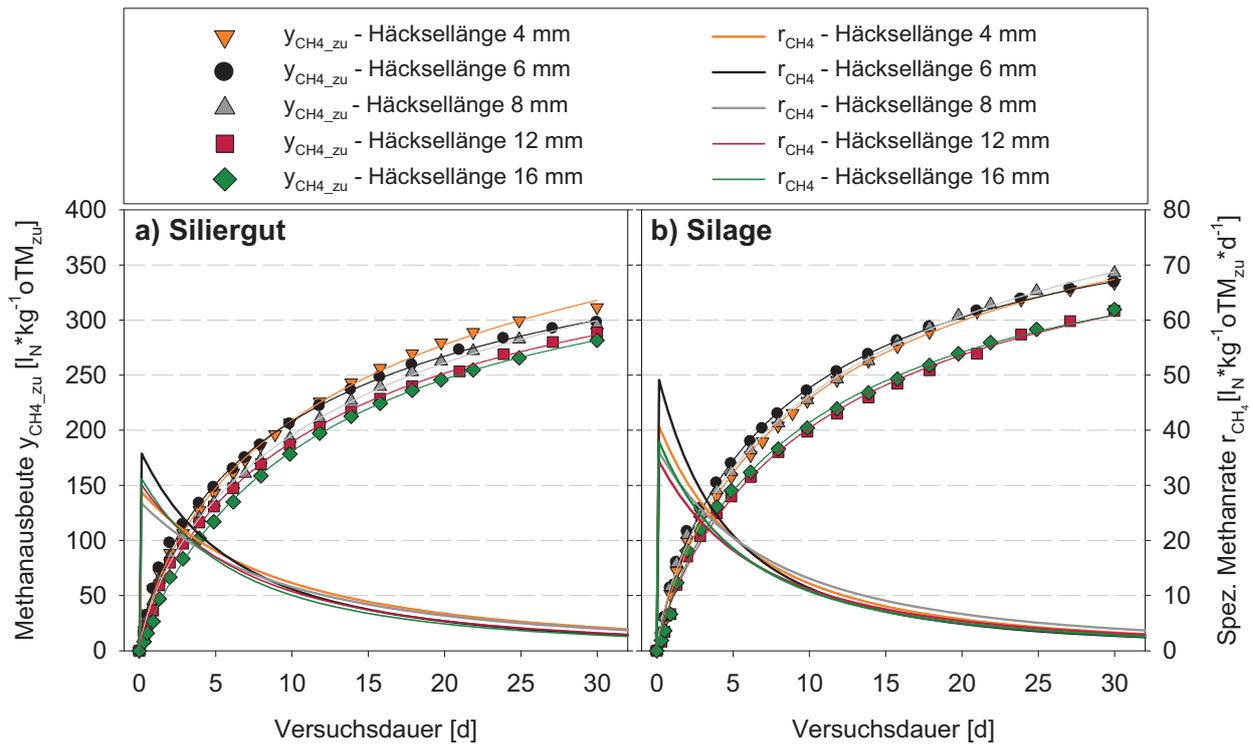


Abb. 24: Summe der Methanausbeute sowie spezifische Methanrate von a) Siliergut und b) Silagen des Sudangrases bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (dargestellt ist jeweils die mittlere Wiederholung einer Variante)

Werden Silierverluste, die bei den Sudangrasproben mit steigender Häcksellänge leicht zunehmen (Abschnitt 4.3.2.3), bei der Methanausbeute berücksichtigt, so ist auch bei den Silagen in der Tendenz eine geringere Methanausbeute mit steigender Häcksellänge zu verzeichnen (Tab. A37). Der Unterschied der Methanausbeute bezogen auf oTM_{orig} zwischen kürzester und längster theoretischer Häcksellänge lag mit 12 % in der gleichen Größenordnung wie der des Siliergutes.

Auch die Ergebnisse zu Methanausbeuten von **Triticale** mit Variation der Häcksellänge bestätigten im Wesentlichen die bei Grünschnittroggen und Sudangras ermittelten Trends. Bei unsiliertem Pflanzenmaterial war ein signifikanter Einfluss der Häcksellänge zu verzeichnen, wobei die kürzeste Häcksellängenvariante mit $336 I_N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu}$ um 10 % höhere Methanausbeuten aufwies als die längste Häcksellängenvariante mit $302 I_N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu}$ (**Abb. 25a**). Im Gegensatz dazu wurden keine Unterschiede in der Methanausbeute $y_{CH_4_zu}$ zwischen den Triticalesilagen mit unterschiedlichen Häcksellängen analysiert (**Abb. 25b**).

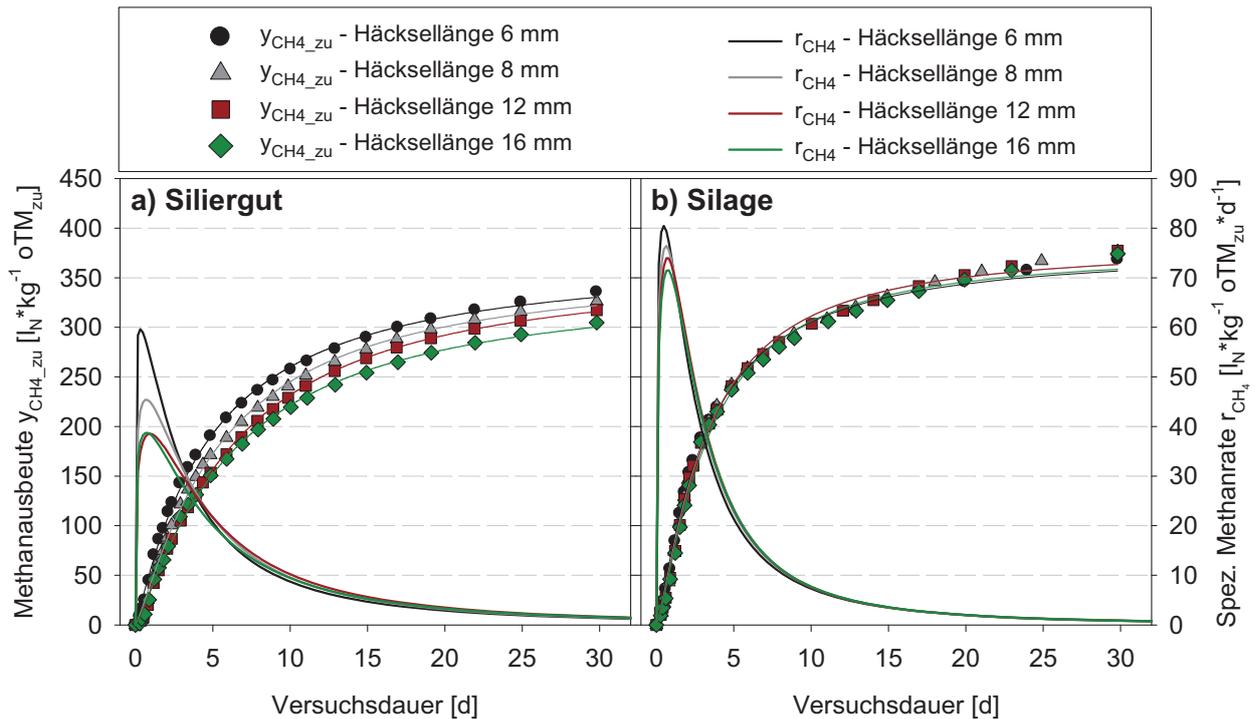


Abb. 25: Summe der Methanausbeute sowie spezifische Methanrate von a) Siliergut und b) Silagen von Triticale bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (dargestellt ist jeweils die mittlere Wiederholung einer Variante)

Anders als bei Grünschnittroggen und Sudangras ergab bei den Triticalesilagen auch die Beachtung von Silierverlusten bei der Methanausbeute (Basis oTM_{orig}) keinen signifikanten Einfluss der Häcksellänge (Tab. A39).

Der Vergleich von Siliergut und Silage ergab bei den untersuchten Pflanzenarten einen signifikanten Einfluss der Konservierung auf die Methanausbeute mit Basis oTM_{zu} (Tab. A35, A37 und A39). Die Silagen wiesen verglichen mit dem Siliergut um 5 bis 14 % höhere Methanausbeuten bei Grünschnittroggen, 6 bis 12 % höhere Methanausbeuten bei Sudangras und 9 bis 19 % höhere Methanausbeuten bei Triticale bezogen auf oTM_{zu} auf (**Abb. 23** bis **Abb. 25**). Auffällig war, dass mit längerer Häcksellänge die Differenz zwischen Siliergut und Silage generell stieg. Durch Einrechnung der Silierverluste in die Methanausbeute verringerte sich der Unterschied zwischen Siliergut und Silage zum Teil wesentlich. Die Unterschiede in der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ waren bei Grünschnittroggen und Triticale jeweils nur bei den Häcksellängen 12 und 16 mm und bei Sudangras bei keiner der Häcksellängen signifikant (Tab. A35, A37 und A39).

Methangehalte

Bei Grünschnittroggen erreichten die mittleren Methangehalte im Biogas Werte zwischen 59 und 63 Vol-%, bei Sudangras Werte zwischen 56 und 58 Vol-% und bei Triticale Werte zwischen 55 und 58 Vol-% (Tab. A35, A37 und A39). Die Methangehalte der Silagen überstiegen die des Siliergutes mit Ausnahme der 11 mm-Variante des

Grünschnittroggens im Mittel um 0,2 bis 2,7 Vol-%. Der Einfluss der Konservierung auf den Methangehalt war jedoch nur bei Triticale teilweise signifikant (Tab. A39). Ein Zusammenhang zwischen Häcksellänge und Methangehalt war bei keiner der geprüften Pflanzenarten gegeben.

Geschwindigkeiten der Methanbildung

Bei Grünschnittroggen wurden Geschwindigkeitskonstanten von 0,103 bis 0,146 d⁻¹ und bei Sudangras von 0,112 bis 0,145 d⁻¹ ermittelt. Bei Triticale lagen die Geschwindigkeitskonstanten mit 0,132 bis 0,245 d⁻¹ etwas höher. Die Geschwindigkeit der Methanbildung wurde nur teilweise von der Häcksellänge, jedoch deutlich von der Konservierung beeinflusst (Tab. A35-A40).

Bei Grünschnittroggen zeigte die theoretische Häcksellänge keinen gerichteten Einfluss auf die Geschwindigkeitskonstante k . Die Geschwindigkeitskonstante des Siliergutes des Sudangrases war bei der 6 mm-Variante am höchsten und nahm mit längerer Häcksellänge tendenziell ab. Im Gegensatz dazu erfolgte die Gasbildung bei den Sudangrassilagen mit unterschiedlichen Häcksellängen sehr gleichmäßig. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen Häcksellänge und Geschwindigkeitskonstante konnte bei Triticale ebenfalls nicht nachgewiesen werden (Tab. A39)

Der deutlichste Einfluss der Silierung auf die Geschwindigkeitskonstante zeigte sich bei Triticale. Hier wiesen die Silagen um 36 bis 41 % höhere Werte als das Siliergut der entsprechenden Häcksellänge auf. Die Geschwindigkeitskonstanten des Grünschnittroggens lagen jeweils um 13 bis 18 % höher verglichen mit dem Siliergut der gleichen Häcksellänge. Bei Sudangras erhöhte die Silierung die Geschwindigkeit der Gasbildung nur bei der Häcksellänge 16 mm signifikant (Tab. A37).

Die maximalen Methanraten ließen sich nur bei Triticale vollständig auswerten. Hier wurde eine mit steigender Häcksellänge tendenziell sinkende maximale Methanrate ermittelt. Dabei wurde die maximalen Methanrate $t(r_{\text{CH}_4_{\text{max}}})$ mit steigender Häcksellänge zeitlich etwas später erreicht. Bei Vergleich von Siliergut und Silage der gleichen Häcksellänge erfolgte die maximale Methanbildung bei Silagen im zeitlichen Verlauf früher und mit einer um 39 bis 49 % höheren maximalen Methanrate (**Abb. 25**, Tab. A40).

Methanbildungspotenziale

Die Methanausbeuten nach Kurvenanpassung (HILL) ergaben $y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ -Werte, die deutlich über den Methanausbeuten nach 30 Tagen im Batch-Gärttest lagen. Insbesondere bei Grünschnittroggen und Sudangras wurden hohe maximale Methanausbeuten $y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ von 403 bis 475 l_N*kg⁻¹ oTM_{zu} bzw. 396 bis 535 l_N*kg⁻¹ oTM_{zu} errechnet. Die grundsätzlichen Aussagen bezüglich Einfluss von Häcksellänge und Silierung auf die Methanausbeute nach 30 Tagen im Batch-Gärttest treffen auch auf $y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ zu (Tab. A36, A38, A40).

4.3.2.5 Zusammenfassung

Die im Labor variierten theoretischen Häcksellängen bewirkten bei Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale einen deutlichen Unterschied in der physikalischen Struktur des Häckselgutes. Mit kürzerer theoretischer Häcksellänge waren geringere mittlere Partikellängen, -breiten und mittlere projizierte Oberflächen verbunden, wobei insbesondere bei den Partikelbreiten eine unterschiedliche Beschaffenheit der Pflanzenarten deutlich wurde. Bei frischem Siliergut waren mit kürzeren Partikellängen eindeutig steigende Methanausbeuten verbunden. Bei der Silierung führte eine stärkere Zerkleinerung zu höheren Milchsäuregehalten und geringeren TM-Verlusten. Der positive Einfluss einer kurzen Häcksellänge auf die Methanausbeute mit Bezug auf die zugeführte organische Trockenmasse oTM_{zu} war im Gegensatz zum Siliergut bei den Silagen nicht zu finden. Bei Einrechnung der Silierverluste in die Methanausbeute (Bezugsbasis oTM_{orig}) war mit kürzerer Häcksellänge ebenfalls eine Steigerung der Methanausbeute gegeben.

Die Silierung beschleunigte die Methanbildung und erhöhte die Methanausbeute mit Bezug auf die zugeführte organische Trockenmasse oTM_{zu} . Bei Beachtung der Silierverluste war jedoch überwiegend keine signifikante Erhöhung der Methanausbeute (Bezugsbasis oTM_{orig}) nachweisbar.

4.3.3 Versuchsschwerpunkt III – Variation von Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer

4.3.3.1 Physikalische Struktur

Zur Beschreibung der physikalischen Struktur von Mais-, Grünschnittroggen-, Sudangras- und Triticaleproben, die jeweils mit zwei verschiedenen theoretischen Häcksellängeneinstellungen eines Feldhäckslers geerntet wurden, sind als Ergebnis bildanalytischer Vermessungen Daten zu Partikellänge, Partikelbreite und projizierter Oberfläche dargestellt (**Abb. 26, Abb. 27**; Tab. A15 – A18).

Ebenso wie in Versuchsschwerpunkt I und II hat sich auch in Versuchsschwerpunkt III die Verteilung der Anzahl der Partikel über die Partikellänge als Merkmal für die Bewertung des Zerkleinerungserfolges nicht bewährt. Mit geringerer theoretischer Häcksellänge wurde nur eine sehr schwache Abnahme des 50 %-Wertes der Verteilung der Partikelanzahl über der Partikellänge gemessen (Tab. A15 – A18).

Die flächengewichtete Bewertung der mittleren Partikellänge zeigt hingegen bei den vier geprüften Pflanzenarten eindeutig höhere Werte bei gröberer theoretischer Häcksellänge (**Abb. 27**). Dies stimmt auch mit dem optischen Eindruck zur Struktur der vermessenen Häckselgüter überein (fotografische Darstellungen Abb. A13 – A16). Generell lagen die gemessenen Werte der mittleren Partikellängen über den theoretischen Längeneinstellungen am Feldhäcksler. Der Mais wurde mit einer theoretischen Häcksellänge von 4 und 8 mm zerkleinert und wies hierfür verhältnismäßig hohe mittlere Partikellängen von 12,3 und 15 mm auf. Die mittleren Partikellängen waren damit etwa den Werten der mittleren und groben Häckseleinstellung des Maises im Versuchsschwerpunkt I zum dritten Erntetermin vergleichbar, der Interquartilabstand der Flächenverteilungen lag jedoch im Mittel um 4 mm und der Grobanteil im Mittel um 7 % (abs.) unter den entsprechenden Werten in Versuchsschwerpunkt I. Damit war eine höhere Gleichmäßigkeit der Partikellängen des Maises in Versuchsschwerpunkt III gegeben. Die mittleren Partikellängen des mit 6,8 mm und 11 mm theoretischer Häcksellänge zerkleinerten Grünschnittroggens und des mit 4 mm und 7 mm theoretischer Häcksellänge zerkleinerten Sudangrases stimmten mit 11 und 10,6 mm bei der kurzen Variante und 14,2 und 14,4 mm bei der gröberen Variante nahezu überein. Die geringsten mittleren Partikellängen wurden mit 8,8 und 12,7 mm von den beiden Varianten der Triticale analysiert. Bei den vier geprüften Pflanzenarten wurden bei der kurzen Zerkleinerungsstufe um 3 bis 4 mm geringere mittlere Partikellängen als bei der gröberen theoretischen Häcksellänge erreicht (**Abb. 27**). Der Grobanteil nahm mit stärkerer Zerkleinerung um 2 bis 6 % (abs.) ab und der Feinanteil um 4 bis 12 % (abs.) zu.

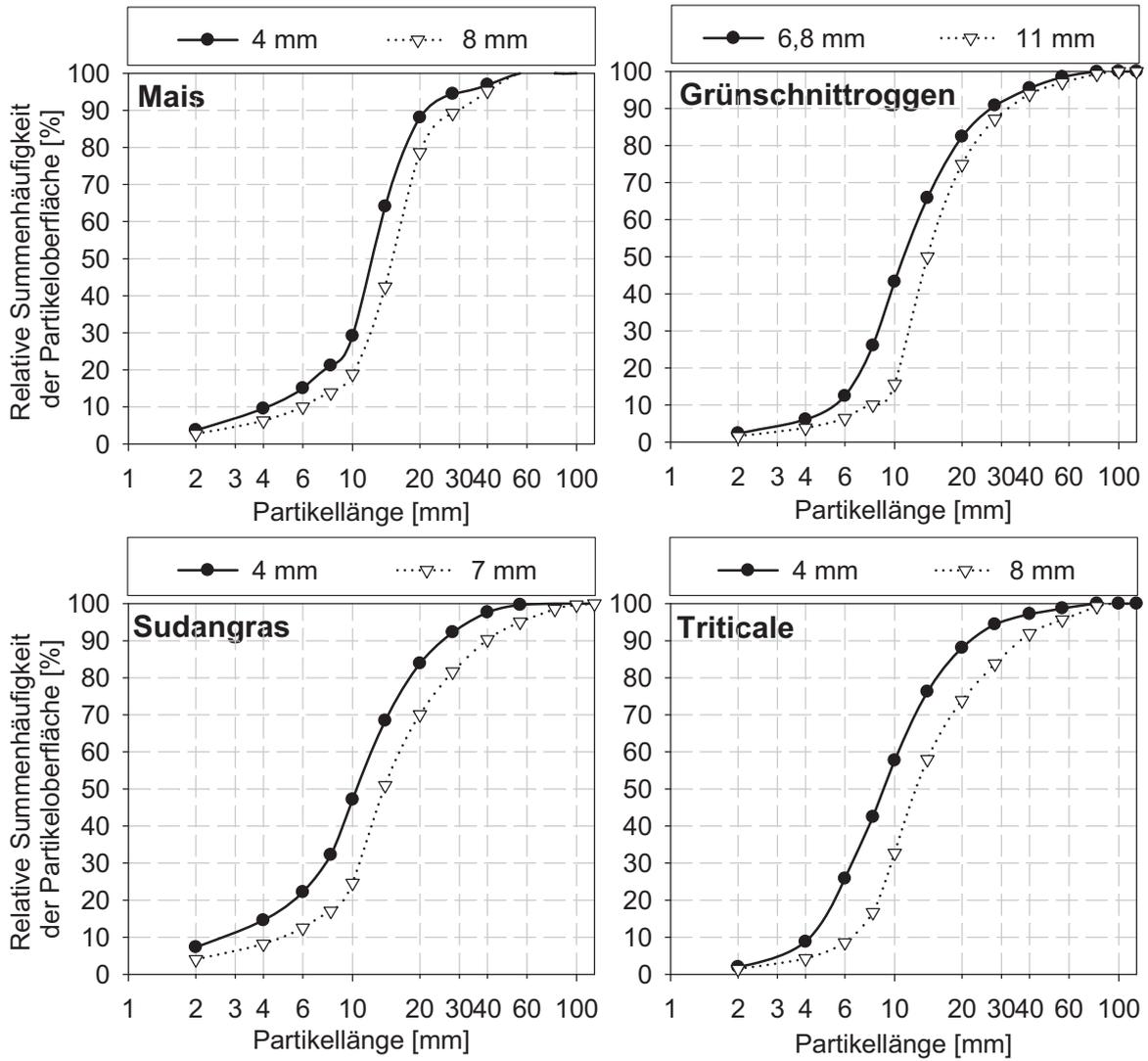


Abb. 26: Summenverteilung der projizierten Oberfläche über die Länge der Partikel bei jeweils zwei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Feldhäcksler) von Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale

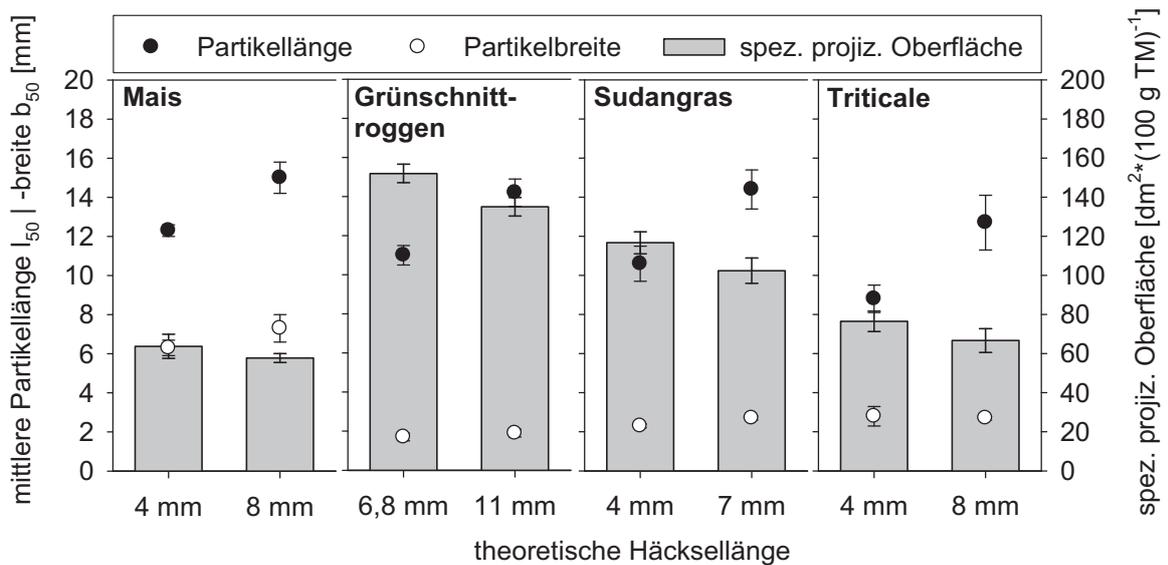


Abb. 27: Mittlere Partikellänge, -breite und spezifische projizierte Oberfläche ($\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen) bei jeweils zwei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Feldhäcksler) von Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale

Bei Mais wurden mit 6,3 bzw. 7,3 mm die höchsten mittleren Partikelbreiten bestimmt (**Abb. 27**). Die mittleren Partikelbreiten der übrigen Pflanzenarten reichten von 1,7 bis 2,8 mm. Das mittlere Verhältnis Länge zu Breite der Partikel war bei Grünschnittroggen und Triticale vergleichbar und lag etwa doppelt so hoch wie bei Mais und Sudangras. Die Unterschiede in der Partikelbreite und dem Verhältnis Länge zu Breite zwischen den beiden Häcksellängenvarianten einer Pflanzenart waren gering.

Aufgrund der höheren Partikelbreiten überstiegen die mittleren projizierten Oberflächen des Mais mit 46 bzw. 66 mm² die entsprechenden Werte der übrigen Pflanzenarten von 16 bis 34 mm². Mit geringerer theoretischer Häcksellänge nahm die mittlere projizierte Oberfläche um 31 bis 43 % (rel.) bei den geprüften Pflanzenarten ab.

Ähnlich wie im Versuchsschwerpunkt I und II waren auch bei den Praxishäcksellängen geringere spezifische Oberflächen bei Mais und Triticale im Vergleich zu Grünschnittroggen und Sudangras zu messen. Die ermittelten Unterschiede in der spezifischen projizierten Oberfläche zwischen den Häcksellängenvarianten einer Pflanzenart waren mit 6 bis 12 % (rel.) geringer als die Unterschiede in der mittleren projizierten Oberfläche.

4.3.3.2 Chemische Charakterisierung

Die Ergebnisse der chemischen Analyse des Siliergutes und der Silagen von Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale bei Variation der theoretischen Häcksellänge, des Silierzusatzes und der Silierdauer sind im Folgenden zusammenfassend beschrieben. Die Datensätze hierzu sind in den Tabellen A25 bis A28 des Anhangs aufgeführt.

Mais und Sudangras wiesen einen für die Silierung günstigen TM-Gehalt von 33 bzw. 31 % auf. Bei Grünschnittroggen lag der TM-Gehalt mit 25 % etwas niedriger, bei Triticale mit im Mittel 39 % geringfügig höher. Durch die Silierung nahm der TM-Gehalt um bis zu 4,2 % (abs.) ab. Dabei war die Abnahme des TM-Gehaltes bei Zusatz der biologischen Siliermittel und bei langen Lagerzeiten verstärkt ausgeprägt.

Abb. 28 gibt einen Überblick über die im Mittel in dem Siliergut und in den Silagen der vier geprüften Pflanzenarten gemessenen Rohnährstoffgehalte. Dabei wurden bei Mais und Triticale mit etwa 5 % TM die geringsten und bei Sudangras mit 8,7 % TM die höchsten Gehalte an Rohasche bestimmt. Die Rohfettgehalte lagen mit im Mittel 1,4 bis 2,8 % TM im Siliergut durchgängig niedrig. Die ermittelten Rohproteingehalte reichten von 5,4 % TM bei Sudangras bis 10,2 % TM bei Grünschnittroggen. Neben den stickstofffreien Extraktstoffen nahmen die Rohfaserbestandteile mit 20,4 % TM bei Mais bis 38,2 % TM bei Grünschnittroggen den größten Anteil der TM ein.

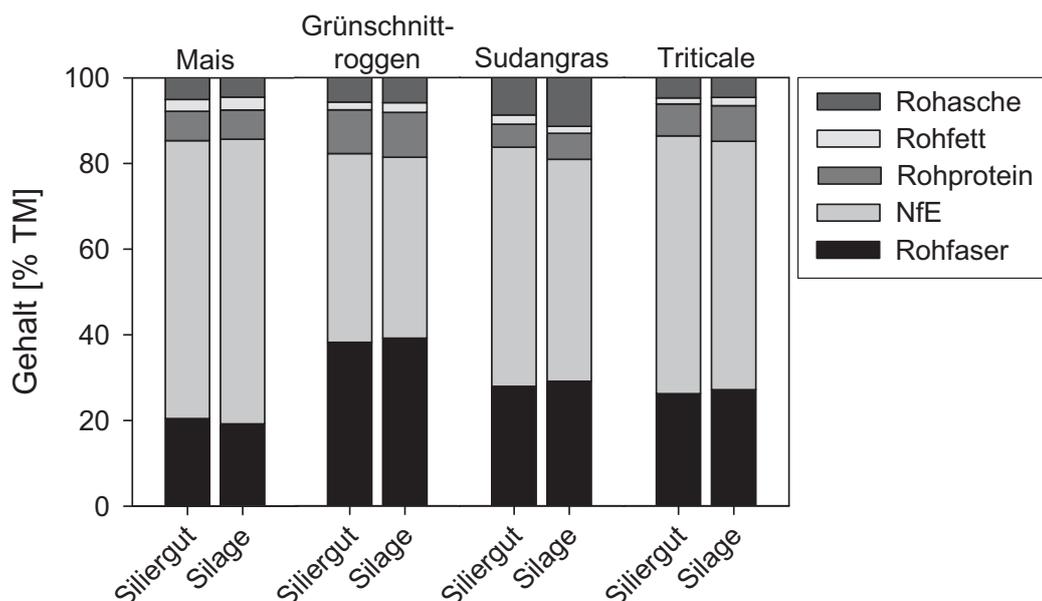


Abb. 28: Mittlere Rohnährstoffgehalte des Siliergutes und der Silagen von Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale in Versuchsschwerpunkt III

Durch die Silierung nahmen ebenso wie in Versuchsschwerpunkt II die nicht für die Gärprozesse genutzten Inhaltsstoffe relativ zum Siliergut geringfügig zu. Entsprechend wurden in den Silagen im Mittel bis zu 0,5 % TM höhere Gehalte an Rohfett und bis zu 0,8 % TM höhere Gehalte an Rohprotein analysiert. Der Rohfasergehalt der Silagen überstieg mit Ausnahme des Maises den Rohfasergehalt des Siliergutes im Mittel um 0,9 bis 1,2 % TM. Die Analyse der Gerüstsubstanzen ergab bei den Pflanzenarten eine mittlere Abnahme des Gehaltes an Hemicellulose um 1,6 bis 7,5 % TM, jedoch kein einheitliches Verhalten des Cellulose- und Lignin-Anteils (**Abb. 29**). Die Analyseergebnisse zwischen den Wiederholungen variierten zum Teil stark.

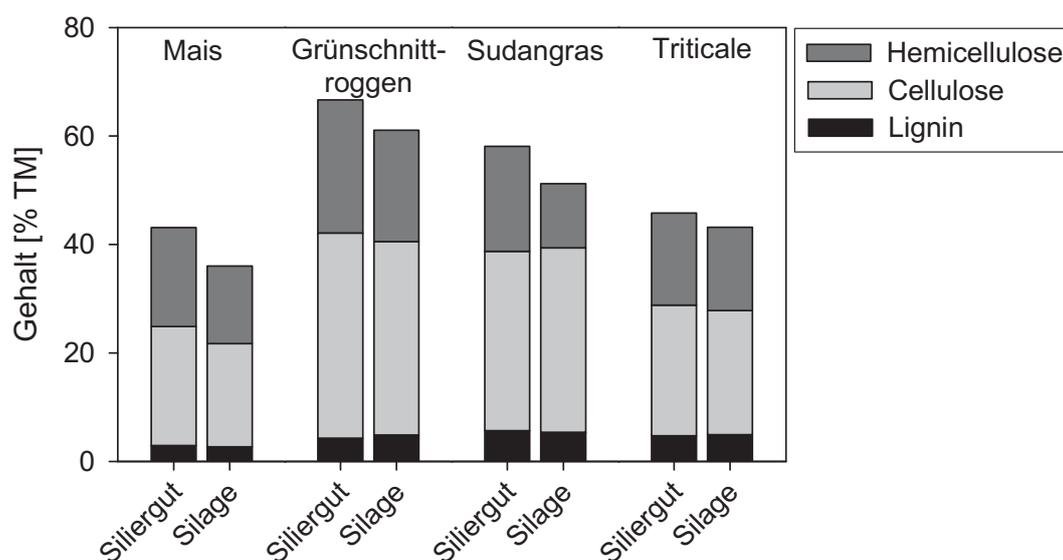


Abb. 29: Mittlere Anteile der Gerüstsubstanzen des Siliergutes und der Silagen von Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale in Versuchsschwerpunkt III

Bei Mais, Grünschnittroggen und Sudangras wurde eine Verringerung des Zuckeranteils von jeweils im Mittel 7,5 % TM, 4,6 % TM und 9,4 % TM durch die Silierung ermittelt. Dies entsprach einer Abnahme des vor der Silierung vorhandenen Zuckers um 59 bis 62 % (rel.). Bei Triticale konnte hingegen, ähnlich wie in Versuchsschwerpunkt II keine eindeutige Abnahme des Zuckergehaltes nachgewiesen werden (Tab. A28).

Die Variation der Parameter Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer führte vor allem zu Unterschieden im Gär säuremuster (Abschnitt 4.3.3.3), im Zuckergehalt der Silagen sowie zum Teil im Gehalt an Rohprotein (Tab. A25 – A28).

4.3.3.3 Silierverluste und Gärqualität der Silagen

Die **Tab. 18** bis **Tab. 21** zeigen wesentliche Parameter und Summenparameter der Gärqualität von Mais-, Grünschnittroggen-, Sudangras- und Triticalesilagen aus Laborversuchen mit unterschiedlicher Behandlung bezüglich Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer. Im Folgenden werden die Ergebnisse getrennt nach Pflanzenart dargestellt und beschrieben.

Die **Maissilagen** im Versuchsschwerpunkt III wiesen ausschließlich niedrige pH-Werte bis maximal 4,3 und gute bis sehr gute Gärqualitäten nach DLG-Schlüssel auf. Buttersäure wurde nur bei wenigen Varianten mit geringen Gehalten nachgewiesen (**Tab. 18**).

Tab. 18: TM-Verlust und Gärqualität von Maissilagen (Laborsilo) bei Variation von Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer; n=3

| Häcksellänge [mm] | Silierzusatz | Lagerdauer [d] | TM-Verlust [%] | pH-Wert [-] | Milchsäure [% TM] | Essigsäure ¹⁾ [% TM] | Buttersäure ²⁾ [% TM] | einw. Alkohole ³⁾ [% TM] | DLG-Punkte ⁴⁾ [-] | DLG-Note ⁴⁾ [-] |
|----------------------|--------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|---------------------------------|-------------------------------|
| 4 | ohne | 10 | 1,3 | 3,9 | 4,3 | 0,1 | n.n. | 1,0 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 90 | 3,4 | 3,8 | 5,0 | 0,8 | n.n. | 1,2 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 180 | 3,1 | 3,8 | 5,2 | 0,9 | 0,1 | 0,5 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 365 | 3,6 | 3,8 | 4,8 | 2,2 | 0,1 | 1,5 | 100 | sehr gut |
| 4 | Chem. A | 90 | 3,7 | 3,8 | 5,0 | 0,6 | n.n. | 0,6 | 100 | sehr gut |
| 4 | MSB-komb. A | 90 | 5,9 | 4,3 | 1,3 | 2,3 | n.n. | 2,4 | 100 | sehr gut |
| 8 | ohne | 10 | 1,4 | 3,9 | 4,3 | 0,5 | n.n. | 1,2 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 90 | 4,3 | 3,9 | 4,8 | 1,0 | n.n. | 1,0 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 180 | 5,8 | 4,2 | 2,5 | 2,4 | n.n. | 1,2 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 365 | 7,8 | 4,2 | 2,3 | 3,9 | n.n. | 2,1 | 78 | gut |
| 8 | Chem. A | 90 | 3,9 | 3,9 | 5,0 | 1,1 | 0,2 | 0,5 | 94 | sehr gut |
| 8 | MSB-komb. A | 90 | 13,6 | 4,2 | 2,7 | 2,4 | 0,1 | 1,7 | 95 | sehr gut |
| | MSB-ho | 90 | 8,0 | 3,9 | 4,5 | 1,6 | n.n. | 1,3 | 100 | sehr gut |
| | MSB-komb. B | 90 | 6,1 | 4,2 | 2,2 | 0,8 | n.n. | 1,8 | 100 | sehr gut |

¹⁾Summe aus Essig- und Propionsäure; ²⁾Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; ³⁾Summe aus Ethanol und Propanol; ⁴⁾DLG-Schlüssel 2006; einw. ... einwertig; n.n. ... nicht nachweisbar

Die unterschiedliche Zerkleinerung des Maises beeinflusste das Gär säuremuster und die Verluste bei der Silierung. Bei der kurzen Häcksellänge von 4 mm waren TM-Verluste von 1,3 bis 5,9 % zu beobachten (**Tab. 18**). Diese lagen um 0,1 bis 7,7 % (abs.) unter den TM-Verlusten der vergleichbaren Silagen mit 8 mm Häcksellänge. Bei der kürzeren Häcksellänge wurden zudem bei den Silagen ohne Silierzusatz um bis zu 2,7 % TM höhere Milchsäuregehalte, um bis zu 1,7 % TM geringere Essigsäuregehalte und vorwiegend niedrigere Gehalte an einwertigen Alkoholen gemessen.

Die geprüften Silierzusätze wirkten sich unterschiedlich auf das Gär säuremuster und die Silierverluste aus. Während sich die Maissilagen mit dem Silierzusatz Chem. A kaum von den Kontrollvarianten ohne Silierzusatz unterschieden, traten infolge der Zugabe des biologischen Siliermittels MSB-komb. A um 3,7 bzw. 2,1 % TM niedrigere Milchsäuregehalte, um 1,5 bzw. 1,4 % TM höhere Essigsäuregehalte und um 1,7 bzw. 0,7 % TM höhere Ethanolgehalte nach 90 Tagen Silierdauer auf. Durch die heterofermentative Bildung organischer Säuren wurden deutlich höhere TM-Verluste verglichen mit dem chemischen Zusatz und der Kontrollvariante erzeugt. Der bei 8 mm Häcksellänge zusätzlich geprüfte biologische Silierzusatz MSB-komb. B mit homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterien ergab ein ähnliches Gär säuremuster wie der Zusatz MSB-komb. A. Es wurden jedoch etwas geringere Essigsäuregehalte und um 7,5 % (abs.) geringere TM-Verluste gemessen. Durch Zusatz des biologischen Siliermittels MSB-ho mit homofermentativen Milchsäurebakterien wurden ähnliche Milchsäuregehalte wie bei der Variante ohne Silierzusatz, jedoch um 0,6 % TM höhere Essigsäuregehalte und um 0,3 % TM höhere Gehalte an einwertigen Alkoholen gebildet. Der TM-Verlust lag um 3,7 % (abs.) höher als bei der Kontrollvariante.

Neben der Häcksellänge und dem Silierzusatz hatte auch die Lagerdauer der Maissilagen unter anaeroben Bedingungen einen Effekt auf die Gär säuren und TM-Verluste. Nach 10 Tagen Lagerdauer wurden bei einer theoretischen Häcksellänge von 4 mm 4,3 % TM Milchsäure gebildet, wobei der Milchsäuregehalt mit zunehmender Lagerdauer bis 180 Tage auf 5,2 % TM weiter anstieg. Nach 180 Tagen Lagerdauer wurden keine höheren Milchsäuregehalte, jedoch eine Zunahme der Gehalte an Essigsäure und einwertigen Alkoholen analysiert. Bei 8 mm Häcksellänge war ebenfalls ein Anstieg des Milchsäuregehaltes in den Silagen bis 90 Tage Lagerdauer zu verzeichnen, es waren jedoch bereits ab 180 Tagen um die Hälfte niedrigere Milchsäuregehalte und ein deutlicher Anstieg der Essigsäure- und Alkoholgehalte zu beobachten. Die Zunahme von Essigsäure und einwertigen Alkoholen als Fermentationsprodukte war mit steigenden TM-Verlusten verbunden. Von 10 auf 365 Tage Lagerdauer nahmen die TM-Verluste von 1,3 auf 3,6 % bei 4 mm und von 1,4 auf 7,8 % bei 8 mm Häcksellänge zu.

Der silierte **Grünschnittroggen** wies deutlich größere Unterschiede in der Gärqualität auf als der untersuchte Mais. Die DLG-Noten reichten von „sehr gut“ bis „schlecht“, wobei zum Teil unzureichend niedrige pH-Werte, hohe Essigsäuregehalte und bei einer Variante ein hoher Buttersäuregehalt analysiert wurden (**Tab. 19**).

Tab. 19: TM-Verlust und Gärqualität von Grünschnittroggensilagen (Laborsilo) bei Variation von Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer; n=3

| Häcksel- länge | Silier- zusatz | Lager- dauer | TM- Verlust | pH- Wert | Milch- säure | Essig- säure ¹⁾ | Butter- säure ²⁾ | einw. Alkohole ³⁾ | DLG- Punkte ⁴⁾ | DLG- Note ⁴⁾ |
|-------------------|-------------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| [mm] | | [d] | [%] | [-] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [-] | [-] |
| 6,8 | ohne | 10 | 2,3 | 4,1 | 7,0 | 1,4 | n.n. | 0,7 | 95 | sehr gut |
| | ohne | 90 | 2,6 | 4,0 | 8,2 | 1,9 | n.n. | 0,8 | 98 | sehr gut |
| | ohne | 180 | 3,0 | 4,1 | 7,8 | 2,1 | n.n. | 0,7 | 97 | sehr gut |
| | ohne | 365 | 3,5 | 4,1 | 8,0 | 1,8 | n.n. | 0,7 | 95 | sehr gut |
| 6,8 | Chem. B | 10 | 0,3 | 4,1 | 6,9 | 1,0 | n.n. | 0,7 | 95 | sehr gut |
| | Chem. B | 90 | 1,2 | 4,2 | 6,8 | 1,3 | n.n. | 1,4 | 95 | sehr gut |
| 6,8 | MSB-komb. A | 10 | 3,1 | 4,0 | 7,3 | 1,3 | n.n. | 0,9 | 100 | sehr gut |
| | MSB-komb. A | 90 | 5,2 | 4,7 | 2,2 | 5,7 | n.n. | 2,2 | 45 | schlecht |
| 11 | ohne | 10 | 4,4 | 4,0 | 7,0 | 1,5 | n.n. | 0,6 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 90 | 8,0 | 4,2 | 7,4 | 2,3 | n.n. | 0,5 | 95 | sehr gut |
| | ohne | 180 | 8,9 | 4,5 | 3,2 | 4,6 | n.n. | 1,6 | 60 | verb.bed. |
| | ohne | 365 | 9,0 | 4,8 | 1,7 | 4,5 | 1,3 | 2,0 | 35 | schlecht |
| 11 | Chem. B | 10 | 0,6 | 4,4 | 5,4 | 1,1 | n.n. | 0,2 | 90 | sehr gut |
| | Chem. B | 90 | 2,2 | 4,4 | 5,5 | 0,8 | n.n. | 0,2 | 88 | gut |
| 11 | MSB-komb. A | 10 | 2,1 | 4,0 | 6,7 | 1,6 | 0,02 | 1,0 | 100 | sehr gut |
| | MSB-komb. A | 90 | 7,2 | 4,7 | 1,9 | 5,3 | n.n. | 1,9 | 52 | verb.bed. |

¹⁾Summe aus Essig- und Propionsäure; ²⁾Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; ³⁾Summe aus Ethanol und Propanol; ⁴⁾DLG-Schlüssel 2006; verb.bed. ... verbesserungsbedürftig; einw. ... einwertig; n.n. ... nicht nachweisbar

Die Häcksellänge des Grünschnittroggens hatte einen deutlichen Einfluss auf den Silierverlauf und die Konservatqualität. Die TM-Verluste der 11 mm-Silagen lagen sowohl ohne Silierzusatz als auch mit chemischem und biologischem Zusatz fast ausschließlich über denen der 6,8 mm-Silagen. Dabei wurden bei der größeren Häcksellänge um bis zu 5,9 % (abs.) höhere TM-Verluste gemessen als bei den entsprechenden Varianten der kürzeren Häcksellänge. Ähnlich wie bei Mais stieg mit kürzerer Häcksellänge der Milchsäuregehalt in den Silagen. Die Unterschiede im Milchsäuregehalt zwischen vergleichbaren Häcksellängenvarianten lagen bei bis zu 6,3 % TM. Gleichzeitig wurden ohne Silierzusatz bei kürzerer Häcksellänge im Mittel um 0,1 bis 2,6 % TM geringere Essigsäuregehalte nachgewiesen. Der positive Einfluss der kürzeren Häcksellänge auf die Milchsäuregärung spiegelte sich in niedrigeren pH-Werten und einer höheren Punktezahl bei Bewertung der Gärqualität nach DLG-Schlüssel bei 5 der 8 untersuchten Varianten wieder.

Die Verwendung von Silierzusätzen führte bei Grünschnittroggen zu Änderungen im Gär säuremuster der Silagen. Der chemische Silierzusatz Chem. B bewirkte bei beiden Häcksellängen eine Verringerung der TM-Verluste um 1,4 bis 5,8 % (abs.). Im Vergleich zu den 10-Tage- und 90-Tage-Silagen ohne Silierzusatz wurden bis zu 1,9 % TM geringere Gehalte an Milchsäure und bis zu 1,5 % TM geringere Gehalte an Essigsäure gebildet. Bei den Silagen mit größerer Häcksellänge wurde der pH-Wert durch die geringeren Säuregehalte nur auf 4,4 gesenkt und lag damit etwas höher als bei den Silagen mit kürzerer Häcksellänge bzw. ohne Silierzusatz. Dennoch wiesen die Silagen mit dem Zusatz Chem. B eine gute bis sehr gute Gärqualität auf. Die nach 10 Tagen ausgelagerten Silagen mit biologischem Silierzusatz MSB-komb. A unterschieden sich zunächst nur gering von den 10-Tage-Silagen ohne Zusatz. Hohe Milchsäuregehalte bewirkten eine Senkung des pH-Wertes auf 4,0 und sehr gute Gärqualitäten. Nach 90 Tagen Silierdauer verringerte sich jedoch durch Wirkung der heterofermentativen Milchsäurebakterien des biologischen Siliermittels der Milchsäuregehalt um 4,8 bzw. 5,1 % TM. Der Essigsäuregehalt stieg entsprechend um 3,7 bzw. 5,1 % TM. Die Bildung der Essigsäure war mit höheren TM-Verlusten und Punktabzug bei der Bewertung nach DLG-Schlüssel verbunden.

Ebenso wie bei Mais waren auch bei Grünschnittroggen die Silierverluste und Gehalte der Gärprodukte von der Lagerdauer abhängig. Allgemein stiegen die TM-Verluste mit zunehmender Lagerzeit. Bei einer theoretischen Häcksellänge von 6,8 mm wurden ohne Silierzusatz über eine Lagerdauer bis 365 Tage anaerob stabile Silagen erzeugt. Die quantitativ größten Änderungen der Gär säuregehalte erfolgten zwischen 10 und 90 Tagen Silierdauer, anschließend blieb das Gär säuremuster nahezu konstant. Die TM-Verluste nahmen nur gering von 2,3 auf 3,5 % zu. Bei der größeren Häcksellänge von 11 mm wurden ab einer Lagerdauer von 180 Tagen der Ab- bzw. Umbau von Milchsäure zu Essig- und Buttersäure, eine verstärkte Bildung von Ethanol und Propanol und damit verbunden steigende pH-Werte und die Verschlechterung der Gärqualität der Silagen beobachtet. Hohe Anteile von Ammoniak-Stickstoff am Gesamt-Stickstoff weisen auf den Abbau von Proteinen hin (Tab. A26). Die TM-Verluste nahmen deutlich von 4,4 auf 9,0 % zu.

Das silierte **Sudangras** wies im Mittel gute bis sehr gute Gärqualitäten nach DLG-Schlüssel auf. Buttersäure wurde bei den Silagen nur in Spuren analysiert. Die sensorische Prüfung ergab jedoch bei mehreren Varianten einen leicht veränderten Geruch und eine ungewöhnlich Färbung der Silagen. Bei einer Probe wurde eine oberflächliche Schimmelbildung festgestellt (**Tab. 20**).

Tab. 20: TM-Verlust und Gärqualität von Sudangrassilagen (Laborsilo) bei Variation von Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer; n=3

| Häcksel- länge [mm] | Silier- zusatz | Lager- dauer [d] | TM- Verlust [%] | pH- Wert [-] | Milch- säure [% TM] | Essig- säure ¹⁾ [% TM] | Butter- säure ²⁾ [% TM] | einw. Alkohole ³⁾ [% TM] | DLG- Punkte ⁴⁾ [-] | DLG- Note ⁴⁾ [-] |
|---------------------------|-------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|---|--|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 4 | ohne | 10 | 2,7 | 3,8 | 5,2 | 1,6 | 0,2 | 1,6 | 97 | sehr gut |
| | ohne | 90 | 3,5 | 3,9 | 4,2 | 1,1 | 0,1 | 1,0 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 180 | 5,3 | 3,9 | 4,5 | 1,6 | n.n. | 1,6 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 365 | 8,5 | 3,8 | 6,9 | 2,7 | 0,3 | 2,6 | 88 | gut |
| 4 | Chem. B | 10 | 1,5 | 4,3 | 2,9 | 1,1 | 0,1 | 0,1 | 100 ⁵⁾ | sehr gut |
| | Chem. B | 90 | 3,5 | 4,2 | 3,5 | 1,1 | 0,1 | 0,7 | 97 ⁵⁾ | sehr gut |
| 4 | MSB-komb. A | 10 | 2,1 | 3,8 | 5,1 | 1,2 | 0,1 | 1,2 | 100 | sehr gut |
| | MSB-komb. A | 90 | 7,1 | 4,0 | 2,9 | 1,7 | 0,2 | 1,1 | 95 ⁶⁾ | sehr gut |
| 7 | ohne | 10 | 3,7 | 3,9 | 1,7 | 1,4 | 0,1 | 1,5 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 90 | 5,8 | 4,0 | 4,6 | 1,3 | 0,1 | 2,2 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 180 | 7,2 | 3,8 | 5,5 | 1,2 | n.n. | 1,4 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 365 | 9,6 | 3,8 | 7,8 | 2,4 | n.n. | 3,0 | 100 | sehr gut |
| 7 | Chem. B | 10 | 2,8 | 4,3 | 1,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 100 ⁵⁾ | sehr gut |
| | Chem. B | 90 | 3,1 | 4,2 | 3,8 | 1,5 | 0,3 | 0,4 | 94 | sehr gut |
| 7 | MSB-komb. A | 10 | 3,2 | 3,8 | 2,2 | 1,4 | 0,1 | 1,3 | 100 | sehr gut |
| | MSB-komb. A | 90 | 7,9 | 4,0 | 3,3 | 2,8 | 0,1 | 1,1 | 95 | sehr gut |

¹⁾Summe aus Essig- und Propionsäure; ²⁾Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; ³⁾Summe aus Ethanol und Propanol; ⁴⁾DLG-Schlüssel 2006; ⁵⁾veränderte Farbe und Geruch der Silage; ⁶⁾oberflächliche Schimmelbildung; einw. ... einwertig; n.n. ... nicht nachweisbar

Ebenso wie bei Mais und Grünschnittroggen hatte auch bei Sudangras die Häcksellänge einen Einfluss auf das Gär säuremuster und die Silierverluste (**Tab. 20**). Die TM-Verluste lagen bei der kürzeren Häcksellänge mit Ausnahme einer Variante um 0,7 bis 2,3 % niedriger als bei den entsprechenden Silagen der längeren Häcksellänge. Allerdings wiesen die kurzen Varianten im Gegensatz zu Mais und Grünschnittroggen bei Sudangras etwas niedrigere (bis 1,1 % TM) Milchsäuregehalte auf als die größeren Häckselvarianten. Dies traf nicht für die Silagen mit 10 Tagen Lagerdauer zu. Hier wurden 1,4 bis 3,5 % TM höhere Gehalte an Milchsäure bei den Varianten der kurzen Häcksellänge gemessen. Die Unterschiede im Essigsäure- und Ethanolgehalt zwischen den Häcksellängenvarianten waren mit maximal 1,1 bzw. 1,2 % TM relativ gering, wobei in den 7 mm-Varianten vorwiegend etwas höhere Essigsäure- und Ethanolgehalte gemessen wurden als bei den 4 mm-Varianten.

Die bei Sudangras geprüften Silierzusätze bewirkten ebenfalls Veränderungen im Gär säuremuster und bei den Silierverlusten verglichen mit den Varianten ohne Silierzusatz. Der Zusatz des chemischen Siliermittels Chem. B ergab im Vergleich die geringsten TM-Verluste. Ähnlich wie bei dem Grünschnittroggen fiel die Milchsäurebildung mit chemischem Siliermittel geringer aus als bei der Kontrolle ohne Siliermittel. Entsprechend lagen die pH-Werte um 0,2 bis 0,5 höher als ohne Zusatz. Auffällig waren ebenfalls mit

bis zu 1,8 % TM deutlich niedrigere Ethanolgehalte bei Zusatz des Siliermittels Chem. B. Der biologische Silierzusatz MSB-komb. A mit homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterien bewirkte nach 90-tägiger Silierung eine Verschiebung des Gär säuremusters zugunsten von Essigsäure und einen um 1,3 % TM niedrigeren Milchsäuregehalt im Vergleich zur Kontrolle. Die Silierverluste lagen nach 90 Tagen um 3,6 bzw. 2,1 % (abs.) höher als ohne Silierzusatz und um 3,6 bzw. 4,8 % (abs.) höher als bei Applikation des Siliermittels Chem. B.

Mit längerer Lagerdauer war bei den Sudangrassilagen sowohl ohne als auch mit Silierzusätzen eine Zunahme der TM-Verluste zu beobachten. Ohne Zusatz erhöhten sich die Silierverluste von 2,7 % bzw. 3,7 % nach 10 Tagen auf 8,5 % bzw. 9,6 % nach einem Jahr. In der Tendenz war ein Anstieg der Summe der Fermentationsprodukte mit längerer Lagerdauer, jedoch keine Verschlechterung der Gärqualität zu verzeichnen.

Die Silagen des Versuches mit **Triticale** wurden nach DLG-Schlüssel mit guter bis sehr guter Gärqualität beurteilt (**Tab. 21**). Die Silagen wiesen mit maximal 5,6 % TM und 3,1 % TM verhältnismäßig niedrige Milch- und Essigsäuregehalte auf. Die Gehalte an Ethanol lagen mit bis zu 3,9 % TM hingegen verhältnismäßig hoch.

**Tab. 21: TM-Verlust und Gärqualität von Triticalesilagen (Laborsilo) bei Variation von Häcksel-
länge, Silierzusatz und Lagerdauer; n=3**

| Häcksel- länge | Silierzusatz | Lager- dauer | TM- Verlust | pH- Wert | Milch- säure | Essig- säure ¹⁾ | Butter- säure ²⁾ | einw. Alkohole ³⁾ | DLG- Punkte ⁴⁾ | DLG- Note ⁴⁾ |
|-------------------|--------------|-----------------|----------------|-------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| [mm] | | [d] | [%] | [-] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [% TM] | [-] | [-] |
| 4 | ohne | 10 | 3,2 | 4,0 | 4,7 | 1,1 | n.n. | 2,0 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 90 | 4,4 | 4,0 | 5,2 | 1,1 | n.n. | 2,8 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 180 | 3,0 | 4,0 | 5,2 | 0,9 | n.n. | 2,5 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 365 | 4,0 | 3,9 | 4,3 | 1,4 | 0,1 | 3,7 | 100 | sehr gut |
| 4 | Chem. B | 10 | 2,2 | 5,5 | 1,6 | 0,8 | n.n. | 0,3 | 90 | sehr gut |
| | Chem. B | 90 | 6,5 | 4,6 | 3,2 | 1,5 | 0,5 | 0,4 | 80 | gut |
| 4 | MSB-komb. A | 10 | 4,6 | 4,0 | 5,4 | 1,2 | n.n. | 3,4 | 100 | sehr gut |
| | MSB-komb. A | 90 | 7,1 | 4,0 | 5,5 | 1,6 | 0,1 | 3,9 | 100 | sehr gut |
| 8 | ohne | 10 | 6,9 | 3,9 | 5,1 | 1,2 | n.n. | 1,3 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 90 | 8,2 | 4,0 | 5,3 | 0,7 | n.n. | 2,2 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 180 | 8,6 | 3,9 | 5,6 | 1,2 | n.n. | 3,2 | 100 | sehr gut |
| | ohne | 365 | 9,4 | 3,8 | 4,7 | 1,1 | n.n. | 2,9 | 100 | sehr gut |
| 8 | Chem. B | 10 | 2,4 | 5,0 | 2,4 | 0,8 | n.n. | 0,2 | 90 | sehr gut |
| | Chem. B | 90 | 3,6 | 4,6 | 3,2 | 0,6 | n.n. | 0,1 | 97 | sehr gut |
| 8 | MSB-komb. A | 10 | 3,9 | 4,0 | 5,0 | 1,2 | n.n. | 1,0 | 100 | sehr gut |
| | MSB-komb. A | 90 | 9,3 | 4,0 | 3,9 | 3,1 | n.n. | 1,2 | 90 | sehr gut |

¹⁾Summe aus Essig- und Propionsäure; ²⁾Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; ³⁾Summe aus Ethanol und Propanol; ⁴⁾DLG-Schlüssel 2006; einw. ... einwertig; n.n. ... nicht nachweisbar

Im Vergleich der Pflanzenarten hatte die Häcksellänge bei Triticale einen geringen Einfluss auf den Siliiverlauf. Die kurze Häcksellänge von 4 mm bewirkte ohne Silierzusatz eine etwas geringere Milchsäurebildung und um 3,7 bis 5,6 % niedrigere TM-Verluste verglichen mit den entsprechenden Varianten der längeren Häcksellänge von 8 mm. Unterschiede im Essigsäure- und Ethanolgehalt waren zwischen den Häcksellängenvarianten kaum vorhanden.

Der Zusatz von Siliermitteln zeigte bei Triticale ähnliche Effekte wie bei den übrigen Pflanzenarten in Versuchsschwerpunkt III. Infolge der Applikation des chemischen Siliermittels Chem. B waren eine verminderte Bildung von Milchsäure und geringere Ethanolgehalte zu verzeichnen. Nach 10 Tagen Silierdauer war der pH-Wert durch die geringe Versäuerung nur unzureichend auf 5,5 bzw. 5,0 abgesunken. Auch nach 90 Tagen lag der pH-Wert mit 4,6 noch deutlich über dem der Vergleichsvarianten. Dennoch waren durch die verminderte stoffliche Umsetzung die TM-Verluste um bis zu 4,6 % (abs.) niedriger als bei den Varianten ohne Silierzusatz. Ausnahme war die 4 mm-Variante mit Zusatz Chem. B nach 90 Tagen Silierdauer. Hier wurde Buttersäure mit einem Gehalt von 0,5 % TM analysiert. Die Buttersäurebildung führte zu höheren Verlusten und Punktabzug bei der Bewertung der Silagen nach DLG-Schlüssel. Der Zusatz des biologischen Siliermittels MSB-komb. A hatte bei den mit 4 mm gehäckselten Varianten um bis zu 0,7 % TM höhere Milchsäure-, 0,4 % TM höhere Essigsäure- und 1,4 % TM höhere Ethanolgehalte als ohne Silierzusatz zur Folge. Bei den 8 mm-Varianten waren erst nach 90 Tagen Silierdauer Unterschiede zwischen biologischem Zusatz und der Kontrolle ohne Zusatz zu erkennen. Hier wurden 1,6 % TM niedrigere Milchsäure- und 1,5 % TM höhere Essigsäuregehalte nach Applikation des biologischen Siliermittels ermittelt. Mit dem Zusatz MSB-komb. A wurde mit Ausnahme der über 10 Tage silierten 8 mm-Variante 1,1 bis 2,7 % mehr Trockenmasse als ohne Zusatz bei der Silierung verloren.

Der Einfluss der Lagerdauer auf das Gär säuremuster bei Triticale war ebenso wie der Einfluss der Häcksellänge verhältnismäßig gering. Ohne Silierzusatz nahmen die Milchsäuregehalte von 10 zu 180 Tagen Silierdauer um 0,5 % TM bei beiden Häcksellängenvarianten zu. Nach 365 Tagen wurden jedoch um jeweils 0,9 % TM niedrigere Milchsäuregehalte als nach 180 Tagen gemessen. Die Essigsäuregehalte verhielten sich ohne eindeutige Abhängigkeit von der Lagerdauer, während die Gehalte an einwertigen Alkoholen mit zunehmender Lagerdauer tendenziell stiegen. Die TM-Verluste nahmen nur bei den 8 mm-Varianten von 6,9 % nach 10 Tagen auf 9,4 % nach einem Jahr Lagerdauer deutlich zu.

4.3.3.4 Methanbildung

Die gemessenen Methanausbeuten sowie die Methanausbeuten unter Berücksichtigung der TM-Verluste bei der Silierung sind für das Siliergut und die Silagen von Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale bei unterschiedlicher Behandlung bezüglich Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer in den **Abb. 30** bis **Abb. 37** dargestellt. Die Daten zu Methanausbeuten, Methangehalten und den Geschwindigkeiten der Methanbildung sind in den Tabellen A41-A48 des Anhangs aufgeführt.

Auch in Versuchsschwerpunkt III wurde keine Hemmung oder Verzögerung der Methanbildung im zeitlichen Verlauf der Methanausbeute festgestellt. Die Verläufe der Methanbildung zeigten ein typisches Bild mit raschem Anstieg der gebildeten Gasmenge in den ersten Tagen des Gärtests.

Methanausbeuten

Die im Versuchsschwerpunkt III ermittelten Methanausbeuten wiesen bei Mais eine Spanne von 325 bis 378 $\text{I}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ (Tab. A41) und bei Triticale eine Spanne von 331 bis 374 $\text{I}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ auf (Tab. A47). Bei Grünschnittroggen und Sudangras lagen die Methanausbeuten mit 293 bis 346 $\text{I}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ und 283 bis 346 $\text{I}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ etwas niedriger (Tab. A43 und A45). Im Folgenden ist der Einfluss der Prüffaktoren Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer auf die Methanausbeute im Einzelnen für die untersuchten Pflanzenarten erläutert.

Bei **Mais** wurden die Methanausbeuten mit Bezug auf oTM_{zu} von der Häcksellänge und der Lagerdauer bzw. Silierung beeinflusst. Die Methanausbeuten der frischen Maisproben lagen bei der kürzeren Häcksellänge mit 355 bis 364 $\text{I}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ um 5 bis 11 % über den Methanausbeuten des frischen Maises bei größerer Häcksellänge mit 325 bis 337 $\text{I}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ (**Abb. 30**, Tab. A41). Bei den Silagen ist dieser Trend nicht zu finden. Hier wurden bei größerer Häcksellänge zum Teil höhere und zum Teil niedrigere Methanausbeuten mit Bezug auf oTM_{zu} erzielt. Bei Einrechnung der durch die Silierung entstandenen TM-Verluste in die Methanausbeute waren jedoch auch für die Silagen mit 4 mm Häcksellänge höhere Methanausbeuten (Bezugsbasis oTM_{orig}) als mit 8 mm Häcksellänge zu verzeichnen. Die Differenzen lagen mit 0,2 bis 6 % geringer als bei dem Siliergut (Tab. A41).

Der Zusatz von Siliermitteln bewirkte bei Mais nur geringe Änderungen in der Methanausbeute. Bei der Häcksellänge 4 mm waren die Unterschiede zur Kontrollvariante in der Methanausbeute sowohl mit Bezug auf oTM_{zu} als auch auf oTM_{orig} mit weniger als 1,5 % vernachlässigbar. Bei den Silagen mit 8 mm Häcksellänge wurden etwas größere Unterschiede in den Methanausbeuten mit Basis oTM_{zu} gemessen. Bei chemischem Zusatz Chem. A lag die Methanausbeute (oTM_{zu}) um 5 % unter der Methanausbeute

der Kontrollvariante. Die höchste Methanausbeute wurde von der Variante mit biologischem Zusatz MSB-komb. A erzielt, die die Methanausbeute der Kontrollvariante um 3 % überstieg. Die Unterschiede zwischen den Siliermittelvarianten waren jedoch auch bei 8 mm Häcksellänge statistisch nicht gesichert (Tab. A49). Die Berücksichtigung der Silierverluste in der Methanausbeute der 8 mm-Silagen führt zu einer weiteren Angleichung der Werte bei Variation des Silierzusatzes (**Abb. 30**). Bezogen auf oTM_{orig} wurden bei den Silagen mit Silierzusatz um 1 bis 5 % niedrigere Methanausbeuten als bei der Kontrollvariante ohne Zusatz ermittelt.

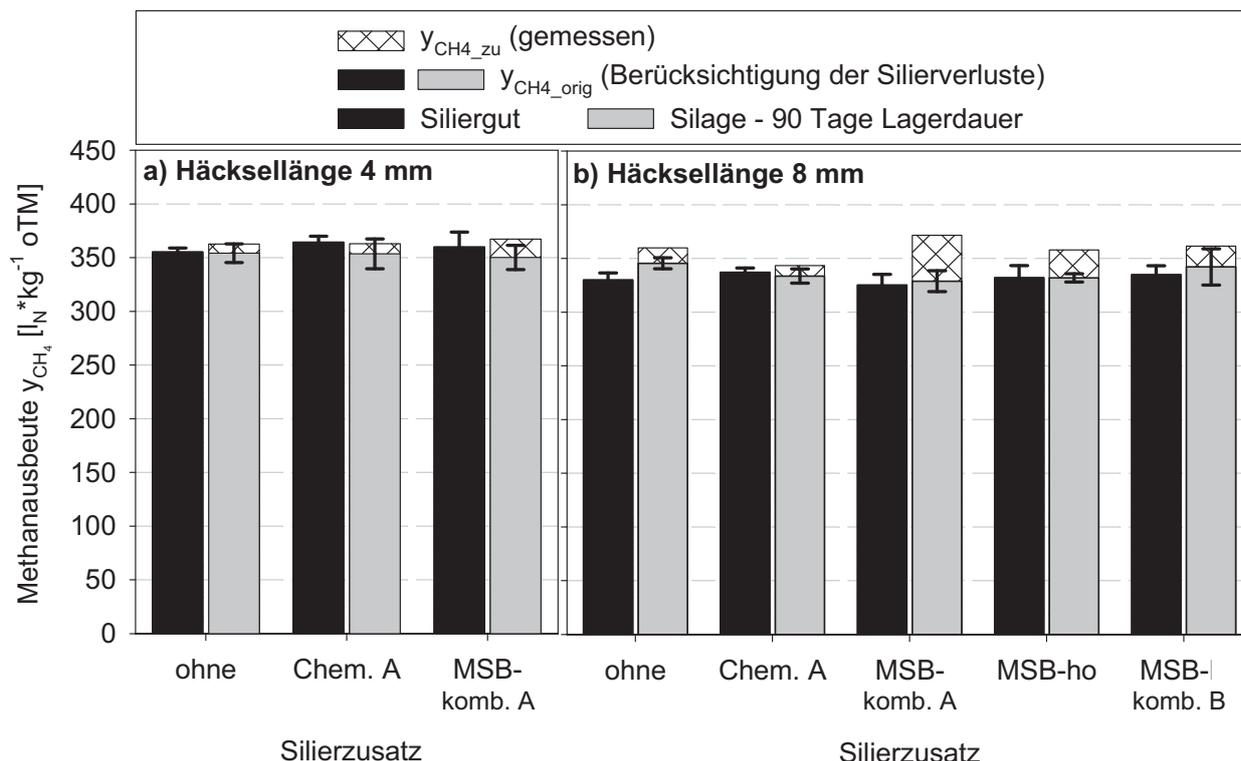


Abb. 30: Methanausbeute von Mais mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 8 mm bei Variation von Lagerdauer und Silierzusatz; n=3

Die über 90 Tage gelagerten Maissilagen wiesen höhere Methanausbeuten bezogen auf oTM_{zu} auf als das entsprechende Siliergut (**Abb. 30**). Durch die Silierung nahm die Methanausbeute (oTM_{zu}) bei 4 mm Häcksellänge um bis zu 2 % zu, während die Zunahme bei 8 mm Häcksellänge mit bis zu 14 % wesentlich stärker ausgeprägt war. Bei Einbeziehung der Silierverluste war hingegen kein signifikanter Einfluss der Silierung auf die Methanausbeute $y_{CH_4_{orig}}$ zu verzeichnen (Tab. A50). Mit Verlängerung der Dauer der Silierung von 10 auf 365 Tagen ohne Silierzusatz nahm die Methanausbeute bei 4 mm Häcksellänge geringfügig von 360 auf 363 $N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu}$ und bei 8 mm Häcksellänge von 342 auf 378 $N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu}$ etwas deutlicher zu (**Abb. 31**). Nach Einrechnung der Silierverluste, die mit längerer Lagerdauer ebenfalls stiegen, ergaben sich jedoch nur noch geringe Unterschiede in der Methanausbeute $y_{CH_4_{orig}}$ zwischen den Lagerdauervarianten von 1 bis 4 %.

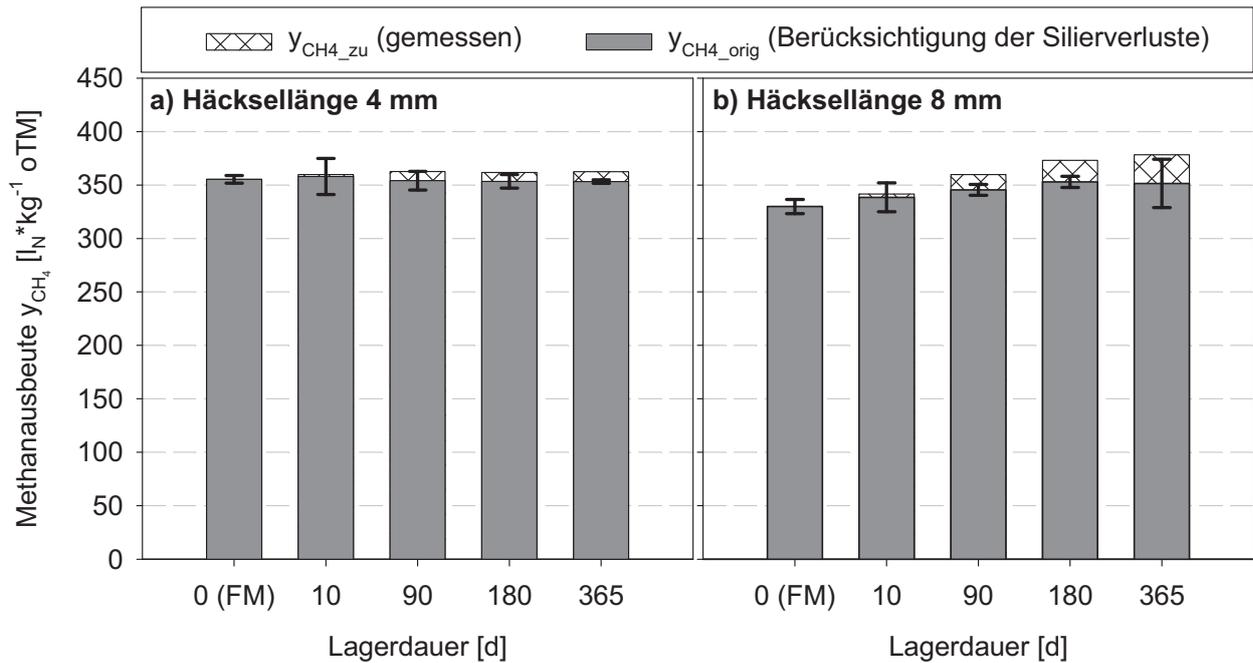


Abb. 31: Methanausbeute von Mais mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 8 mm bei Variation der Lagerdauer; n=3

Bei **Grünschnittroggen** hatten sowohl die Häcksellänge als auch der Silierzusatz und die Lagerdauer einen Effekt auf die Methanausbeute $y_{CH_4_zu}$ (**Abb. 32**).

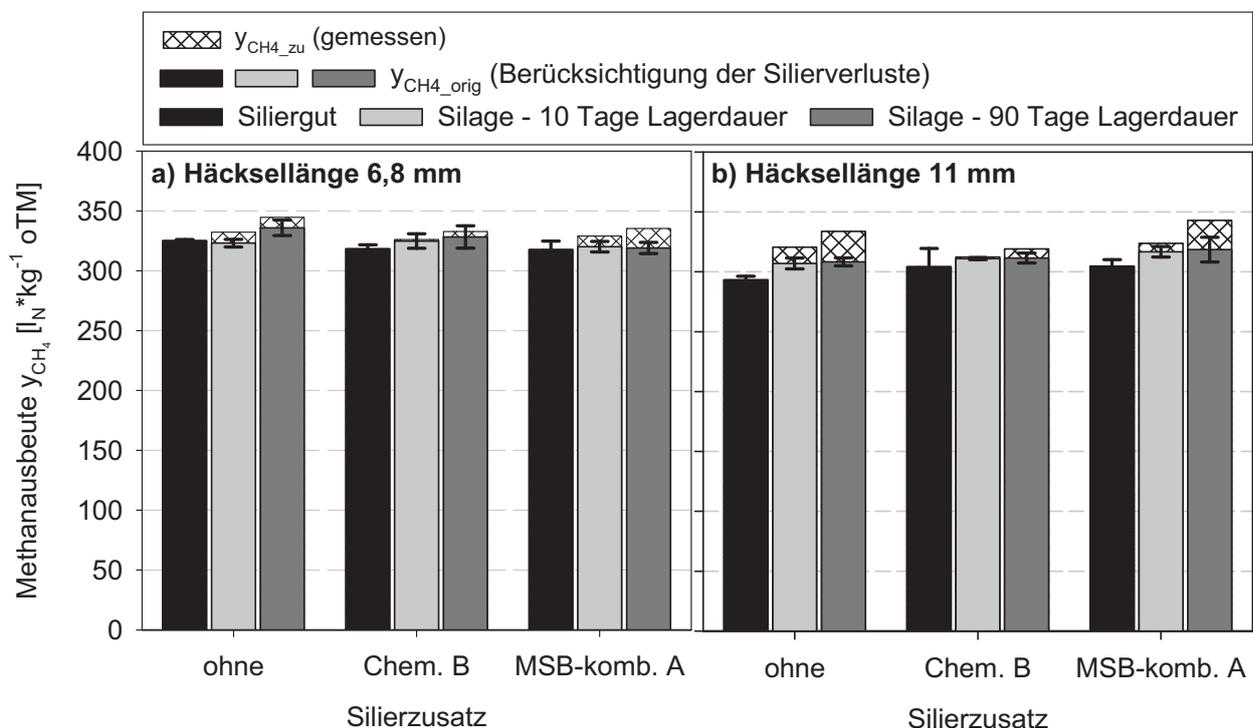


Abb. 32: Methanausbeute von Grünschnittroggen mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 6,8 mm und b) 11 mm bei Variation von Lagerdauer und Silierzusatz; n=3

Kürzeres Häckseln wirkte sich bei Grünschnittroggen positiv auf die Methanausbeute bezogen auf oTM_{zu} aus. Bei acht der elf möglichen Vergleiche wurden um 2 bis 11 % höhere Methanausbeuten als mit theoretischer Häcksellänge 11 mm erzielt.

Der Unterschied zwischen den Häcksellängenvarianten war jedoch nur bei den Siliergütern ohne Silierzusatz statistisch gesichert (Tab. A53). Bei biologischem Zusatz zeigte sich, im Gegensatz zu den übrigen Varianten, nur eine sehr geringe Erhöhung der Methanausbeute mit kürzerer Häcksellänge nach 10 Tagen Lagerdauer und eine Verringerung der Methanausbeute mit kürzerer Häcksellänge nach 90 Tagen Lagerdauer. Unter Einbeziehung der Silierverluste, die bei den 6,8-mm-Silagen niedriger lagen als bei den 11-mm-Silagen, wurden jedoch ausschließlich höhere Methanausbeuten (Bezug oTM_{orig}) der kürzer gehäckselten Silagen gegenüber den entsprechenden längeren Varianten gemessen (**Abb. 32**, Tab. A43).

Der Effekt des Silierzusatzes auf die Methanausbeute war auch bei Grünschnittroggen verhältnismäßig gering. Bei 6,8 mm Häcksellänge wurde kein signifikanter Einfluss des Silierzusatzes auf die Methanausbeute bezogen auf oTM_{zu} und oTM_{orig} analysiert (Tab. A53, A54). Die Silagen wiesen nach 90 Tagen Lagerdauer mit chemischem Zusatz Chem. B um 3,5 % (oTM_{zu}) bzw. 2,3 % (oTM_{orig}) niedrigere und mit biologischem Zusatz MSB-komb. A um 2,6 % (oTM_{zu}) bzw. 5 % (oTM_{orig}) niedrigere Methanausbeuten auf als die Kontrollvariante ohne Zusatz. Etwas größere Differenzen zeigten sich bei einer theoretischen Häcksellänge des Grünschnittroggens von 11 mm (**Abb. 32**). Verglichen mit der Kontrollvariante ohne Zusatz ergaben sich bezogen auf oTM_{zu} eine um 4 % niedrigere Methanausbeute bei chemischem und eine um 3 % höhere Methanausbeute bei biologischem Zusatz. Die Grünschnittroggensilagen mit dem Zusatz MSB-komb. A unterschieden sich durch eine um 7,5 % höhere Methanausbeute signifikant von den Silagen mit dem Zusatz Chem. B (Tab. A53). Dieser Unterschied gleicht sich jedoch bei Berücksichtigung der Silierverluste aus. Auf Basis oTM_{orig} differierten die Methanausbeuten der Vergleichsvarianten mit und ohne Zusatz mit 1 bis 3 % nur marginal (**Abb. 32**).

Mit Bezug auf oTM_{zu} waren bei den untersuchten Grünschnittroggensilagen höhere Methanausbeuten festzustellen als bei dem dazugehörigen Siliergut. Die Differenzen reichten von 1 bis 6 % bei der Häcksellänge 6,8 mm und von 3 bis 18 % bei der Häcksellänge 11 mm (**Abb. 32**). Bei Beachtung der Silierverluste waren jedoch keine signifikanten Unterschiede in der Methanausbeute (Bezug oTM_{orig}) zwischen dem frischen und silierten Grünschnittroggen gegeben (Tab. A54). Ergebnisse ohne Silierzusatz mit einer Lagerdauer bis zu einem Jahr zeigen, dass bei Biomethanisierung der bis 180 Tage gelagerten Silagen die Methanausbeute (oTM_{zu}) mit längerer Lagerdauer ansteigt (**Abb. 33**). Bei Verlängerung der Lagerdauer auf ein Jahr wurden jedoch etwas niedrigere Methanausbeuten verglichen mit den 180-Tages-Varianten gemessen. Die Einbeziehung der Silierverluste hatte eine Minderung der Unterschiede zwischen den Varianten zur Folge. Eine schwach steigende Tendenz der Methanausbeute (oTM_{orig}) mit zunehmender Lagerdauer bis 180 Tage blieb jedoch erhalten (**Abb. 33**).

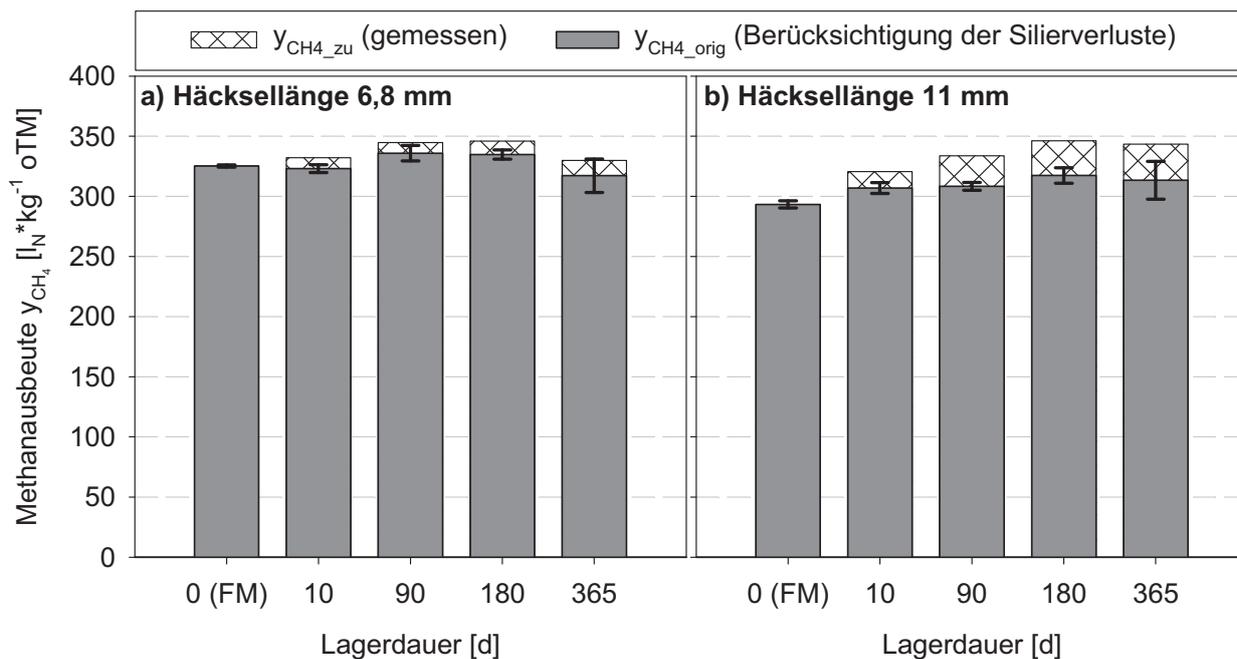


Abb. 33: Methanausbeute von Grünschnittroggen mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 6,8 mm und b) 11 mm bei Variation der Lagerdauer; n=3

Die Methanausbeute $y_{CH_4_zu}$ des **Sudangrases** war von der Häcksellänge und der Lagerdauer abhängig. Der Vergleich der Methanausbeuten von mit 4 mm und 7 mm theoretischer Häcksellänge geerntetem Sudangras ergab mit Ausnahme des Siliergutes mit biologischem Silierzusatz MSB-komb. A um 0,3 bis 11 % höhere Werte bei kürzerer Häcksellänge. Signifikante Unterschiede wurden bei den Silagen ohne Zusatz und 90 Tagen Lagerdauer sowie bei den Silagen mit Zusatz MSB-komb. A und 10 Tagen Lagerdauer ermittelt (Tab. A57). Bei der Silierung lagen die TM-Verluste mit 7 mm Häcksellänge fast ausschließlich über den Verlusten der Varianten mit kürzerer Häcksellänge (**Tab. 20**). Daher stiegen die Differenzen zwischen den Häcksellängenvarianten bei Bezug der Methanausbeute auf oTM_{orig} auf 2 bis 16 % an. Die Wiederholungen des Siliergutes mit dem Zusatz MSB-komb. A und 4 mm Häcksellänge wiesen eine für den ermittelten Trend zu niedriger Methanausbeute auf.

Ähnlich wie bei Mais und Grünschnittroggen war auch bei Sudangras der Einfluss des Silierzusatzes auf die Methanausbeute gering. Die größten Differenzen wurden mit 7 % bzw. 6 % zwischen den Methanausbeuten (Basis oTM_{zu}) der Silagen ohne Zusatz und mit biologischem Zusatz MSB-komb. A bzw. den Silagen mit chemischem Zusatz Chem. B und dem Zusatz MSB-komb. A bei 7 mm Häcksellänge und 10 Tagen Lagerdauer gemessen. Bei Einbeziehung der Silierverluste lagen bei 7 mm Häcksellänge und 10 Tagen Lagerdauer die Methanausbeuten der Silagen mit dem Zusatz Chem. B um 11 % bzw. 10 % über den Methanausbeuten der Silagen ohne bzw. mit biologischem Zusatz MSB-komb. A. Die übrigen Vergleichsvarianten differierten in ihrer Methanausbeute

sowohl bezogen auf oTM_{zu} als auch bezogen auf oTM_{orig} um weniger als 3,5 %. Keiner der gemessenen Unterschiede war statistisch signifikant (Tab. A57, A58).

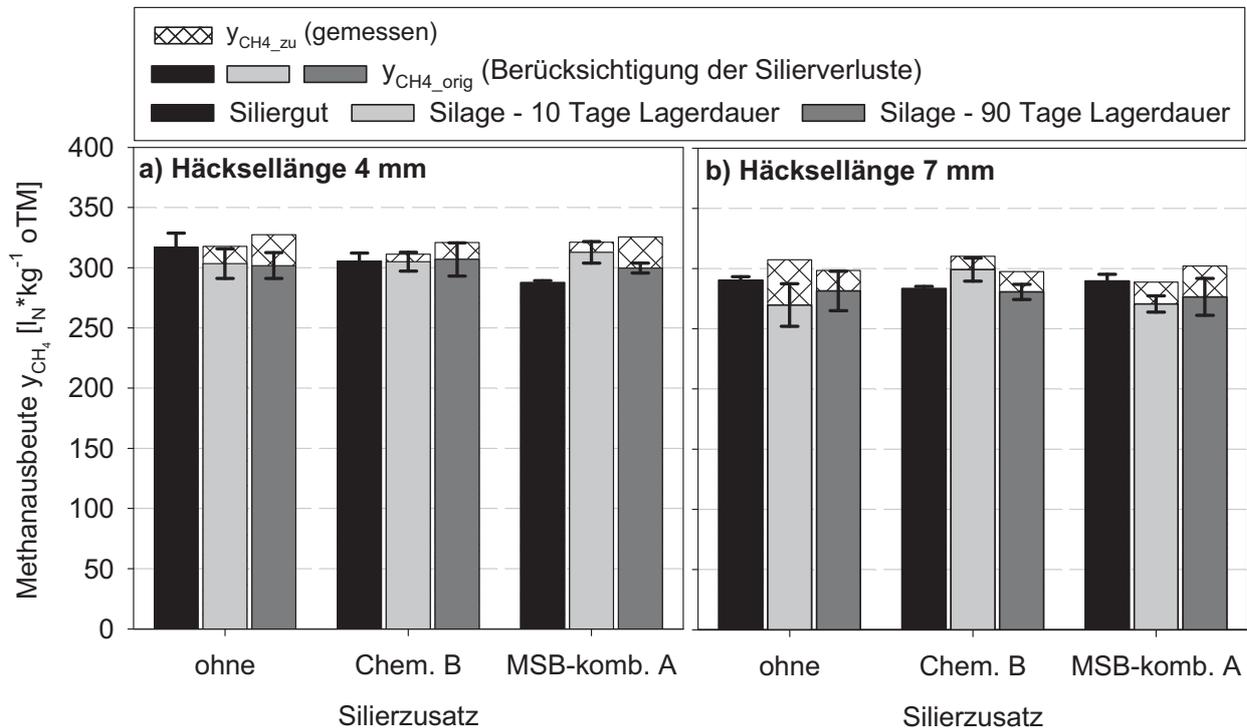


Abb. 34: Methanausbeute von Sudangras mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 7 mm bei Variation von Lagerdauer und Silierzusatz; n=3

Der Vergleich von frischem und siliertem Sudangras ergab mit Bezug auf oTM_{zu} einen Anstieg der Methanausbeute durch die Konservierung um bis zu 13 %. Nach Einrechnung der Silierverluste in die Methanausbeute waren jedoch kein einheitlicher Trend und keine signifikanten Unterschiede zwischen der frischen und silierten Biomasse nachzuweisen. Mit Variation der Lagerdauer konnte ebenfalls kein einheitlicher Trend der Methanausbeute bei Sudangras ermittelt werden (**Abb. 34** und **Abb. 35**). Bezogen auf oTM_{zu} stieg die Methanausbeute der Varianten mit 4 mm Häcksellänge zwar tendenziell geringfügig an, dies bestätigte sich jedoch weder bei der Häcksellänge 7 mm noch bei Einbeziehung der Fermentationsverluste.

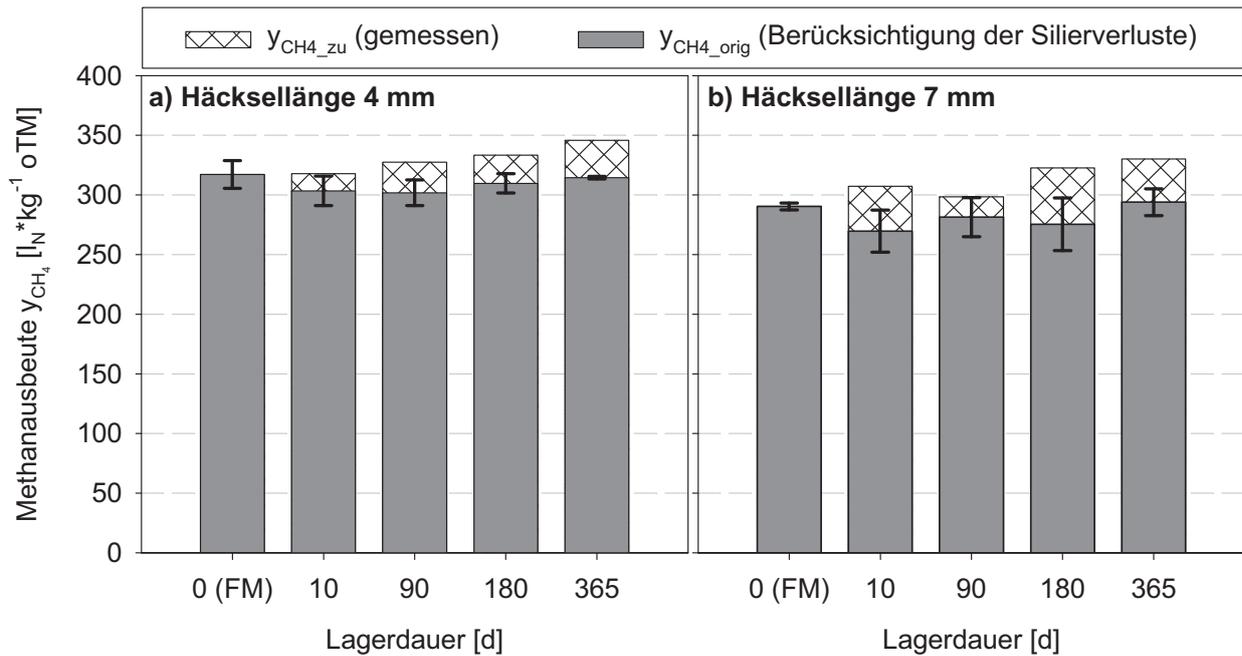


Abb. 35: Methanausbeute von Sudangras mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 7 mm bei Variation der Lagerdauer; n=3

Bei **Triticale** wurde die Methanausbeute mit Bezug auf oTM_{zu} von den drei Prüffaktoren Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer beeinflusst.

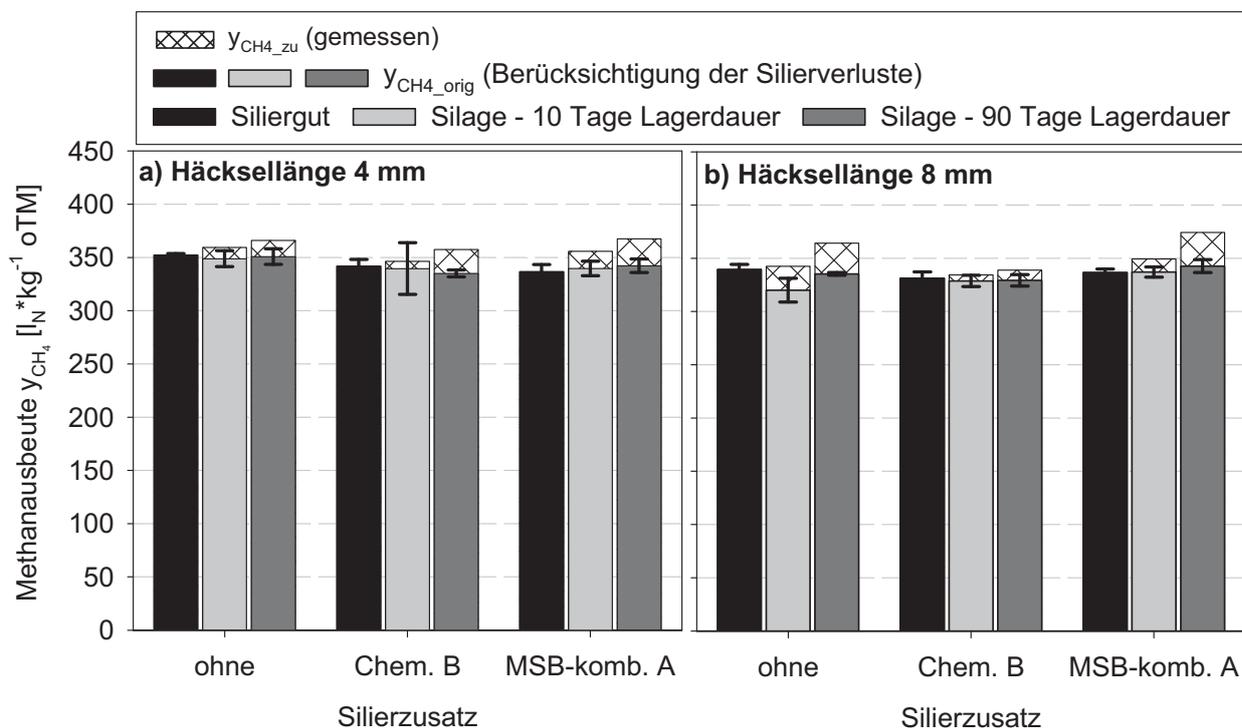


Abb. 36: Methanausbeute von Triticale mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 8 mm bei Variation von Lagerdauer und Silierzusatz; n=3

Der positive Effekt einer kürzeren Häcksellänge auf die Methanausbeute bezogen auf oTM_{zu} war bei Triticale weniger ausgeprägt als bei Sudangras und Grünschnittroggen. Acht der elf möglichen Vergleiche ergaben um 0,1 bis 5,5 % höhere Methanausbeuten

(oTM_{zu}) bei kürzeren Häcksellängen (Tab. A47). Die TM-Verluste bei der Silierung lagen insbesondere ohne Silierzusatz bei den 8-mm-Silagen über den Verlusten der 4-mm-Silagen (Abschnitt 4.3.3.3). Daher vergrößerte die zusätzliche Einrechnung der Silierverluste in die Methanausbeute (oTM_{orig}) den Unterschied zwischen den Häcksellängenvarianten. Bei kürzerem Häckseln wurden bis zu 9 % höhere Methanausbeuten mit Bezug auf oTM_{orig} ermittelt verglichen mit länger gehäckselter Triticale.

Der Silierzusatz beeinflusste die Methanausbeute von Triticale mit Bezugsbasis oTM_{zu} . Der Zusatz des chemischen Siliermittels Chem. B bewirkte bei den Triticalesilagen um 2,3 bis 6,9 % niedrigere Methanausbeuten bezogen auf oTM_{zu} im Vergleich zu den Kontrollvarianten ohne Silierzusatz. Mit biologischem Zusatz MSB-komb. A wurden bis zu 2,7 % höhere Methanausbeuten (oTM_{zu}) im Vergleich zu den Kontrollvarianten ermittelt. Die größten Änderungen in der Methanausbeute mit Bezugsbasis oTM_{zu} ergaben sich bei der größeren Häcksellänge und einer Lagerdauer der Silagen von 90 Tagen. Unter diesen Bedingungen wurden mit dem Zusatz Chem. B signifikant niedrigere Methanausbeuten (oTM_{zu}) erzielt als mit dem Zusatz MSB-komb. A (Tab. A61). **Abb. 36** lässt erkennen, dass bei Berücksichtigung der Silierverluste in der Methanausbeute dieser Trend nicht wiederzufinden ist. Die Methanausbeuten $y_{CH_4_{orig}}$ der Silagen bei Variation des Silierzusatzes unterschieden sich mit im Mittel 2,7 % nur noch geringfügig voneinander.

Die Triticalesilagen wiesen höhere Methanausbeuten bezogen auf oTM_{zu} auf als das dazugehörige Siliergut. Die Differenzen zwischen Siliergut und Silage betragen 0,4 bis 11 % und sind vereinzelt statistisch gesichert (Tab. A61). Bei Beachtung der Gärverluste glichen sich jedoch die Methanausbeuten (oTM_{orig}) von Siliergut und Silagen an. Ohne Silierzusatz und mit chemischem Zusatz lagen die Methanausbeuten $y_{CH_4_{orig}}$ der Silagen um 0,4 bis 5,7 % unter den Methanausbeuten des dazugehörigen Siliergutes. Lediglich bei dem Silierzusatz MSB-komb. A werden von den Silagen um 0,1 bis 1,8 % höhere Methanausbeuten $y_{CH_4_{orig}}$ erzielt. Keine dieser Differenzen ist statistisch gesichert. Mit zunehmender Lagerdauer der Triticalesilagen bis 90 Tage war grundsätzlich ein geringer Anstieg der Methanausbeute mit Bezugsbasis oTM_{zu} zu beobachten (**Abb. 36**). Bei 180 und 365 Tagen Lagerdauer setzt sich dieser Trend jedoch nicht fort (**Abb. 37**). Nach Einrechnung der Silierverluste sind die Unterschiede in der Methanausbeute $y_{CH_4_{orig}}$ bei Variation der Lagerdauer vernachlässigbar gering, so dass kein Effekt der Lagerdauer auf die Methanausbeute $y_{CH_4_{orig}}$ nachgewiesen werden kann (Tab. A62).

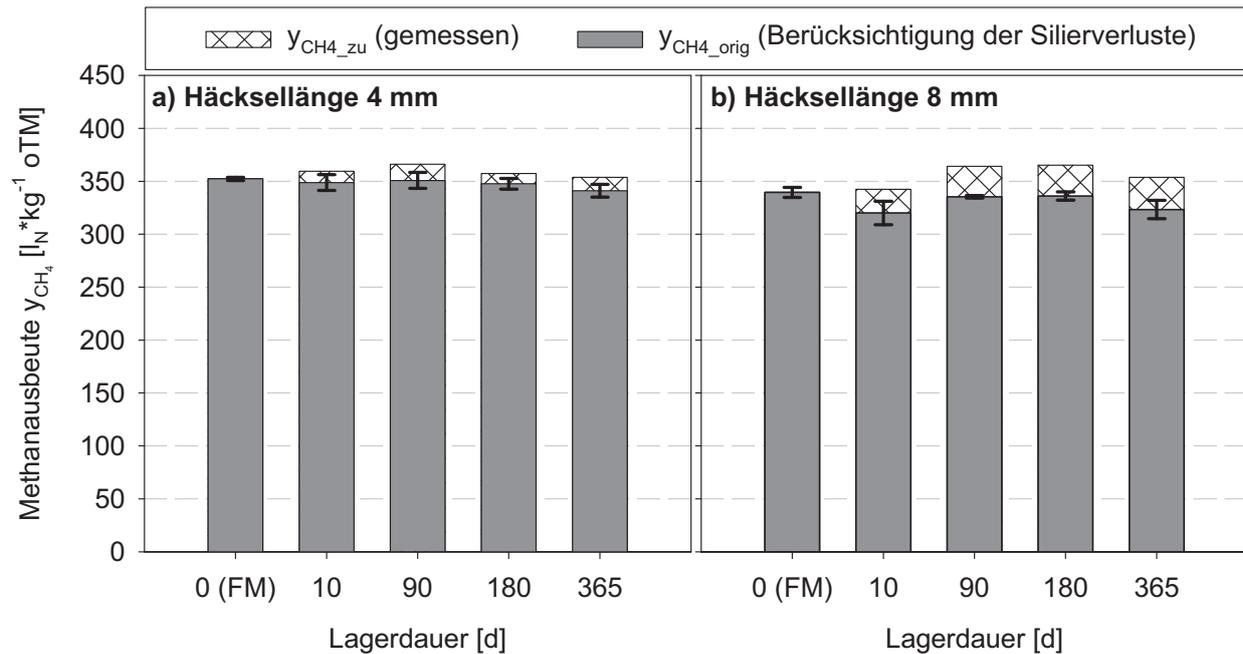


Abb. 37: Methanausbeute von Triticale mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 8 mm bei Variation der Lagerdauer; n=3

Methangehalte

Die mittleren Methangehalte im Biogas wiesen bei Einsatz von Mais als Substrat im Batch-Gärtest eine Spanne von 53,6 bis 57,8 Vol-% und bei Sudangras eine Spanne von 53,1 bis 60,4 Vol-% auf. Bei Grünschnittroggen lagen die Methangehalte mit 57,1 bis 63,0 Vol-% etwas höher. Die Methangehalte zwischen den unterschiedlichen Behandlungen der Triticale variierten mit 55,4 bis 57,9 Vol-% nur gering um weniger als 3 Vol-%.

Paarweise Vergleiche ergaben keine signifikanten Unterschiede im Methangehalt durch Variation der Häcksellänge bei Grünschnittroggen und Triticale (Tab. A55 und A63). Bei Mais- und Sudangrassilagen wurde mit längerer Häcksellänge Biogas mit einem um 1,1 bis 2,6 Vol-% bzw. um 0,7 bis 5,4 Vol-% höheren Anteil an Methan gebildet verglichen mit der kurzen Häcksellänge. Dies traf jedoch nur auf Varianten ohne Silierzusatz bzw. mit chemischem Zusatz zu. Bei Zusatz des biologischen Siliermittels war dieser Trend nicht zu beobachten (Sudangras) bzw. nicht signifikant (Mais).

Der Einfluss des Silierzusatzes auf den Methangehalt im Biogas war bei den geprüften Pflanzenarten nicht konsistent. Die höchsten Methananteile waren bei Grünschnittroggen im Biogas aus Silagen mit biologischem Zusatz MSB-komb. A enthalten. Im Gegensatz dazu wurden bei Sudangras die höchsten Methangehalte bei den Varianten ohne Silierzusatz gemessen. Insbesondere bei Häcksellänge 7 mm und 90 Tagen Lagerdauer der Silagen lagen die Methangehalte im Biogas mit chemischem und biologischem Zusatz niedriger als ohne Zusatz (Tab. A45). Zusammenhänge zwischen Silierzusatz und Methangehalt konnten bei Mais und Triticale nicht gefunden werden.

Silagen wiesen bei Grünschnittroggen ausschließlich und bei Mais und Sudangras überwiegend höhere Methangehalte auf als das dazugehörige Siliergut. Bei Triticale war kein entsprechender Einfluss der Konservierung auf den Methangehalt im Biogas zu erkennen. Mit zunehmender Lagerdauer der Silagen konnte bei keinem der vier untersuchten Pflanzenarten ein eindeutiger Trend zu höheren Methangehalten nachgewiesen werden.

Geschwindigkeiten der Methanbildung

Im Versuchsschwerpunkt III nahmen die über Kurvenanpassung ermittelten Geschwindigkeitskonstanten k bei Mais Werte von 0,151 bis 0,276 d^{-1} und bei Triticale von 0,184 bis 0,288 d^{-1} an. Bei Grünschnittroggen und Sudangras lagen die Geschwindigkeitskonstanten deutlich niedriger bei 0,108 bis 0,161 d^{-1} und 0,102 bis 0,161 d^{-1} . Diese Tendenz war auch im Versuchsschwerpunkt II erkennbar (Abschnitt 4.3.2.4). Die Geschwindigkeit der Methanbildung wurde bei den geprüften Pflanzenarten sehr unterschiedlich beeinflusst.

Ein Effekt der Häcksellänge konnte in Versuchsschwerpunkt III nicht eindeutig nachgewiesen werden. Die Häcksellänge hatte bei Mais und Grünschnittroggen keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Methanbildung. Bei Sudangras wurden ohne Silierzusatz bei kürzerer Häcksellänge etwas höhere Geschwindigkeitskonstanten (0,102 bis 0,128 d^{-1}) errechnet als bei längerer Häcksellänge (0,128 bis 0,160 d^{-1}) (Tab. A45). Die Varianten der Triticale bis 90 Tage Lagerdauer wiesen um bis zu 0,04 d^{-1} höhere Werte bei kürzerer Häcksellänge verglichen mit der längeren Häcksellänge auf. Paarweise Vergleiche ergaben jedoch bei beiden Pflanzenarten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Häcksellängenvarianten (Tab. A60 und A64).

Die Applikation von Silierzusätzen wirkte sich nur vereinzelt auf die Geschwindigkeitskonstante aus. Auffällig waren die insbesondere nach 90 Tagen Lagerdauer zum Teil signifikant höheren Geschwindigkeitskonstanten bei Silagen mit chemischem Silierzusatz Chem. B (Sudangras und Triticale) bzw. die deutlich niedrigeren Werte bei biologischem Zusatz MSB-komb. A (Mais und Triticale).

Der Vergleich der Geschwindigkeitskonstanten von Siliergut und Silagen zeigt ebenfalls unterschiedliche Tendenzen bei den untersuchten Pflanzenarten. Während bei Mais und Triticale die Geschwindigkeit der Methanbildung durch die Silierung überwiegend zunahm, wurde bei Grünschnittroggen und Sudangras keine entsprechende Erhöhung von k ermittelt. Mit zunehmender Lagerdauer nahm bei Triticale die Geschwindigkeit der Methanbildung deutlich ab, während bei den übrigen Pflanzenarten kein gerichteter Einfluss der Lagerdauer auf die Geschwindigkeitskonstante sichtbar war. Ein Zusammenhang zwischen dem Impfmateriale-Verhältnis a_i und der Geschwindigkeit der Methanbildung wurde bei keiner der vier Pflanzenarten beobachtet.

Die maximalen Methanraten im Batch-Gärtest lagen ähnlich wie die Geschwindigkeitskonstanten bei Mais ($51 - 87 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM} \cdot \text{d}^{-1}$) und Triticale ($59 - 92 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM} \cdot \text{d}^{-1}$) am höchsten und bei Grünschnittroggen ($31 - 46 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM} \cdot \text{d}^{-1}$) und Sudangras ($30 - 50 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM} \cdot \text{d}^{-1}$) niedriger. Aus den Methanraten sind bei Mais, Sudangras und Triticale im Wesentlichen zwei Tendenzen abzulesen. Mit kürzerer Häcksellänge wurden höhere maximale Methanraten gemessen als mit längerer Häcksellänge. Dies trifft insbesondere auf das Siliergut zu, bei den Silagen ist diese Tendenz nur vereinzelt zu finden. Silagen wiesen zudem überwiegend höhere maximale Methanraten auf als das entsprechende Siliergut. Bei Grünschnittroggen konnte kein Effekt der untersuchten Einflussfaktoren auf die Methanrate ermittelt werden.

Methanbildungspotenziale

Die durch Anpassung der HILL-Funktion an den gemessenen Kurvenverlauf ermittelten maximalen Methanausbeuten $y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ wichen mit 332 bis $385 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ bei Mais und 341 bis $376 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ bei Triticale um 0 bis maximal $5,6 \%$ und damit geringfügig von den gemessenen Methanausbeuten nach 30 Tagen im Batch-Gärtest ab (Tab. A42 und A48). Bei Grünschnittroggen lagen die Methanbildungspotenziale $y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ zwischen 329 bis $387 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ und überschritten damit die gemessenen Werte um 7 bis 20% etwas deutlicher (Tab. A44). Die größten Unterschiede zwischen den nach 30 Tagen im Gärtest gemessenen Methanausbeuten und den maximalen Methanausbeuten $y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ wurden mit 3 bis 32% bei Sudangras festgestellt. Hierbei lagen die maximalen Methanausbeuten zwischen 332 bis $386 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ (Tab. A46). Damit wiesen die vier geprüften Pflanzenarten bezüglich des Methanbildungspotenzials Werte in gleicher Größenordnung auf.

Die beschriebenen Trends bei Variation von Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer auf die gemessenen Methanausbeuten sind bei Mais, Grünschnittroggen und Triticale im Wesentlichen auch in den Methanbildungspotenzialen $y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ wiederzufinden (Tab. A42, A44 und A48). Eine Angleichung der Methanausbeuten der unterschiedlichen Häcksellängen bei theoretisch unendlich langer Verweilzeit lässt sich aus den gemessenen Kurvenverläufen der Methanbildung für diese Pflanzenarten rechnerisch nicht nachweisen. Die maximalen Methanausbeuten $y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ lagen bei dem Siliergut der kürzer gehäckselten Varianten bei Mais um bis zu 9% , bei Grünschnittroggen um bis zu 12% und bei Triticale um bis zu 2% über den Methanausbeuten der größeren Häcksellängenvarianten. Dies entspricht einer um 2 bzw. 1% geringeren Differenz bei Mais und Triticale und einer um 1% höheren Differenz bei Grünschnittroggen.

Bei Sudangras bestätigten sich hingegen die Effekte der Prüffaktoren auf die gemessene Methanausbeute bei den errechneten Methanbildungspotenzialen nicht. Die Unterschiede zwischen den Häcksellängenvarianten waren bei den errechneten Werten

$y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ geringer bzw. nicht vorhanden. Ein deutlicher Einfluss von Konservierung, Lagerdauer oder Silierzusatz auf das Methanbildungspotenzial $y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ war ebenfalls nicht gegeben (Tab. A46).

4.3.3.5 Zusammenfassung

Die Häcksellänge beeinflusste die gemessenen Verluste im Laborsilo und das Gär säuremuster der Silagen. Bei kürzerer Häcksellänge waren bei den vier untersuchten Pflanzenarten geringere TM-Verluste sowie überwiegend höhere Milchsäuregehalte und geringere Essigsäure- und Alkoholgehalte in den Silagen zu verzeichnen. Bei Grünschnitttroggen wurde durch kürzeres Häckseln eine bessere Gärqualität der Silagen erzielt. Die kurze Häcksellänge wirkte sich positiv auf die Methanausbeute bezogen auf die zugeführte oTM des Siliergutes aus. Bei den Silagen war dieser Trend nur teilweise vorhanden. Die Einrechnung der TM-Verluste führte jedoch auch bei den Silagen fast ausschließlich zu höheren Methanausbeuten $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ mit stärkerer Zerkleinerung. Der Einfluss von Konservierung, Silierzusatz und Lagerdauer auf die Methanausbeute war bei längerer Häcksellänge durchgängig stärker sichtbar als bei den kürzer gehäckselten Varianten.

Die Effekte der geprüften chemischen und biologischen Silierzusätze auf das Gär säuremuster und die TM-Verluste unterschieden sich grundsätzlich entsprechend ihrer voneinander abweichenden Wirkrichtungen. Das chemische Siliermittel Chem. A hatte bei Mais keinen wesentlichen Einfluss auf die gebildeten Gärprodukte und Verluste. Durch den chemischen Silierzusatz Chem. B wurden geringere TM-Verluste sowie geringere Anteile an Gärprodukten, jedoch zum Teil etwas höhere pH-Werte bewirkt. Das biologische Siliermittel MSB-ho mit homofermentativen MSB hatte bei Mais einen verhältnismäßig geringen Effekt zur Folge, während bei Applikation der Silierzusätze MSB-komb. A und MSB-komb. B mit homo- und heterofermentativen MSB deutlich höhere Gehalte an Essigsäure und Alkoholen sowie geringere Milchsäuregehalte im Gär säuremuster und höhere TM-Verluste ermittelt wurden. Mit Bezug auf die zugeführte oTM waren bei Applikation der geprüften chemischen Silierzusätze überwiegend die geringsten, bei Applikation der biologischen Siliermittel mit homo- und heterofermentativen MSB überwiegend die höchsten Methanausbeuten gegeben. Bei Berücksichtigung der Silierverluste glichen sich diese Unterschiede jedoch aus, so dass kein signifikanter Einfluss des Silierzusatzes auf die Methanausbeute mit Bezug auf oTM_{orig} nachgewiesen werden konnte.

Die Silagen wiesen generell höhere Methanausbeuten bezogen auf die zugeführte organische Trockenmasse auf als das entsprechende Siliergut. Durch Einrechnung der Silierverluste wurde dieser Unterschied jedoch eliminiert. Mit Bezug auf oTM_{orig} waren keine signifikanten Differenzen zwischen frischem und siliertem Pflanzenmaterial

vorhanden. Mit zunehmender Lagerdauer der Silagen unter anaeroben Bedingungen nahmen die TM-Verluste zu. Der größte Anteil der Milchsäure wurde innerhalb der ersten 10 Tage gebildet. Bei Mais, Grünschnittroggen und Triticale wurde nach 90 oder 180 Tagen eine vermehrte Bildung von Essigsäure und Alkoholen sowie die Abnahme des Milchsäuregehaltes beobachtet, während bei Sudangras der Milchsäuregehalt bis 365 Tage Lagerdauer stieg. Ab einer Lagerzeit von 180 Tagen nahmen die Gärqualitäten der Silagen zum Teil ab. Mit zunehmender Lagerdauer bis 90 Tage stieg die Methanausbeute bezogen auf die zugeführte oTM fast ausschließlich geringfügig an. Bei einem Teil der Varianten war ein Anstieg der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ bis 180 bzw. 365 Tage Lagerdauer gegeben, häufig nahm die Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ jedoch ab 180 Tage Lagerdauer wieder etwas ab. Bei Einbeziehung der Silierverluste war kein deutlicher Einfluss der Lagerdauer auf die Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ nachweisbar.

4.3.4 Versuchübergreifende Ergebnisse

4.3.4.1 Zusammenhang zwischen chemischer Zusammensetzung und Methanbildung

Der Zusammenhang zwischen chemischer Zusammensetzung und der Methanausbeute sowie der Geschwindigkeit der Methanbildung wurde am Beispiel der Silagen der Versuchsschwerpunkte I bis III ermittelt. Dabei ergaben sich signifikante Zusammenhänge zwischen der Methanausbeute bezogen auf oTM_{orig} und den Gehalten an Rohfett, stickstofffreien Extraktstoffen und Rohfaser sowie den Anteilen an Gerüstsubstanzen. Weiterhin korrelierten die Geschwindigkeitskonstante k mit den Gehalten an Zucker, Rohfett, stickstofffreien Extraktstoffen, Rohfaser und den Anteilen an Gerüstsubstanzen. Der engste Zusammenhang wurde zwischen den ADF-Gehalten, d.h. der Summe aus Lignin und Cellulose und der Methanausbeute bzw. der Geschwindigkeit der Methanbildung berechnet. Dies ist am Beispiel der Silagen des Versuchsschwerpunktes III in **Abb. 38** dargestellt.

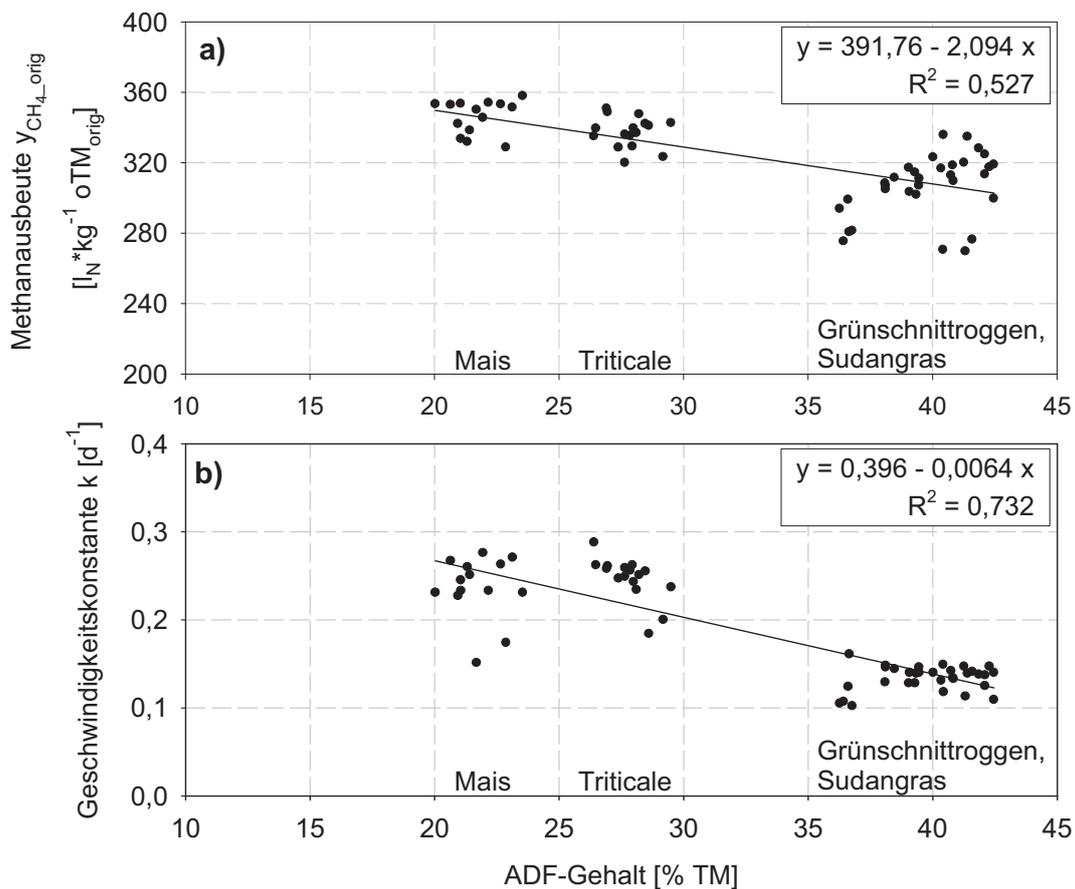


Abb. 38: Zusammenhang zwischen a) dem ADF-Gehalt und der Methanausbeute $y_{CH_4, orig}$ bzw. b) dem ADF-Gehalt und der Geschwindigkeitskonstante k am Beispiel der Silagen des Versuchsschwerpunktes III; $n = 62$

Dabei wird deutlich, dass sich der Zusammenhang zwischen ADF-Gehalt und Methanbildung im Vergleich der Pflanzenarten ergibt. Die Silagen der einzelnen Pflanzenarten weisen jeweils eine Punktwolke auf, wobei innerhalb einer Punktwolke keine klare

Abhängigkeit der Methanbildung vom ADF-Gehalt besteht. Entsprechend werden die Methanausbeuten und Geschwindigkeitskonstanten der Silagen einer Pflanzenart zusätzlich von den Prüffaktoren des Versuchsschwerpunktes beeinflusst.

4.3.4.2 *Zusammenhang zwischen der Änderung der Substratzusammensetzung durch die Silierung und der Methanausbeute*

Die Ergebnisse der Versuchsschwerpunkte I bis III zeigen, dass durch die Umsetzungsprozesse bei der Silierung sowie durch dabei auftretende Verluste Änderungen in der chemischen Zusammensetzung erfolgen. Dies betrifft vorrangig eine leichte relative Zunahme von nicht für die Fermentation genutzten Inhaltsstoffen, wie Rohfett, Rohprotein, Rohfaser und ADL sowie eine Abnahme des NDF-Gehaltes. Weiterhin werden verfügbare Zucker zu organischen Säuren und Alkoholen umgebaut. Um den Einfluss der Häcksellänge auf die Methanbildung in den Hintergrund zu stellen, wurden die Korrelationen zwischen den Änderungen der chemischen Zusammensetzung und der Methanausbeute (Tab. A65) und zwischen dem Gärsäuremuster und der Methanausbeute (Tab. A66) für den Versuchsschwerpunkt III getrennt nach Pflanzenart ausgewertet.

Dabei wurden zwischen den Änderungen der chemischen Zusammensetzung und der Methanausbeute der Silagen keine einheitlichen Trends für die vier geprüften Pflanzenarten ermittelt (Tab. A65). Die Methanausbeuten $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ und $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ sowie der Methangehalt wurden bei Mais, Grünschnittroggen und Sudangras zum Teil von der Änderung des Zuckergehaltes bzw. des Gehaltes an stickstofffreien Extraktstoffen beeinflusst. Bei Mais, Grünschnittroggen und Sudangras wurden zum Teil weite Korrelationen zwischen der Änderung des Rohfasergehaltes bzw. der Gehalte an ADL oder Cellulose und der Methanausbeute errechnet. Die Änderung des Gehaltes an Hemicellulose hatte nur bei Triticale einen signifikanten Effekt auf die Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ und $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ der Silagen. Die Korrelationskoeffizienten lagen allgemein niedrig.

Zwischen den Parametern des Gärsäuremusters und der Methanbildung konnten engere Zusammenhänge ermittelt werden (Tab. A66). Für die geprüften Pflanzenarten mit Ausnahme von Sudangras wurden signifikante Zusammenhänge zwischen der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ und den Gehalten an Essigsäure und einwertigen Alkoholen gefunden. Die höchsten Korrelationskoeffizienten wurden zwischen der Summe an Essigsäure, Buttersäure und einwertigen Alkoholen und der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ der Silagen berechnet (**Abb. 39**). Die Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ der Silagen wurde von dem Gärsäuremuster nicht beeinflusst. Der Methangehalt zeigte mit Ausnahme der Triticale einen signifikanten Zusammenhang zu dem Gehalt an einwertigen Alkoholen. Bei Triticale konnten keine gesicherten Korrelationen zwischen den Parametern des Gärsäuremusters und dem Methangehalt im Biogas der Silagen gefunden werden. **Abb. 39** zeigt beispielhaft für Mais und Triticale im Versuchsschwerpunkt III tendenziell steigende oTM -Verluste der Silagen mit steigenden Gehalten an Essigsäure, Buttersäure und

Alkoholen. Die gleichzeitig zunehmenden Methanausbeuten $y_{CH_4_zu}$ werden durch die höheren Silierverluste kompensiert, so dass bezüglich der Originalmasse kein Zusammenhang zur Methanausbeute ($y_{CH_4_orig}$) besteht.

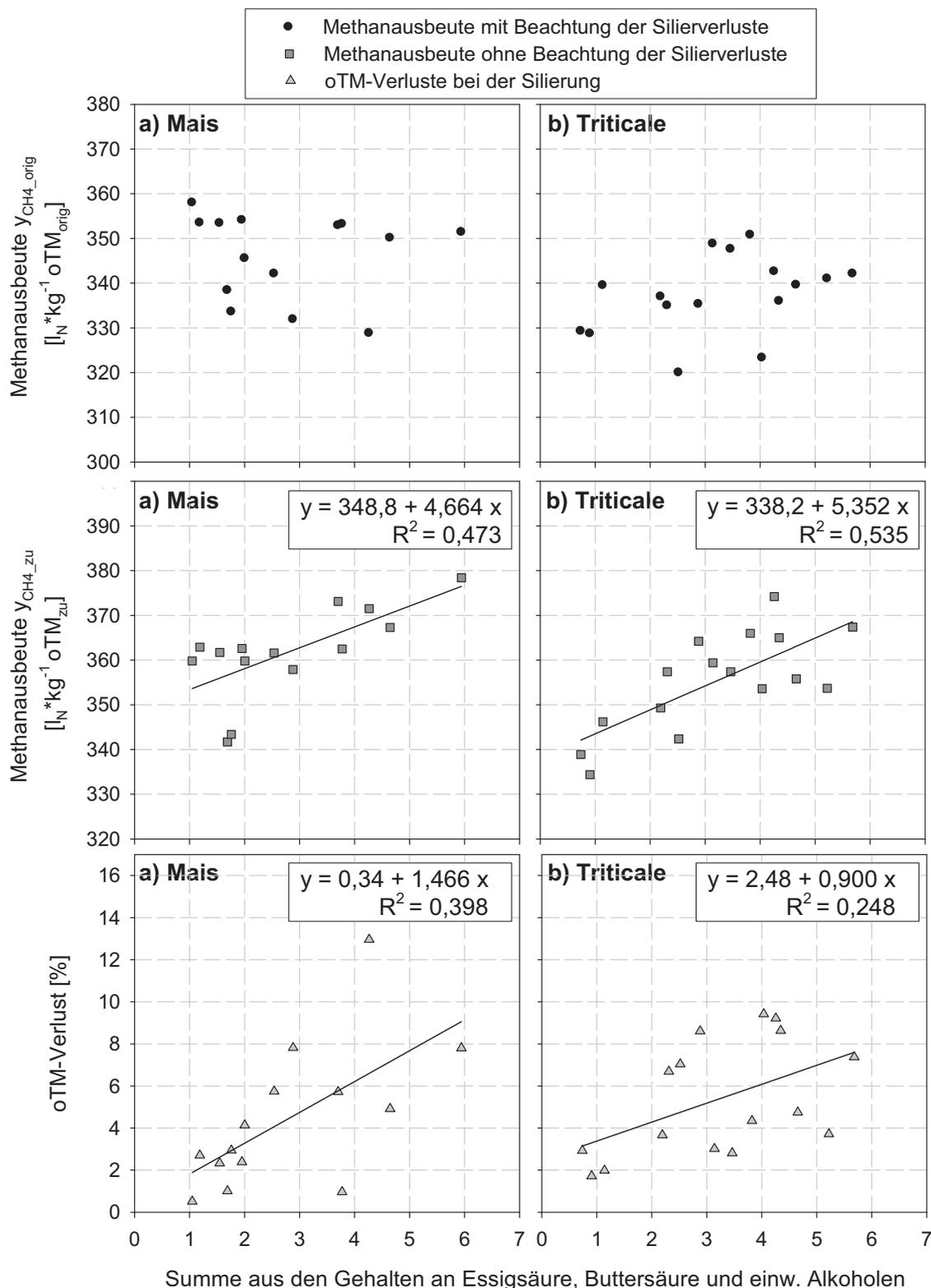


Abb. 39: Zusammenhang zwischen der Summe der Gehalte an Essigsäure, Buttersäure und einwertigen Alkoholen und dem oTM-Verlust bei der Silierung sowie den Methanausbeuten $y_{CH_4_zu}$ und $y_{CH_4_orig}$ am Beispiel der Silagen von a) Mais und b) Triticale des Versuchsschwerpunktes III

4.3.4.3 Einfluss der Silierung auf den Methangehalt

Die Silierung bewirkte überwiegend eine Erhöhung des mittleren Methangehaltes im Biogas. Im Verlauf des Methangehaltes über die Versuchsdauer eines Batch-Gärtests wird deutlich, dass insbesondere innerhalb der ersten Tage des Versuchsansatzes aus der Silage Biogas mit einem höheren Methangehalt gebildet wurde als aus dem frischen Material. Ab etwa dem 10. Tag des Versuchsansatzes glich sich der Methangehalt von Siliergut und Silage an bzw. lag bei dem Siliergut teilweise sogar über dem Methangehalt der Silage. Obwohl sich die Bilder der einzelnen Verlaufskurven des Methangehaltes zwischen den Pflanzenarten und Varianten unterschieden, stimmten sie in diesem Trend generell überein. In **Abb. 40** ist der Verlauf des Methangehaltes über die Versuchsdauer des Batch-Gärtests für die vier geprüften Pflanzenarten in Versuchsschwerpunkt III am Beispiel der groben Häcksellänge und über 90 Tage gelagerten Silagen ohne Silierzusatz dargestellt.

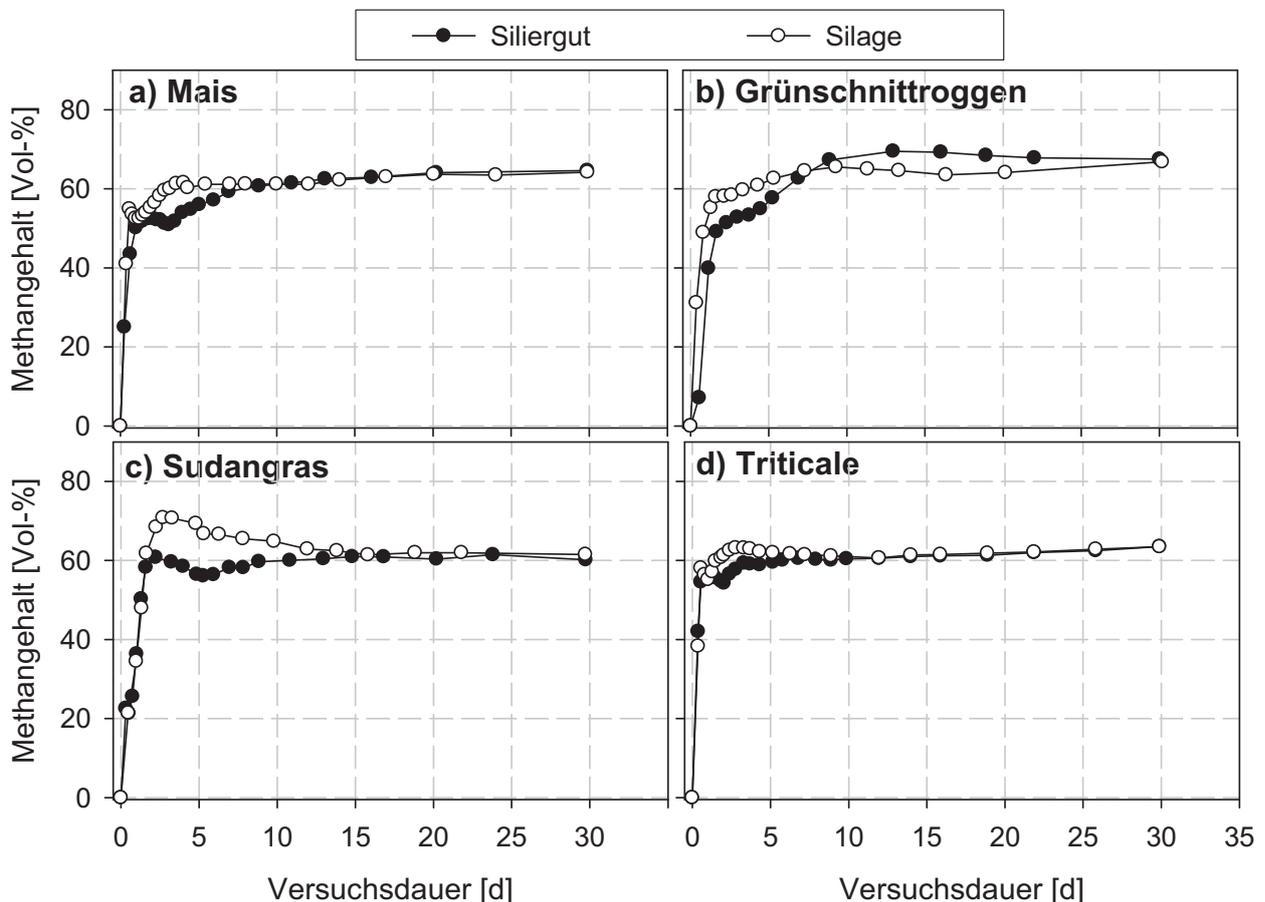


Abb. 40: Verlauf des Methangehaltes im Biogas von Siliergut und Silagen von a) Mais, b) Grünschnittroggen, c) Sudangras und d) Triticale am Beispiel der Varianten mit grober Häcksellänge, 90 Tage Lagerdauer ohne Silierzusatz im Versuchsschwerpunkt III

4.3.4.4 Einfluss der Silierung auf die Geschwindigkeit der Methanbildung

Die Silierung erhöhte die Geschwindigkeit der Methanbildung vorrangig bei Mais und Triticale. Bei Grünschnittroggen konnte nur in Versuchsschwerpunkt II eine Beschleunigung der Methanbildung durch die Konservierung festgestellt werden. Insgesamt wurden keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen der Änderung der chemischen Zusammensetzung (Tab. A67) bzw. dem Gärsäuremuster der Silagen (Tab. A68) und der Geschwindigkeit der Methanbildung gefunden.

4.3.4.5 Zusammenhang zwischen den Feinheitsmerkmalen der Häckselgüter

Für die gesamten untersuchten Häcksellängenproben des Versuchsschwerpunktes I bis III wurde die Korrelation der über Bildanalyse gemessenen Feinheitsmerkmale untereinander ermittelt. **Tab. 22** zeigt, dass zwischen den Feinheitsmerkmalen enge Zusammenhänge bestehen.

Tab. 22: Korrelationsmatrix der bildanalytisch ermittelten Feinheitsmerkmale; n = 48

| | mittlere Partikellänge l_{50} | mittlere Partikelbreite b_{50} | Feinanteil < 4 mm | Grobanteil > 25 mm | mittlere projiz. Oberfläche | spezifische projiz. Oberfläche |
|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| mittlere Partikellänge l_{50} | 1,00 | 0,36 * | -0,77 *** | 0,97 *** | 0,92 *** | -0,60 *** |
| mittlere Partikelbreite b_{50} | 0,36 * | 1,00 | -0,39 ** | 0,28 | 0,65 *** | -0,39 ** |
| Feinanteil < 4 mm | -0,77 *** | -0,39 ** | 1,00 | -0,67 *** | 0,68 *** | 0,45 ** |
| Grobanteil > 20 mm | 0,97 *** | 0,27 | -0,67 *** | 1,00 | 0,88 *** | -0,55 *** |
| mittlere projiz. Oberfläche | 0,92 *** | 0,65 *** | -0,68 *** | 0,88 *** | 1,00 | -0,62 *** |
| spezifische projiz. Oberfläche | -0,60 *** | -0,39 ** | 0,45 ** | -0,55 *** | -0,62 *** | 1,00 |

Es wurden signifikante Zusammenhänge zwischen der mittleren projizierten Oberfläche und den übrigen Feinheitsmerkmalen, insbesondere der mittleren Partikellänge berechnet. Bei grafischer Darstellung von mittlerer Partikellänge und mittlerer projizierter Oberfläche wird für Mais und Sudangras ein etwas steilerer Anstieg der projizierten Oberfläche mit größerer mittlerer Partikellänge als bei Grünschnittroggen und Triticale ersichtlich (**Abb. 41**).

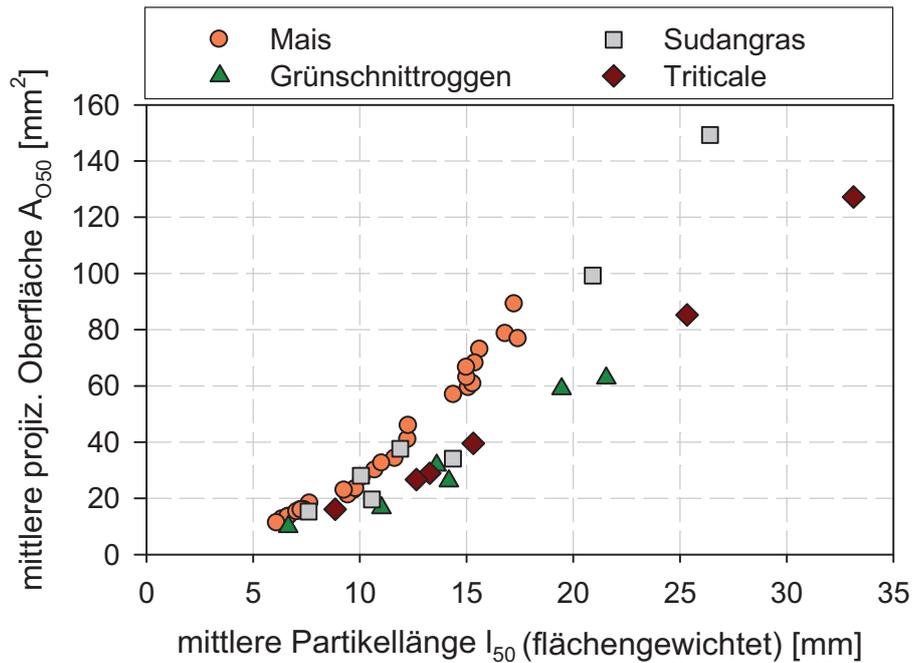


Abb. 41: Zusammenhang zwischen mittlerer Partikellänge und mittlerer projizierter Oberfläche des untersuchten Häckselgutes

Dies ergibt sich aus der etwas größeren Partikelbreite der Mais- und Sudangrashäcksel verglichen mit den Partikeln der Getreidearten. Innerhalb einer Pflanzenart lässt sich ein deutlicher linearer Zusammenhang zwischen mittlerer Partikellänge und mittlerer projizierter Oberfläche erkennen (Abb. 41).

Mit größerer mittlerer Partikellänge einer Probe steigt deren Grobanteil linear an (Abb. 42). Der Feinanteil nimmt hingegen mit geringerer Partikellänge exponentiell zu.

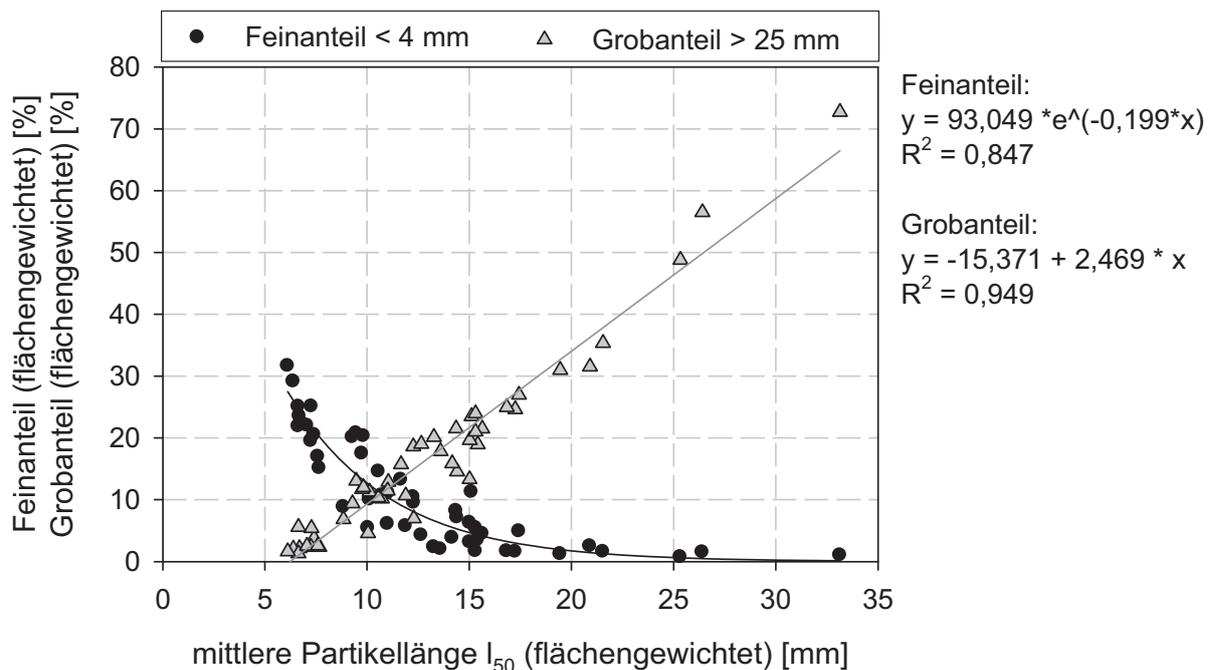


Abb. 42: Zusammenhang zwischen mittlerer Partikellänge und Fein- bzw. Grobanteil der Häckselgüter

Die spezifische projizierte Oberfläche ist ebenfalls signifikant mit den übrigen Parametern korreliert. Sie ist jedoch zusätzlich vom TM-Gehalt der Probe abhängig und weist daher geringere Korrelationskoeffizienten auf als die mittlere projizierte Oberfläche (**Tab. 22**).

4.3.4.6 Zusammenhang zwischen physikalischer Struktur und Methanausbeute

Um den Zusammenhang zwischen der physikalischen Struktur und der Methanausbeute einzuschätzen, wurden Pearsonsche Korrelationskoeffizienten zwischen den bildanalytisch ermittelten Feinheitsmerkmalen und den Methanausbeuten für die Siliergüter und Silagen der Versuchsschwerpunkte I bis III ohne Silierzusatz (90 Tage Lagerdauer der Silagen) getrennt nach Pflanzenart berechnet. Die Ergebnisse (**Tab. 23**) zeigen, dass mit Ausnahme von Grünschnittroggen bei den Siliergütern gesicherte Beziehungen zwischen der mittleren Partikellänge und -breite, dem Grob- und Feinanteil, der mittleren projizierten Oberfläche und der Methanausbeute bestehen. Bei Mais und Triticale wurden zusätzlich signifikante Korrelationen zwischen der spezifischen projizierten Oberfläche und der Methanausbeute des Siliergutes ermittelt.

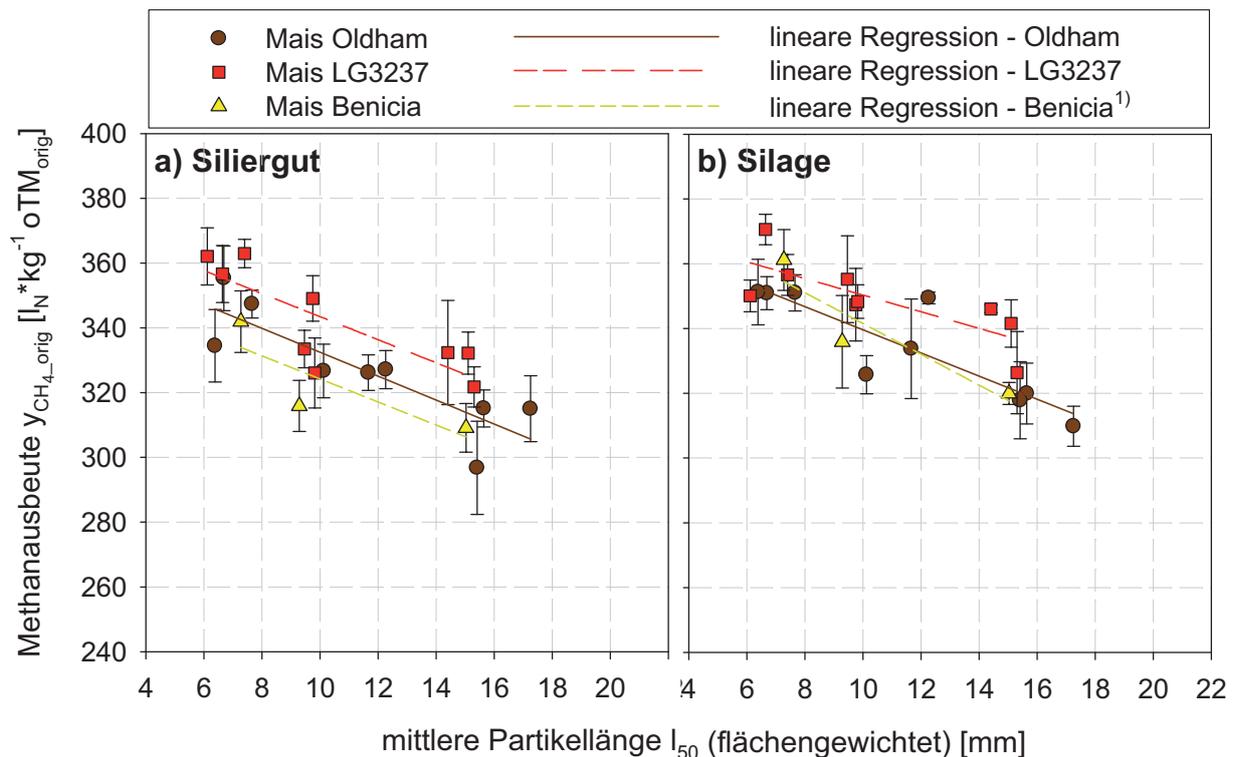
Tab. 23: Pearsonsche Korrelationskoeffizienten zwischen den Feinheitsmerkmalen und den Methanausbeuten von Siliergut und Silagen (ohne Zusatz, 90 Tage Lagerdauer) im Versuchsschwerpunkt I bis III

| | y_{CH4} Siliergut [$l_N \cdot kg^{-1}$] oTM _{zu}] | y_{CH4} Silage [$l_N \cdot kg^{-1}$] oTM _{zu}] | y_{CH4_orig} Silage [$l_N \cdot kg^{-1}$] oTM _{orig}] | y_{CH4} Siliergut [$l_N \cdot kg^{-1}$] oTM _{zu}] | y_{CH4} Silage [$l_N \cdot kg^{-1}$] oTM _{zu}] | y_{CH4_orig} Silage [$l_N \cdot kg^{-1}$] oTM _{orig}] |
|---|--|---|---|--|---|---|
| | Mais; n=29 | | | Grünschnittroggen; n=6 | | |
| mittlere Partikellänge l_{50} [mm] | -0,61 *** | -0,66 *** | -0,67 ** | -0,42 | 0,00 | -0,17 |
| mittlere Partikelbreite b_{50} [mm] | -0,55 ** | -0,64 *** | -0,66 ** | 0,35 | 0,65 | 0,56 |
| Feinanteil < 4 mm [%] | 0,58 *** | 0,67 *** | 0,71 ** | 0,55 | 0,33 | 0,40 |
| Grobanteil > 20 mm [%] | -0,64 *** | -0,66 *** | -0,67 ** | -0,28 | 0,16 | -0,02 |
| mittlere projiz. Oberfläche [mm ²] | -0,58 *** | -0,67 *** | -0,68 ** | -0,21 | 0,22 | 0,05 |
| spez. projiz. Oberfläche [dm ² *100g ⁻¹] | 0,50 ** | 0,40 * | 0,18 | -0,08 | -0,42 | -0,31 |
| | Sudangras; n=7 | | | Triticale; n=6 | | |
| mittlere Partikellänge l_{50} [mm] | -0,86 * | -0,63 | -0,85 * | -0,94 ** | 0,54 | -0,47 |
| mittlere Partikelbreite b_{50} [mm] | -0,76 * | -0,16 | -0,38 | -0,94 ** | 0,67 | -0,44 |
| Feinanteil < 4 mm [%] | 0,89 ** | 0,36 | 0,57 | 0,84 * | -0,73 | 0,88 * |
| Grobanteil > 20 mm [%] | -0,83 * | -0,65 | -0,85 * | -0,93 ** | 0,50 | -0,44 |
| mittlere projiz. Oberfläche [mm ²] | -0,83 * | -0,50 | -0,73 | -0,93 ** | 0,51 | -0,41 |
| spez. projiz. Oberfläche [dm ² *100g ⁻¹] | 0,69 | 0,01 | 0,17 | 0,98 *** | -0,76 | 0,63 |

Mit Ausnahme von Mais wurden für die Silagen keine gesicherten Zusammenhänge zwischen den Feinheitsmerkmalen und der Methanausbeute mit Bezug auf oTM_{zu} festgestellt. Mit Bezug auf oTM_{orig} wurden vorwiegend Zusammenhänge zwischen der Methanausbeute und der mittleren Partikellänge bzw. dem Grob- oder Feinanteil gefunden. Bei Grünschnittroggen konnten keine gesicherten Korrelationen ermittelt werden. Die Ursache hierfür ist der deutliche Unterschied zwischen den Methanausbeuten des Grünschnittroggens in Versuchsschwerpunkt II und III. Wird der Versuchsschwer-

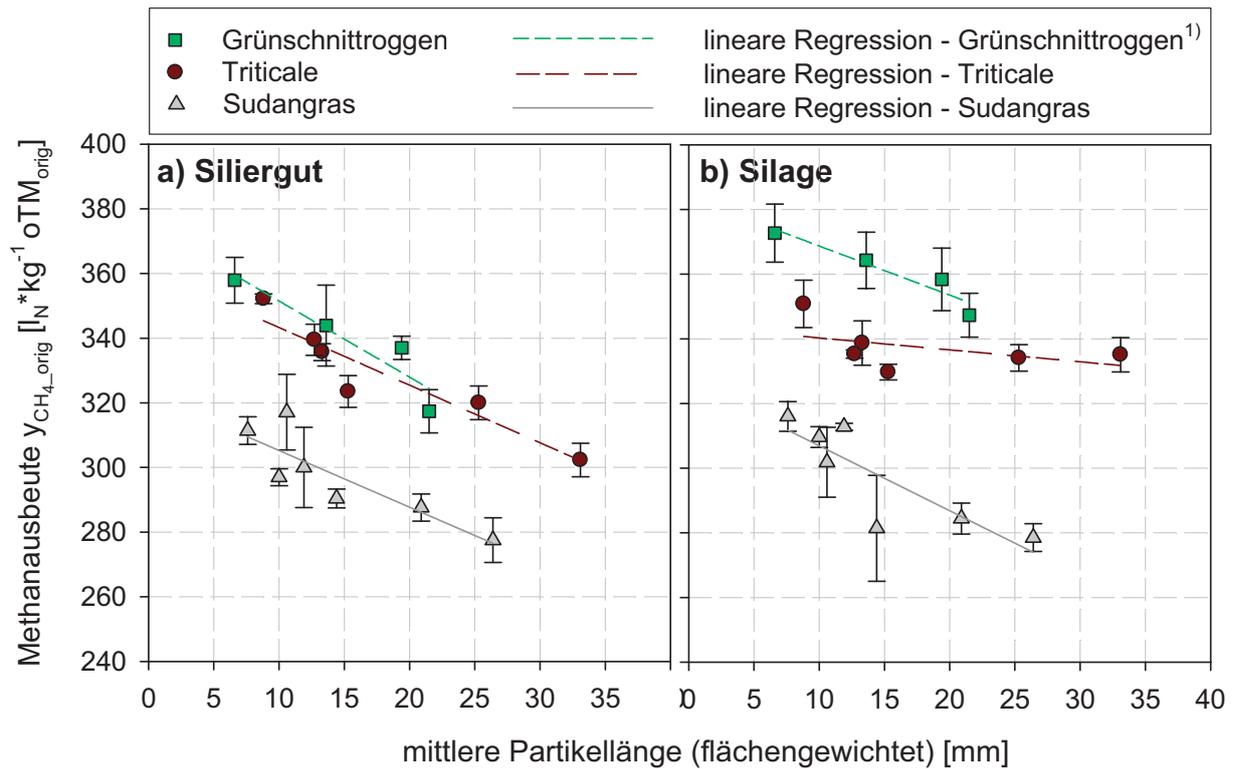
punkt III außer Acht gelassen, dann sind auch Zusammenhänge zwischen der Partikellänge und der Methanausbeute für Grünschnittroggen gegeben (**Abb. 44**).

Zwischen der mittleren Partikellänge und der Methanausbeute wurden überwiegend hohe Korrelationskoeffizienten bestimmt (**Tab. 23**). In **Abb. 43** und **Abb. 44** sind linearen Zusammenhänge zwischen der mittleren Partikellänge und der Methanausbeute mit Bezug auf oTM_{orig} für das Siliergut und die Silagen der geprüften Pflanzenarten dargestellt. Bei Mais wurden die einzelnen Sorten getrennt ausgewertet. Die dazugehörigen Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße sind der **Tab. 24** zu entnehmen. Zudem sind Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße für lineare Zusammenhänge zwischen der mittleren projizierten Oberfläche und der Methanausbeute aufgeführt (**Tab. 24**). Dabei liegen die Bestimmtheitsmaße für die mittlere projizierte Oberfläche durchgängig niedriger als für die mittlere Partikellänge. Dies lässt darauf schließen, dass über die Bewertung der projizierten Oberfläche eines Häckselgutes innerhalb einer Pflanzenart keine bessere Aussage im Hinblick auf die Methanausbeute zu treffen ist als über die Bewertung der mittleren Partikellänge. Bei dem Vergleich verschiedener Pflanzenarten kann hingegen die projizierte Oberfläche eine bessere Aussage liefern (Abschnitt 4.3.4.7).



¹⁾ Regression ohne die Werte des 1. und 2. Erntetermins der Sorte Benicia

Abb. 43: Zusammenhang zwischen mittlerer Partikellänge und Methanausbeute (Bezugsbasis oTM_{orig}) bei a) Siliergut und b) Silagen von Mais im Versuchsschwerpunkt I



¹⁾ Regression ohne die Werte Grünschnittroggen Versuchsschwerpunkt III

Abb. 44: Zusammenhang zwischen mittlerer Partikellänge und Methanausbeute (Bezugsbasis oTM_{orig}) bei a) Siliergut und b) Silagen von Grünschnittroggen, Triticale und Sudangras im Versuchsschwerpunkt II und III

Tab. 24: Lineare Regressionen zwischen der mittleren Partikellänge bzw. der mittleren projizierten Oberfläche und der Methanausbeute (Bezugsbasis oTM_{orig}) von Siliergut und Silagen verschiedener Pflanzenarten

| Pflanzenart (Sorte) | Zu-stand | lineare Regression mittlere Partikellänge | R ² | lineare Regression mittlere projiz. Oberfläche | R ² |
|---------------------------------|----------|---|----------------|--|----------------|
| Mais Oldham | frisch | $y_{CH4_orig} = 369,5 - 3,698 * l_{50}$ | 0,732 | $y_{CH4_orig} = 348,2 - 0,506 * A_{O50}$ | 0,659 |
| | siliert | $y_{CH4_orig} = 375,4 - 3,575 * l_{50}$ | 0,760 | $y_{CH4_orig} = 356,0 - 0,516 * A_{O50}$ | 0,762 |
| Mais LG3237 | frisch | $y_{CH4_orig} = 379,1 - 3,561 * l_{50}$ | 0,658 | $y_{CH4_orig} = 359,4 - 0,557 * A_{O50}$ | 0,536 |
| | siliert | $y_{CH4_orig} = 376,0 - 2,570 * l_{50}$ | 0,609 | $y_{CH4_orig} = 362,8 - 0,434 * A_{O50}$ | 0,578 |
| Mais Benicia ¹⁾ | frisch | $y_{CH4_orig} = 359,8 - 3,559 * l_{50}$ | 0,683 | $y_{CH4_orig} = 339,7 - 0,517 * A_{O50}$ | 0,575 |
| | siliert | $y_{CH4_orig} = 389,1 - 4,755 * l_{50}$ | 0,848 | $y_{CH4_orig} = 363,0 - 0,712 * A_{O50}$ | 0,759 |
| Grünschnittroggen ²⁾ | frisch | $y_{CH4_orig} = 375,0 - 2,353 * l_{50}$ | 0,870 | $y_{CH4_orig} = 362,6 - 0,577 * A_{O50}$ | 0,720 |
| | siliert | $y_{CH4_orig} = 383,8 - 1,517 * l_{50}$ | 0,901 | $y_{CH4_orig} = 376,1 - 0,378 * A_{O50}$ | 0,770 |
| Sudangras | frisch | $y_{CH4_orig} = 322,8 - 1,752 * l_{50}$ | 0,739 | $y_{CH4_orig} = 309,8 - 0,228 * A_{O50}$ | 0,695 |
| | siliert | $y_{CH4_orig} = 327,0 - 2,008 * l_{50}$ | 0,717 | $y_{CH4_orig} = 310,5 - 0,232 * A_{O50}$ | 0,532 |
| Triticale | frisch | $y_{CH4_orig} = 361,1 - 1,782 * l_{50}$ | 0,886 | $y_{CH4_orig} = 345,0 - 0,373 * A_{O50}$ | 0,858 |
| | siliert | $y_{CH4_orig} = 345,0 - 0,369 * l_{50}$ | 0,221 | $y_{CH4_orig} = 341,0 - 0,069 * A_{O50}$ | 0,169 |

¹⁾ Regression ohne die Werte des 1. und 2. Erntetermins der Sorte Benicia; ²⁾ Regression ohne die Werte des Grünschnittroggens in Versuchsschwerpunkt III

4.3.4.7 Zusammenhang zwischen Abreife bzw. Lignifizierung und der Wirkung der Zerkleinerung auf die Methanausbeute

Um die Wirkung der unterschiedlichen Längeneinstellungen beim Häckseln des Erntegutes auf die Methanausbeute zu bewerten, wurde die Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_zu}$ des Siliergutes je mm Verringerung der mittleren Partikellänge bzw. je mm^2 Verringerung der mittleren projizierten Oberfläche durch die Zerkleinerung berechnet. Dies ergibt sich aus dem Anstieg des linearen Zusammenhangs zwischen mittlerer Partikellänge bzw. projizierter Oberfläche und der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_zu}$ des Siliergutes. Dieser wurde getrennt nach Sorte und Erntetermin für den Mais in Versuchsschwerpunkt I und getrennt nach Pflanzenart in Versuchsschwerpunkt II und III kalkuliert. Dabei zeigte sich bei Vergleich der geprüften Pflanzenarten ein deutlicherer Trend der Wirkung der Zerkleinerung auf die Erhöhung der Methanausbeute bei Bewertung der projizierten Oberfläche im Vergleich zur Partikellänge. Daher erfolgt der Bezug im Folgenden auf die mittlere projizierte Oberfläche.

Die in Versuchsschwerpunkt I geprüften Häcksellängenvarianten zeigten einen stärkeren Einfluss der Zerkleinerung auf die Methanausbeute bei späterem Erntetermin und früher reifender Maissorte. Tendenziell nahm die Wirkung der Zerkleinerung mit zunehmendem TM-Gehalt in den Ganzpflanzen zu (**Abb. 45**). Entsprechend war die mechanische Aufbereitung mit zunehmender Reife des Maises effektiver. Da mit späterem Erntetermin der Anteil der Faserbestandteile in den Ganzpflanzen abnahm, wurde in Versuchsschwerpunkt I mit steigenden ADF-Gehalten jedoch eine geringere Wirkung der Zerkleinerung auf die Methanausbeute ermittelt. Im Gegensatz dazu stieg im Vergleich der Pflanzenarten die Erhöhung der Methanausbeute durch stärkere Zerkleinerung mit höherem ADF-Gehalt, d.h. mit höherem Gehalt an Lignin und Cellulose im Siliergut an (**Abb. 45**).

Generell wurde durch die Verringerung der mittleren projizierten Oberfläche des Häckselgutes eine stärkere Erhöhung der Methanausbeute bei Zerkleinerung mittels Feldhäcksler (Versuchsschwerpunkt III) erzielt als bei unterschiedlichem Häckseln im Labor.

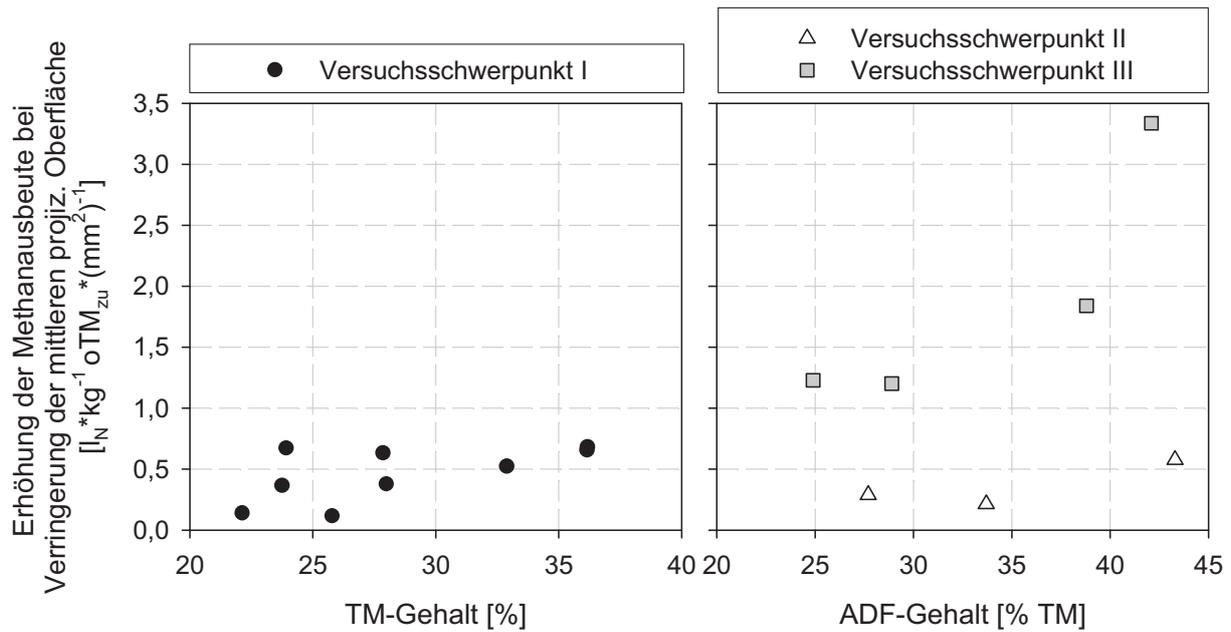


Abb. 45: Zusammenhang zwischen der Wirkung der Zerkleinerung auf die Methanausbeute und dem TM-Gehalt des frischen Mais in Versuchsschwerpunkt I sowie dem ADF-Gehalt des Siliergutes verschiedener Pflanzenarten in Versuchsschwerpunkt II und III

4.3.4.8 Zusammenhang zwischen physikalischer Struktur und Geschwindigkeit der Methanbildung

Gesicherte Zusammenhänge zwischen den bildanalytisch gemessenen Feinheitsmerkmalen und der Geschwindigkeit der Methanbildung konnten vorwiegend für die Siliergüter der Pflanzenarten Mais und Triticale bestimmt werden (Tab. 25).

Tab. 25: Pearsonsche Korrelationskoeffizienten zwischen den Feinheitsmerkmalen und der Geschwindigkeit der Methanbildung von Siliergut und Silagen der Pflanzenarten Mais und Triticale im Versuchsschwerpunkt I bis III

| | k Siliergut [d ⁻¹] | r _{CH₄_max} Siliergut [l _N ·kg ⁻¹ ◦TM _{zu} ·d ⁻¹] | t(r _{CH₄_max}) Siliergut [d] | k Silage [d ⁻¹] | r _{CH₄_max} Silage [l _N ·kg ⁻¹ ◦TM _{zu} ·d ⁻¹] | t(r _{CH₄_max}) Silage [d] |
|---|--------------------------------------|---|---|-----------------------------------|--|--|
| Mais; n=29 | | | | | | |
| mittlere Partikellänge l ₅₀ [mm] | -0,51 ** | -0,51 ** | 0,30 | 0,11 | -0,12 | -0,04 |
| mittlere Partikelbreite b ₅₀ [mm] | -0,38 * | -0,41 * | 0,34 | 0,18 | -0,07 | -0,10 |
| Feinanteil < 4 mm [%] | 0,36 | 0,39 * | -0,27 | -0,18 | 0,05 | 0,10 |
| Grobanteil > 20 mm [%] | -0,58 *** | -0,57 ** | 0,28 | 0,02 | -0,18 | 0,00 |
| mittlere projiz. Oberfläche [mm ²] | -0,47 * | -0,47 ** | 0,35 | 0,12 | -0,12 | -0,05 |
| spez. projiz. Oberfläche [dm ² ·100g ⁻¹] | 0,64 *** | 0,67 *** | -0,51 ** | 0,25 | 0,42 * | -0,27 |
| Triticale; n=6 | | | | | | |
| mittlere Partikellänge l ₅₀ [mm] | -0,74 | -0,78 | 0,89 * | -0,80 | -0,88 * | 0,62 |
| mittlere Partikelbreite b ₅₀ [mm] | -0,82 * | -0,86 * | 0,92 * | -0,85 * | -0,90 * | 0,53 |
| Feinanteil < 4 mm [%] | 0,95 ** | 0,95 ** | -0,83 * | 0,80 | 0,70 | 0,04 |
| Grobanteil > 20 mm [%] | -0,72 | -0,77 | 0,86 * | -0,80 | -0,89 * | 0,61 |
| mittlere projiz. Oberfläche [mm ²] | -0,70 | -0,75 | 0,87 * | -0,78 | -0,88 * | 0,67 |
| spez. projiz. Oberfläche [dm ² ·100g ⁻¹] | 0,86 * | 0,90 * | -0,93 ** | 0,82 * | 0,85 * | -0,47 |

Dabei wurde ein positiver Effekt des Feinanteils des Häckselgutes bzw. ein negativer Effekt steigender Grobanteile und spezifischer projizierter Oberflächen der untersuchten Proben auf die Geschwindigkeitskonstante der Methanausbeute im Batch-Gärtest und die maximale Methanrate festgestellt. Der Zeitpunkt der maximalen Methanrate ($t(r_{\text{CH}_4_{\text{max}}})$) wurde ebenfalls mit zunehmender spezifischer projizierter Oberfläche im Batch-Gärtest zeitiger erreicht. Für die Mais- und Triticalesilagen waren im Gegensatz zu den Siliergütern geringere Korrelationen bzw. keine einheitlichen Zusammenhänge zwischen den Feinheitsmerkmalen und der Geschwindigkeit der Methanbildung gegeben.

4.3.4.9 Zusammenhang zwischen Abreife und Wirkung der Häcksellänge auf die Geschwindigkeit der Methanbildung

Bei Mais im Versuchsschwerpunkt I zeigt sich mit zunehmender Reife in der Tendenz eine verstärkte positive Wirkung einer kürzeren Häcksellänge auf die Geschwindigkeit der Methanbildung. Wie in **Abb. 46** dargestellt, nimmt die Geschwindigkeitskonstante k bei allen drei geprüften Maissorten bei höherem TM-Gehalt mit geringerer mittlerer Partikellänge des Siliergutes stärker zu als bei niedrigerem TM-Gehalt. Dabei verringert sich bei gleicher Partikellänge die Geschwindigkeitskonstante mit höherem TM-Gehalt. Dies erfolgt bei kürzerer Partikellänge weniger stark als bei gröberer Partikellänge. Eine entsprechende Wirkung der Häcksellänge auf die Geschwindigkeit der Methanbildung mit zunehmender Abreife bzw. steigendem TM-Gehalt lässt sich für das Siliergut, jedoch nicht für die Maissilagen, darstellen.

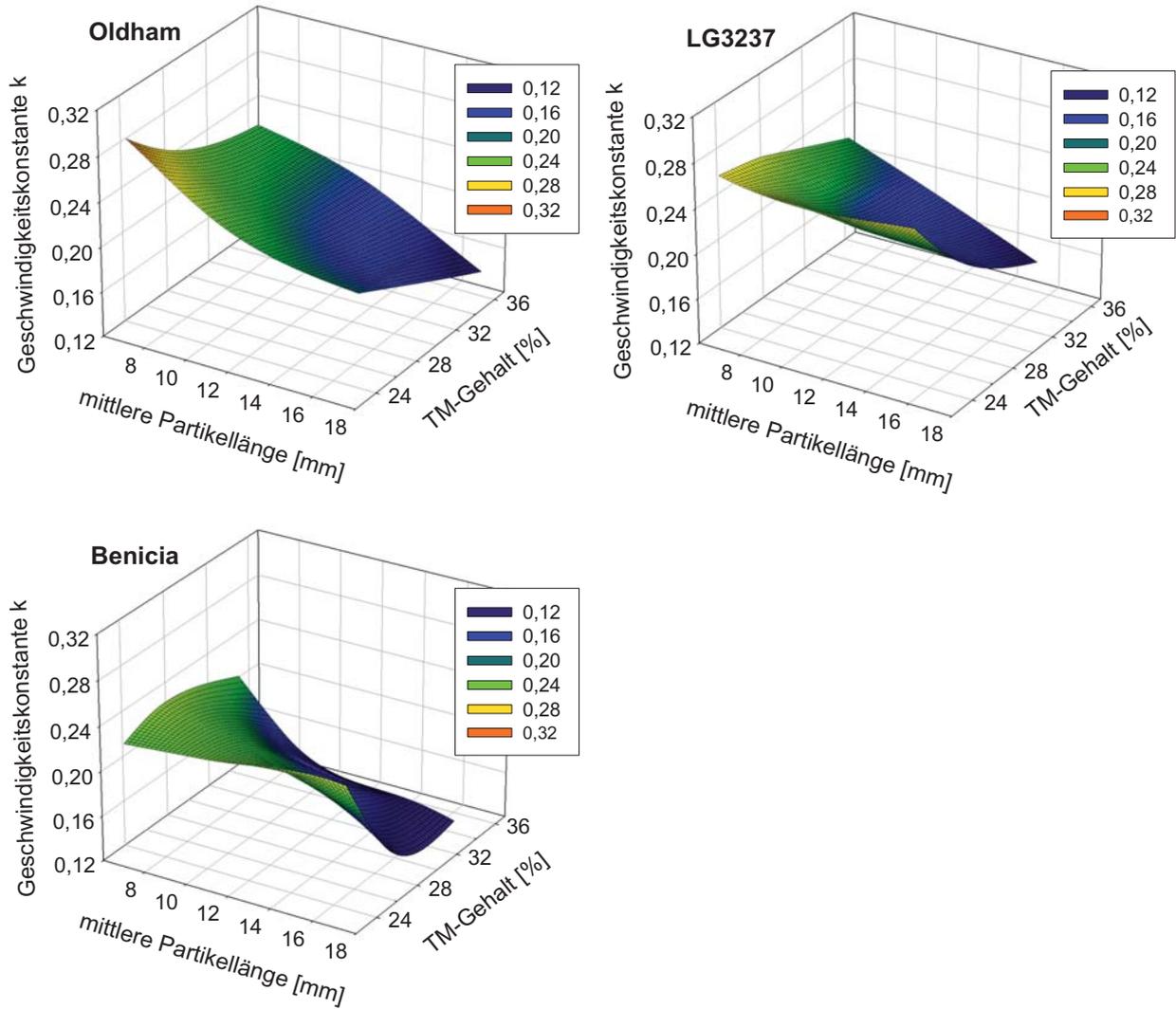


Abb. 46: Wirkung von TM-Gehalt und mittlerer Partikellänge des frischen Maises auf die Geschwindigkeitskonstante k im Batch-Gärtest für die geprüften Maissorten im Versuchsschwerpunkt I

4.4 Diskussion

4.4.1 Substratzusammensetzung der geprüften Pflanzenarten

Die analysierten Gehalte der Rohnährstoffe und Gerüstsubstanzen lagen bei den geprüften Pflanzenarten Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale in einem Bereich, der auch durch Ergebnisse aus der Literatur abgedeckt wird (**Tab. 26**). Der Vergleich der chemischen Zusammensetzung der vier geprüften Pflanzenarten ergab einheitlich einen geringen Rohfettgehalt. Der Rohproteingehalt lag bei Sudangras etwas niedriger als bei den übrigen Pflanzenarten. Die Gehalte an Rohfaser bzw. an Lignin, Cellulose und Hemicellulose nahmen in der Reihenfolge von Mais, Triticale, Sudangras und Grünschnittroggen deutlich zu. Die hohen Faseranteile bei Grünschnittroggen und Sudangras sind auf die hohen TM-Anteile des Stängels an der Gesamtpflanze zum Zeitpunkt der Ernte zurückzuführen (BLACK ET AL. 1980).

Tab. 26: Vergleich der Inhaltsstoffe des Siliergutes der eigenen Untersuchungen mit Literaturangaben; alle Angaben in [% TM]

| Entwicklungsstadium | | oTM | XP | XL | XF | NfE | Zucker | Stärke | NDF | ADF | ADL | Quelle |
|---------------------------|-----|------|------|-----|------|------|--------|--------|------|------|-----|-----------------------|
| Mais | | | | | | | | | | | | |
| Teigreife | Min | 94,9 | 7,2 | 2,3 | 16,3 | 63,1 | 4,9 | 20,0 | 38,8 | 21,2 | 1,9 | eigene Ergebnisse |
| | Max | 97,1 | 9,0 | 3,2 | 21,5 | 67,9 | 12,3 | 29,6 | 55,7 | 25,9 | 4,2 | |
| Beginn bis Ende Teigreife | Min | 94,8 | 7,7 | 2,3 | 18,1 | 60,2 | 7,0 | 13,8 | | | | DLG (1997) |
| | Max | 95,8 | 8,6 | 2,9 | 24,4 | 67,1 | 14,2 | 32,5 | | | | |
| k.A. | Min | 95,9 | 6,3 | 2,3 | 14,0 | | | 24,4 | | | | LEURS (2005) |
| | Max | 97,2 | 7,9 | 3,1 | 21,1 | | | 43,7 | | | | |
| Teigreife | | 96,4 | 7,4 | 1,6 | 22,1 | | | | 49,1 | 25,2 | 2,1 | SCHUMACHER (2008) |
| Teigreife | Min | 95,3 | 7,5 | 0,9 | 19,1 | 55,6 | | | | | | AMON ET AL. (2003b) |
| | Max | 96,8 | 9,8 | 3,4 | 30,3 | 65,1 | | | | | | |
| Grünschnittroggen | | | | | | | | | | | | |
| Beginn Blüte | Min | 93,7 | 9,6 | 1,6 | 37,3 | 43,0 | 6,5 | 0 | 64,9 | 40,5 | 4,0 | eigene Ergebnisse |
| | Max | 94,5 | 11,0 | 1,9 | 39,6 | 45,6 | 8,5 | 2,3 | 69,1 | 43,7 | 4,7 | |
| Beginn Blüte | | 91,5 | 13,1 | 3,1 | 33,1 | 42,2 | 13,0 | 0 | | | | DLG (1997) |
| k.A. | | | 9,3 | 2,4 | | 44,1 | | | 61,4 | 37,6 | 5,6 | BRULÉ ET AL. (2008) |
| Sorghum | | | | | | | | | | | | |
| frühe Milchreife | Min | 89,8 | 3,3 | 1,2 | 26,2 | 55,1 | 15,2 | 0 | 55,1 | 32,1 | 4,4 | eigene Ergebnisse |
| | Max | 95,3 | 6,6 | 2,9 | 30,8 | 60,6 | 29,0 | 10,8 | 62,4 | 41,2 | 7,8 | |
| Ende Blüte | | 91,8 | 7,6 | 2,2 | 34,7 | 47,3 | | 0 | | | | DLG (1997) |
| k.A. (TM = 22 – 30 %) | Min | 89,5 | 8,0 | 1,2 | 27,6 | | | | 60,4 | 36,6 | 5,6 | KAISER (2007) |
| | Max | 94,9 | 11,8 | 2,0 | 34,2 | | | | 67,2 | 40,6 | 7,8 | |
| (TM = 32 – 46 %) | | | | | | | | | 37,9 | 24,6 | 4,2 | (PHILLIP ET AL. 2007) |
| | | | | | | | | | 50,4 | 33,6 | 5,9 | |

Tab. 26: Fortsetzung

| Entwicklungs- stadium | | oTM | XP | XL | XF | NfE | Zucker | Stärke | NDF | ADF | ADL | Quelle |
|--------------------------|-----|------|-----|-----|------|------|--------|--------|------|------|-----|----------------------|
| <i>Triticale</i> | | | | | | | | | | | | |
| Teigreife | Min | 94,7 | 6,7 | 1,2 | 22,9 | 55,7 | 7,7 | 4,4 | 44,1 | 23,9 | 3,9 | eigene Ergebnisse |
| | Max | 95,6 | 8,1 | 2,0 | 29,8 | 62,7 | 12,2 | 18,6 | 51,5 | 31,4 | 5,3 | |
| frühe Teigreife | | 92,7 | | | | | 17,8 | 15,7 | 44,7 | 29,5 | 3,5 | NADEAU (2007) |
| Teigreife | | 95,0 | 6,3 | 2,0 | 26,5 | | | | 49,8 | 31,0 | 3,9 | SCHUMACHER (2008) |

Die Zuckergehalte im Siliergut der eigenen Untersuchungen wiesen überwiegend etwas niedrigere Werte im Vergleich zu den Literaturangaben auf. Als Ursache hierfür sind Unterschiede in der Analysenmethodik sowie eine zeitliche Verzögerung zwischen Ernte und Probenahme des analysierten Pflanzenmaterials zu sehen. Die angewendete Analysenmethode detektiert vorwiegend Glucose, Fructose und Saccharose (LENGERKEN & ZIMMERMANN 1991). Dies entspricht nicht vollständig dem Anteil an wasserlöslichen Kohlenhydraten im Substrat. Hierzu zählen vor allem auch Fructane sowie verschiedene Di-, Tri- und Tetrasaccharide (MCDONALD ET AL. 1991), die bei der angewendeten Methode nicht erfasst werden. Die Probenahme des analysierten Pflanzenmaterials erfolgte zeitgleich mit der Einlagerung in die Laborsilos. Zwischen Ernte und Probenahme lag infolge der Dauer des Ernteprozesses sowie des Transportes ins Labor eine zeitliche Differenz von mehreren Stunden, wobei angenommen werden kann, dass währenddessen bereits ein Abbau von Zuckern durch Restatmung in den Pflanzenzellen stattfand.

Innerhalb der Pflanzenarten wurde bei Mais eine verhältnismäßig große Spanne im Stärkegehalt sowie in den Gehalten an Rohfaser, ADF, NDF und ADL ermittelt. Dies kann mit unterschiedlich ausgeprägter Kolbenbildung (LEURS 2005) bzw. verschiedenen Anteilen von Blatt, Stängel und Kolben an der Ganzpflanze bei Maissorten mit unterschiedlichem Reifeverhalten begründet werden (SCHITTENHELM 2008). Auch zwischen Standorten und Anbaujahren ergeben sich Unterschiede in der Substratzusammensetzung (AMON ET AL. 2007a, SCHITTENHELM 2008).

Bei Sudangras und Triticale wurden ebenfalls größere Differenzen in den Gehalten der Gerüstsubstanzen analysiert, wobei hier keine Sorten-, Standort- und Jahresunterschiede gegeben waren. Auffällig ist zudem bei Sudangras eine große Spanne der oTM-Gehalte, die sich auch bei wiederholter Analyse bestätigte, und der Zuckergehalte. Der Anbau des Sudangrases erfolgte im Jahr 2006 unter sehr trockenen und warmen Witterungsbedingungen in den Monaten Juni und Juli. Dies führte zu einer verzögerten Jugendentwicklung der Pflanzen und zu einem ungleichmäßig entwickelten Bestand. Zur Ernte war überwiegend die Kornfüllungsphase erreicht, ein Teil der Pflanzen befand

sich jedoch noch in der Blüte. Wie auf der fotografischen Darstellung des Siliergutes zu erkennen ist (Abb. A11 und A15), war ein Teil der Blätter des Sudangrases vertrocknet. Es ist anzunehmen, dass die Unterschiede in der Entwicklung innerhalb des Bestandes zu Heterogenität in der Substratzusammensetzung geführt haben. Der oTM-Gehalt dient als Bezugsbasis für die Methanausbeute. Die großen Unterschiede der Sudangrasproben im oTM-Gehalt, die sich vor allem im Versuchsschwerpunkt III bei 7 mm Häcksellänge ergaben, waren Ursache für zum Teil erhebliche Streuungen der Methanausbeute zwischen den Wiederholungen einer Variante. Dabei waren die Unterschiede zwischen den Wiederholungen einer Variante zum Teil größer als die Unterschiede zwischen den Varianten. Entsprechend konnten die Trends, die sich in Versuchsschwerpunkt III für die übrigen Pflanzenarten ergaben, bei Sudangras überwiegend nicht nachgewiesen werden. Die Differenz im Zuckergehalt wurde durch die Feldliegezeit des Sudangrases zur Praxisernte (Versuchsschwerpunkt III) verursacht, während das Sudangras in Versuchsschwerpunkt II direkt nach der Ernte gehäckselt und siliert wurde. Das Anwelken des Erntegutes ist allgemein mit einer Reduktion des Zuckergehaltes durch Zellatmung verbunden (MUCK ET AL. 2003).

Für die Bewertung der Methanausbeute ist der Gehalt an ADF, also der Anteil an Lignin und Cellulose von wesentlicher Bedeutung (Abschnitt 4.4.2). Das C/N-Verhältnis als weitere wichtige Kenngröße lag bei Mais, Grünschnittroggen und Triticale zwischen 25 und 35. Dieser Bereich ist für die Biomethanisierung optimal (WEILAND 2001). Eine Ausnahme bildete Sudangras. Hier wurde das optimale C/N-Verhältnis um den Wert 20 bis 30 überschritten. Der geringe Anteil an Stickstoff kann zu einem unzureichenden Abbau des Kohlenstoffs und damit zu einer geringeren Methanausbeute bei Sudangras beigetragen haben.

4.4.2 Biomethanisierung der geprüften Pflanzenarten

Im Versuchsschwerpunkt I bis III wurden mit Bezug auf die oTM für Mais allgemein die höchsten Methanausbeuten erzielt, gefolgt von Triticale, Grünschnittroggen und Sudangras. Dabei war ein Zusammenhang zwischen den Gehalten an ADF der Pflanzenarten und den Methanausbeuten gegeben. Mit Zunahme des ADF-Gehaltes im Substrat nahm die Methanausbeute ab. Ein ähnlicher Zusammenhang wird auch von PALMOWSKI (2000) beschrieben. Die Untersuchung des Substratabbaus bei der Biomethanisierung von organischen Materialien, wie Apfel, Fleisch, Heu, Kartoffel, Laub, Reis u.ä. führte zu geringeren Abbaugraden bei steigender Konzentration an Zellwandbestandteilen (PALMOWSKI 2000).

Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Methanausbeuten $y_{\text{CH}_4, \text{zu}}$ liegen für die vier geprüften Pflanzenarten Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale im mittleren Bereich der in der Literatur angegebenen Methanausbeuten (**Tab. 27**).

Tab. 27: Literaturangaben zu im Batch-Gärttest ermittelten Methanausbeuten $y_{\text{CH}_4, \text{zu}}$ und Methangehalten c_{CH_4} im Biogas der geprüften Pflanzenarten (Ganzpflanze)

| Pflanzenart | Entwicklungsstadium zur Ernte | TM-Gehalt [%] | $y_{\text{CH}_4, \text{zu}}$ [$l \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$] | c_{CH_4} [Vol-%] | Literatur |
|-------------|-------------------------------|---------------|---|---------------------------|--------------------------|
| Mais | Milchreife - Vollreife | 21-38 | 297-388 | 53-58 | eigene Ergebnisse |
| Mais | k.A. | k.A. | 342 ¹⁾ | 65 | (BADGER ET AL. 1979) |
| Mais | Milchreife - Teigreife | 20-37 | 270-298 | k.A. | (ZAUNER & KÜNTZEL 1986) |
| Mais | Milchreife – physiol. Reife | k.A. | 195-375 | 49-70 ¹⁾ | (AMON ET AL. 2003a) |
| Mais** | k.A. | 20-42 | 330-400 | k.A. | (OECHSNER ET AL. 2003) |
| Mais | Milchreife - Vollreife | 18-48 | 268-366 | k.A. | (AMON ET AL. 2007a) |
| Mais | versch. Erntetermine | 22 - 47 | 245-432 | 44-52 | (KAISER 2007) |
| Mais | Ende Teigreife | 28-31 | 350-410 | 47-57 | (MÄHNERT 2007) |
| Mais | versch. Erntetermine | ca. 10-40 | 282-419 | k.A. | (SCHITTENHELM 2008) |
| Mais | versch. Erntetermine | 21-50 | 307-370 | 50-54 | (SCHUMACHER 2008) |
| Roggen | Beginn Blüte | 22-26 | 293-377 | 57-63 | eigene Ergebnisse |
| Roggen | Blüte - Teigreife | 25-61 | 300-504 ¹⁾ | 61-64 | (HEIERMANN ET AL. 2002b) |
| Roggen | 4-Knoten - Milchreife | 24-34 | 140-243 | k.A. | (AMON ET AL. 2006) |
| Roggen | nach dem Ährenschieben | 22-25 | 400-430 | 52-62 | (MÄHNERT 2007) |
| Roggen | k.A. | k.A. | 332-341 | k.A. | (BRULÈ ET AL. 2008) |
| Grünroggen | k.A. | 19 | 366-381 | 53 | (SCHUMACHER 2008) |
| Sudangras | frühe Milchreife | 27-31 | 278-346 | 53-60 | eigene Ergebnisse |
| Sorghum | k.A. | 27-45 | 280-400 | k.A. | (JERGER ET AL. 1987) |
| Sorghum | k.A. | k.A. | 260-390 | k.A. | (CHYNOWETH ET AL. 1993) |
| Hirse** | k.A. | 24-26 | 310 | <50 | (OECHSNER ET AL. 2003) |
| Sudangras | versch. Erntetermine | 14-35 | 268-344 | 47-52 | (KAISER 2007) |
| Sudangras | k.A. | 33 | 399 | k.A. | (BANEMANN ET AL. 2008b) |
| Triticale | Teigreife | 33-39 | 302-376 | 55-58 | eigene Ergebnisse |
| Triticale | Blüte - Teigreife | 27-66 | 353-563 ¹⁾ | 59-69 | (HEIERMANN ET AL. 2002b) |
| Triticale | 3-4-Knoten - Teigreife | 16-30 | 213-265 | k.A. | (AMON ET AL. 2006) |
| Triticale | Ährenschieben - Teigreife | 16-41 | 289-369 | 53-57 | (SCHUMACHER 2008) |

*frische Biomasse; **Silage; k.A. keine Angabe; ¹⁾ kalkuliert aus Autorenangaben

Dabei weisen die Daten aus der Literatur eine zum Teil erhebliche Spanne auf. Insbesondere für die Getreidearten Roggen und Triticale sind sehr niedrige (AMON ET AL. 2006) und sehr hohe (HEIERMANN ET AL. 2002b) Werte verfügbar. Ähnliches trifft auf den Methangehalt im Biogas zu. Für die geprüften Pflanzenarten sind Methangehalte von etwa 45 bis 70 Vol-% in der Literatur zu finden. Dabei lassen sich aufgrund der großen Differenzen keine eindeutigen Unterschiede zwischen den Pflanzenarten aus den Literaturangaben ableiten. Obwohl die in **Tab. 27** aufgeführten Werte generell in Batch-Gärttests ermittelt wurden, kann der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und die Auswertung der Ergebnisse sehr unterschiedlich erfolgen. Dies führt zu uneinheitlichen

Werten der Labore und macht den direkten Vergleich von Methanausbeuten schwierig. Zudem bedingen eine Vielzahl von Einflussfaktoren, wie die Sorte, der Erntetermin, die Bestandesführung, die Häcksellänge usw., auch innerhalb einer Pflanzenart Unterschiede in der Methanausbeute.

Die aus dem Kurvenverlauf der Methanausbeute im Batch-Gärtest ermittelten Geschwindigkeitskonstanten der Methanbildung lagen im Versuchsschwerpunkt I bis III für Mais zwischen $0,137$ und $0,299 \text{ d}^{-1}$, für Triticale zwischen $0,132$ und $0,288 \text{ d}^{-1}$ und für Grünschnittroggen und Sudangras etwas geringer zwischen $0,103$ und $0,161 \text{ d}^{-1}$ sowie $0,102$ und $0,161 \text{ d}^{-1}$. Entsprechende Versuche aus der Literatur ergeben überwiegend etwas niedrigere Geschwindigkeitskonstanten von $0,10$ bis $0,13 \text{ d}^{-1}$ für Mais und $0,06$ bis $0,16 \text{ d}^{-1}$ für Roggen-Ganzpflanzensilage (MÄHNERT 2007). CHYNOWETH ET AL. (1993) erzielten bei der Biomethanisierung von Sorghum Geschwindigkeitskonstanten von $0,152 \pm 0,017 \text{ d}^{-1}$ und GUNASEELAN (2004) für verschiedene Pflanzenbestandteile von Zuckerhirse (*Sorghum bicolor* (L) Moench) Geschwindigkeitskonstanten von $0,064$ bis $0,091 \text{ d}^{-1}$. Ein möglicher Grund für die etwas höheren Geschwindigkeitskonstanten der eigenen Untersuchungen ist das Verhältnis $\text{oTM}_{\text{Substrat}}$ zu $\text{oTM}_{\text{Inoculum } a_i}$, das häufig höher gewählt wird als in den vorliegenden Untersuchungen (CHYNOWETH ET AL. 1993, GUNASEELAN 2004, MÄHNERT 2007). Höhere Verhältnisse a_i können zu einer geringeren Geschwindigkeit der Methanbildung führen (Abschnitt 4.4.8.1). In Versuchsschwerpunkt II und III lag das Verhältnis a_i für Mais und Triticale um $0,1$ bis $0,2$ über dem Verhältnis a_i für Grünschnittroggen und Sudangras. Dennoch wurden von Mais und Triticale höhere Geschwindigkeitskonstanten erreicht. Entsprechend ist die schnellere Methanbildung bei Mais und Triticale auf einen schnelleren Abbau der Inhaltsstoffe dieser Pflanzenarten, nicht auf die unterschiedlichen Anteile des Impfmaterials zurückzuführen. Es konnte gezeigt werden, dass die Geschwindigkeit der Methanbildung mit steigenden ADF-Gehalten im Substrat abnimmt (**Abb. 38**, Abschnitt 4.3.4.1). Dabei wiesen Mais und Triticale in Versuchsschwerpunkt II und III im Mittel um 9 bis 18% TM geringere Gehalte an ADF auf als Grünschnittroggen und Sudangras. Geringere Gehalte an Zellwandkomponenten, insbesondere an Lignin und Cellulose, können die Abbaugeschwindigkeit bei der Biomethanisierung steigern (PALMOWSKI 2000).

4.4.3 Einfluss der Silierung auf die Biomethanisierung

4.4.3.1 Einfluss der Silierung auf die Methanausbeute

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass für die Diskussion des Einflusses der Silierung auf die Biomethanisierung zunächst die Bezugsbasis der für die Silagen ermittelten Methanausbeute entscheidend ist. Üblicherweise wird die Methanausbeute auf die dem Biogasfermenter zugeführte oTM bezogen. Verluste, die während des Silierprozesses auftreten, bleiben dabei unberücksichtigt. Mit Bezug auf oTM_{zu} wurde bei allen vier geprüften Pflanzenarten fast ausschließlich eine Zunahme der Methanausbeute durch die Silierung ermittelt. Dabei wiesen Maissilagen um maximal 15 %, Grünschnittroggensilagen um maximal 18 %, Sudangrassilagen um maximal 13 % und Triticalesilagen um maximal 23 % höhere Methanausbeuten auf als das entsprechende Siliergut. Eine Vielzahl verschiedener Untersuchungen aus der Literatur bestätigen höhere Methanausbeuten mit Bezug auf oTM_{zu} von Silagen im Vergleich zu dem unsilierten Material (**Tab. 6**, Abschnitt 2.1.3.3; z.B. CHYNOWETH ET AL. 1993, MADHUKARA ET AL. 1993, AMON ET AL. 2003b, HEIERMANN & PLÖCHL 2004, RANI & NAND 2004, KAISER 2007). Es sind jedoch auch gegenteilige Ergebnisse zu finden (z.B. ZUBR 1986, NEUREITER ET AL. 2005, IDLER ET AL. 2007, PAKARINEN ET AL. 2008). Der Effekt der Silierung ist in der Literatur häufig wesentlich höher als bei den vorliegenden Untersuchungen. So werden von AMON ET AL. (2003b) um 36 % höhere Methanausbeuten nach der Silierung von Klee gras, von RANI & NAND (2004) Unterschiede von 51 % in der Methanausbeute von frischer und siliertes Ananasschale und von KAISER (2007) ein Anstieg der Methanausbeute um bis zu 85 % durch die Silierung von Gras angegeben. Entsprechend hohe Differenzen sind in erster Linie auf eine fehlende Korrektur um flüchtige organische Verbindungen des durch Trocknung analysierten TM-Gehaltes zurückzuführen (MUKENGELE & OECHSNER 2007). Insbesondere die Anteile an Essigsäure und Alkoholen der Silagen verflüchtigen sich bereits bei 60°C im Trockenschrank nahezu vollständig. Ein Vergleich der Methanausbeute mit Bezug auf die oTM ohne Korrektur und mit Korrektur der flüchtigen Bestandteile nach den wie in der vorliegenden Arbeit genutzten Korrekturgleichungen von WEIßBACH & KUHLA (1995) ergab eine Überschätzung der Methanausbeute durch fehlende Korrektur um 5 bis 10 % bei Maissilage (MUKENGELE & OECHSNER 2007). Dabei war der Einfluss der TM-Korrektur bei geringeren TM-Gehalten der Silagen höher, da bei höherem Feuchtegehalt mehr Säuren und Alkohole gebildet werden. Dennoch wurde auch bei Anwendung der TM-Korrektur, ebenso wie bei den vorliegenden Ergebnissen des Versuchsschwerpunktes I bis III, ein positiver Einfluss der Silierung auf die Methanausbeute mit Bezug oTM_{zu} ermittelt. Die Methanausbeuten des silierten Mais lagen um 3 bis 6 % über den Methanausbeuten des frischen Erntegutes (MUKENGELE & OECHSNER 2007). SCHUMACHER (2008) erzielte mit TM-Korrektur eine um 15 % höhere Methanausbeute von Maissilage und eine um 23 %

höhere Methanausbeute von Triticalesilage jeweils verglichen mit dem frischen Material. Der gleiche Trend wurde von ZACHARIAS (2008) mit 6 %, 14 % und 40 % höheren Methanausbeuten von Luzerne-, Mais- und Grassilagen verglichen mit den frischen Biomassen mit TM-Korrektur analysiert.

Gesicherte Erkenntnisse über die Ursachen höherer Methanausbeuten nach der Silierung liegen bisher nicht vor. Es wird vermutet, dass durch die Silierung eine Vorhydrolyse von Strukturpolymeren zu organischen Säuren (ZUBR 1986) bzw. ein teilweiser Voraufschluss von Pflanzenmasse (OECHSNER & LEMMER 2009) oder von Rohfaser (AMON ET AL. 2007a) erfolgt. Dadurch wäre ein höherer Anteil verfügbarer Nährstoffe vorhanden (AMON ET AL. 2007a). SCHUMACHER (2008) gibt als Ursache für die niedrigeren Methanausbeuten von frischer Triticale an, dass die Stängelröhrchen und damit das nicht abbaubare Rohlignin weitgehend unversehrt waren. Dies stand im Gegensatz zu dem bei der Silierung verdichtetem Material (SCHUMACHER 2008). Eine Hydrolyse von Strukturpolymeren kann jedoch nicht mit den Stoffwechselprozessen der Milchsäurebakterien begründet werden, da Milchsäurebakterien keine hydrolytische Aktivität gegenüber komplexen Kohlenhydraten aufweisen (ROOKE & HATFIELD 2003).

In der Literatur werden verschiedene Vorbehandlungen von lignocellulosehaltiger pflanzlicher Biomasse beschrieben, die auf das Lösen der Hemicellulose und eine dadurch erhöhte Verfügbarkeit der Cellulose abzielen (BUDDE ET AL. 2008, HENDRIKS & ZEEMAN 2009). Hierzu zählen Vorbehandlungen durch Steam explosion, Behandlungen mit flüssigem heißen Wasser oder chemische Aufbereitungen mit Basen oder Säuren. Die Säurebehandlung kann dabei sowohl mit starken als auch mit schwachen Säuren erfolgen. Es wird davon ausgegangen, dass sich das Lösen der Hemicellulose und die leichtere Erreichbarkeit der Cellulose durch Enzyme positiv auf die Methanproduktion auswirken (HENDRIKS & ZEEMAN 2009). Von verschiedenen Autoren wird der Abbau von Hemicellulose durch die Silierung angeführt. MACGREGOR & EDWARDS (1968) analysierten größere Mengen an Xylose, dem Hauptbestandteil der Hemicellulose landwirtschaftlich genutzter Pflanzen (HENDRIKS & ZEEMAN 2009), und geringere Mengen an Arabinose und Galactose in Gerstesilagen, was sie auf die Hydrolyse von Hemicellulose durch die Silierung zurückführten. Nach McDONALD ET AL. (1991) können die Anteile an Hemicellulose im pflanzlichen Substrat durch die Silierung bis zur Hälfte verringert werden. MORRISON (1979) beobachtete eine Abnahme von Hemicellulose um 10 bis 20 % und eine Abnahme von Cellulose um bis zu 5 % bei der Silierung von Deutschem Weidelgras über eine Dauer von 150 Tagen. Der Ligninanteil blieb dabei unverändert. NADEAU (2007) erzielte eine Verringerung des NDF-Gehaltes bei Getreideganzpflanzensilagen um 7 bis 8 % bei Zusatz von Ameisen- und Propionsäure, jedoch keine niedrigeren NDF-Gehalte bei Silierung ohne Säurezusatz. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden ebenfalls im Mittel um 1,7 bis 8,9 % TM geringere Gehalte an Hemicellulose in den Silagen verglichen mit dem Siliergut ermittelt. Dies entspricht einer im

Vergleich zu den Literaturergebnissen hohen Abnahme des Hemicelluloseanteils um 9 bis 35 % (rel.), wobei jedoch die prozentuale Standardabweichung der Messwiederholungen bei der Analyse des Hemicellulosegehaltes mit 7,3 % verhältnismäßig hoch war.

Von DEWAR ET AL. (1963) wurden Untersuchungen zur Ursache des Hemicelluloseabbaus bei der Silierung von Weidelgras und Knautgras durchgeführt. Dabei wurden der enzymatische Abbau durch Hemicellulasen, die Fermentation der Hemicellulose durch Bakterien sowie die Hydrolyse der Hemicellulose durch organische Säuren als mögliche Ursachen geprüft. Die Studie zeigt, dass das Optimum der Aktivität von Hemicellulasen bei pH 6 liegt. Entsprechend ist bei Silagen mit üblicherweise deutlich niedrigerem pH-Wert kein starker Abbau der Hemicellulose durch Enzyme zu erwarten. Ebenso wurden keine Bakterien gefunden, die eine Spaltung der Hemicellulose bewirken. Als Ursache für die Reduzierung des Hemicelluloseanteils wird eine langsame, aber andauernde Säurehydrolyse insbesondere bei niedrigen pH-Werten und langen Lagerzeiten geschlussfolgert (DEWAR ET AL. 1963).

In den vorliegenden Untersuchungen wurde nur für Triticale ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Änderung des Hemicellulosegehaltes durch die Silierung und der Höhe der Methanausbeute ermittelt. Dabei wurde bei Triticale jeweils die geringste Änderung des Hemicellulosegehaltes analysiert. Da die Gehalte an Cellulose und Lignin im Wesentlichen durch die Silierung unverändert bleiben, und die Hemicellulose verglichen mit Lignin und Cellulose zu einem höheren Anteil bei der Biomethanisierung abbaubar ist (GHOSH & HENRY 1985, BANEMANN ET AL. 2008c), ist eine Erhöhung der Methanausbeute durch Hydrolyse von Hemicellulosen bei der Silierung als unwahrscheinlich einzuschätzen.

Ein weiterer Erklärungsansatz geht davon aus, dass die Bildung der organischen Säuren bei der Silierung die Methanausbeute erhöht, da ein Teil der Säuren direkt oder auf kurzem Weg zu Methan umgebaut werden können und daher besonders gut verwertbar sind (AMON ET AL. 2007a, ZACHARIAS 2008). Hieraus würde jedoch in erster Linie eine erhöhte Geschwindigkeit der Methanbildung resultieren, weniger eine Steigerung der Methanausbeute.

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie lassen sich weitere Thesen bezüglich der Ursachen zur Steigerung der Methanausbeute bezogen auf die zugeführte oTM durch die Silierung ableiten. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Änderungen in der chemischen Zusammensetzung durch die Silierung die Methanausbeute erhöht. Zum Einen erfolgt durch die Silierung vorwiegend der Abbau einfacher Zucker. Damit weisen die Silagen etwas höhere Gehalte an nicht als Gärsubstrat bei der Silierung verwerteten Bestandteilen relativ zum Siliergut auf. Dies betrifft insbesondere Rohfett und Rohprotein, sofern keine Proteolyse bei der Silierung stattfindet. Fette und Proteine tragen theoretisch zu einer höheren Methanausbeute als Kohlenhydrate bei (WEILAND 2001, LINKE ET

AL. 2006). Allerdings nehmen auch die Gehalte an Rohasche und Lignin, also den für die Biomethanisierung nicht verwertbaren Bestandteilen geringfügig zu.

Des Weiteren werden bei der Silierung Fermentationsprodukte gebildet, die zum Teil deutlich höhere theoretische Methanausbeuten aufweisen als die einfachen Zucker als Gärsubstrate bei der Silierung. **Tab. 28** fasst die nach BUSWELL & MUELLER (1952) berechneten theoretischen Methanausbeuten und Methangehalte wichtiger Gärsubstrate und –produkte der Silierung bei vollständiger Verwertung zu Methan und Kohlendioxid zusammen. Die Biomasseneubildung der Mikroorganismen im Gärprozess wurde dabei nicht berücksichtigt.

Tab. 28: Theoretische Methanausbeuten und Methangehalte wichtiger Gärsubstrate und Gärprodukte der Silierung berechnet nach BUSWELL & MUELLER (1952)

| Gärsubstrate / Gärprodukte | | beteiligte Mikroorganismen (Gärprodukte) | theor. Methanausbeute [N*kg ⁻¹ oTM] | Methangehalt [Vol-%] |
|----------------------------|----------------|---|--|----------------------|
| Gärsubstrate | Glucose | | 373 | 50 |
| | Fructose | | 373 | 50 |
| Gärprodukte | Milchsäure | homo- und heterofermentative MSB | 373 | 50 |
| | Essigsäure | heterofermentative MSB, Enterobakterien, Hefen, Clostridien | 373 | 50 |
| | Buttersäure | Clostridien | 636 | 63 |
| | Ethanol | heterofermentative MSB, Enterobakterien, Hefen | 729 | 75 |
| | 1,2-Propandiol | heterofermentative MSB | 589 | 67 |

Hohe Methanausbeuten ergeben sich dabei insbesondere für Gärprodukte, die bei Aktivität von bei der Silierung unerwünschten Mikroorganismen, wie Clostridien, Hefen und Enterobakterien, gebildet werden (**Tab. 28**). Analysen von NUSSBAUM (2008) zu Methanausbeuten der in **Tab. 28** aufgeführten Gärprodukte im Batch-Gärttest bestätigen die theoretischen Werte in ihrer Größenordnung. Auch die Aussage, dass der Energiegehalt von Silagen üblicherweise höher als der Energiegehalt der entsprechenden Siliergüter – besonders bei sehr ausgeprägter Fermentation – ist, stützt diese These (MCDONALD ET AL. 1973, MCGECHAN 1990, WILKINSON ET AL. 2003). Als Grund hierfür wird angegeben, dass mit Ausnahme der homofermentativen Milchsäurebildung TM-Verluste durch stattfindende Umsetzungsvorgänge bei der Silierung immer höher als die Energieverluste sind. Eigene Ergebnisse zeigen, dass zwischen den Gehalten an Essigsäure, einwertigen Alkoholen sowie zum Teil Buttersäure und der Methanausbeute mit Bezug auf die zugeführte oTM signifikante positive Zusammenhänge bestehen (Abschnitt 4.3.4.2). Da Ethanol bzw. Alkohole und die Buttersäure eine hohe theoretische Methanausbeute aufweisen (**Tab. 28**), passt dieses Ergebnis zu dem dargelegten Erklärungsansatz. Buttersäure wurde nur bei wenigen Silagen nachgewiesen,

entsprechend wurden nur teilweise signifikante Korrelationen gefunden. Die Essigsäure weist keine höhere theoretische Methanausbeute als Glucose auf. Von PLÖCHL (2007) wurde jedoch bei Zusatz von Milch- und Essigsäure zu Mais für beide Zusätze eine geringfügig höhere Methanausbeute erzielt als theoretisch nach BUSWELL & MUELLER (1952) zu erwarten war. PIENING ET AL. (2007) ermittelten bei Zusatz von Milchsäure und Essigsäure zu einem Batch-Gärttest 80 % der theoretischen Methanausbeute nach BUSWELL & MUELLER (1952) für Essigsäure, jedoch nur 54 % der theoretischen Methanausbeute nach BUSWELL & MUELLER (1952) für Milchsäure. Die Bildung von Essigsäure bei der Silierung ist zudem häufig mit der Bildung von Gärprodukten mit hohen theoretischen Methanausbeuten, wie Ethanol oder 1,2-Propandiol verbunden. ZACHARIAS (2008) äußert ebenfalls auf Basis von jeweils fünf verschiedenen untersuchten Varianten von Gras- und Maissilage die Vermutung, dass mit steigenden Essigsäure- bzw. Essig- und Propionsäuregehalten im Gär säuremuster die Methanausbeuten zunehmen. Als Grund hierfür wird jedoch gesehen, dass die Essigsäure ein direktes Vorprodukt des Methans ist und Propion- und Buttersäure wiederum direkte Vorprodukte der Essigsäure bei der Biomethanisierung darstellen.

Dennoch lassen sich bei Annahme eines linearen Zusammenhangs nicht mehr als 53 % der Streuung der Methanausbeute der Silagen bei gleichem Ausgangsmaterial (Versuchsschwerpunkt III) durch die Summe an flüchtigen (C_2 - bis C_6 -) Fettsäuren und einwertigen Alkoholen erklären. Eine Ursache hierfür könnte die unvollständige Analyse der gebildeten Gärprodukte sein. Entsprechend konnten in die vorliegende Bewertung nicht alle Substrate einbezogen werden, die eine höhere theoretische Methanausbeute als die bei der Silierung genutzten Gärsubstrate aufweisen. Wichtiges Beispiel hierfür ist das 1,2-Propandiol, das insbesondere bei heterofermentativer Milchsäuregärung Bestandteil des Gär säuremusters sein kann (WEIßBACH & STRUBELT 2008a). Das Nichtberücksichtigen dieser Substanz führt auch zu einer unvollständigen Korrektur des TM-Gehaltes, die sich wiederum auf die Methanausbeute auswirkt (Abschnitt 4.4.8.2). Sowohl die Silierung als auch die Biomethanisierung sind komplexe und vielschichtige biochemische Prozesse, deren Analyse aufwändig ist und nur eine begrenzte Anzahl an Versuchen ermöglicht. Zur Bestätigung des dargelegten Erklärungsansatzes hinsichtlich des Einflusses des Gär säuremusters auf die Methanausbeute $y_{CH_4_zu}$ sind weitere Untersuchungen mit kompletter Analyse des Gär säuremusters notwendig.

Die Ergebnisse wurden an Silagen mit fast ausschließlich guter bis sehr guter Gärqualität ermittelt und gelten daher für diesen Qualitätsbereich. Buttersäuregärung wurde nur vereinzelt beobachtet, ein Zusammenhang zwischen dem Buttersäuregehalt und der Methanausbeute $y_{CH_4_zu}$ konnte daher nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Eine Steigerung der Methanausbeute bezogen auf die zugeführte oTM durch die Silierung bedeutet nicht, dass die Silierung die Menge an Methan erhöht, die aus einer

Masseinheit des geernteten Gutes gewonnen werden kann. Bei der Silierung entstehen Masseverluste, die hierbei berücksichtigt werden müssen. Entsprechend wurden bei den durchgeführten Untersuchungen die Methanausbeuten der Silagen auch auf die vor der Silierung vorhandene oTM des Ausgangsmaterials oTM_{orig} bezogen und damit Silierverluste in die Methanausbeuten mit eingerechnet. Auf Basis von oTM_{orig} ergaben sich mit wenigen Ausnahmen keine statistisch signifikanten Unterschiede in der Methanausbeute zwischen Siliergut und Silagen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Silierung bei Beachtung der dabei entstehenden Verluste keine Erhöhung der Methanausbeute bewirkt, die Verluste hatten jedoch auch keine signifikante Abnahme der Methanausbeute zur Folge. Entsprechend wurden die durch Restatmung und Fermentationsprozesse entstandenen Silierverluste durch höhere Methanausbeuten $y_{CH_4_zu}$ teilweise ausgeglichen. Dies stimmt mit Angaben von NEUREITER (2005) und ZACHARIAS (2008) überein, wonach die Erhöhung der Methanausbeute $y_{CH_4_zu}$ bezogen auf die oTM durch die Silierung die ermittelten TM-Verluste bei der Silierung sogar zum Teil überwogen. In anderen Studien wurden ohne Silierzusatz generell geringere Methanausbeuten der Silagen bei Einrechnung der Silierverluste, jedoch ebenfalls ein teilweiser Ausgleich der Silierverluste, ermittelt (LEHTOMÄKI 2006, PAKARINEN ET AL. 2008).

4.4.3.2 Einfluss der Silierung auf den Methangehalt im Biogas

Die im Versuchsschwerpunkt I bis III untersuchten Silagen wiesen überwiegend etwas höhere Methangehalte auf als das dazugehörige Siliergut. Nur bei wenigen Varianten wurde eine signifikante Erhöhung des Methangehaltes im Biogas durch die Silierung nachgewiesen. Der maximale Unterschied im Methangehalt zwischen frischem und siliertem Material lag bei 7,1 Vol-%. Dies entspricht den in der Literatur beschriebenen Änderungen des Methangehaltes im Biogas durch die Silierung. Von Silagen verschiedener Energiepflanzen wurden fast ausschließlich gleiche bzw. höhere Methangehalte im Biogas gemessen verglichen mit dem frischen Pflanzenmaterial. Der Methangehalt der Silagen lag dabei um bis zu 7,6 Vol-% bzw. um bis zu 7 Vol-% über dem Methangehalt des Siliergutes (ZUBR 1986, HEIERMANN ET AL. 2002a). In einer anderen Studie wurden ebenfalls generell höhere Methangehalte in Biogas aus siliertem Material verglichen mit dem Erntegut erzielt (ZACHARIAS 2008). Luzerne-, Gras- und Maissilagen wiesen um 0,2 bis 2,6 Vol-% höhere Methangehalte im Biogas auf als das dazugehörige frische Substrat. Im Biogas aus siliertem Ananasschale wurden von RANI & NAND (2004) sogar um 10 Vol-% höhere Methangehalte ermittelt als im Biogas des unsilierten Materials.

Als Ursache des erhöhten Methangehaltes von Silagen kann die Reduzierung des in der Anfangsphase der Methanisierung gebildeten Kohlendioxids durch die Silierung gesehen werden, da die Bildung dieses Kohlendioxides bereits weitgehend während des Silierprozesses erfolgt (ZUBR 1986). In Untersuchungen von MÄHNERT ET AL. (2002)

wurden in der Anfangsphase von Batch-Gärtests mit verschiedenen Grasarten höhere Methanausbeuten bei Grassilagen verglichen mit dem frischen Material gemessen. Am 3. Tag des Gärtests lagen die Methangehalte der Silagen um 10 Vol-% über den Methangehalten des Siliergutes, wobei ab Tag 11 bis 14 im Batch-Gärtest gleichbleibende Methangehalte im Biogas aus Siliergut und Silagen ermittelt wurden. Vergleichbare Verläufe des Methangehaltes im Biogas sind für Siliergüter und Silagen in Abschnitt 4.3.4.3 dargestellt. Trotz unterschiedlicher Kurvenverläufe des Methangehaltes im Biogas der geprüften Pflanzenarten, wurden einheitlich bis etwa Tag 10 der durchgeführten Gärtests höhere Methangehalte im Biogas aus dem silierten Material gewonnen. Im Fortlauf des Gärtests glich sich der Methangehalt an.

Die Umsetzung der Hexosen und Pentosen bei der Silierung erfolgt unter Bildung von organischen Säuren und Alkoholen, die sich zum Teil neben einem höheren theoretischen Methanbildungspotenzial auch durch höhere theoretische Methangehalte auszeichnen (**Tab. 28**). Hierzu zählt insbesondere Ethanol. Es konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Ethanolgehalt in den Silagen und dem im Batch-Gärtest analysierten mittleren Methangehalt bei Mais, Grünschnittroggen und Triticale bestätigt werden. Demnach sind höhere Methanausbeuten mit Bezug auf oTM_{zu} nach der Silierung zum Teil auf höhere Methangehalte im Biogas der Silagen zurückzuführen.

4.4.3.3 Einfluss der Silagequalität auf die Methanausbeute

Die in Versuchsschwerpunkt I bis III untersuchten und bewerteten Silagen wiesen überwiegend eine gute bis sehr gute Gärqualität auf. Schlechte bis sehr schlechte Gärqualitäten nach DLG-Schlüssel 2006 wurden nur vereinzelt in Versuchsschwerpunkt II bei Triticale und in Versuchsschwerpunkt III bei Grünschnittroggen festgestellt. Hierbei führte vorrangig ein erhöhter Buttersäuregehalt in den Silagen zu einer negativen Bewertung. Die Bildung der Buttersäure ist in erster Linie auf die Aktivität von Mikroorganismen der Gattung *Clostridium* zurückzuführen, infolgedessen ein Abbau von Zuckern und Milchsäure, verbunden mit einem Anstieg des pH-Wertes, stattfindet (McDONALD ET AL. 1991). Dies war bei den entsprechenden Silagen mit schlechter Gärqualität zu beobachten. Proteolytische Clostridien bewirken den Abbau von Aminosäuren, wobei der Anteil an Ammoniak in der Silage steigt (McDONALD ET AL. 1991). Letzteres war insbesondere bei dem Grünschnittroggen in Versuchsschwerpunkt III mit Häcksellänge 11 mm und einem Jahr Lagerdauer gegeben. Die Stoffwechselprozesse der Clostridien sind allgemein mit hohen Verlusten verbunden.

Aufgrund der geringen Anzahl an Varianten mit schlechter Gärqualität und Wechselwirkungen mit anderen Prüffaktoren bei der Versuchsdurchführung sind Aussagen zum Einfluss der Buttersäuregärung auf die Methanausbeute nur sehr begrenzt möglich. Auffällig ist jedoch, dass das Auftreten der Fehlgärungen nicht zu einer deutlichen

Abnahme der Methanausbeute führte. Mit Bezug auf oTM_{zu} wurden vor allem bei dem Grünschnittroggen unerwartet hohe Methanausbeuten gemessen. Dies stimmt mit Ergebnissen von NEUREITER ET AL. (2005) und HERRMANN ET AL. (2008) überein, wonach Silagen mit erhöhtem Anteil an Buttersäure im Gärsäuremuster hohe Methanausbeuten bezogen auf die zugeführte organische Trockenmasse aufwiesen. Auch ZACHARIAS ET AL. (2008) ermittelten zum Teil, jedoch nicht einheitlich, wesentlich höhere Methanausbeuten (oTM_{zu}) bei fehlvergorenen Silagen im Vergleich zu guten Silagen. Von MÄHNERT ET AL. (2002) wird berichtet, dass trotz verminderter Qualität verschiedener Grassilagen kein Unterschied in der Methanbildung zu den Frischgräsern auftrat. Generell bestätigt dies eine Verwertbarkeit von Buttersäure im Biogasprozess, wobei aus der Buttersäure überdies hohe Methanausbeuten erzielt werden können (**Tab. 28**). Durch erheblich höhere Masseverluste bei der Silierung wird dieser Effekt jedoch sowohl bei den vorliegenden Untersuchungen als auch in der Literatur relativiert (HERRMANN ET AL. 2008). Die Bildung von Buttersäure ist daher keinesfalls als vorteilhaft zu bewerten.

In der Literatur sind auch Angaben zu deutlich geringeren Methanausbeuten bei Silagen mit schlechter Gärqualität zu finden, wobei der Verderb der Silagen nicht näher charakterisiert wird (HEIERMANN ET AL. 2002a, KIESEWALTER ET AL. 2007). Es ist davon auszugehen, dass die Buttersäuregärung unter Praxisbedingungen stärker auf die Silierverluste und damit stärker negativ auf die Methanausbeute bezogen auf oTM_{orig} wirkt als bei Silierung unter Laborbedingungen. Unter suboptimalen Lagerbedingungen wurde eine Abnahme der Methanausbeute bei Beachtung der Silierverluste um bis zu 50 % bzw. 31 % ermittelt (PAKARINEN ET AL. 2008, HERRMANN ET AL. 2009). Weiterhin kann aerober Verderb und Nacherwärmung zu hohen Verlusten und einer starken Minderung der Methanausbeute führen (ZACHARIAS ET AL. 2008). BASERGA & EGGER (1997) beobachteten eine Abnahme der Biogasausbeute von Grassilage um 26 % nach 5 Tagen und um 55 % nach 30 Tagen Lagerung bei fehlendem konsequentem Luftabschluss. Von BANEMANN & NELLES (2008a) werden ein Verlust der Methanausbeute von 14 % bei herkömmlichen Maissilagen und ein Verlust der Methanausbeute von 8 % bei essigsäurereichen Maissilagen durch Nacherwärmung angegeben. Anders als bei den Silierverlusten durch anaerobe Fermentationsprozesse geht bei den Verlusten durch Nacherwärmung die Energie vor allem über Wärmebildung an die Umgebung verloren. Als Nährstoffe für die aeroben Bakterien, Hefen und Schimmelpilze dienen wasserlösliche Kohlenhydrate, organische Säuren und wasserlösliche stickstoffhaltige Bestandteile der Silage, wodurch ein starker Anstieg des Rohfaser- und Aschegehaltes bei aerobem Verderb zu verzeichnen ist (MCDONALD ET AL. 1991). Es ist davon auszugehen, dass sich dies negativ auf die Methanausbeute auswirkt. In eine Bewertung des Einflusses der Silagequalität auf die Methanausbeute wäre zukünftig auch die aerobe Stabilität der Silage mit einzubeziehen.

Neben dem Gehalt an Buttersäure als unerwünschtes Gärprodukt geht auch ein erhöhter Essigsäuregehalt negativ in die Beurteilung der Gärqualität von Silagen ein (DLG 2006). Die Essigsäure kann ebenfalls ein Produkt der Stoffwechselaktivität von Clostridien in nitrathaltigem Pflanzenmaterial sein und weist auf erhöhte Verluste bei der Silierung hin. Der Bewertungsschlüssel gibt jedoch nicht nur Hinweise über das Ausmaß an Verlusten und die Lagerstabilität von Silagen unter anaeroben Bedingungen, sondern berücksichtigt auch Kriterien der Tierernährung und –gesundheit. Ein deutlich erhöhter Essigsäuregehalt kann hier zu einer Minderung der Futteraufnahme führen. Für Biogassilagen ist der Gehalt an Essigsäure differenziert zu betrachten. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Essigsäure als direktes Ausgangssubstrat der Methanbildner im Biogasprozess sehr gut verwertbar und mit hohen Methanausbeuten bezogen auf die zugeführte oTM verbunden ist. Auch bei Einbeziehung der Gärverluste wurde durch erhöhte Essigsäuregehalte keine Abnahme der Methanausbeute (Bezug auf oTM_{orig}) bewirkt. Weiterhin kann Essigsäure die aerobe Stabilität von Silagen verbessern und damit Verluste durch Nacherwärmung verringern (OUDE ELFERINK ET AL. 2001, DANNER ET AL. 2003). Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wäre eine Anpassung des Bewertungsschlüssels für die Nutzungsrichtung Biogasproduktion zu empfehlen. Hierzu sollten jedoch weitere Untersuchungen mit einer größeren Bandbreite von Substraten und Unterschieden im Gärsäuremuster durchgeführt werden.

4.4.3.4 Einfluss der Silierung auf die Geschwindigkeit der Methanbildung

Bei Mais und Triticale ergab sich bei allen Versuchsschwerpunkten eine deutliche Erhöhung der Geschwindigkeit der Methanbildung durch die Silierung. Dies fand sich in höheren Geschwindigkeitskonstanten k und höheren maximalen Methanraten $r_{\text{CH}_4_max}$ der silierten Biomasse gegenüber dem frischen Pflanzenmaterial wieder. Bei Grünschnittroggen wurde nur in Versuchsschwerpunkt III eine schnellere Methanbildung nach der Silierung beobachtet, während die Konservierung bei Sudangras die Geschwindigkeit der Methanbildung nicht beeinflusste. Von HEIERMANN ET AL. (2002b) wird eine schnellere Methanbildung von siliertem Ganzpflanzengetreide im Vergleich zu der frisch geernteten Biomasse erwähnt. Dies wird jedoch nicht näher quantifiziert. In Untersuchungen von CHYNOWETH ET AL. (1993) wurde bei silierten Energiepflanzen mit nur einer Ausnahme eine höhere Geschwindigkeitskonstante im Batch-Gärtest ermittelt verglichen mit der frischen Biomasse. Nach Einschätzung der Autoren hatte die Silierung jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Kinetik der Biogasbildung. In anderen Studien wurde ebenfalls kein wesentlicher Unterschied in der Geschwindigkeit der Methanbildung zwischen Siliergut und Silagen beobachtet (ZUBR 1986, NEUREITER ET AL. 2005).

In Untersuchungen von PIENING ET AL. (2007) und BANEMANN ET AL. (2009) konnte ein sehr rascher Abbau von Glucose bzw. Zuckern, die als Gärsubstrat bei der Silierung

dienen, nachgewiesen werden. Ebenso wurde Essigsäure sehr schnell verwertet, während der Abbau der Milchsäure erst nach einer Verzögerung von 4 Tagen begann (PIENING ET AL. 2007). Es ist daher denkbar, dass den Fermentationsprozessen bei der Silierung sowohl eine Beschleunigung der Biomethanisierung durch Bildung schnell abbaubarer Produkte, als auch eine Verringerung der Geschwindigkeit der Methanbildung bei großen Anteilen an Milchsäure folgt. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Parametern des Gär säuremusters bzw. der Änderung der chemischen Zusammensetzung durch die Silierung und der Geschwindigkeitskonstante k bzw. der maximalen Methanrate $r_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ konnte jedoch nicht gefunden werden. Aufschluss hierüber würden detaillierte Versuche zum Abbau der einzelnen Inhaltsstoffe des frischen und konservierten Pflanzenmaterials geben.

4.4.4 Einfluss der Abreife auf die Silierung und Biomethanisierung bei Mais

4.4.4.1 Einfluss der Abreife auf die Silierung bei Mais

In Versuchsschwerpunkt I wurden Maissilagen einer frühen, mittelfrühen und mittelspäten Silomaissorte zu jeweils drei Ernteterminen zwischen Milchreife und physiologischer Reife erstellt. Dabei nahmen mit zunehmender Abreife die Milchsäuregehalte und Gesamtsäuregehalte in den Silagen sowie die TM-Verluste bei der Silierung tendenziell ab. Dies entspricht dem bekannten Zusammenhang einer rückläufigen Intensität der Säurebildung mit steigenden TM-Gehalten im Erntegut (DERNEDDE & HONIG 1977). Insbesondere zum frühen Erntetermin sind im Mais hohe Anteile an verfügbaren Zuckern enthalten, die zu einer verstärkten Aktivität der Milchsäurebakterien und damit zu erhöhten Milchsäuregehalten und geringen pH-Werten führen (MCDONALD ET AL. 1991). GIARDINI ET AL. (1976) ermittelte aus Daten von 500 Maissilagen eine lineare Abnahme des Milchsäure- und Gesamtsäuregehaltes und der TM-Verluste mit steigendem TM-Gehalt. Ein ähnlicher Zusammenhang wird von XICCATO ET AL. (1994) für Daten von 96 Maissilagen angeführt. Hier wird jedoch bei Überschreiten eines Optimums bei einem TM-Gehalt von 35 % im Mais ein erneuter Anstieg der Verluste festgestellt. Abnehmende Milchsäuregehalte und TM-Verluste von der Milchreife bis zur physiologischen Reife des Mais werden auch von anderen Autoren berichtet (BAL ET AL. 1997, JOHNSON ET AL. 2003b). Zudem werden häufig die Abnahme des Essigsäuregehaltes, des Ethanolgehaltes und die Zunahme des pH-Wertes bei späterem Erntetermin angegeben (GIARDINI ET AL. 1976, XICCATO ET AL. 1994, BAL ET AL. 1997, JOHNSON ET AL. 2003b). Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Abreife und Essigsäuregehalt, Gehalt an Ethanol sowie dem pH-Wert war jedoch im Versuchsschwerpunkt I nicht erkennbar. Der pH-Wert lag bei allen Silagen auf einem niedrigen Niveau.

Der frühe Erntetermin in Versuchsschwerpunkt I wurde bei einem TM-Gehalt von 22 bis 24 % durchgeführt. Erst ab einem TM-Gehalt von 25 bis 29 % wird die Bildung von Sickersaft bei der Silierung unterbunden (MCDONALD ET AL. 1991). In den durchgeführten Laborversuchen wurde eine Sickersaftbildung nicht berücksichtigt, da die Flüssigkeit in den Siliergläsern verblieb. In der Praxis können jedoch mit Sickersaft wertvolle Nährstoffe für die Methanisierung verloren gehen, wenn die Flüssigkeit nicht aufgefangen und der anaeroben Vergärung zugeführt wird. Durch höhere Sickersaftverluste erhöhen sich die Anteile der Zellwandbestandteile in der Silage (MCDONALD ET AL. 1991), was sich wiederum negativ auf die Methanausbeute auswirkt. Aus Sicht der Konservierung ist bei Mais ein Erntetermin bei einem TM-Gehalt deutlich unter 30 % daher nicht zu empfehlen.

4.4.4.2 Einfluss der Abreife auf die Biomethanisierung von Mais

Die Variation der Silomaisorte und des Erntezeitpunktes zwischen Milchreife und physiologischer Reife sowie die damit verbundenen Unterschiede in der Substratzusammensetzung und im Fermentationsverlauf bei der Silierung hatten nur relativ geringe Auswirkungen auf die Methanausbeute mit Bezug auf die oTM. Dabei wurden von der mittelfrühen Maissorte etwas höhere Methanausbeuten als von den beiden anderen Maissorten analysiert. Dies stimmt in der Tendenz mit Ergebnissen aus anderen Studien zur Bewertung des Methanbildungspotenzials verschiedener Maissorten überein. Von HEIERMANN & PLÖCHL (2004) werden etwas höhere Methanausbeuten von zwei mittelfrühen Sorten gegenüber einer frühen Sorte angeführt. SCHUMACHER ET AL. (2006) stellten bei Untersuchung neun verschiedener mittelfrüher bis spätreifer Silomaisorten eine Abnahme der Methanausbeute mit steigender Reifezahl der Sorten fest. Eine mögliche Ursache für die höhere Methanausbeute der mittelfrühen Sorte LG3237 könnte auch die effektive Häcksellänge sein. Bei der Sorte LG3237 wurden jeweils die geringsten Partikellängen und Partikelbreiten verglichen mit den beiden anderen Maissorten gemessen. Dabei können die größere Angriffsfläche für Mikroorganismen und Enzyme sowie eine bessere Verfügbarkeit der Nährstoffe bei kürzerer Häcksellänge die Methanausbeute erhöhen (Abschnitt 4.4.5.2).

Die Differenzen in der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4, \text{zu}}$ zwischen den Ernteterminen einer Sorte lagen im Versuchsschwerpunkt I bei maximal 10 %. Mit späterem Erntetermin war eine geringfügige Abnahme um im Mittel 3,5 % der Methanausbeute trotz geringerer Anteile an Rohfaser bzw. Gerüstsubstanzen in den Ganzpflanzen zu verzeichnen. Auch bei SCHUMACHER ET AL. (2006) lagen die Unterschiede in der Methanausbeute der zu 4 verschiedenen Ernteterminen zwischen Mitte September und Ende Oktober geprüften Maissorten innerhalb einer Maissorte nur bei 3 bis 9 %. Mit späterem Erntetermin nahm die Methanausbeute dabei ebenfalls tendenziell ab, nur bei den extrem spätreifen Maissorten wurde eine Zunahme der Methanausbeute mit späterem Erntetermin beobachtet. AMON ET AL. (2003a) ermittelten die gleiche Tendenz, jedoch einen stärkeren Einfluss des Erntetermins auf die Methanausbeute bei 13 verschiedenen früh- bis spätreifen Maissorten. Hierbei nahmen die Methanausbeuten von der Milchreife bis zur Vollreife um 7 bis 27 % ab. In der Literatur sind jedoch auch gegensätzliche Tendenzen zu finden. So wird von HEIERMANN & PLÖCHL (2004) zum Erntezeitpunkt von früh- bis mittelfrühen Maissorten bei einem TM-Gehalt von 33 bis 37 % eine um 11 bis 32 % höhere Methanausbeute als zum Erntezeitpunkt bei einem TM-Gehalt von 25 bis 29 % angeführt. SCHITTENHELM (2008) fand für Maissorten mit Siloreifezahlen zwischen 250 und 700 einen mittleren Anstieg der Methanausbeute um 27 bzw. 11 % bei einem Erntetermin zwischen 124 und 180 Wachstumstagen bzw. 118 und 180 Wachstumstagen.

Eine Abnahme der Methanausbeute mit zunehmender Reife wird vorwiegend mit verstärkter Lignifizierung des Pflanzenmaterials begründet (AMON ET AL. 2006, LEHTOMÄKI 2006, KAISER 2007). Bei Mais kommt es jedoch während der Kornentwicklung, also von der Milchreife bis zur Vollreife, üblicherweise zu einer deutlichen Abnahme der Rohfaseranteile bzw. der Gehalte an Gerüstsubstanzen in der Ganzpflanze (z.B. BAL ET AL. 1997, AMON ET AL. 2003a, SCHITTENHELM 2008). Dies ist auf den starken Massezuwachs des Maiskolbens durch Einlagerung von Stärke zurückzuführen, wobei der Kolben nur geringe Faseranteile aufweist. Der Gewichtsanteil der TM des Kornes und Kolbens beträgt nach einer Studie von GIARDINI ET AL. (1976) zur Milchreife 28 bis 30 % der Gesamt-TM und nimmt bis zur physiologischen Reife auf 53 bis 58 % zu. Gleichzeitig sinkt der Rohfasergehalt des Kolbens von 20 % TM auf 11,3 % TM. Der Gewichtsanteil des Stängels an der Gesamttrockenmasse nimmt hingegen von 35 bis 38 % zur Milchreife auf 18 bis 20 % zur physiologischen Reife ab. Der Rohfasergehalt steigt jedoch zwischen diesen Entwicklungsstadien im Stängel um 2,5 % TM und in den Blättern um 3,7 % TM an (GIARDINI ET AL. 1976). Es ist also von einer zunehmenden Lignifizierung von Stängel und Blatt der Maispflanze von der Milchreife zur physiologischen Reife auszugehen, die sich jedoch aufgrund der Kolbenentwicklung nicht in den Faseranteilen der Gesamtpflanze widerspiegelt.

AMON ET AL. (2003a) begründen die Abnahme der Methanausbeute von der Milchreife bis zur Vollreife durch die Erweiterung des C/N-Verhältnisses. Es wird von einem optimalen C/N-Verhältnis im Bereich 10 bis 30 ausgegangen, wobei das C/N-Verhältnis zur Vollreife auf über 42 stieg und damit deutlich außerhalb des optimalen Bereiches lag. Entsprechend konnte der Kohlenstoff nicht vollständig umgesetzt werden und blieb daher ungenutzt (AMON ET AL. 2003a). Im Versuchsschwerpunkt I nahm das C/N-Verhältnis des frischen Maises von 31 bis 33 zum ersten Erntetermin auf 35 bis 38 zum dritten Erntetermin weniger deutlich zu.

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Erntetermin und Methangehalt im Biogas konnte nicht nachgewiesen werden. Dies wird auch von HEIERMANN & PLÖCHL (2004) berichtet. Die TM-Verluste bei der Silierung nahmen mit späterem Erntetermin tendenziell ab (Abschnitt 4.3.1.3). Mit Bezug auf die oTM des Ausgangsmaterials, also bei Beachtung der Silierverluste, wurden entsprechend noch geringere Unterschiede in der Methanausbeute der Silagen zwischen den Ernteterminen ermittelt. Allerdings war zum späteren Erntezeitpunkt ein deutlicher Zuwachs an TM zu verzeichnen. Durch die geringen Unterschiede der Methanausbeute bezogen auf die oTM zwischen den Ernteterminen und dem deutlich höheren TM-Anteil mit späterem Erntetermin ist von einer Zunahme des Methanhektarertrages bis zur Vollreife auszugehen. Daher ist im Vergleich der geprüften Erntetermine der späte Termin als vorzüglich anzusehen. Der dominierende Einfluss der verfügbaren TM bzw. des TM-Ertrages bei der Wahl des

Erntetermins wird auch von anderen Autoren herausgestellt (KAISER ET AL. 2004, SCHUMACHER ET AL. 2006).

Mit späterem Erntetermin nahmen in Versuchsschwerpunkt I die Geschwindigkeiten der Methanbildung sowie die maximalen Methanraten insbesondere bei dem unsilierten Mais deutlich ab. Dies ist möglicherweise auf die erhebliche Abnahme des Zuckergehaltes und die Zunahme des Stärkeanteils mit späterem Erntetermin zurückzuführen. Nach Untersuchungen von BANEMANN ET AL. (2009) wird der Zuckeranteil im Mais noch wesentlich schneller abgebaut als die Stärke. Obwohl mit späterem Erntezeitpunkt auch der Gehalt an langsamer verwerteten Inhaltsstoffen, wie Rohfaser bzw. Cellulose, abnimmt, ist der Unterschied im Zucker- und Stärkegehalt zwischen den untersuchten Entwicklungsstadien erheblich größer.

Zwischen den Ernteterminen konnte bei der gewählten Versuchsdurchführung kein einheitliches oTM-Verhältnis von Impfmateriale und Substrat gewährleistet werden. Dieses nahm vom frühen zum späten Erntetermin von 0,3 auf 0,5 zu. Ein höherer Anteil an oTM des Substrates könnte eine geringere Geschwindigkeit der Methanbildung zur Folge haben (LLABRÉS-LUENGO & MATA-ALVAREZ 1988, CHYNOWETH ET AL. 1993). Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass sich eine Erhöhung des Verhältnisses a_i von 0,2 auf 0,5 negativ auf die Methanausbeute, den Methangehalt im Biogas und auf die Geschwindigkeit der Methanbildung auswirkt (Abschnitt 4.4.8.1). Möglicherweise sind daher die etwas geringeren Methanausbeuten mit Bezug auf oTM_{zu} zum späteren Erntetermin und die abnehmenden Geschwindigkeitskonstanten zumindest teilweise auf einen geringeren oTM-Anteil des Inoculums im Batch-Gärtest zurückzuführen.

4.4.5 Einfluss der Häcksellänge auf die Silierung und Biomethanisierung

4.4.5.1 Einfluss der Häcksellänge auf die Silierung

In Versuchsschwerpunkt II und III wurden mit Abnahme der Häcksellänge überwiegend ein steigender Anteil an Milchsäure im Gär säuremuster der Silagen sowie eine Verringerung der Silierverluste festgestellt. Ausnahme war lediglich Triticale in Versuchsschwerpunkt III, wobei kein deutlicher Einfluss der Häcksellänge auf die Silierung erkennbar war. Eine längere Häcksellänge hatte zudem häufig höhere Essigsäure- und Alkoholgehalte im Gär säuremuster sowie zum Teil geringfügig höhere pH-Werte zur Folge. Bei Triticale im Versuchsschwerpunkt II und Grünschnittroggen in Versuchsschwerpunkt III wurden mit kürzerer Häcksellänge geringere Buttersäuregehalte und eine verbesserte Gärqualität der Silagen erzielt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass durch einen verbesserten Zellaufschluss bei kürzerer Häcksellänge ein höherer Anteil an schnell verwertbaren Substanzen zur Verfügung stand und damit günstigere Gärbedingungen vorherrschten (DERNEDDE & HONIG 1977). Dies führte zu einer verstärkten Milchsäurebildung, einem besseren und rascheren Säuerungsverlauf und damit zu einer effektiven Hemmung von Gär schädlingen und zu geringeren Verlusten (ZIMMER 1967a). Eine schnellere Milchsäurebildung war insbesondere bei Sudangras im Versuchsschwerpunkt III erkennbar, wobei die Milchsäuregehalte in den Silagen mit kurzer Häcksellänge nach 10 Tagen Lagerdauer um 3,5 % TM über den Gehalten der Silagen mit größerer Häcksellänge lagen. Mit längerer Lagerdauer wurden auch bei der größeren Häcksellänge hohe Milchsäuregehalte erzeugt. Wasserlösliche Kohlenhydrate können von den Milchsäurebakterien schnell genutzt werden, wenn sie verfügbar sind (McDONALD ET AL. 1991). Es wird angenommen, dass der Anteil an fermentierbarem Substrat in der wässrigen Phase der Silage, also außerhalb der intakten Zellen, für einen guten Silierverlauf entscheidend ist, weniger die absolut vorhandene Menge an wasserlöslichen Kohlenhydraten im Pflanzenmaterial (WILSON 1985). Damit kommt einer intensiven Aufbereitung des Erntegutes vor der Silierung eine besondere Bedeutung zu.

In der Literatur sind eine Reihe von Untersuchungen mit unterschiedlicher Aufbereitung des Siliergutes verschiedener Pflanzenarten zu finden, die ähnliche Ergebnisse wie die des Versuchsschwerpunktes II und III zeigen. Die Autoren ermittelten einen Anstieg der Milchsäuregehalte in Silagen mit kürzerer Häcksellänge bzw. stärkerer Aufbereitung (z.B. MURDOCH ET AL. 1955, GORDON ET AL. 1959, ZIMMER & GORDON 1964, BAXTER ET AL. 1966, HONIG & ROHR 1982, SEALE ET AL. 1982, PANDITHARATNE ET AL. 1986, BAL ET AL. 2000, McENIRY ET AL. 2007). Weiterhin waren mit einer stärkeren Aufbereitung schneller sinkende pH-Werte und ein niedrigerer resultierender pH-Wert (MURDOCH ET AL. 1955, GORDON ET AL. 1959, ZIMMER & GORDON 1964, BAXTER ET AL. 1966, CASTLE ET AL. 1979, SEALE ET AL. 1982, PANDITHARATNE ET AL. 1986, MÜLLER & FÜBBEKER 1997, PÖTSCH &

RESCH 2002, MCENIRY ET AL. 2007) sowie höhere Restzuckergehalte und geringere TM- bzw. Energieverluste verbunden (GORDON ET AL. 1959, McDONALD ET AL. 1964, PANDITHARATNE ET AL. 1986). Zum Teil wurden bessere Gärqualitäten und geringere Buttersäuregehalte in den Silagen erzielt (MURDOCH ET AL. 1955, GORDON ET AL. 1959, ZIMMER & GORDON 1964, BAXTER ET AL. 1966, CASTLE ET AL. 1979, SEALE ET AL. 1982, MÜLLER & FÜBBEKER 1997, WAGNER ET AL. 2004). Kürzere Häcksellängen hatten jedoch nicht generell einen Einfluss auf das Gärsäuremuster der Silagen bzw. einen verbesserten Silierverlauf und höhere Milchsäuregehalte zur Folge (DERNEDDE & HONIG 1977, GUTH 1995, SCHWAB ET AL. 2002, JOHNSON ET AL. 2003a, FERNANDEZ ET AL. 2004, LEURS 2005). Nach MURDOCH ET AL. (1955) unterstützt die Aufbereitung einen guten Silierverlauf, ergibt jedoch nicht zwangsläufig bessere Gärqualitäten. Es wird davon ausgegangen, dass schwer gärfähiges Pflanzenmaterial stärker auf die Zerkleinerung reagiert als leicht vergärbare Biomasse (ZIMMER 1967a).

In Versuchsschwerpunkt I wurde kein gerichteter Einfluss der Häcksellänge auf die Milchsäuregehalte und TM-Verluste bei Maissilagen ermittelt. Bei der feinen Häcksellänge wurden jedoch deutlich höhere Gehalte an Essigsäure und Ethanol in den Silagen bei allen drei geprüften Maissorten und Ernteterminen verglichen mit der mittleren und groben Häcksellänge gemessen. Zudem lagen der Zuckergehalt im Siliergut des fein gehäckselten Mais und der Restzuckergehalt in den fein gehäckselten Silagen deutlich niedriger als bei grober und mittlerer Häcksellänge. Bereits im Ausgangsmaterial wurde durchgängig Essigsäure, Ethanol und n-Valeriansäure sowie zum Teil Milchsäure detektiert. Die Gehalte dieser Substanzen waren bei feiner Häcksellänge höher als bei grober und mittlerer Zerkleinerung. Die Ursache hierfür könnte in der Verzögerung der Einlagerung des Häckselgutes in die Siliergläser durch den Transport zum Labor liegen. Aufgrund der stärkeren Aufbereitung der fein gehäckselten Maisvarianten wurden hier erhöhte Anteile an fermentierbaren Zuckern zum Zeitpunkt der Ernte in die wässrige Phase freigesetzt, die unter aeroben Bedingungen während des Transportes möglicherweise verstärkt von Hefen und Enterobakterien genutzt wurden. Dabei erfolgten die Bildung von Essigsäure und Ethanol und der Verlust fermentierbarer Zucker bereits vor Einlagerung in die Laborsilos. Nach McDONALD ET AL. (1991) folgen aus einem verzögerten Luftabschluss von Silagen eine Reduktion der vorhandenen fermentierbaren Kohlenhydrate sowie eine verstärkte Entwicklung von Hefen und Gram-negativen Bakterien. Hefen fermentieren vorwiegend Hexosen zu Ethanol. Gram-negative Bakterien (*Coliforme* Keime) produzieren eine Reihe von Fermentationsprodukten, u.a. Milchsäure, Essigsäure, Ethanol, 2,3-Butandiol, Kohlendioxid und Wasserstoff. RUXTON & McDONALD (1974) ermittelten bei Sauerstoffzufuhr in Laborsilos eine Verringerung des Anteils wasserlöslicher Kohlenhydrate um bis zu 49 %, geringere Milchsäuregehalte und höhere Gehalte an Essigsäure, was sie ebenfalls auf die Aktivität von Hefen und Gram-negativen Bakterien des *coliformen* Typs zurückführten. Demnach ist zu

vermuten, dass der positive Effekt einer kürzeren Häcksellänge auf die Verfügbarkeit von fermentierbaren Zuckern in Versuchsschwerpunkt I durch eine verstärkte Aktivität von Hefen und Enterobakterien, die mit den Milchsäurebakterien in Konkurrenz um die fermentierbaren Zucker stehen, überlagert wurde.

4.4.5.2 Einfluss der Häcksellänge auf die Methanbildung des Siliergutes

Der Einfluss der mechanischen Aufbereitung bzw. der Partikelgröße auf die Methanausbeute ist bisher vorwiegend für organische Abfall- und Reststoffe ermittelt worden (HILLS & NAKANO 1984, GOLLAKOTA & MEHER 1988, SHARMA ET AL. 1988, CHYNOWETH ET AL. 1993, MSHANDETE ET AL. 2006). Einige Untersuchungen wurden an verschiedenen unsilierten pflanzlichen Biomassen, wie Gras bzw. Heu (BADGER ET AL. 1979, BASERGA & EGGER 1997, PALMOWSKI 2000, KARAPAJU ET AL. 2002), Stroh (BADGER ET AL. 1979, LLABRÉS-LUENGO & MATA-ALVARES 1988, SHARMA ET AL. 1988), Klee (KARAPAJU ET AL. 2002), Hafer (KARAPAJU ET AL. 2002) und Sorghum sowie für die energetische Nutzung gezüchtetem Zuckerrohr (CHYNOWETH ET AL. 1993) durchgeführt. Die Zerkleinerung erfolgte durch unterschiedliche technische Geräte im Labor, wie Schneid- oder Kugelmühlen bzw. per Hand mit Hilfe eines Messers. Mit stärkerer Zerkleinerung wurden dabei keine einheitlichen Effekte auf die Methanausbeute erzielt, überwiegend wurde jedoch eine erhöhte Methanausbeute mit stärkerer Aufbereitung ermittelt (**Tab. 5**, Abschnitt 2.1.3.2). HENDRIKS & ZEEMANN (2009) stellen zusammenfassend fest, dass durch mechanische Aufbereitung in den meisten Fällen eine Erhöhung der Methanausbeute um 5 bis 25 % erreicht wird. Zum Teil werden jedoch auch deutlich größere Unterschiede in der Methanausbeute um bis zu 65 % (SHARMA ET AL. 1988) und 71 % (HILLS & NAKANO 1984) durch Verringerung der Partikelgröße angegeben.

Der Effekt einer höheren Methanausbeute mit geringerer Partikellänge des Substrates wurde in der vorliegenden Arbeit im Versuchsschwerpunkt I bis III für das untersuchte Siliergut generell bestätigt. Durch feines Häckseln wurde eine Erhöhung der Methanausbeute um maximal 10 bis 13 % bei unsiliertem Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und unsilierter Triticale gegenüber dem grob gehäckselten Material erzielt. Dies liegt in dem von HENDRIKS & ZEEMANN (2009) angeführten Bereich. Die größten mittleren Partikellängen lagen dabei bei 33,1 mm und die feinsten mittleren Partikellängen bei 6,1 mm. In der Literatur wurde häufig durch Vermahlen eine noch feinere theoretische Partikelgröße erzeugt (SHARMA ET AL. 1988, CHYNOWETH ET AL. 1993, MOORHEAD & NORDSTEDT 1993) bzw. die Spanne der untersuchten Partikelgrößen war deutlich größer (BASERGA & EGGER 1997, MSHANDETE ET AL. 2006). Eine Messung der Partikelgröße bzw. des Zerkleinerungserfolges fehlt in der Literatur jedoch fast ausschließlich, weshalb ein Vergleich der Ergebnisse nur schwer möglich ist.

Der Methangehalt im Biogas der untersuchten Siliergüter wurde von der Häcksellänge nicht beeinflusst. Demnach wird die erhöhte Methanausbeute in erster Linie durch höhere Gasmengen, nicht durch die Verbesserung der Biogasqualität erreicht. Wie in Abschnitt 4.3.4.6 dargestellt, war ein linearer inverser Zusammenhang zwischen der gemessenen mittleren Partikellänge im untersuchten Bereich und der Methanausbeute bei den Siliergütern der geprüften Pflanzenarten gegeben. In der Literatur wird zum Teil ein stärkerer Effekt auf die Methanausbeute bei sehr geringen Partikelgrößen analysiert (HILLS & NAKANO 1984, MSHANDETE ET AL. 2006), während in einer anderen Studie bei sehr feiner Vermahlung nur noch ein geringer Mehrertrag in der Methanausbeute ermittelt wurde (SHARMA ET AL. 1988). Entsprechend feine Partikellängen von < 5 mm wurden jedoch in den vorliegenden Untersuchungen durch geringe Längeneinstellungen am Feldhäcksler nicht erreicht und liegen daher außerhalb des bewerteten Längenbereiches. Allerdings wurde durch die Zerkleinerung im Praxismaßstab eine stärkere Wirkung auf die Methanausbeute erzielt als bei der Zerkleinerung im Labormaßstab. Eine mögliche Ursache hierfür ist die gleichmäßigere Zerkleinerung durch den Feldhäcksler, die sich im geringeren Interquartilabstand und einem geringeren Grobanteil bei vergleichbaren Partikellängenverteilungen widerspiegelt.

Über die gemessene mittlere Partikellänge konnten bei den Siliergütern der geprüften Pflanzenarten 66 bis 89 % der Schwankungen in der Methanausbeute der Häcksel-längenvarianten erklärt werden. Die Partikellänge ist jedoch nur ein Merkmal der physikalischen Struktur eines Häckselgutes oder Teilchens. Für physikalische Lösungsvorgänge und biologische Abbauvorgänge besitzt die Oberfläche der Partikel als weiteres Merkmal eine besondere Bedeutung. Die Hydrolyse eines organischen Substrates im Biogasprozess erfolgt vorwiegend über extrazelluläre Enzyme, die an der zugänglichen Fläche des Feststoffes angreifen (GAVALA ET AL. 2003). Die Hydrolyserate ist damit abhängig von der verfügbaren Kontaktfläche. Mittels der verwendeten Methode der Bildanalyse zur Beschreibung der physikalischen Struktur konnten zusätzlich Ergebnisse zur projizierten Oberfläche der Partikel des untersuchten Häckselgutes gewonnen werden. Die projizierte Oberfläche ist eine zweidimensionale Größe, die im Wesentlichen auch die Partikelbreite und im zweidimensionalen Bild erkennbare Rauigkeiten des Partikelrandes erfasst. Entgegen den Erwartungen wurden jedoch bei Bewertung des Zusammenhangs zwischen mittlerer projizierter Oberfläche und der Methanausbeute keine höheren Bestimmtheitsmaße erzielt als für den Zusammenhang zwischen der mittleren Partikellänge und der Methanausbeute eines Häckselgutes. Innerhalb einer Pflanzenart bestand bei den durchgeführten Analysen eine enge Korrelation zwischen der mittleren projizierten Oberfläche und der mittleren Partikellänge einer Probe. Zudem ging die projizierte Oberfläche bereits durch die flächengewichtete Auswertung der Partikellänge in den Wert der mittleren Partikellänge ein. Entsprechend wurde über die Bewertung der mittleren projizierten Oberfläche kein bedeutender zusätzlicher

Informationsgewinn im Hinblick auf die Methanausbeute innerhalb einer Pflanzenart erhalten. Hierfür wäre die Messung der realen und von den Bakterien im Biogasprozess erreichbaren spezifischen Oberfläche des Substrates nötig. Diese ist jedoch bei organischen Feststoffen nur schwierig zu analysieren, da sie sowohl die dreidimensionale äußere Oberfläche und Rauigkeiten der Partikel als auch Poren mit unterschiedlicher Größe umfasst (ZENG ET AL. 2006). Von PALMOWSKI (2000) wurden hierfür verschiedene Methoden geprüft, die jedoch für die Charakterisierung der Bioverfügbarkeit überwiegend als nicht gut geeignet eingeschätzt wurden.

Bei Vergleich der Pflanzenarten hinsichtlich der Wirkung der Zerkleinerung auf die Methanausbeute spielt die mittlere projizierte Oberfläche dennoch eine wichtige Rolle (Abschnitt 4.4.5.5).

Die Erhöhung des Abbaugrades und damit einhergehend der Methanausbeute organischer Substrate durch eine stärkere mechanische Aufbereitung lässt sich im Wesentlichen auf zwei Wirkungen der Zerkleinerung auf die Substratbeschaffenheit zurückführen (PALMOWSKI 2000):

1. Es erfolgt eine Reduktion der Partikelgröße, die die Schaffung neuer Oberflächen und damit die Freilegung von bei schwächerer Zerkleinerung unzugänglichen Bereichen des Substrates bewirkt.
2. Es erfolgt eine Änderung der Materialstruktur, insbesondere eine Reduktion der Kristallinität der Cellulose und die Zerstörung von Cellulose/Lignin-Komplexen, wodurch bisher nicht abbaubare Bestandteile des Substrates verfügbar werden.

Neben dem positiven Effekt der geringeren Partikellänge auf die Höhe der Methanausbeute wurde durch eine verstärkte mechanische Aufbereitung zum Teil auch die Geschwindigkeit der Methanbildung gefördert (Abschnitt 4.4.5.4). Da die Untersuchung der gebildeten Methanmenge nur über einen begrenzten Zeitraum erfolgt, ist die Vermutung naheliegend, dass höhere Methanausbeuten vorrangig auf eine schnellere Substratumsetzung zurückzuführen sind. Dies würde eine Angleichung der Methanausbeute der Häcksellängenvarianten nach theoretisch unendlich langer Zeit im Gärtest nach sich ziehen. Um dies zu überprüfen, wurde die Anpassung einer Funktion nach HILL an die im Gärtest über einen begrenzten Zeitraum gewonnenen Daten durchgeführt, die die Berechnung des Wertes ermöglicht, an den sich die Methanausbeute nach theoretisch unendlich langer Zeit annähert. Die dabei ermittelten Ergebnisse zeigen mit wenigen Ausnahmen, dass auch nach theoretisch unendlich langer Zeit noch nahezu die gleichen Unterschiede in der Methanausbeute zwischen den Häcksellängenvarianten bestehen wie nach 30 Tagen Versuchsdauer des Batch-Gärtests. Entsprechend ist die Erhöhung der Methanausbeute durch die kürzere Häcksellänge auf die bereits genannten Änderungen in der Substratbeschaffenheit, nicht auf die begrenzte Verweilzeit im Gärtest zurückzuführen.

Die positive Wirkung einer kürzeren Häcksellänge auf die Methanausbeute gilt im Wesentlichen für die Nassvergärung. Bei der Feststofffermentation wird hingegen eine grobe Struktur zum Teil benötigt und ist entsprechend unter anderen Gesichtspunkten zu bewerten (MEIER 2008).

4.4.5.3 Einfluss der Häcksellänge auf die Methanbildung der Silagen

Bei Betrachtung der positiven Wirkung einer kurzen Häcksellänge bei der Ernte auf den Silierverlauf (Abschnitt 2.1.2.4) und der positiven Wirkung einer kurzen Häcksellänge auf die Methanbildung, ist ein doppelt positiver Effekt einer intensiven mechanischen Aufbereitung vor der Silierung auf die Methanausbeute von Silagen zu erwarten. Die Ergebnisse des Versuchsschwerpunktes I bis III zeigen jedoch einen gegenteiligen Trend. Mit stärkerer Zerkleinerung zur Ernte waren bei den Silagen keine Unterschiede oder deutlich geringere Unterschiede in der Methanausbeute mit Bezug auf oTM_{zu} zu messen als bei den frischen Siliergütern mit unterschiedlicher Zerkleinerung. Entsprechend wurden die Methanausbeuten $y_{CH_4_{zu}}$ der grob gehäckselten Varianten durch die Silierung stärker erhöht als die Methanausbeuten der fein gehäckselten Varianten. Die Einrechnung der Silierverluste in die Methanausbeute (Bezug oTM_{orig}) ergab jedoch bei den Silagen mit wenigen Ausnahmen Unterschiede zwischen den Häcksellängenvarianten in gleicher Größenordnung wie bei den Siliergütern. In der Literatur fehlen vergleichbare Ergebnisse hierzu weitestgehend. Von OECHSNER & LEMMER (2009) wird lediglich beschrieben, dass in einer Studie mit siliertem Mais mit unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge zwischen 4 und 10 mm kein signifikanter Unterschied in der Methanausbeute nachgewiesen werden konnte. Als Bezugsbasis der Methanausbeute ist hier sicherlich die zugeführte oTM gemeint, genaue Daten werden jedoch nicht angegeben. Von WEIß & BRÜCKNER (2008) wurde hingegen für Maissilage eine um 11 % höhere Methanausbeute $y_{CH_4_{zu}}$ bei „kürzester Längeneinstellung am Häcksler“ verglichen mit einer „üblichen Längeneinstellung“ ermittelt. Angaben zu Silierverlusten und Gärsäuremustern sind nicht vorhanden.

In Anlehnung an die im Abschnitt 4.4.3.1 beschriebene Wirkung der bei der Silierung gebildeten Gärsäuren auf die Methanausbeute $y_{CH_4_{zu}}$ ist denkbar, dass die stärkere Erhöhung der Methanausbeute $y_{CH_4_{zu}}$ durch die Silierung bei größeren Häcksellängen auf geringere Milchsäuregehalte und höhere Anteile an Essigsäure, Alkoholen und ggf. Buttersäure sowie dem intensiveren Abbau des Zuckeranteils zurückzuführen sind. Auch bei den Häcksellängenvarianten wird mit steigenden Fermentationsverlusten bei der Silierung eine Zunahme der Methanausbeute der Silagen $y_{CH_4_{zu}}$ gemessen. Während sich bei den untersuchten Siliergütern (Abschnitt 4.4.5.2) nur die geänderte physikalische Struktur bei unterschiedlicher Zerkleinerung auf die Methanausbeute auswirkte, ist demnach bei den Silagen eine Überlagerung der Effekte durch unterschiedliche

Häcksellänge, Silagequalität sowie durch die Gehalte organischer Säuren auf die Methanausbeute gegeben.

Der Methangehalt im Biogas der untersuchten Silagen war ebenso wie bei den Siliergütern überwiegend unabhängig von der Häcksellänge. Lediglich in Versuchsschwerpunkt III wurden bei Mais und Sudangras etwas niedrigere Methangehalte bei kürzerer Häcksellänge ermittelt verglichen mit der grob gehäckselten Variante. Letzteres würde die Theorie eines geringeren Methangehaltes bei höheren Milchsäuregehalten und niedrigeren Anteilen an Alkoholen in der Silage stützen (Abschnitt 4.4.3.1). Ähnliche Trends wurden auch in anderen Studien gefunden. Von WEIß & BRÜCKNER (2008) wurde eine geringfügige Abnahme des Methangehaltes im Biogas von Maissilage nach mechanischer Aufbereitung gemessen. HILLS & NAKANO (1984) analysierten ein Absinken des Methangehaltes mit niedrigerer mittlerer Partikelgröße um 2,4 Vol-%, wobei hier jedoch unterschiedlich abgeseibte Tomatenabfälle betrachtet wurden. Insgesamt ist von einer geringen Wirkung der Häcksellänge auf den Methangehalt im Biogas auszugehen, die bei Beachtung der relativ großen Messungenauigkeit bei der Analyse der Gaskomponenten (Abschnitt 4.2.7) nur schwer nachweisbar ist.

Die Ergebnisse zu Methanausbeuten unterschiedlich gehäckselter Erntegüter nach der Silierung zeigen, dass die Berücksichtigung der Silierverluste für die gewonnene Aussage von wesentlicher Bedeutung ist. Bei Beachtung der in den Laborsilos gemessenen Silierverluste konnte auch bei den Silagen eine positive Wirkung einer geringeren Häcksellänge auf die Methanausbeute erzielt werden. Die Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ der Silagen bei feiner Zerkleinerung lag bei maximal 5 bis 13 % gegenüber den grob gehäckselten Varianten.

Durch die stärkere Zerkleinerung zur Ernte sind weitere positive Effekte auf die Silierung denkbar, die in den vorliegenden Ergebnissen noch nicht berücksichtigt sind. Bei kurzer Häcksellänge ist eine verbesserte Dichtlagerung im Silo möglich, die vor allem bei der Entnahme der Silage das Eindringen von Sauerstoff in das Silo verringert. Entsprechend ist die Gefahr der Nacherwärmung der Silage und damit verbunden die Gefahr hoher Stoff- und Energieverluste durch aeroben Verderb reduziert (WAGNER ET AL. 2004). Da die Nacherwärmung der Silage zu einer deutlichen Verringerung der Methanausbeute führen kann (BANEMANN & NELLES 2008a, ZACHARIAS 2008), ist ein zusätzlicher positiver Effekt einer kurzen Häcksellänge auf die Methanausbeute insbesondere bei hohen TM-Gehalten und bei für Nacherwärmung anfälligen Silagen mit hohen Restzuckergehalten denkbar. Zu diesem Sachverhalt liegen gegenwärtig keine Untersuchungsergebnisse vor.

4.4.5.4 Einfluss der Häcksellänge auf die Geschwindigkeit der Methanbildung

Zu dem Einfluss der Häcksellänge bzw. Partikellänge eines Substrates auf die Geschwindigkeit der Methanbildung sind in der Literatur sehr unterschiedliche Aussagen zu finden. Zum einen wird eine deutliche Erhöhung der Geschwindigkeit der Methanbildung bzw. des Substratabbaus mit geringerer Partikellänge beobachtet (MOORHEAD & NORDSTEDT 1993, PALMOWSKI 2000). Zum anderen hatte die Häcksellänge keinen Effekt auf die Geschwindigkeit der Methanbildung (BASERGA & EGGER 1997, OECHSNER & LEMMER 2009). Nach CHYNOWETH ET AL. (1993) beeinflussen Partikelgrößen im mm- bis cm-Bereich die Geschwindigkeit der Biogasbildung nicht, bei Partikelgrößen < 1 mm wird die Geschwindigkeit der Biogasbildung möglicherweise, jedoch nicht reproduzierbar ansteigen.

Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde ebenfalls kein einheitlicher Effekt der Häcksellänge auf die Geschwindigkeit der Methanbildung gefunden. Während bei Grünschnittroggen und Sudangras kein Einfluss der physikalischen Struktur der Partikel auf die Geschwindigkeit der Methanbildung nachgewiesen werden konnte, wurde bei Mais und Triticale die Geschwindigkeitskonstante k vorrangig vom Grobanteil der Partikellängenverteilung negativ bzw. vom Feinanteil und der spezifischen projizierten Oberfläche positiv beeinflusst.

Nach PALMOWSKI (2000) sind für eine höhere Abbaugeschwindigkeit und damit für eine schnellere Methanbildung bei stärkerer Zerkleinerung des Substrates verschiedene Ursachen gegeben. Zum einen erfolgt ein Zellaufschluss, der die Freisetzung organischer Komponenten bewirkt, die so schneller verfügbar sind. Weiterhin steigert die durch Zerkleinerung vergrößerte Oberfläche der Partikel die Lösungsvorgänge und erhöht die Angriffsoberfläche für Mikroorganismen bzw. deren Enzyme. Dies beschleunigt ebenfalls die Verfügbarkeit abbaubarer Inhaltsstoffe des Substrates.

Die vorliegenden Ergebnisse wurden in Laborversuchen im Batch-Verfahren ermittelt. In der Praxis wird überwiegend das Durchflussverfahren mit kontinuierlicher Beschickung der Biogassanlage angewandt (SCHOLWIN ET AL. 2006). In kontinuierlichen Systemen zur Nassvergärung kann eine höhere Abbaugeschwindigkeit bei begrenzten Verweilzeiten zu einer besseren Ausnutzung des Substrates und damit zusätzlich zur Erhöhung der Methanausbeute führen. Vor allem bei kurzen Verweilzeiten in der Biogassanlage und hohen Raumbelastungen ist ein positiver Effekt auf die Methanausbeute möglich (MÄHNERT 2007).

4.4.5.5 Einfluss der Häcksellänge auf die Methanausbeute bei unterschiedlicher Abreife bzw. Lignifizierung

Aus den Ergebnissen des Versuchsschwerpunktes I geht hervor, dass die Wirkung einer kurzen Häcksellänge auf die Methanausbeute sowie die Geschwindigkeit der Methanbildung bei Mais mit späterem Erntetermin bzw. früher reifender Sorte zunimmt. Während zum frühen Erntetermin mit feiner Häcksellänge eine um 4 bis 9 % höhere Methanausbeute als bei grober Häcksellänge des Mais erzielt wurde, erhöhte sich die Methanausbeute zum spätesten Erntetermin um 10 bis 12 %. Wie bereits in Abschnitt 4.4.4.2 erläutert, ist von einer zunehmenden Lignifizierung der Stängel und Blätter des Mais mit späterem Erntetermin auszugehen. Dies spiegelt sich jedoch zwischen Milchreife und physiologischer Reife durch den starken TM-Zuwachs des Kolbens mit geringen Faseranteilen nicht in den Anteilen der Gerüstsubstanzen der Ganzpflanze wider. Dennoch könnte ein erhöhter Lignin- und Cellulosegehalt in den Stängel- und Blattanteilen die Abbaubarkeit dieser Komponenten gemindert und die Wirkung der Zerkleinerung erhöht haben. MORRISON ET AL. (1998) gehen davon aus, dass die Komplexität der Bindungen der Zellwandkohlenhydrate im Mais mit zunehmender Reife steigt und die abbaubaren organischen Bestandteile daher für die mikrobielle Fermentation schwerer zugänglich werden.

Bei den in Versuchsschwerpunkt I geprüften Varianten wurde mit späterem Erntetermin keine deutliche Änderung der mittleren Partikellänge oder des Grobanteils bei gleicher Häcksellängeneinstellung, wie dies von LEURS (2005) beobachtet wurde, ermittelt. Allerdings stieg der Feinanteil mit zunehmendem TM-Gehalt bei gleicher Längeneinstellung an. Dies ist möglicherweise auf eine zunehmende Sprödigkeit des Substrates mit höherem TM-Gehalt zurückzuführen. Größere Unterschiede im Feinanteil zwischen den Häcksellängenvarianten des spätesten Erntezeitpunktes könnten ebenfalls zu einem stärkeren Effekt der Zerkleinerung auf die Methanausbeute und Geschwindigkeit der Methanbildung beigetragen haben.

Von PALMOWSKI (2000) wurde gezeigt, dass bei Vergleich von Substraten mit hohen Faseranteilen, wie Laub und Heu, mit Substraten mit sehr geringen Faseranteilen, wie Fleisch, Kartoffel, Möhre oder Apfel, eine deutlich höhere Wirkung der Zerkleinerung auf den Substratabbau bei hohen Faseranteilen gegeben ist. Ebenso gehen auch BADGER ET AL. (1979) und OECHSNER & LEMMER (2009) davon aus, dass mit stärkerer Lignifizierung des Pflanzenmaterials der Effekt eines mechanischen Aufschlusses auf die Abbaubarkeit bei der Biomethanisierung zunimmt. Verglichen werden hier jedoch verschiedene Substrate mit Unterschieden im Lignin- und Rohfasergehalt von bis zu 50 % (abs.) (PALMOWSKI 2000).

Im Vergleich der in Versuchsschwerpunkt II und III geprüften Pflanzenarten wurde der Einfluss der mechanischen Aufbereitung an Substraten mit Unterschieden im Rohfasergehalt von im Mittel 19 % TM bzw. in den Gehalten an Lignin und Cellulose (ADF-Gehalt) von im Mittel 18 % TM ermittelt. Im Ergebnis unterscheiden sich die Wirkungen der Häcksellängen verhältnismäßig geringfügig. Dennoch wurde mit höherem ADF-Gehalt bei Vergleich der Pflanzenarten eine stärkere Wirkung auf die Methanausbeute erzielt. Dieser Zusammenhang wird insbesondere mit Bezug auf die mittlere projizierte Oberfläche der untersuchten Proben deutlich, da hierbei neben den Unterschieden in der Partikellänge zusätzlich die Unterschiede in der Partikelbreite zwischen den Häckselgütern der geprüften Pflanzenarten berücksichtigt wurde. In Versuchsschwerpunkt III erhöhte sich die Methanausbeute bei Grünschnittroggen um $3,3 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ je mm^2 Verringerung der mittleren projizierten Oberfläche durch die kürzere Häcksellänge, während bei Mais und Triticale die Methanausbeute nur um $1,2 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ je mm^2 zunahm.

4.4.6 Einfluss der Lagerdauer

4.4.6.1 Einfluss der Lagerdauer auf die Silierverluste und das Gär säuremuster

Die Dauer der Lagerung von Mais-, Grünschnittroggen-, Sudangras- und Triticale-silagen unter anaeroben Bedingungen beeinflusste die TM-Verluste im Laborsilo sowie die Anteile der organischen Säuren und Alkohole im Gär säuremuster. Mit zunehmender Lagerdauer nahmen die Silierverluste, die bei der gewählten Versuchsdurchführung vorwiegend die Fermentationsverluste umfassen, generell zu. Der überwiegende Teil der Gärprodukte, insbesondere der Milchsäure, wurde innerhalb der ersten 10 Tage gebildet. Dennoch stiegen die Gesamtgehalte an Säuren und Alkoholen im Gär säuremuster bis zu einem Jahr Lagerdauer fortwährend geringfügig an. Nach PAHLOW (2006) wird die Hauptgärphase, die durch intensive Umsetzungsvorgänge gekennzeichnet ist, üblicherweise innerhalb von etwa einer Woche abgeschlossen. In der sich anschließenden Lagerphase findet ein weiterer kontinuierlicher schwacher Substratabbau statt, der den Anstieg der Verluste und der Anteile an Fermentationsprodukten erklärt. Dies ist unproblematisch, so lange ein Luftzutritt in die Silage zuverlässig verhindert wird und genügend Gärsubstrat vorhanden ist.

In Versuchsschwerpunkt III wurde bei Mais, Grünschnittroggen und Triticale ab einer Lagerdauer von 90 bzw. 180 Tagen eine vermehrte Bildung von Essigsäure und einwertigen Alkoholen beobachtet. Gleichzeitig nahm der Gehalt an Milchsäure ab. Bei Sudangras stieg der Milchsäuregehalt hingegen bis zu einem Jahr Lagerdauer kontinuierlich an, wobei nach 365 Tagen ebenfalls erhöhte Gehalte an Essigsäure und Ethanol in den Sudangrassilagen zu verzeichnen waren. Die Ursache hierfür könnte in dem Gehalt an verfügbaren wasserlöslichen Kohlenhydraten liegen. Sudangras wies mit im Mittel 16 % TM den höchsten Gehalt an Zucker im Siliergut auf. Dieser lag nach einem Jahr Lagerdauer noch immer bei 6 bis 7 % TM. Es kann davon ausgegangen werden, dass für die nur noch vermindert ablaufenden Gärprozesse nach entsprechend langer Lagerdauer noch ausreichend Gärsubstrat für die Milchsäurebakterien vorhanden war. Der Zuckergehalt von Mais lag mit im Mittel 12 % TM und der Zuckergehalt von Grünschnittroggen und Triticale mit im Mittel 7,8 und 8,2 % TM zur Ernte niedriger als bei Sudangras. Nach einem Jahr Lagerdauer wurden nur noch Zuckergehalte von 1,2 bis 1,3 % TM bei Mais, 0,8 bis 3,2 % TM bei Grünschnittroggen und 2,5 bis 2,7 TM bei Triticale analysiert. Bei einem begrenzten Angebot an Hexosen sind verschiedene Milchsäurebakterien in der Lage, Milchsäure als Energiequelle unter anaeroben Bedingungen zu nutzen (LINDGREN ET AL. 1990, McDONALD ET AL. 1991). Bei diesem Prozess wird Milchsäure durch die schwächere Essigsäure ersetzt. Dies kann zu einem Anstieg des pH-Wertes verbunden mit der Aktivität unerwünschter Gär schädlinge und damit zu einer Verschlechterung der Gärqualität führen. Ein entsprechender Verlauf war insbesondere bei der grob gehäckselten Variante des Grünschnittroggens in Versuchsschwerpunkt III zu erkennen.

4.4.6.2 Einfluss der Lagerdauer auf die Methanausbeute

Eine zunehmende Lagerdauer von Mais-, Grünschnittroggen-, Sudangras- und Triticale-silagen bis zu 90 bzw. 180 Tagen unter anaeroben Bedingungen im Laborsilo war fast ausschließlich mit steigenden Methanausbeuten bezogen auf die zugeführte oTM verbunden. Dies stimmt in der Tendenz mit Ergebnissen von NEUREITER ET AL. (2005) überein, die generell höhere Methanausbeuten von 119 Tage gelagerten Maissilagen im Vergleich zu 44 Tage gelagerten Maissilagen zeigen. Dabei wurde jedoch eine Erhöhung der Methanausbeute um bis zu 42 % ermittelt, die von den eigenen Versuchen mit maximal 11 % Differenz in der Methanausbeute der Lagerdauervarianten nicht bestätigt werden kann. Allerdings lagen auch die von NEUREITER ET AL. (2005) angeführten Methanausbeuten mit 338 bis 537 l_N*kg oTM_{zu}⁻¹ über den eigenen und für Mais üblichen Methanausbeuten anderer Autoren (OECHSNER ET AL. 2003, AMON ET AL. 2007a, SCHUMACHER 2008). LEHTOMÄKI (2006) berichtet ebenfalls von steigenden Methanausbeuten bezogen auf oTM_{zu} bei Verlängerung der Lagerdauer von 3 Monate auf 6 Monate bei Gras- und Zuckerrübenkopfsilage. Hierbei werden die Unterschiede zwischen den Lagerdauervarianten mit bis zu 11 % bei Grassilage und mit bis zu 57 % bei Zuckerrübenkopfsilage angegeben. Den Grund für steigende Methanausbeuten mit zunehmender Lagerdauer sieht LEHTOMÄKI (2006) in einem erhöhten Anteil an gelösten Substanzen in den Silagen, der sich im Anteil NH₃-N an N_{ges} widerspiegelt. Ein hoher Anteil an Ammoniak weist jedoch vorrangig auf die Aktivität von proteolytischen Clostridien oder Enterobakterien bei der Silierung hin (MCDONALD ET AL. 1991). Ein steigender Anteil NH₃-N an N_{ges} mit längerer Lagerdauer war auch im Versuchsschwerpunkt III zu beobachten. Der Zusammenhang zwischen diesem Parameter und der Methanausbeute bezogen auf oTM_{zu} war bei Mais und Grünschnittroggen signifikant. Allerdings wurde zwischen dem Gehalt an Essigsäure sowie Ethanol und der Methanausbeute y_{CH₄_zu} überwiegend ein höherer Korrelationskoeffizient berechnet. Als Ursache für die steigenden Methanausbeuten bezogen auf oTM_{zu} mit zunehmender Lagerdauer kann daher die Erhöhung der Gehalte an Essigsäure, Buttersäure und Ethanol mit längerer Lagerzeit gesehen werden. Wie bereits in Abschnitt 4.4.3.1 erläutert, weisen diese Siliervollprodukte eine höhere theoretische Methanausbeute als Glucose und Milchsäure auf bzw. treten gemeinsam mit Substanzen mit höheren theoretischen Methanausbeuten in der Silage auf. Ungeklärt bleibt damit jedoch die zum Teil gemessene Abnahme der Methanausbeute y_{CH₄_zu} nach 180 Tagen Lagerdauer, obwohl eine weitere deutliche Zunahme an Essigsäure und Ethanol von 180 bis 365 Tagen Lagerdauer zu verzeichnen war.

Mit längerer Lagerzeit und verstärkter Bildung von Essigsäure und Alkoholen als Gärprodukte gingen höhere Siliervollverluste einher. Bei Einrechnung der TM-Verluste in die Methanausbeute wurden die Methanausbeuten zwischen den Lagerdauervarianten im Wesentlichen angeglichen. Es konnte kein signifikanter Einfluss der Lagerzeit auf die

Methanausbeute mit Bezugsbasis oTM_{orig} nachgewiesen werden. Entsprechend hatte eine Lagerdauer der Silagen unter optimierten, strikt anaeroben Bedingungen im Laborsilo bis zu einem Jahr keinen negativen Einfluss auf die Methanbildung, es wurde jedoch auch keine deutliche Erhöhung der Methanausbeute bei Beachtung der Silierverluste erreicht. Dies widerspricht den Ergebnissen von NEUREITER ET AL. (2005) und LEHTOMÄKI (2006), die auch nach Einrechnung von Silierverlusten noch eine Zunahme der Methanausbeuten bei Mais um bis zu 47 % (Bezugsbasis FM_{orig}) und bei Zuckerrübenblatt um bis zu 31 % mit längerer Lagerdauer verzeichneten.

4.4.6.3 Einfluss der Lagerdauer der Silagen bei unterschiedlichen Häcksellängen

Auffällig ist, dass die Bildung von Essigsäuren und Alkoholen sowie zum Teil von Buttersäure und der Abbau der Milchsäure mit längerer Lagerdauer vorrangig bei den gröbereren Häcksellängen erfolgten. Analog dazu überstiegen die Gehalte an Restzucker in den Silagen bei der kurzen Häcksellänge nach 365 Tagen insbesondere bei Mais und Grünschnittroggen die Restzuckergehalte der Silagen mit gröberer Häcksellänge. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass eine kürzere Häcksellänge nicht nur eine schnellere pH-Wert-Senkung in der Anfangsphase des Siliierprozesses bewirkt, sondern auch durch Unterstützung einer effektiveren Nutzung des vorhandenen Gärsubstrates einen positiven Effekt auf die Stabilität der Silage unter anaeroben Bedingungen bei langer Lagerdauer ausüben kann. Entsprechend traten bei kurzer Häcksellänge insbesondere bei langen Lagerzeiten geringere Verluste und zum Teil bessere Gärqualitäten der Silagen auf verglichen mit der längeren Häcksellänge.

Durch die verstärkte Bildung von Ethanol, Essig- und zum Teil Buttersäure mit langer Lagerdauer bei gröberer Häcksellänge wurden größere Differenzen in der Methanausbeute $y_{CH_4_zu}$ zwischen den Lagerdauervarianten ermittelt als bei der kurzen Längeneinstellung. Bei Einrechnung der Silierverluste, die bei gröberer Häcksellänge höher lagen, wurden diese Unterschiede ausgeglichen. Insgesamt spiegelte sich der positive Einfluss der kurzen Häcksellänge auf den Silierverlauf und die Gärqualität der Silagen bei langer Lagerdauer im Labormaßstab nicht in den Methanausbeuten $y_{CH_4_orig}$ wider. Zwischen den Zerkleinerungsvarianten wurden nach 10 Tagen und 365 Tagen Lagerdauer annähernd gleiche Differenzen in der Methanausbeute $y_{CH_4_orig}$ ermittelt.

4.4.7 Einfluss von Silierzusätzen auf Silierverlauf und Biomethanisierung

4.4.7.1 Einfluss der Silierzusätze auf den Silierverlauf

Bei der Silierung führen anaerobe Bedingungen und die schnelle Produktion von Milchsäure zu einer Konservierung von Energie und Nährstoffen des Pflanzenmaterials. Dennoch ist die Silierung ein unkontrollierter, von der epiphytischen Mikroflora abhängiger Prozess. Um den Silierverlauf zu sichern bzw. zu verbessern, können Silierzusätze verwendet werden. Diese haben über die Hemmung von Gärschädlingen bzw. über die Förderung der Milchsäuregärung einen mehr oder weniger starken Effekt auf das Gärsäuremuster der Silagen. Das Ziel der Applikation von Silierzusätzen in Versuchsschwerpunkt III war es, die Wirkung der durch Silierzusätze hervorgerufenen Änderungen im Gärsäuremuster auf die Biomethanisierung zu untersuchen. Hierfür kamen bei Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale kommerziell erhältliche Silierzusätze zur Anwendung.

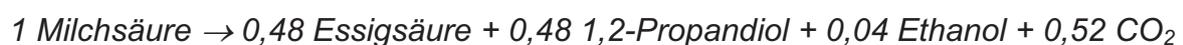
Durch den chemischen Silierzusatz Chem. A wurden bei Mais kaum Änderungen im Gärsäuremuster erzielt. Lediglich der Gehalt an Ethanol lag etwas niedriger als bei der Kontrollvariante ohne Silierzusatz. Dies ist möglicherweise auf die hemmende Wirkung des Präparates auf Hefen zurückzuführen (KUNG ET AL. 2003, KALZENDORF 2006), wobei durch Aktivität der Hefen vorrangig Ethanol gebildet wird. Von dem im Präparat enthaltenem Propionat und Benzoat geht eine antimykotische Wirkung aus (KALZENDORF 2006), die zu einer verbesserten aeroben Stabilität der Silage führt. Letzteres wurde jedoch nicht in die Untersuchung mit einbezogen.

Der chemische Silierzusatz Chem. B bewirkte bei Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale im Wesentlichen eine Verringerung der Intensität der Fermentationsprozesse, was zu niedrigeren Gehalten an organischen Säuren und Alkoholen im Gärsäuremuster sowie geringeren TM-Verlusten führte. Das in dem Präparat enthaltene Natriumnitrit wird in der Anfangsphase des Silierprozesses zu Stickoxiden abgebaut, die Clostridien und Enterobakterien unterdrücken. Das ebenfalls enthaltene Hexamethylentetramin wird erst bei pH-Absenkung aufgespalten und setzt unter sauren Bedingungen Methanal frei (KUNG ET AL. 2003). Methanal bewirkt die Beschränkung von mikrobieller Aktivität und Proteolyse. Nach KUNG ET AL. (2003) sind dadurch geringere Gehalte an organischen Säuren und $\text{NH}_3\text{-N}$ in den Silagen zu erwarten. Eine Verringerung der Gehalte an $\text{NH}_3\text{-N}$ konnten in den vorliegenden Untersuchungen nicht nachgewiesen werden.

Zur Förderung der Milchsäuregärung bei der Silierung werden üblicherweise biologische Silierzusätze mit homofermentativen MSB appliziert. Dies erhöht die Anzahl an MSB zu Beginn der Silierung. Ein positiver Effekt hinsichtlich einer verlustarmen Milchsäurebildung und zügigen pH-Senkung ist jedoch nur dann gegeben, wenn die Impfkulturen die natürlich vorkommenden Gärkeime dominieren (MUCK 1988). Entsprechend ist

eine schnelle Wachstumsrate und hohe Konkurrenzkraft der Impfkulturen notwendig. In Versuchsschwerpunkt III konnte durch das biologische Siliermittel MSB-ho mit homofermentativen MSB bei Mais keine erhöhte Milchsäurebildung festgestellt werden. Andere Indikatoren für einen stärker homofermentativen Silierverlauf, wie geringere Gehalte an Essigsäure und Ethanol, höhere Restzuckergehalte in den Silagen und geringere Fermentationsverluste gegenüber der Kontrollvariante, wurden ebenfalls nicht gefunden. Dies deutet darauf hin, dass die epiphytische Mikroflora durch die zugesetzten MSB nicht dominiert werden konnte. Obwohl durch Zusatz von *Lactobacillus plantarum* häufig eine verstärkte homofermentative Milchsäuregärung bewirkt wird (**Tab. 29**), ist auch das Ausbleiben einer entsprechenden Wirkung an verschiedenen Stellen in der Literatur beschrieben (LI ET AL. 1992, RANJIT & KUNG 2000, RANJIT ET AL. 2002).

Bei den vorliegenden Untersuchungen konnten bei den geprüften Pflanzenarten unter Zusatz des speziell für Biogassilagen angebotenen biologischen Siliermittels MSB-komb. A, dass neben homofermentativen MSB auch *Lactobacillus buchneri* enthält, ein Anstieg des Essigsäuregehaltes und geringere Milchsäuregehalte im Gär säuremuster der Silagen nachgewiesen werden. Überwiegend traten höhere Gehalte an Alkoholen auf. Während sich die Silagen mit dem biologischen Silierzusatz MSB-komb. A nach 10 Tagen Silierdauer noch nicht wesentlich von den Kontrollsilagen ohne Silierzusatz unterschieden, waren diese Änderungen im Gär säuremuster vor allem nach 90 Tagen Silierdauer gegeben. Bei herkömmlicher heterofermentativer Milchsäuregärung werden bereits in der Anfangsphase der Silierung verschiedene Gärprodukte, u.a. Milch- und Essigsäure gebildet (MCDONALD ET AL. 1991). Heterofermentative MSB der Art *Lactobacillus buchneri* sind jedoch in der Lage Milchsäure unter anaeroben Bedingungen in Essigsäure und 1,2-Propandiol sowie geringe Mengen an Ethanol umzuwandeln (OUDE ELFERINK ET AL. 2001):



Das Temperaturoptimum dieses Prozesses liegt bei 20 bis 30°C. Um die Umwandlung der Milchsäure in Essigsäure und 1,2-Propandiol in Gang zu setzen, sind geringe pH-Werte von deutlich unter 5,8 notwendig (OUDE ELFERINK ET AL. 2001). Es ist folglich davon auszugehen, dass durch homofermentative MSB des Silierzusatzes MSB-komb. A zunächst größere Mengen an Milchsäure gebildet wurden, was zu einer Senkung des pH-Wertes führte. Bei ausreichend niedrigem pH-Wert setzte der Abbau der Milchsäure unter Bildung von Essigsäure und 1,2-Propandiol durch *Lactobacillus buchneri* ein. Bei Mais und Grünschnittroggen wurden in Versuchsschwerpunkt III Anteile an Propanol und Propionsäure im Gär säuremuster nach 90 Tagen Silierdauer nachgewiesen. In anderen Studien wurde gezeigt, dass 1,2-Propandiol in den Silagen entweder angereichert (NISHINO ET AL. 2003) oder weiter zu Propionsäure und 1-Propanol

metabolisiert werden kann (DRIEHUIS ET AL. 1999). Genauere Erkenntnisse hierzu fehlen jedoch bisher. Die starke Verschiebung des Gär säuremusters zugunsten von Essigsäure durch das Siliermittel MSB-komb. A ist erwünscht. Ziel ist es, durch einen sofortigen Abbau der Essigsäure im Biogasprozess und durch erhöhte aerobe Stabilitäten der Silagen die Methanausbeute zu verbessern (SCHAUMANN 2009). Es ist bekannt, dass vor allem Essigsäure eine hemmende Wirkung auf Hefen und damit einen positiven Effekt auf die aerobe Stabilität ausübt (OUDE ELFERINK ET AL. 2001, DANNER ET AL. 2003). Die Umsetzungswege der heterofermentativen MSB sind mit höheren Masseverlusten verbunden als die Bildung der Milchsäure durch homofermentative MSB (MCDONALD ET AL. 1991). Dies zeigt sich bei den geprüften Pflanzenarten des Versuchsschwerpunktes III und stimmt mit einer Reihe von Ergebnissen aus Silierversuchen anderer Autoren überein (**Tab. 29**). Das Ziel des Zusatzes heterofermentativer MSB ist es, durch die Minderung der Verluste durch Nacherwärmung die etwas höheren Fermentationsverluste bei der Silierung überzukompensieren (KUNG & RANJIT 2001).

Das biologische Siliermittel MSB-komb. B, welches bei Mais geprüft wurde, beinhaltet ebenfalls eine Kombination aus homo- und heterofermentativen MSB mit *Lactobacillus buchneri*. Auch hier wurden niedrigere Milchsäuregehalte und ein Anstieg an einwertigen Alkoholen im Gär säuremuster gegenüber der Kontrollvariante analysiert. Der Effekt auf den Essigsäuregehalt war jedoch wesentlich geringer verglichen mit dem biologischen Siliermittel MSB-komb. A.

In **Tab. 29** sind Literaturangaben zu Änderungen im Gär säuremuster durch Silierzusätze, die den in Versuchsschwerpunkt III genutzten Präparaten vergleichbar sind, jeweils gegenüber der Kontrollvariante aufgeführt.

Tab. 29: Literaturangaben zu Änderungen von TM-Verlust, pH-Wert und Gärsäuremuster (Differenz Silierzusatz – Kontrolle) durch Zusatz von Siliermitteln

| Siliermittel (Wirkstoff) | Pflanzenart | Silierdauer [d] | TM-Verlust [%] | pH [-] | MS [%TM] | ES [%TM] | BS [%TM] | Eth [%TM] | 1,2-PD [%TM] | Quelle |
|--|-------------|-----------------|----------------|--------|----------|----------|----------|-----------|--------------|------------------------|
| chemisch (PS-basiert) | Mais | 100 | k.A. | 0,0 | -1,0 | +0,2 | 0,0 | -0,4 | k.A. | (RANJIT & KUNG 2000) |
| chemisch (AS, PS) | Triticale | 90 | ca. -4 | 0,0 | -3,7 | -1,7 | k.A. | k.A. | k.A. | (NADEAU 2007) |
| chemisch (NB, NP) | Mais | 90 | -0,2 | 0,0 | -0,8 | +0,1 | k.A. | 0,0 | k.A. | (ZACHARIAS 2008) |
| homof. MSB (2 Stämme LP) | Mais | 100 | k.A. | 0,0 | -0,7 | -0,1 | 0,0 | -0,4 | k.A. | (RANJIT & KUNG 2000) |
| | | 100 | k.A. | 0,0 | -0,5 | +0,2 | 0,0 | -0,4 | k.A. | |
| homof. MSB (LP, PP, PF, E) | Mais | 180 | +3,4 | +0,2 | +0,3 | +0,4 | k.A. | k.A. | k.A. | (RANJIT ET AL. 2002) |
| homof. MSB (LP) | Mais | 8 | -0,5 | -0,4 | +3,9 | -0,9 | k.A. | 0,0 | k.A. | (FILYA 2003a) |
| | | 90 | -0,9 | -0,1 | +3,9 | -1,0 | k.A. | -0,1 | k.A. | |
| homof. MSB (LP) | Mais | 60 | 0,0* | 0,0 | +1,4 | -0,8 | k.A. | k.A. | k.A. | (FILYA 2003b) |
| | Sorghum | 60 | -0,1* | -0,1 | -0,5 | -0,3 | k.A. | k.A. | k.A. | |
| heterof. MSB (LB) | Weizen | 60 | k.A. | k.A. | -1,0 | +0,7 | k.A. | +0,1 | k.A. | (WEINBERG ET AL. 1999) |
| | Sorghum | 60 | k.A. | k.A. | -0,8 | +1,2 | k.A. | +0,1 | k.A. | |
| heterof. MSB (LB 1x10 ⁶ KbE/g) | Mais | 100 | k.A. | 0,0 | -1,3 | +1,8 | 0,0 | -1,1 | k.A. | (RANJIT & KUNG 2000) |
| heterof. MSB (LB 5x10 ⁵ KbE/g, E) | Gerste | 69 | +3,4 | -0,6 | -0,8 | +3,2 | -0,6 | +0,7 | k.A. | (KUNG & RANJIT 2001) |
| heterof. MSB (LB 2,5x10 ⁵ KbE/g) | Mais | 180 | +1,4 | +0,1 | -0,1 | +1,7 | k.A. | k.A. | k.A. | (RANJIT ET AL. 2002) |
| heterof. MSB (LB) | Mais | 8 | +0,7 | +0,2 | -1,5 | +2,1 | k.A. | 0,0 | k.A. | (FILYA 2003a) |
| | | 90 | +1,6 | +0,4 | -1,2 | +2,6 | k.A. | 0,0 | k.A. | |
| heterof. MSB (LB) | Sorghum | 8 | +0,8 | 0,0 | -2,3 | +2,8 | k.A. | 0,0 | k.A. | (FILYA 2003a) |
| | | 90 | +1,5 | +0,4 | -2,4 | +3,3 | k.A. | 0,0 | k.A. | |
| heterof. MSB (LB) | Weizen | 60 | +1,3* | +0,3 | -1,3 | +1,3 | k.A. | k.A. | k.A. | (FILYA 2003b) |
| | Sorghum | 60 | +1,5* | +0,2 | -2,3 | +1,4 | k.A. | k.A. | k.A. | |
| | Mais | 60 | +1,7* | +0,3 | -1,3 | +1,0 | k.A. | k.A. | k.A. | |
| heterof. MSB (LB) | Mais | 10 | +0,7 | 0,0 | -0,7 | +1,1 | k.A. | +0,1 | +1,0 | (NISHINO ET AL. 2004) |
| | | 60 | +3,9 | +0,2 | -2,4 | +3,3 | k.A. | -1,0 | +2,8 | |
| homo+heterof. MSB (LP, LB) | Sorghum | 60 | k.A. | k.A. | +0,6 | -0,1 | k.A. | -0,6 | k.A. | (WEINBERG ET AL. 1999) |
| homo+heterof. MSB (LP, LB) | Mais | 8 | -0,3 | -0,2 | +0,8 | +1,4 | k.A. | 0,0 | k.A. | (FILYA 2003a) |
| | | 90 | -0,6 | +0,1 | +1,6 | +1,9 | k.A. | 0,0 | k.A. | |
| homo+heterof. MSB (LP, LB) | Sorghum | 8 | -0,2 | -0,1 | +0,7 | +2,0 | k.A. | -0,1 | k.A. | (FILYA 2003a) |
| | | 90 | -0,5 | 0,0 | +1,3 | +2,5 | k.A. | 0,0 | k.A. | |
| homo+heterof. MSB (LP, LB) | Weizen | 60 | +0,5* | 0,0 | -0,9 | +1,1 | k.A. | k.A. | k.A. | (FILYA 2003b) |
| | Sorghum | 60 | +0,6* | 0,0 | -1,8 | +1,1 | k.A. | k.A. | k.A. | |
| | Mais | 60 | +0,8* | +0,1 | -0,5 | +0,9 | k.A. | k.A. | k.A. | |

MS... Milchsäure, ES... Essigsäure, BS... Buttersäure, Eth... Ethanol, 1,2-PD... 1,2-Propandiol, NB... Natriumbenzoat, NP... Natriumpropionat, AS... Ameisensäure, PS... Propionsäure, LP... *Lactobacillus plantarum*, LB... *Lactobacillus buchneri*, PP... *Pediococcus pentosaceus*, PF... *Propionibacterium freudenreichii*, E... Enzyme

Die Werte aus der Literatur zeigen bei Zusatz chemischer Siliermittel und biologischer Siliermittel mit homo- und heterofermentativen MSB vorwiegend die gleichen Trends wie in Versuchsschwerpunkt III sowie eine gleiche Größenordnung bei der Änderung des Gärsäuremusters. Es ist zu schlussfolgern, dass die erwünschten Effekte der Silierzusätze auf den Silierverlauf und das Gärsäuremuster überwiegend erreicht wurden.

4.4.7.2 Einfluss der Silierzusätze auf die Biomethanisierung

Die in Versuchsschwerpunkt III bei Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale applizierten Silierzusätze wirkten sich unterschiedlich auf die Methanausbeute bezogen auf die zugeführte oTM aus. Die Wirkung war jedoch allgemein gering und zumeist statistisch nicht gesichert. Dabei ist der Effekt bei der gewählten Versuchsdurchführung auf durch die Silierzusätze erzeugte Unterschiede im Gärsäuremuster der Silagen zurückzuführen. Die Wirkungen des Silierzusatzes auf die aerobe Stabilität und die möglichen durch Nacherwärmung entstehenden Verluste wurden nicht berücksichtigt.

Durch den chemischen Silierzusatz Chem. A mit Wirkrichtung „Verbesserung der aeroben Stabilität“ ergaben sich bei Mais entsprechend den geringen Unterschieden im Gärsäuremuster kaum Änderungen der Methanausbeute. Lediglich bei 8 mm Häcksel­länge wurde eine um 5 % niedrigere Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ gegenüber der Kontrollvariante ohne Silierzusatz festgestellt. Bei Zusatz des chemischen Siliermittels Chem. B mit Wirkrichtung „Verbesserung des Gärverlaufes“ wurden allgemein etwas geringere Methanausbeuten $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ bei den Pflanzenarten Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale ermittelt. Die Differenz zur Kontrollvariante lag dabei bei maximal 7 %. Wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, könnten die durch diese Silierzusätze erzeugten geringeren Gehalte an Essigsäure und Alkoholen im Gärsäuremuster sowie die geringere Intensität der Fermentationsprozesse zu diesen Werten geführt haben (Abschnitt 4.4.3.1). Vergleichbare Ergebnisse zum Einfluss chemischer Silierzusätze auf die Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ sind in Untersuchungen von ZACHARIAS (2008) zu finden. Hierbei bewirkte der Silierzusatz Chem. A eine mit 15 % deutlich geringere Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ bei Mais verglichen mit der Kontrollvariante. Die mit dem Siliermittel Chem. B behandelten Luzerne- und Grassilagen wiesen jeweils um 33 und 1 % geringere Methanausbeuten $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ auf als ohne Silierzusatz.

Im Gegensatz zu den chemischen Silierzusätzen hatten die biologischen Silierzusätze MSB-komb. A und B in Versuchsschwerpunkt III überwiegend eine schwach positive Wirkung auf die Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$. Bei Applikation dieser biologischen Siliermittel mit homo- und heterofermentativen MSB wurden um bis zu 3 % höhere Methanausbeuten $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ der Silagen gegenüber der Kontrollvariante ermittelt. Diese Unterschiede traten vorwiegend erst nach einer Lagerdauer von 90 Tagen auf. Die positive Wirkung der biologischen Silierzusätze mit homo- und heterofermentativen MSB auf die Methanausbeute kann wiederum mit den erhöhten Gehalten an Essigsäure und Alkoholen im

Gärsäuremuster der entsprechend behandelten Silagen in Verbindung gebracht werden (Abschnitt 4.4.3.1). Durch das Siliermittel MSB-ho mit ausschließlich homofermentativen MSB konnte hingegen keine Änderung des Gärsäuremusters und der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ bei Mais erzielt werden. Eine Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ durch Zusatz heterofermentativer MSB wird auch von anderen Autoren beschrieben. Bei Sudangras wurde eine um 6 % höhere Methanausbeute bei Zusatz heterofermentativer MSB erzielt verglichen mit der unbehandelten Kontrolle (BANEMANN ET AL. 2008b). Für Maissilage wird eine um 13 % höhere Methanausbeute bei essigsäurereicher Maissilage, allerdings nach Lagerung unter Einfluss von Luftsauerstoff, angegeben (BANEMANN ET AL. 2008b). THAYSEN ET AL. (2008) ermittelten ein um 7 % höheres Biogaspotenzial von mit homo- und heterofermentativen MSB behandelte Maissilage im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle im Laborversuch. In der Praxis lag die Biogasausbeute um 3 % niedriger, der Methangehalt im Biogas jedoch um 2,3 % höher. In einer anderen Studie wurden für Mais bei Zusatz homo- und heterofermentativer MSB eine Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ um 22 % nach 44 Tagen Silierdauer und eine Verringerung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ um 12 % nach 119 Tagen Lagerdauer gegenüber der unbehandelten Kontrolle gemessen (NEUREITER ET AL. 2005). Von IDLER ET AL. (2007) werden keine Änderungen in der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ durch Zusatz homo- und heterofermentativer MSB bei einem ersten Grasschnitt, jedoch eine geringe Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ um 2 % bei einem zweiten Grasschnitt angegeben.

Zusammenfassend werden die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Trends zum Einfluss chemischer Silierzusätze und biologischer Silierzusätze mit homo- und heterofermentativen MSB durch Ergebnisse aus der Literatur im Wesentlichen bestätigt. Allerdings sind bei den eigenen Untersuchungen überwiegend geringere Unterschiede bei Zusatz des Siliermittels zur Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ der Kontrollvariante gegeben. Studien zum Einfluss homofermentativer MSB auf die Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ sind ebenfalls für verschiedene Pflanzenarten in der Literatur zu finden, weichen jedoch in ihren Ergebnissen stark voneinander ab. Für Luzerne ergab sich eine um 11 % geringere und für Mais eine um 12 % geringere Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ bei Zusatz eines Siliermittels mit homofermentativen MSB und Propionsäurebakterien (ZACHARIAS 2008). Bei Grassilage wurde die Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ um 10 % und 1 % durch den Zusatz homofermentativer MSB gesenkt (ZACHARIAS 2008). LEHTOMÄKI (2006) ermittelte eine um 4 bis 33 % höhere Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ für Gras und eine um 6 bis 11 % geringere Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ für Zuckerrübenköpfe bei Zusatz eines Siliermittels mit homofermentativen MSB und Propionsäurebakterien gegenüber der Kontrollvariante. In Untersuchungen von PAKARINEN ET AL. (2008) hatte der Zusatz eines Siliermittels mit homofermentativen MSB und Enzymen keinen positiven Effekt auf die Methanausbeute von Gras. Von NEUREITER ET AL. (2005) wurde eine um 3 % höhere Methanausbeute

nach 44 Tagen Silierdauer und eine um 21 % geringere Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ nach 119 Tagen Silierdauer bei Applikation homofermentativer MSB bei Mais analysiert. Eindeutige Schlussfolgerungen lassen sich aus diesen Literaturangaben nicht ziehen.

LEHTOMÄKI (2006) räumt ein, dass ein Teil der Erhöhung der Methanausbeute durch den Silierzusatz selbst entstehen kann. Dies trifft jedoch nicht auf die in Versuchsschwerpunkt III geprüften Silierzusätze zu. Die zugegebene Masse der biologischen Siliermittel war mit etwa 50 μg je Gärttest, also 1/1.000.000 der Masse des zugeführten pflanzlichen Substrates, so gering, dass selbst bei Verwertung des Zusatzes als „Substrat“ im Biogasprozess keine merkliche Erhöhung der Methanausbeute möglich ist. Zwischen den Siliergütern mit Silierzusatz, die grundsätzlich mit analysiert wurden, ergab sich nur bei Sudangras ein signifikanter Unterschied. Dieser ist jedoch auf die starke Heterogenität des Siliergutes zurückzuführen (Abschnitt 4.4.1), nicht auf den Zusatz des Siliermittels.

Ebenso wie bei den Einflussfaktoren Häcksellänge und Lagerdauer ist auch bei den Silierzusätzen die Einbeziehung der Silierverluste in die Methanausbeute für die Bewertung der Wirkung auf die Methanbildung von Bedeutung. Mit Beachtung der Fermentationsverluste, die bei chemischen Silierzusätzen geringer ausfielen als bei den biologischen Silierzusätzen, wurden Unterschiede in der Methanausbeute zwischen den Siliermittelvarianten ausgeglichen. Bei keiner der geprüften Pflanzenarten wurden signifikante Unterschiede in der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ zwischen den Siliermittelvarianten ermittelt. Entsprechend können keine Vorzugsvarianten definiert werden. Die Trends aus anderen Studien, die auch bei Einbeziehung der Fermentationsverluste noch eine Erhöhung der Methanausbeute um bis zu 14 % bei Mais, 11 % bei Gras und 19 % bei Zuckerrüben beschreiben (FRITZ & NELLES 2006, LEHTOMÄKI 2006), wurden nicht bestätigt.

Bei den vorliegenden Laborergebnissen wiesen alle Kontrollsilagen ohne Silierzusatz bereits eine sehr gute Gärqualität auf. Dies ist zum Einen auf die leichte Vergärbarkeit des Pflanzenmaterials bei Mais, Sudangras und Triticale und zum Anderen auf die optimierten Bedingungen im Laborsilo zurückzuführen. D.h., durch den Silierzusatz konnte die Gärqualität der Silagen nicht verbessert werden. Weiterhin wurden Unterschiede in der aeroben Stabilität der Silagen nicht bewertet. Es ist davon auszugehen, dass zumindest das chemische Siliermittel Chem. A sowie die biologischen Siliermittel MSB-komb. A und B mit homo- und heterofermentativen MSB die aerobe Stabilität der Silagen verbesserten. Dies spielt vor allem bei Mais und Sudangras mit hohen Restzuckergehalten in den Silagen eine Rolle. Werden mittels Silierzusatz Fehlgärungen oder hohe Verluste durch aeroben Verderb verhindert, ist der Einsatz eines angepassten chemischen oder biologischen Siliermittels für Biogassilagen empfehlenswert und kann einer Abnahme der Methanausbeute durch Masseverluste entgegenwirken (BANEMANN & NELLES 2008a, ZACHARIAS 2008).

4.4.7.3 Einfluss der Silierzusätze bei unterschiedlicher Häcksellänge

Die Wirkung einer kurzen Häcksellänge hinsichtlich einer schnelleren und nachhaltigeren Säurebildung bei der Silierung wurde in Versuchsschwerpunkt III von den Effekten der Silierzusätze auf die Fermentation überlagert. Obwohl bei kürzerer Häcksellänge auch bei dem Silierzusatz MSB-komb. A noch überwiegend höhere Milchsäuregehalte in den Silagen analysiert wurden als bei weniger intensiver Zerkleinerung, lagen auch die Essigsäuregehalte teilweise höher. Auch DULPHY & DEMARQUILLY (1973 zitiert in GORDON 1982) stellten fest, dass der Effekt der Häcksellänge auf die Fermentation bei der Silierung wesentlich verringert oder eliminiert wird, wenn Silierzusätze verwendet werden.

Ähnlich wie bei der Silierdauer war auch bei den Silierzusätzen eine stärkere Wirkung auf die Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ mit gröberer Häcksellänge gegeben. Da diese Unterschiede jedoch durch Einrechnung der Silierverluste, die bei Zusatz der Siliermittel bei kürzerer Häcksellänge überwiegend niedriger lagen, ausgeglichen wurden, ist der Gesamteffekt der Silierzusätze auf die Methanausbeute sowohl bei kurzer als auch bei längerer Häcksellänge vernachlässigbar. Auch mit Silierzusatz war eine positive Wirkung einer stärkeren mechanischen Aufbereitung auf die Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ gegeben.

4.4.8 Kritische Betrachtung der Versuchsdurchführung

4.4.8.1 Batch-Gärtest

Ziel der Batch-Gärtests war es, die Methanbildung verschiedener Substrate und unterschiedlich behandelter Varianten unter optimierten einheitlichen Bedingungen im Labormaßstab zu prüfen. Dies ermöglicht den Vergleich einer großen Anzahl von Substraten und Behandlungen und damit die Ermittlung von Vorzugsvarianten. Nach VDI-Richtlinie 4630 werden für vergleichbare Ergebnisse und einen einheitlichen Gärverlauf folgende Anforderungen an das Inoculum bzw. an den Gärtestansatz eines Batch-Gärtests gestellt (VDI 2006):

- Das Verhältnis $\text{oTM}_{\text{Substrat}} : \text{oTM}_{\text{Inoculum}} (a_i)$ sollte maximal 0,5 betragen.
- Der Anteil an Biogas aus dem Inoculum am gesamten produzierten Gasvolumen sollte maximal 20 % betragen.
- Der TM-Gehalt des Versuchsansatzes sollte 10 % nicht überschreiten.

Mit der beschriebenen Versuchsdurchführung wurden diese Anforderungen erfüllt. Das Verhältnis $\text{oTM}_{\text{Substrat}} : \text{oTM}_{\text{Inoculum}}$ lag bei den durchgeführten Untersuchungen zwischen 0,28 und 0,54 und wies über alle Gärtests gemittelt einen Wert a_i von 0,41 auf. Die Gasbildung der Kontrollen überschritt in keinem Versuch 14 % des Biogasvolumens, das aus den Gärtestansätzen mit Substrat erzeugt wurde. Im Mittel wurden aus den Kontrollen nur 5 % des Biogasvolumens der Gärtestansätze mit Substrat gebildet. Der maximale TM-Gehalt der Versuchsansätze lag bei 5,1 % und damit nur bei der Hälfte der TM-Obergrenze.

Zur Überprüfung der Aktivität des Inoculums wurde mikrokristalline Cellulose als Referenzsubstrat hinsichtlich der Biogasbildung getestet. Diese Cellulose ist zu 100 % abbaubar und sollte in einem Gärtest mit ausreichend aktivem Inoculum mindestens 80 % ihres Biogaspotenzials von $750 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}$ bilden (VDI 2006). In diesem Wert ist bereits die Biomasseneubildung berücksichtigt. Das theoretische Biogaspotenzial bei Berechnung nach BUSWELL liegt etwa 10 % höher bei $829 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}$. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde grundsätzlich die geforderte Biogasausbeute aus der Cellulose erreicht. Die über alle Versuchsansätze gemittelte Biogasausbeute lag bei $776 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}$ und demnach sogar über dem nach VDI (2006) angegebenen Biogaspotenzial der Cellulose. Mit im Mittel 51,3 Vol-% Methan im Biogas ergibt sich eine Methanausbeute für die mikrokristalline Cellulose von $398 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}$. Ähnlich hohe Methanausbeuten werden mit $419 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}$ und $392 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}$ auch von anderen Autoren für dieses Referenzsubstrat angegeben (GUNASEELAN 2004, CZEPUCK ET AL. 2006). Da die Biomasseneubildung bei der anaeroben Vergärung zwischen 3 bis 20 % liegen kann (WEILAND 2001, GAVALA ET AL. 2003), sind entsprechend hohe Methanausbeuten erklärbar.

Die Summenkurven der gemessenen Methanausbeuten wiesen durchgängig einen steilen Anstieg in den ersten 8 bis 15 Tagen auf und flachten anschließend fast ausschließlich deutlich ab. Die maximalen Methanraten wurden generell innerhalb der ersten ein bis zwei Tage nach Versuchsbeginn erreicht. Nach VDI (2006) entsteht dieser Kurvenverlauf bei einer „normalen“, störungsfreien Umsetzung des Substrates. Es ist davon auszugehen, dass durch die gewählte Versuchsdurchführung und das Inoculum ein optimaler Substratabbau gewährleistet war.

Für die durchgeführten Batch-Gärtests der Versuchsschwerpunkte I bis III ergibt sich ein mittlerer Variationskoeffizient der Messwiederholungen von 2,3 %. Dies lässt auf eine hohe Messgenauigkeit schließen, zumal es sich bei dem Messsystem um biologische Prozesse handelt. Ähnlich niedrige relative Standardabweichungen werden mit im Mittel 1,7 bis 2,0 % von SCHUMACHER (2008) für die mittels „Hohenheimer Biogastest (HBT)“ gemessenen Methanausbeuten von Biogaspflanzen angegeben. Bei diesem Batch-Gärtest erfolgt jedoch eine intensivere Vorbehandlung mit Trocknung und Zerkleinerung des Substrates auf < 1 mm und damit eine stärkere Homogenisierung des Ausgangsmaterials (HELFFRICH & OECHSNER 2003). Für Batch-Gärtests mit Eudiometer lässt sich eine mittlere prozentuale Standardabweichung der Messwiederholungen von 3,7 % berechnen (AMON ET AL. 2007a). Die von KAISER (2007) angeführten Variationskoeffizienten der Methanausbeute im Batch-Gärtest liegen für Mais mit 6,6 bis 8,8 %, für Grünland und Gras mit 6,9 bis 10,9 % und für andere nachwachsende Rohstoffe mit 9,3 bis 11,1 % deutlich höher.

Obwohl das nach VDI-Richtlinie für einen einheitlichen Gärverlauf notwendige Kriterium $a_i \leq 0,5$ eingehalten wurde, erschweren die Unterschiede im Verhältnis $\sigma_{TM_{\text{Substrat}}}$ zu $\sigma_{TM_{\text{Inoculum}}}$ bei den unterschiedlichen Ernteterminen des Mais in Versuchsschwerpunkt I die Auswertung. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass ein steigendes Verhältnis a_i von 0,2 auf 0,5 bei Mais eine Abnahme der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{zu}}}$ um 5 bis 10 % und eine Abnahme des mittleren Methangehaltes im Biogas um 3,3 bis 3,6 Vol-% bewirkt (**Abb. 47**). Eine Abnahme der Geschwindigkeit der Methanbildung konnte nur bei dem Mais mit niedrigem TM-Gehalt nachgewiesen werden. Dabei lag die Geschwindigkeitskonstante bei $a_i = 0,5$ um $0,04 \text{ d}^{-1}$ unter der Geschwindigkeitskonstante bei $a_i = 0,2$.

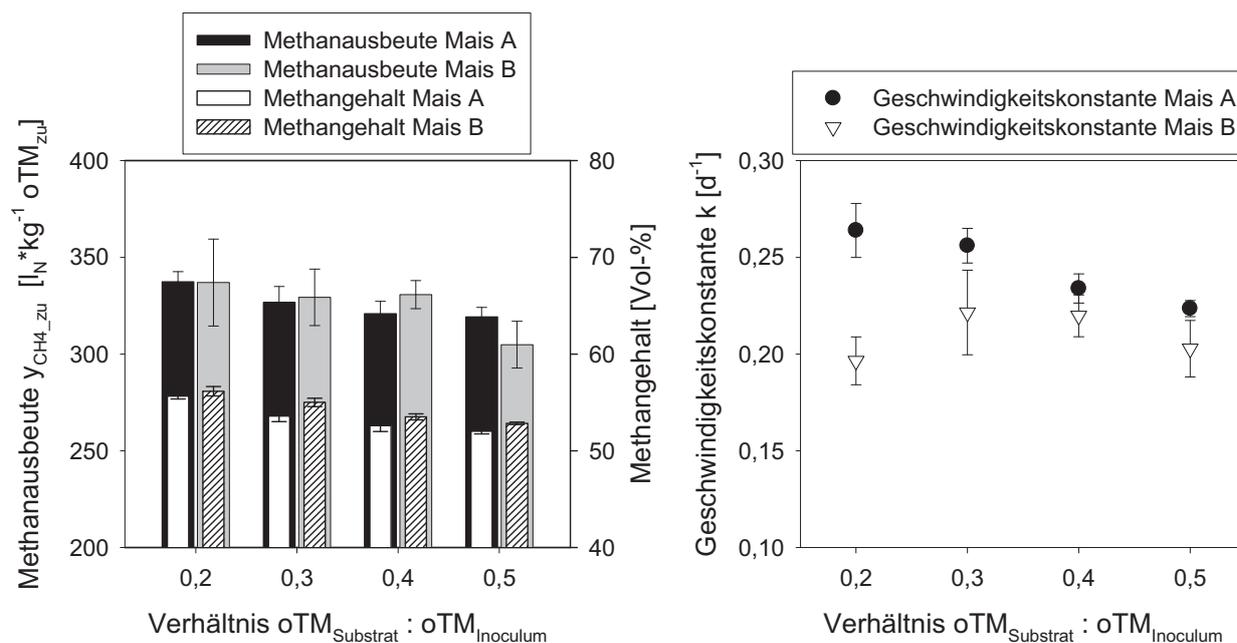


Abb. 47: Einfluss des Verhältnisses $\text{oTM}_{\text{Substrat}} : \text{oTM}_{\text{Inoculum}}$ a_i auf Methanausbeute, Methangehalt und Geschwindigkeit der Methanbildung im Batch-Gärtest bei frischem Mais A (TM = 25 %) und frischem Mais B (TM = 44 %); n = 5

Untersuchungen aus der Literatur zum Einfluss des Anteils an Inoculum auf das Ergebnis des Batch-Gärtests bestätigen in erster Linie einen Effekt auf die Geschwindigkeit der Methanbildung. Von CHYNOWETH ET AL. (1993) wurde mit sinkendem Verhältnis a_i von ca. 1 auf 0,5 eine Zunahme der Geschwindigkeit der Methanbildung aus Cellulose beobachtet. In Batch-Gärtests mit Schweinegülle, Weizenstroh bzw. Ölkuchen der Sonnenblume stieg mit dem Anteil an Inoculum die Geschwindigkeit der Methanbildung ebenfalls deutlich an (LLABRÉS-LUENGO & MATA-ALVAREZ 1988, GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ & GARCÍA-ENCINA 2009, RAPASO ET AL. 2009). Der Anteil an Inoculum hatte jedoch keinen bzw. nur einen geringen, statistisch nicht gesicherten Effekt auf die Biogasausbeute. Auch von MOORHEAD & NORDSTEDT (1993) konnte kein eindeutiger Einfluss der Menge an Inoculum auf die Methanausbeute gefunden werden. In Untersuchungen von LIU ET AL. (2009) wurde hingegen ein signifikanter Einfluss des Inoculum-Substrat-Verhältnisses auf Methanausbeute und Methanbildungsrate gefunden. Für zukünftige Arbeiten ist ein möglichst einheitliches Verhältnis $\text{oTM}_{\text{Substrat}}$ zu $\text{oTM}_{\text{Inoculum}}$ der Vergleichsvarianten zu empfehlen.

Nach VDI 4630 ist eine Fortführung des Versuches so lange zu empfehlen, bis die tägliche Biogasrate nur noch 1 % des bis zu diesem Zeitpunkt produzierten gesamten Biogaslumens beträgt (VDI 2006). Dieses Abbruchkriterium war bei den vorliegenden Versuchen nach 11 bis 26 Tagen, im Mittel nach 17 Tagen erreicht. Entsprechend war nach einer Versuchsdauer von 30 Tagen bei allen Ansätzen die Gasbildung aus dem Substrat nach VDI (2006) weitgehend beendet. Auch von BADGER ET AL. (1979) wird eine Versuchsdauer von 30 Tagen als Sollwert für Batch-Gärtests angeführt, wobei

anschließend nur noch eine sehr geringe Produktionsrate des Biogases vorhanden ist. MÄHNERT (2007) sieht ebenfalls eine pauschale Versuchsdauer von 4 Wochen bei der Vergärung von NawaRos und Gülle im Batch-Gärtest als ausreichend an. Nach 28 Tagen wurden 92 bis 100 % des Biogaspotenzials von Rindergülle, Mais-, Rüben- und Roggensilage gewonnen. Bei der Biomethanisierung von Klee, Gras und Hafer machte die Methanausbeute nach 22 Tagen im Batch-Gärtest 70 bis 127 % der Methanausbeute aus, die nach 155 Tagen im Batch-Gärtest gemessen wurde (KAPARAJU ET AL. 2002). Von frischem Gras, Grassilage und Heu wurde nach 25 Tagen im Batch-Gärtest von BASERGA & EGGER (1997) 87 bis 100 % der maximalen Gasausbeute erreicht. In Untersuchungen von AMON ET AL. (2003b) war hingegen erst nach 39 bis 42 Tagen bei Silomaissilage und nach 41 bis 44 Tagen bei Kleegrassilage 95 % der maximal möglichen Methanmenge gebildet.

Obwohl in den vorliegenden Untersuchungen das nach VDI (2006) empfohlene Abbruchkriterium grundsätzlich überschritten war, wurden in Versuchsschwerpunkt II bei den rohfaserreichen Substraten Grünschnittroggen und Sudangras Methanbildungspotenziale $y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ berechnet, die deutlich über den nach 30 Tagen gemessenen Methanausbeuten lagen. Dies deutet ebenso wie die geringen Geschwindigkeitskonstanten darauf hin, dass mit 30 Tagen Versuchsdauer die Methanbildung bei diesen beiden Pflanzenarten noch nicht vollständig abgeschlossen war. Ein noch stetig steigender Kurvenverlauf der Methanbildung bis zum Ende der Versuchsdauer kann zu einer deutlichen Überschätzung des Methanbildungspotenzials bei Berechnung über die Funktion nach HILL führen. MÄHNERT (2007) bestätigt, dass das Abbruchkriterium nach VDI (2006) keine Verallgemeinerung hinsichtlich des erzielten Anteils der Methanausbeute an $y_{\text{CH}_4_{\text{max}}}$ erlaubt. Ein definiertes Abbruchkriterium, wie es durch die VDI-Richtlinie vorgegeben wird, ist möglicherweise für Substrate mit geringer Abbaugeschwindigkeit und relativ niedrigem Methanvolumen ungünstig und sollte hierfür entsprechend überprüft werden.

4.4.8.2 Trockenmassekorrektur

In der vorliegenden Arbeit wurde der im Trockenschrank bestimmte TM-Gehalt in Abhängigkeit vom pH-Wert nach den ausführlichen Gleichungen von WEIßBACH & KUHLA (1995) um flüchtige organische Bestandteile und Ammoniak korrigiert (Abschnitt 4.2.6). Aktuelle Erkenntnisse zeigen jedoch, dass auch zweiwertige Alkohole, wie 1,2-Propandiol und 2,3-Butandiol, die insbesondere bei Zusatz von biologischen Siliermitteln zur Verbesserung der aeroben Stabilität in der Silage enthalten sein können, eine hohe Flüchtigkeitsquote besitzen (WEIßBACH & STRUBELT 2008a). Entsprechend wird für Maissilage eine neue Korrekturformel nach Gleichung 14 vorgeschlagen:

$$TM_k = TM_m + 0,95NFS + 0,08MS + 0,77PD + 1,00AA \quad \text{Gl. 14}$$

| | |
|--------|---|
| NFS... | Summe der Gehalte an niederen Fettsäuren (C ₂ ... C ₆) |
| MS... | Milchsäure |
| PD... | 1,2-Propandiol |
| AA... | Alkohole (C ₂ ... C ₄ inkl. 2,3-Butandiol) |

Weitere Korrekturgleichungen werden für Grassilage (WEIßBACH & STRUBELT 2008b) und Rübensilage (WEIßBACH & STRUBELT 2008c) angegeben. Nach WEIßBACH & STRUBELT (2008a) sind der Anstieg der Methanausbeute durch die Silierung sowie höhere Methanausbeuten bei Zusatz von Siliermitteln durch eine fehlende oder unzulängliche Korrektur des TM-Gehaltes zu erklären.

Um diesem Diskussionspunkt Rechnung zu tragen, wurden für die im Erntejahr 2007 erstellten Maissilagen des Versuchsschwerpunktes III nachträglich die Gehalte an 1,2-Propandiol und 2,3-Butandiol analysiert. In **Tab. 30** sind die Analysenergebnisse, TM-Gehalte und Methanausbeuten nach bisheriger Korrektur (WEIßBACH & KUHLA 1995) und neuer Korrekturformel (WEIßBACH & STRUBELT 2008a) gegenübergestellt.

Tab. 30: Gehalte an 1,2-Propandiol und 2,3-Butandiol sowie TM-Gehalte und Methanausbeuten der Maissilagen des Versuchsschwerpunktes III nach alter (WEIßBACH & KUHLA 1995) und neuer TM-Korrektur (WEIßBACH & STRUBELT 2008a)

| Häcksel- länge [mm] | Silier- zusatz | Lager- dauer [d] | 1,2- Propandiol [% FM] | 2,3- Butandiol [% FM] | TM- Gehalt [%] | TM- Gehalt [%] | Y _{CH₄_zu} [l _N *kg ⁻¹] | Y _{CH₄_zu} [l _N *kg ⁻¹] | Diff. Y _{CH₄_zu} |
|---------------------------|-------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|---|---|---|
| | | | | | | | oTM _{zu} | oTM _{zu} | |
| <i>Korrektur</i> | | | | | | „alt“ | „neu“ | „alt“ | „neu“ |
| 4 | ohne | 10 | n.n. | 0,05 | 33,0 | 33,0 | 359,8 | 359,2 | -0,2 % |
| 4 | ohne | 90 | 0,03 | 0,06 | 32,5 | 32,6 | 362,6 | 361,7 | -0,2 % |
| 4 | ohne | 365 | 0,16 | 0,06 | 32,5 | 32,7 | 362,5 | 360,3 | -0,6 % |
| 4 | Chem. A | 90 | n.n. | 0,06 | 32,3 | 32,4 | 362,9 | 362,2 | -0,2 % |
| 4 | MSB-komb. A | 90 | 0,13 | 0,07 | 32,8 | 33,1 | 367,3 | 364,1 | -0,9 % |
| 8 | ohne | 10 | n.n. | 0,05 | 32,1 | 32,1 | 341,7 | 341,2 | -0,1 % |
| 8 | ohne | 90 | 0,13 | 0,05 | 31,3 | 31,5 | 359,8 | 358,1 | -0,5 % |
| 8 | ohne | 365 | 0,71 | 0,06 | 30,4 | 31,2 | 378,4 | 368,5 | -2,6 % |
| 8 | Chem. A | 90 | n.n. | 0,07 | 31,8 | 31,9 | 343,4 | 342,7 | -0,2 % |
| 8 | MSB-komb. A | 90 | 0,57 | 0,06 | 29,3 | 29,9 | 371,5 | 363,7 | -2,1 % |
| 8 | MSB-ho | 90 | 0,23 | 0,05 | 30,6 | 30,9 | 357,9 | 355,1 | -0,8 % |
| 8 | MSB-komb. B | 90 | 0,51 | 0,06 | 31,4 | 31,9 | 361,6 | 356,0 | -1,5 % |

n.n. ... nicht nachweisbar

Die Ergebnisse zeigen, dass die Gehalte an 2,3-Butandiol mit 0,05 bis 0,07 % FM konstant niedrig lagen. Die Gehalte an 1,2-Propandiol wiesen hingegen mit Gehalten zwischen 0,00 und 0,71 % FM stärkere Unterschiede zwischen den Behandlungen auf. Die Anwendung der neuen Korrekturformel ergab für die Silagen ohne Silierzusatz und mit chemischem Zusatz bis zu einer Lagerdauer von 90 Tagen nur eine geringe Erhöhung des TM-Gehaltes von maximal 0,2 % (abs.) und eine geringe Abnahme der Methanausbeute um maximal 0,5 % (rel.) gegenüber der bisherigen Korrektur. Ein

größerer Effekt der TM-Korrektur bestätigte sich für die Silagen mit biologischem Zusatz und ohne Zusatz bei einer Lagerdauer von einem Jahr. Hier wurden nach neuer Korrektur um bis zu 0,8 % (abs.) höhere TM-Gehalte und um bis zu 2,6 % geringere Methanausbeuten gegenüber der bisherigen Korrektur ermittelt.

Durch Anwendung der neuen Korrekturformel verringern sich die Unterschiede in der Methanausbeute zwischen den Lagerdauer- und Siliermittelvarianten. Die grundsätzlichen Aussagen bezüglich des Einflusses von Silierung, Silierzusatz und Lagerdauer ändern sich für den Mais in Versuchsschwerpunkt III bei Einbeziehung von 1,2-Propandiol und 2,3-Butandiol in die TM-Korrektur jedoch nicht. Sowohl nach bisheriger als auch nach neuer Korrekturformel wurde kein signifikanter Unterschied in der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_zu}$ zwischen den Siliermittelvarianten ermittelt. Mit längerer Lagerdauer steigt die Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_zu}$ geringfügig an, bei Beachtung der Silierverluste ist jedoch kein Anstieg der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_orig}$ zu verzeichnen. Auch nach Neuberechnung liegen die Methanausbeuten $y_{\text{CH}_4_zu}$ der Silagen noch deutlich über den Methanausbeuten des Siliergutes, wobei dieser Unterschied unabhängig von der TM-Korrektur bei Einrechnung der Silierverluste ausgeglichen wird.

Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass die Methanausbeute mit Bezug auf die oTM sehr stark von dem gemessenen und korrigierten TM-Gehalt abhängig ist. Entsprechend spiegeln sich Messfehler und Ungenauigkeiten bei der TM-Bestimmung um ein Vielfaches in der Methanausbeute wider. Auf eine genaue Analyse des TM- und oTM-Gehaltes sollte daher besonderer Wert gelegt werden.

4.4.8.3 Bildanalyse

Die theoretische Häcksellänge zur Ernte ist für die Beschreibung der physikalischen Struktur eines Häckselgutes unzureichend, da sie einen Relativwert darstellt, der von einer Reihe von Faktoren seitens der Häckseltechnik und des Halmgutes beeinflusst wird (BOCKISCH & AUMÜLLER 1989). Für die Messung der tatsächlichen Häcksellängenverteilung und die Ermittlung der tatsächlichen mittleren Partikellänge des Häckselgutes wird üblicherweise auf die Siebanalyse als Methode zur gewichtsmäßigen Klassifizierung nach der Länge der Teilchen zurückgegriffen. Die Trennung der Teilchen über unterschiedliche Sieblochdurchmesser wird jedoch allgemein als stark fehlerbehaftet bewertet (GUTH & BOCKISCH 1992). Als kritisch ist vor allem zu sehen, dass die über die Größe des Siebloches theoretisch angenommene Länge der Teilchen, die ein Sieb passieren, nicht mit der realen Länge übereinstimmt. Insbesondere bei stäbchenförmigen oder länglichen Teilchen liegt die Partikellänge oft über der Sieblochgröße, da sich diese Teilchen aufstellen und durch das Siebgewebe fallen (GUTH 1995). Bei dem Häckselgut des Versuchsschwerpunktes II und III war mittels Siebanalyse keine eindeutige Trennung der Längenfraktionen für Grünschnittroggen und Triticale möglich

(Ergebnisse nicht dargestellt). Daher kam für die Ermittlung der physikalischen Struktur in der vorliegenden Arbeit ein bildanalytisches Messsystem zur Anwendung.

Die mittels bildanalytischer Vermessung bestimmten flächengewichteten Feinheitsmerkmale der physikalischen Struktur bestätigten qualitativ die Werte der theoretischen Häcksellängen und den optischen Eindruck des Häckselgutes. Nach BOCKISCH & AUMÜLLER (1989) sowie GUTH (1995) kann die Bildanalyse als geeignete objektive, reproduzierbare Methode zur Bewertung von verschiedenartigen Futterstrukturen angesehen werden. BOCKISCH & AUMÜLLER (1989) ermittelten über ein bildanalytisches Messverfahren eine spezifische projizierte Oberfläche von Ganzpflanzensilage von $44,3 \text{ dm}^2 \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ TM}$ und GUTH (1995) von $121 \text{ dm}^2 \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ TM}$ bei Zerkleinerung mit einem Exaktfeldhäcksler mit Normalmessertrommel. Für Maissilage werden Werte zwischen 56 und $67 \text{ dm}^2 \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ TM}$ angegeben (GUTH 1995). Die Literaturwerte stimmen in ihrer Größenordnung mit den in Versuchsschwerpunkt III gemessenen spezifischen projizierten Oberflächen überein. Die Diskussion der absoluten Werte der bildanalytischen Vermessung erfolgt in Abschnitt 5.4.2.

Die Probenteilung und Messung erfolgte bei den vorliegenden Untersuchungen am frischen Häckselgut. Nach GUTH (1995) ist eine Aufteilung der Proben im frischen Zustand günstiger als im getrockneten Zustand. Durch die Messung des frischen Erntegutes wird ein eventuelles „Schrumpfen der Partikel“ durch Vortrocknung (LEURS 2005) ausgeschlossen. Empfohlen wird die Messung einer Probenmenge von wenigsten 5 g TM, wenn das Probenmaterial nicht zu stark heterogen ist und ein ausreichend niedriger Variationskoeffizient erreicht wird. Als akzeptabel wird dabei ein Variationskoeffizient von 10,0 % angesehen (GUTH 1995). Andernfalls ist die Messung von 20 bis 25 g TM anzustreben. Aufgrund des hohen Zeitaufwandes, der mit über 3 h pro g Probenmaterial auch von GUTH ET AL. (1993) bestätigt wird, konnte in der vorliegenden Arbeit nur 10 bis 20 g Frischmasse in fünffacher Wiederholung je Variante bildanalytisch vermessen werden. Dennoch lag der mittlere Variationskoeffizient mit 8,3 % für die mittlere Partikellänge verhältnismäßig niedrig. Problematisch sind vor allem einzelne sehr große Partikel, die bei einer geringen Probenmenge durch ihren hohen Anteil an der projizierten Oberfläche das Ergebnis der mittleren Partikellänge stark beeinflussen.

4.5 Schlussfolgerungen

Um bei der Nutzung von Energiepflanzen für die Biogasproduktion ein Substrat mit möglichst hoher Qualität, d.h., mit einem maximalen Methanbildungspotenzial bereitzustellen, ist die optimale Gestaltung verschiedener Einflussparameter bei der Ernte und Konservierung des Pflanzenmaterials notwendig.

Bei der Ernte von Ganzpflanzen für die Nutzungsrichtung Biogasproduktion sollte ein Mindest-TM-Gehalt angestrebt werden, um Fermentationsverluste bei der Silierung möglichst gering zu halten, Sickersaftverluste zu vermeiden und das Risiko von Fehlgärungen zu mindern. Da sich die Methanausbeute von Mais bezogen auf die oTM im Entwicklungsstadium zwischen Milch- und Vollreife nur geringfügig ändert, ist der TM-Ertrag die entscheidende Größe für einen hohen Methanhektarertrag. Der TM-Gehalt des Mais steigt nach der Milchreife noch deutlich an, so dass sowohl aus Sicht der Silierung als auch aus Sicht der Biomethanisierung eine Ernte des Mais deutlich vor der Teigreife nicht zu empfehlen ist. Die Maissorte sollte entsprechend standortangepasst gewählt werden, so dass eine sichere Abreife und hohe TM-Erträge gewährleistet sind.

Zur Gewährleistung eines optimalen Silierverlaufes und maximaler Methanausbeuten ist die Einstellung einer kurzen Häcksellänge zur Ernte ratsam. Durch eine Verringerung der Häcksellängeneinstellung können eine verstärkte Milchsäuregärung, eine effektivere pH-Wert-Senkung und geringere Verluste bei der Silierung erzielt werden, dies muss jedoch vor allem bei leicht vergärbarem Siliergut nicht zwangsläufig zu besseren Gärqualitäten führen. Eine kürzere Häcksellänge hat weiterhin einen positiven Effekt auf die Methanausbeute, die jedoch bei den Silagen durch Überlagerung mit den Effekten der Silierung auf die Methanausbeute nur dann sichtbar ist, wenn Verluste durch Fermentationsprozesse bei der Silierung in die Methanausbeute mit eingerechnet werden. Im Bereich mittlerer Partikellängen zwischen 33 und 6 mm kann die Erhöhung der Methanausbeute um maximal 10 bis 13 % erzielt werden. Die Wahl einer sehr kurzen Häcksellänge ist vor allem bei später Ernte und cellulosehaltigen Pflanzenarten sinnvoll, da die positive Wirkung einer verstärkten mechanischen Aufbereitung mit zunehmender Reife bzw. mit höheren Gehalten an Lignin und Cellulose steigt. In kontinuierlichen Systemen zur Flüssigvergärung, wie sie in der Praxis am häufigsten vorkommen, kann auch durch eine erhöhte Geschwindigkeit des Substratabbaus bei kürzerer Häcksellänge eine erhöhte Methanproduktion in der Biogasanlage vor allem bei hohen Raumbelastungen und kurzen Verweilzeiten bewirkt werden.

Der Prozess der Silierung bewirkt keine signifikante Erhöhung der Methanbildung, wie dies verschiedentlich aus höheren Methanausbeuten der Silagen verglichen mit dem frischen Siliergut gefolgert wird. Da bei der Silierung vorwiegend Substanzen mit niedrigerer Methanausbeute verloren gehen und Gärprodukte mit hoher spezifischer

Methanausbeute gebildet werden, weisen Silagen häufig höhere Methanausbeuten bezogen auf die der Biomethanisierung zugeführten oTM auf. Werden die während des Silierprozesses entstehenden Fermentationsverluste in der Methanausbeute berücksichtigt, ist jedoch keine signifikante Änderung der Methanausbeute durch die Silierung gegeben. Um bei der Bewertung des Methanbildungspotenzials von Silagen Fehlinterpretationen zu vermeiden, sollten Silierverluste grundsätzlich in die Methanausbeute mit einbezogen werden.

Eine endgültige Bewertung des Einflusses der Gärqualität von Silagen auf die Methanproduktion kann auf Grundlage der durchgeführten Analysen nicht erfolgen. Hierfür sind weitere Untersuchungen auch mit schlecht konservierten Silagen notwendig. Die Untersuchungsergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass sich erhöhte Essigsäuregehalte, die hinsichtlich der Gärqualität negativ bewertet werden, keine Minderung der Methanausbeute auch bei Beachtung etwas höherer Silierverluste bewirken. Bestätigt sich dies in weiteren Untersuchungen, sollte auch vor dem Hintergrund der positiven Wirkung erhöhter Essigsäuregehalte auf die aeroben Stabilität für die Qualitätsbewertung von Biogassilagen ein neues Bewertungssystem erarbeitet werden.

Eine Lagerzeit gut konservierter Silagen bis zu einem Jahr unter strikt anaeroben Bedingungen ist ohne Minderung der Methanausbeute möglich, es ist jedoch bei Beachtung der Silierverluste auch nicht mit einer deutlichen Erhöhung der Methanausbeute durch lange Lagerzeiten zu rechnen. Durch Silierzusätze kann der Silierverlauf und das Gär säuremuster beeinflusst werden. Ohne die Verbesserung der Gärqualität der Silagen oder die Verringerung von Verlusten durch Nacherwärmung ist jedoch durch den Zusatz der geprüften Siliermittel keine Erhöhung der Methanausbeute bei Beachtung der Silierverluste zu erwarten. Der Zusatz von Siliermitteln bleibt auch bei der Konservierung von Biomasse mit Nutzungsrichtung Biogasproduktion eine Maßnahme zur Verbesserung bzw. -sicherung der Silagequalität. Die Aussagen zum Einfluss von Lagerdauer und Silierzusatz gelten unabhängig von der Häcksellänge.

Alle durchgeführten Untersuchungen erfolgten unter optimierten Bedingungen im Labormaßstab. Zur Bestätigung der Erkenntnisse sind weitere Untersuchungen unter Praxisbedingungen zu empfehlen.

5 Bewertung kürzerer Häcksellängen

5.1 Aufgabenstellung

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wurde ein positiver Effekt einer kürzeren Schnittlänge zur Ernte auf den Silierverlauf und die Methanausbeute verschiedener Biogaspflanzen nachgewiesen. In der Praxis kann das Siliergut über eine kurze Häcksellängeneinstellung am Feldhäcksler verstärkt mechanisch aufbereitet werden. Die Veränderung der Häcksellänge wirkt sich bei der Ernte und in den weiteren Prozessschritten auf die verfahrenstechnischen Kapazitäten und die Bilanzen von Energie, Treibhausgasen (THG) sowie Kosten und Erlösen aus. Dabei soll im Folgenden betrachtet werden:

- Ernte: Für die stärkere Zerkleinerung im Feldhäcksler wird mehr Kraftstoff benötigt. Gleichzeitig sinken Arbeitsgeschwindigkeit und Durchsatz des Feldhäckslers.
- Transport: Die Häcksellängen wirken sich auf die Transportkapazität aus. Bei der kürzeren Häcksellänge verlängern sich die Beladezeiten infolge der geringeren Arbeitsgeschwindigkeit des Feldhäckslers. Andererseits erhöhen sich die Schüttdichten und damit die Lademassen.
- Silierung: Eine kürzere Häcksellänge kann theoretisch mit einem geringeren Verdichtungsaufwand einhergehen. Bei gleichem Verdichtungsaufwand in der Praxis sind höhere Lagerungsdichten im Silo zu erwarten. Der Bedarf an Silovolumen nimmt ab, die Silagequalität steigt, die Verluste an oTM sinken.
- Biomethanisierung: Bei kürzeren Häcksellängen erhöht sich die substratspezifische Methanausbeute.

Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit soll daher die Einstellung einer sehr kurzen theoretischen Häcksellänge im Vergleich zu einer praxisüblichen, etwas gröberen Längeneinstellung am Feldhäcksler hinsichtlich

- Funktion,
- Wirkung auf die Kapazität der Ernte- und Silierkette,
- Energiebilanz,
- Wirkung auf Treibhausgasemissionen sowie
- Wirtschaftlichkeit

bewertet werden. Die Bewertung erfolgt für den Einsatz eines selbstfahrenden Feldhäckslers mit paralleler Überladung auf traktorgezogene Kippanhänger, die Silierung im Horizontalsilo und Nutzung der Silage als Koferment in einer Durchfluss-Biogasanlage zur Methanproduktion. Als Grundlage für die Bewertung sollen Daten aus Feldversuchen mit Mais, Sudangras, Grünschnitt- und Winterroggen sowie Wintertriticale

dienen. Mittels einer einfachen Sensitivitätsanalyse soll für ausgewählte Messvarianten der Effekt einer kürzeren theoretischen Häcksellänge auf die Bewertungskriterien unter Variation der Transportentfernung sowie weiterer Einflussfaktoren abgeschätzt werden.

Die Bewertung erfolgt zunächst für die einzelnen Praxisbeispiele. Anschließend wird aus den Ergebnissen der Einzelversuche eine Gesamtaussage hinsichtlich der optimalen Gestaltung des Einflussparameters Häcksellänge abgeleitet.

5.2 Material und Methoden

5.2.1 Grundlagen und Abfolge der Bewertungen

Das Ziel der folgenden Analysen ist die Bewertung von Aufwendungen und Nutzen einer sehr kurzen Schnittlängeneinstellung zur Ernte am Feldhäcksler gegenüber einer in der Praxis üblichen, etwas größeren Häcksellängeneinstellung. Dabei sind neben der Frage nach der Funktion einer kürzeren theoretischen Häcksellängeneinstellung als weitere Fragestellungen vor allem die Wirkungen auf den Ressourcenverbrauch, auf Umweltbelastungen und auf die Wirtschaftlichkeit von Interesse:

- Ressourcenverbrauch: Für die Aufbereitung des Erntegutes mit einer kürzeren theoretischen Häcksellänge ist ein erhöhter Energieeinsatz notwendig. Die kürzere Längeneinstellung ist nur dann sinnvoll, wenn der zusätzliche Energieoutput durch geringere Verluste und höhere Methanausbeuten in der Biogasanlage den erhöhten Energieeinsatz übersteigt.
- Umweltbelastungen: Bei der Bewertung von Umwelteffekten ist im Hinblick auf die Häcksellängeneinstellung vor allem die Problematik des globalen anthropogenen Treibhauseffektes von Bedeutung, da ein erhöhter Energieeinsatz mit erhöhten Emissionen klimarelevanter Gase einhergeht. Bei der energetischen Nutzung von sehr kurz gehäckselten Biogassilagen sollte sichergestellt werden, dass es durch eine zusätzliche Substitution fossiler Energieträger zu einer weiteren Umweltentlastung kommt.
- Wirtschaftlichkeit: Erhöhte Kraftstoffverbräuche und ein erhöhter Arbeitszeitbedarf bei kürzerer Schnittlängeneinstellung am Feldhäcksler sind mit höheren Kosten verbunden. Die kürzere Längeneinstellung ist nur dann ökonomisch sinnvoll, wenn die zusätzlichen Kosten geringer sind als zusätzliche Erlöse durch eine höhere Methanproduktion und Kosteneinsparungen durch höhere Schütt- und Lagerdichten.

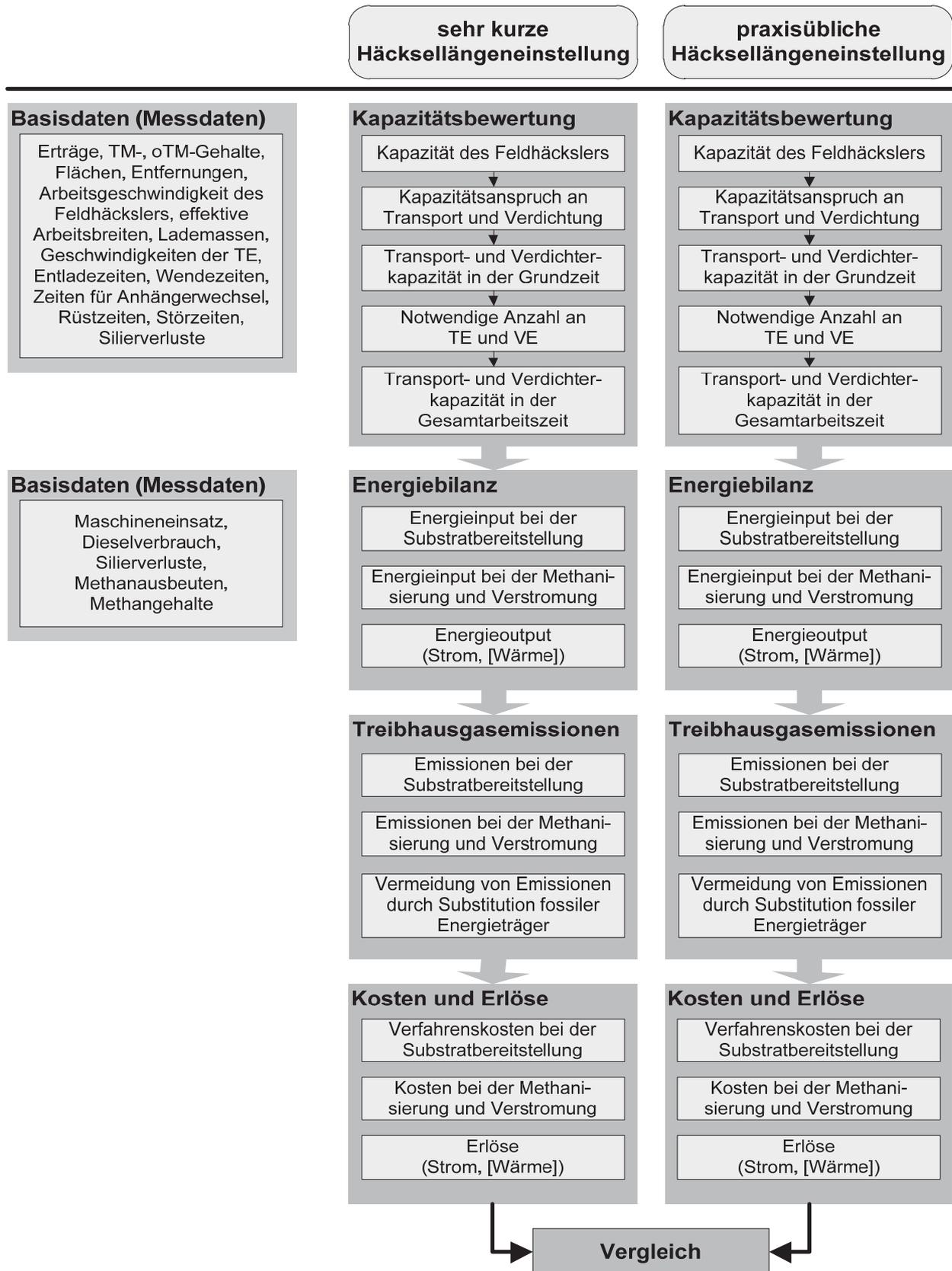
Entsprechend dieser Fragestellungen wurde der Effekt einer kürzeren Häcksellängeneinstellung auf die Energiebilanz, auf THG-Emissionen und auf die Wirtschaftlichkeit bewertet. Der fossile Primärenergieverbrauch sowie die THG-Emissionen können als Wirkungskategorien im Rahmen von Ökobilanzen nach DIN EN ISO 14040 analysiert werden (DIN 1997). Bei den durchgeführten Bilanzierungen wurde der Lebensweg der pflanzlichen Biomasse von der Produktion bis zur Umwandlung in Nutzenergie betrachtet. Grundsätzlich sind für die vergleichende Bewertung der Häcksellängeneinstellungen jedoch nur die Prozessschritte relevant, die von der Längeneinstellung beeinflusst werden. Dies umfasst die Teilbereiche Ernte, Transport, Silierung und Nutzung der Silage für die Biogasproduktion. Prozesse und Parameter, die nicht im Zusammenhang mit dem Vergleich stehen, wurden bei der Gegenüberstellung der Häcksellängenvarianten konstant gehalten bzw. nicht betrachtet. So wurden die Prozesse zur Erzeugung der

Energiepflanzen nicht näher analysiert, da durch die betrachtete Einflussgröße Häcksellänge hierbei keine Unterschiede entstehen. Weiterhin wird die Entscheidung über die Häcksellängeneinstellung üblicherweise zur Ernte eines für eine bestehende Biogasanlage vorgesehenen Pflanzenbestandes zu treffen sein. Die Berücksichtigung des Parameters Häcksellänge bei der Auslegung einer Biogasanlage kann als unwahrscheinlich angesehen werden, da der Häcksellänge im Gesamtprozess Biogaserzeugung nur eine relativ geringe Bedeutung zukommt. Für die Bewertung wurde daher angenommen, dass die unterschiedlich gehäckselte Silage einer einheitlichen Biogasanlage zugeführt wird, d.h. dass sich die Größe und Investitionen bzw. Aufwendungen der baulichen Anlagen und Technik nicht unterscheiden. Im Vergleich der Häcksellängenvarianten werden daher die Investitionen bzw. der Bau der Biogasanlage sowie die davon abhängigen Aufwendungen als konstant angesetzt und nicht erfasst.

Grundsätzlich werden im Folgenden nur die Änderungen des Aufwandes und Nutzens als Effekte der kürzeren Häcksellängeneinstellung (Werte der verringerten Längeneinstellung abzüglich der Werte der größeren Längeneinstellung) dargestellt. Als funktionale Einheit wurde die Verwendung eines Hektars Anbaufläche zur Bereitstellung von Biogassilagen bezogen auf ein Jahr gewählt. Der Bezugsraum ist die Bundesrepublik Deutschland, wobei in die Bewertung eingehende gemessene Primärdaten (v.a. Hektarerträge) unter den Standortbedingungen in Brandenburg ermittelt wurden.

Für die Effekte einer verringerten Häcksellängeneinstellung am Feldhäcksler auf den Kraftstoffverbrauch, auf die Arbeitsgeschwindigkeit, auf die Schüttdichte des Häckselgutes, auf die Lagerdichte im Silo sowie auf die Silierverluste und die Methanausbeute fehlten bisher vollständige Datensätze. Diese Grunddaten mussten zunächst bereitgestellt werden. Hierfür wurden Messungen und Beobachtungen von Ernteprozessketten in Praxisbetrieben durchgeführt. Die Silierverluste und Methanausbeuten wurden im Labormaßstab analysiert. Die Aufwandsbewertung setzt eine Quantifizierung von Kapazitäten der eingesetzten Maschinen voraus. Die Kapazitäten sind wiederum von der Form und Größe der Anbaufläche abhängig. Bei den Feldmessungen waren jedoch Unterschiede in den Schlagabmessungen für die einzelnen Häcksellängenvarianten unvermeidbar. Weiterhin traten bei den Praxisernten stochastisch Stör- und Verlustzeiten auf, die nicht im direkten Zusammenhang zwischen der untersuchten Einflussgröße Häcksellänge und der Kapazität der Maschinen standen. Daher wurden für die Kapazitätsbewertung bei unterschiedlicher Häcksellängeneinstellung Modellkalkulationen bei einheitlichen Schlagabmessungen basierend auf Messergebnissen aus den Prozessbeobachtungen zu Grunde gelegt (Abschnitt 5.2.4).

Prinzip und Abfolge der Berechnungen sowie die eingehenden Basisdaten sind zusammenfassend in **Abb. 48** dargestellt.



TE... Transporteinheiten; VE... Verdichtereinheiten

Abb. 48: Prinzip und Abfolge der Berechnungen zur Bewertung kürzerer Häcksellängen

5.2.2 Beschreibung der Messvarianten

Zur Ermittlung von Primärdaten für die Bewertung von Ernteprozessketten bei unterschiedlicher Häcksellängeneinstellung am Feldhäcksler wurden Prozessbeobachtungen und Datenerhebungen bei elf verschiedenen Praxisernten durchgeführt. Die Messungen erfolgten in unterschiedlicher Anzahl für die Fruchtarten Mais (*Zea mays*), Sudangrasybride (*Sorghum sudanense x bicolor*), Grünschnittroggen (*Secale cereale*), Wintertriticale (*x Triticosecale*) und Winterroggen (*Secale cereale*). Daten zu den Sorten, Erntejahren, Entwicklungsstadien der Pflanzenbestände zur Ernte und zu den in den Praxisbetrieben eingesetzten Erntemaschinen sind in **Tab. 31** aufgeführt. Als theoretische Häcksellänge wurde eine für die jeweilige Fruchtart in den Praxisbetrieben übliche Einstellung gewählt und jeweils einer verringerten Schnittlängeneinstellung am Feldhäcksler gegenübergestellt. Bei der Messvariante Mais_3 war der Vergleich von drei theoretischen Häcksellängen möglich.

Für die Praxisernten kamen die betrieblich vorhandenen Verfahrenslinien zum Einsatz. Bei den Messvarianten Sogr, Gsr_1 und Trit_1 wurde das Erntegut vor dem Häckseln gemäht und im Schwad abgelegt. Die Aufnahme des Schwads erfolgte für Sudangras nach einer Anwelkzeit von 19 Stunden und für Grünschnittroggen nach einer Anwelkzeit von 12,5 Stunden. Bei Triticale wurde das Schwad ohne Anwelkzeit durch den Feldhäcksler aufgenommen und zerkleinert. Für den Transport wurden vorwiegend HW 80 Kippanhänger mit Schwerhäckselaufbau (20 m³ Ladevolumen) im Einzel- oder Doppelzug eingesetzt. Bei der Auswertung wurden einheitlich HW 80 Doppelzüge für die Transportarbeiten angenommen. Die Silierung erfolgte für die einzelnen Messvarianten unterschiedlich im Schlauchsilos bzw. in Freigärhaufen oder Horizontalsilos (Abschnitt 5.3.2.2). Für die Bewertung wurde einheitlich eine Verdichtung im Horizontalsilo unterstellt.

Tab. 31: Beschreibung der Messvarianten und eingesetzten Erntemaschinen bei der Praxisernte von Mais, Sudangras (Sugr), Grünschnittroggen (Gsr), Wintertriticale (Trit) und Winterroggen (Wro)

| Messvariante | Mais_1 | Mais_2 | Mais_3 | Mais_4 | Sugr | Gsr_1 | Gsr_2 | Gsr_3 | Trit_1 | Trit_2 | Wro |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Pflanzenart | Mais | Mais | Mais | Mais | Sudangras-hybride | Grünschnitt-roggen | Grünschnitt-roggen | Grünschnitt-roggen ¹⁾ | Wintertriticale | Wintertriticale | Winterroggen |
| Sorte | Flavi (S 250) | Gavott (S 250) | k.A. | Nesico (S 220) | Susu | Recrut | Vitallo | Permontra | Talentro | Grenado | Visello |
| Erntejahr | 2005 | 2005 | 2006 | 2007 | 2006 | 2006 | 2006 | 2006 | 2007 | 2007 | 2007 |
| Entwicklungsstadium | Physiologische Reife (BBCH87) | Teigreife (BBCH85) | Vollreife (BBCH 89) | Vollreife (BBCH 89) | Frühe Milchreife (BBCH 73) | 2-Knoten-Stadium (BBCH 32) | Beginn der Blüte (BBCH 61) | Beginn der Blüte (BBCH61) | Späte Milchreife (BBCH 79) | Teigreife (BBCH 85) | Teigreife (BBCH85) |
| Schlaggröße | 10 ha | 10 ha | 18 ha | 6 ha | 5 ha | 5 ha | 11,5 ha | 13 ha | 6 ha | 9 ha | 13 ha |
| Mähauflbereiter | - | - | - | - | Krone Big M | Krone Big M | - | - | Krone Big M | - | - |
| Leistung [kW] | - | - | - | - | 395 | 395 | - | - | 395 | - | - |
| Erntevorsatz | - | - | - | - | Scheibenmäherwerk | Scheibenmäherwerk | - | - | Scheibenmäherwerk | - | - |
| Arbeitsbreite [m] | - | - | - | - | 9 | 9 | - | - | 9 | - | - |
| Feldhäcksler | Claas Jaguar 840 | Claas Jaguar 690 SL | Claas Krone Big X V8 (Vielmesser-trommel) | Claas Jaguar Speedstar 870 | Claas Jaguar 840 | Claas Jaguar 840 | Claas Jaguar 690 SL | Claas Jaguar 690 SL | Claas Jaguar Speedstar 870 | Claas Jaguar 690 SL | Claas Jaguar 690 SL |
| Motornennleistung [kW] | 265 | 232 | 445 | 333 | 265 | 265 | 232 | 232 | 333 | 232 | 232 |
| Erntevorsatz | Maisgebiss RU 450 | Maisgebiss Easy Collect 500 | Maisgebiss Easy Collect 500 | Maisgebiss RU 600 | Pick Up PU 300 | Pick Up PU 300 | GP ²⁾ -Schneidwerk | GP ²⁾ -Schneidwerk | Pick Up PU 300 | GP ²⁾ -Schneidwerk | GP ²⁾ -Schneidwerk |
| Arbeitsbreite [m] | 4,5 | 3 | 7,5 | 6 | 3 | 3 | 3,6 | 3,6 | 3 | 3,6 | 3,6 |
| theoretische Häcksellänge [mm] | 4 / 9 | 4 / 8 | 8 / 10 6 / 8 | 4 / 8 | 4 / 7 | 5,5 / 9 | 6,8 / 11 | 6,8 / 11 | 4 / 8 | 4 / 8 | 4 / 8 |

k.A. ... keine Angabe; ¹⁾ perennierender Roggen – Ernte als Grünschnittroggen; ²⁾ Ganzpflanzenschneidwerk

5.2.3 Datenerhebung während des Ernteprozesses und bei der Silageentnahme

Als Primärdaten wurden während der Praxisernten Arbeitszeiten, Wege, Massen, Kraftstoffverbräuche und TM-Gehalte bestimmt.

Die Ermittlung der Arbeitszeiten der Ernteeinheiten auf dem Feld und der Verdichtereinheiten bei der Silierung erfolgte manuell mit Hilfe von Stoppuhren (SW328, Fa. ATECH), die die parallele Messung und Speicherung mehrerer Einzelzeiten ermöglichten. Jede Teilzeit wurde der unter Abschnitt 5.2.4 beschriebenen Zeitgliederung zugeordnet bzw. mit entsprechenden Anmerkungen versehen, die eine Interpretation und Zuordnung ermöglichten. Die Ankunft und Abfahrt der Transporteinheiten am Feld, am Feldhäcksler, an der Waage und am Silo wurde ebenfalls zeitlich erfasst.

Die Wege der Mähaufbereiter und Feldhäcksler wurden während der Ernte mit Hilfe des GPS-Empfängers GeoXT (Fa. TRIMPLE) aufgezeichnet. Die Unterteilung der Wegstrecken in Wege zur An- und Abfahrt, zum Wenden sowie zur Arbeit während der Hauptzeit erfolgte nachträglich mit der Software ArcView 8 (Fa. ESRI). **Abb. 49** zeigt beispielhaft die nach der beschriebenen Methode ermittelten Wege des Feldhäckslers für die Messvariante Mais_3. Die Wege der Transporteinheiten wurden für jede Messvariante einmalig bestimmt. Der GPS-Empfänger GeoXT diente ebenfalls dazu, die Flächen je Häcksellänge einer Messvariante einzumessen.

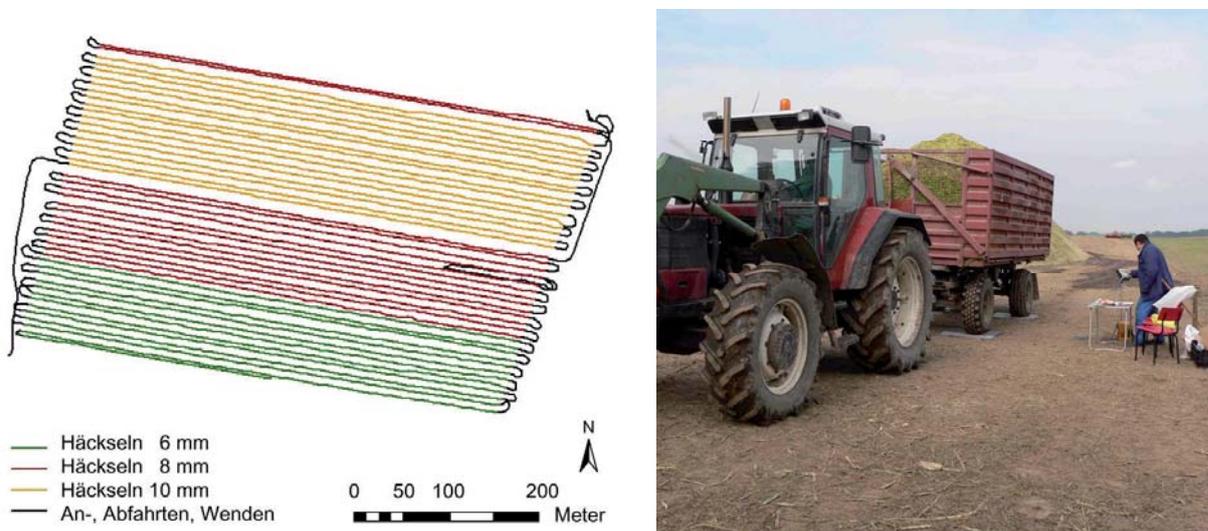


Abb. 49: Wege des Feldhäckslers am Beispiel der Messvariante Mais_3 (links) und Wägung der Lademassen der Transporteinheiten mit Radlastwaagen (rechts)

Die Wägung der Lademassen der Transporteinheiten für die Kalkulation von Durchsätzen und Erträgen wurde unter Einsatz transportabler Radlastwaagen RW 10.0 (Fa. HKM, Genauigkeit ± 10 kg) vor dem Entladen am Silo durchgeführt.

Die Messung der Dieserverbräuche des Feldhäckslers erfolgte über eine transportable Tankstation mit mechanischem Zählwerk (Modell 800, Fa. TUTHILL EUROPA). Hierfür

wurde der Feldhäcksler vor Beginn der Arbeit auf dem Feld sowie nach jedem Arbeitsabschnitt, d.h. bei Änderung der Häcksellänge und Beendigung der Feldarbeit, auf eine definierte Füllhöhe am Feldrand betankt. Der Dieserverbrauch konnte je Arbeitsabschnitt mit einer Genauigkeit von 0,1 Liter abgelesen werden.

Weiterhin wurden effektive Arbeitsbreiten und Schwadabstände während des Ernteprozesses manuell vermessen. Für die Ermittlung von TM- und oTM-Gehalten, zur Bewertung der Häckselgutstruktur sowie zur Silierung und Biomethanisierung des Erntegutes im Labormaßstab wurden von jedem Transportzug Einzelproben entnommen und im Labor zu einer Sammelprobe vereint. Die Analysen- und Untersuchungsmethoden im Labormaßstab entsprechen den in Abschnitt 4.2 im ersten Teil der vorliegenden Dissertation beschriebenen Methoden.

Zusätzlich zu den Untersuchungen des Silierverlaufes im Labormaßstab wurden in den Praxissilos Dichtemessungen bei der Silageentnahme durchgeführt. Hierfür kam ein radiometrisches Verfahren zum Einsatz. Die Lagerdichte wurde an der Anschnittfläche der Silos je Mess- und Häcksellängenvariante in der Regel dreimal im Verlauf der Silageentnahme mittels Gamma-Rückstreusonde (KUNH 1986) vermessen. Eine Messung umfasste dabei 27 Einzelbestimmungen der Lagerdichte verteilt über den Siloanschnitt entsprechend **Abb. 50**. Die Dichte einer Einzelmessung kann über die erhaltene Impulsrate mit Hilfe einer Kalibrierkurve ausgewertet werden. Die mittlere Dichte des Silostapels ergibt sich als Mittelwert aus den Einzelmessungen.

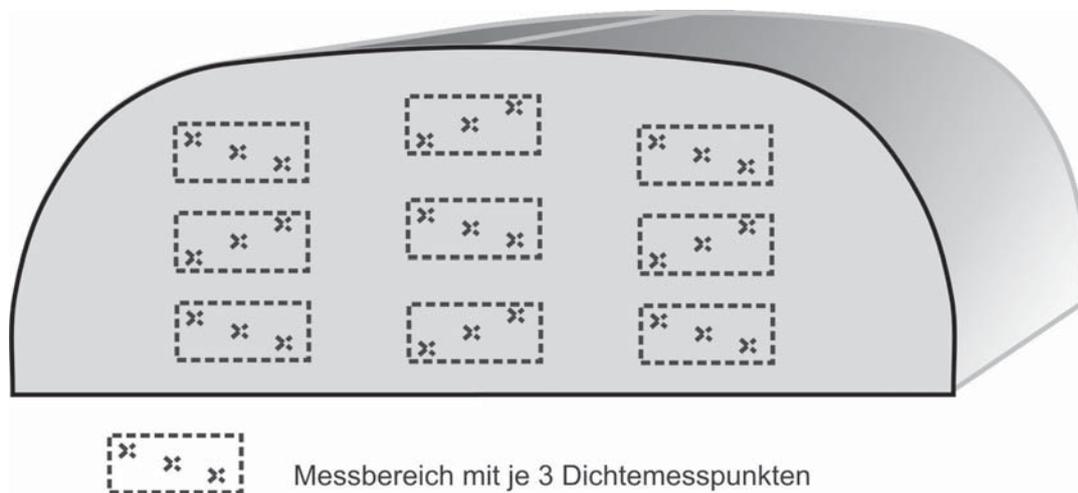


Abb. 50: Schematische Darstellung der Verteilung der Messstellen zur Bestimmung der Dichte am Siloanschnitt

Die ermittelten Primärdaten wurden für die Berechnung von Kapazitäten sowie für die Ermittlung des Energieinputs der CO₂-Aufwendungen und der Verfahrenskosten genutzt.

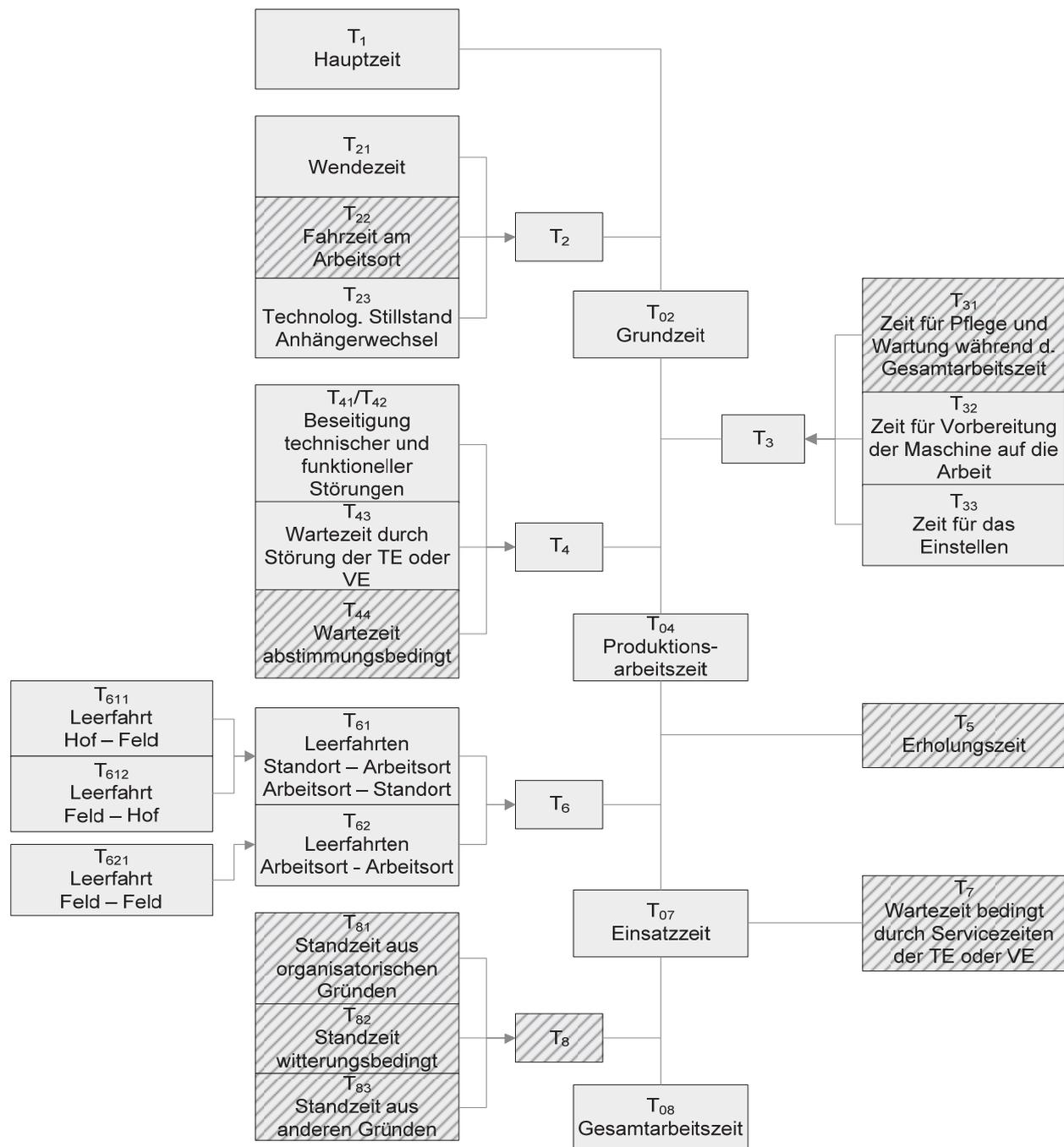
5.2.4 Kapazitätsbewertung

Die Kapazitätsbewertung beinhaltet die Ermittlung von Kapazitätsansprüchen, von Maschinenkapazitäten und daraus folgend der Anzahl notwendiger Maschinen der Ernte- und Silierkette.

Der Kapazitätsanspruch eines Aggregates ergibt sich allgemein aus der zu erledigenden Arbeitsmenge und der hierfür verfügbaren Zeit. Die für die Ganzpflanzenernte einer Fruchtart zur Verfügung stehende Zeit ist von der Zeitspanne, in der ein Bestand mit hohem Ertrag und geforderter Qualität geerntet werden kann, und den in dieser Zeitspanne witterungsbedingt verfügbaren Erntetagen (KTBL 2008) abhängig. Die zu erledigende Arbeitsmenge wird bei der Nutzung von Energiepflanzen für die Biogasproduktion über den Bedarf an Anbaufläche zur Deckung der benötigten Substratzufuhr der Biogasanlage bestimmt. Der Anteil an für die Methanproduktion in einer Biogasanlage genutzten Silage kann sehr unterschiedlich sein. In der Praxis existieren sowohl Anlagen zur Monofermentation von Energiepflanzen als auch zur Kofermentation mit unterschiedlichen Anteilen an Wirtschaftsdüngern oder organischen Abfällen. Da für die vorliegende Fragestellung keine explizite Definition einer Modellanlage notwendig ist und weiterhin eine volle Auslastung des Feldhäckslers zugrunde gelegt wird (Abschnitt 5.2.5), wird auf die Ermittlung des Kapazitätsanspruchs für das Häckseln verzichtet. Der Kapazitätsanspruch an die Transport- und Verdichtereinheiten wird ausgehend von dem Einsatz eines Feldhäckslers ermittelt und entspricht der Kapazität des Feldhäckslers.

Die Kapazität einer Maschine bezeichnet deren Leistungsfähigkeit, d.h. die Flächenleistung oder den Durchsatz unter gegebenen Bedingungen. Die Kenntnis dieser Leistungen bezogen auf die Gesamtarbeitszeit ist Voraussetzung für die Aufwandsbewertung.

Die Kapazitäten der Maschinen werden grundsätzlich zeitbezogen angegeben. Eine exakte Quantifizierung der Kapazitäten macht daher eine definierte Gliederung von Arbeitszeiten notwendig. Für landwirtschaftliche Arbeitsprozesse sind im Wesentlichen als standardisierte Zeitgliederungen in Deutschland das Zeitschema nach KTBL (JÄGER 1991) und die TGL 22289 „Zeitgliederung in der Land- und Forstwirtschaft“ (TGL 1974) bekannt. Beide Zeitgliederungen wurden von verschiedenen Autoren erweitert, geändert und verglichen (JÄGER 1991, HERRMANN 1999, SONNEN 2006). Der vorliegenden Bewertung wird die der TGL 22289 entlehnte und an die Ernteprozessketten von Siliergütern angepasste Zeitgliederung nach SONNEN (2006) zugrunde gelegt. **Abb. 51** zeigt den für selbstfahrende Ernteeinheiten relevanten Auszug der Zeitgliederung. Die an die Transport- und Verdichtereinheiten angepassten Auszüge der Zeitgliederung sind in **Abb. A17** und **A18** des Anhangs dargestellt.



TE... Transporteinheit; VE... Verdichtereinheit

Abb. 51: Zeitgliederungsauszug für selbstfahrende Ernteeinheiten nach SONNEN (2006)

Die Zuordnung gemessener Arbeitszeiten während der Praxisernten erfolgte nach den in **Abb. 51**, A17 und A18 aufgeführten Teilzeiten. Für die Berechnung von Kapazitäten bei einheitlichen Schlagabmessungen wurde die Zeitgliederung durch Streichung von für die Bewertung der Häcksellänge nicht benötigten bzw. von schwer quantifizierbaren Teilzeiten vereinfacht. Hierzu zählen Fahrzeiten am Arbeitsort T_{22} , Erholungszeiten T_5 , servicebedingte Wartezeiten T_7 und witterungs- oder organisatorisch bedingten Standzeiten T_8 . Es wurde von einem optimalen Arbeitsablauf ausgegangen. Die Zeiten T_{32} und T_{33} bzw. T_{41}/T_{42} und T_{43} wurden als Rüstzeit T_3 bzw. Störzeit T_4 zusammengefasst.

Bei den Transporteinheiten wurde angenommen, dass keine verkehrsbedingte Wartezeiten bzw. Verzögerungen durch den Zustand der Wege auftreten und keine Wägung des Siliergutes stattfindet. Die in der Modellrechnung nicht beachteten Teilzeiten sind in **Abb. 51**, A17 und A18 durch die Schraffur des Hintergrundes gekennzeichnet.

Es wurde weiterhin davon ausgegangen, dass die Kapazitäten der Transport- und Verdichtereinheiten so auf die Ernteeinheit abgestimmt sind, dass keine verfahrensbedingten Wartezeiten des Feldhäckslers entstehen. Aufgrund der Verknüpfung der Ernte- und Transportvorgänge im Parallelverfahren entstehen dadurch jedoch verfahrensbedingte Wartezeiten beim Transport. Diese wurden abweichend von der Zeitgliederung nach SONNEN (2006) als zyklische verfahrensbedingte Verlustzeit T_{25} der erweiterten Grundzeit T_{025} zugeordnet, da sie in jedem Transportumlauf periodisch wiederkehren (HERRMANN 1999). Die abstimmungsbedingte Wartezeit T_{44} wurde hierfür gestrichen (Abb. A17). Bei der Bewertung der Verdichtung im Horizontalsilo sind zwei verschiedene methodische Ansätze möglich. Zum Einen kann davon ausgegangen werden, dass sich durch die bessere Verdichtbarkeit bei kürzeren Häcksellängen die notwendige Verdichtungszeit verringert, während die gleiche Lagerdichte im Silo erreicht wird. Zum Anderen ist der Ansatz gleicher Verdichtungszeiten möglich, wobei sich bei kurzen Häcksellängen die Lagerdichte im Silo erhöht. Aufgrund fehlender Daten zur Verringerung der notwendigen Verdichtungszeit in Abhängigkeit von der Verkürzung der Häcksellänge eines Siliergutes wurde der zweite methodische Ansatz gewählt. Es wurde von einer einheitlichen Verdichtungszeit je Erntemasse ausgegangen. Zusätzlich vorhandene Zeiten der Verdichtereinheiten bis zum Entladen der nächsten Transporteinheit wurden rechnerisch als zyklische verfahrensbedingte Verlustzeiten definiert (Abb. A18). Der Effekt einer kürzeren Häcksellänge zeigt sich in einer höheren Lagerdichte im Silo.

Kapazität des Feldhäckslers

Der Durchsatz des Feldhäckslers in der Hauptzeit kann als Produkt der effektiven Arbeitsbreite, der Arbeitsgeschwindigkeit und des Ertrages berechnet werden (Gl. 15). Erfolgt vor dem Häckseln das Mähen und Schwaden des Bestandes, wird die effektive Arbeitsbreite des Feldhäckslers dem mittleren Schwadabstand gleichgesetzt.

$$\dot{m}_{T1EE} = 0,1 \cdot E \cdot b_{eff} \cdot v_{EE} \quad \text{Gl. 15}$$

| | |
|------------------------|---|
| $\dot{m}_{T1EE} \dots$ | Durchsatz der Ernteeinheit (Feldhäcksler) in der Hauptzeit [$t \cdot h^{-1}$] |
| $E \dots$ | Ertrag [$t \cdot ha^{-1}$] |
| $b_{eff} \dots$ | effektive Arbeitsbreite [m] |
| $v_{EE} \dots$ | Arbeitsgeschwindigkeit der Ernteeinheit (Feldhäcksler) [$km \cdot h^{-1}$] |

Nach HERRMANN (1999) lässt sich der Durchsatz einer Ernteeinheit in der Gesamtarbeitszeit als Quotient aus täglicher Erntemasse und täglicher Gesamtarbeitszeit beschreiben. Dabei wird die tägliche Gesamtarbeitszeit in ihre relevanten Teilzeiten untergliedert. Bei den vorliegenden Berechnungen wurden als Teilzeiten die Hauptzeit, die Wendezeit, die Zeit für den Wechsel der Transporteinheiten, die Rüstzeit, die Wartezeit durch technische Störungen, die Fahrzeiten zwischen Standort und Arbeitsort sowie die Fahrzeiten zwischen den Arbeitsorten in der Gesamtarbeitszeit berücksichtigt. Für die Berechnung des Durchsatzes des Feldhäckslers in der Gesamtarbeitszeit findet die Gl. 16 Anwendung. Die Herleitung der Gl. 16 ist in Tab. A69 im Anhang dargelegt.

$$\dot{m}_{T08EE} = \frac{\left(T_{08} - T_{3EE} - \frac{(s_{611} + s_{612} - s_{62})}{v_{T_EE}} \right)}{\left((1 + k_4) \cdot \left(\frac{1}{\dot{m}_{T1EE}} + \frac{t_{21}}{0,1 \cdot l \cdot E \cdot b_{eff}} + \frac{t_{23}}{m_L} - \frac{t_{23}}{l \cdot b \cdot E \cdot 100} \right) \right) + \frac{s_{62}}{l \cdot b \cdot E \cdot 100 \cdot v_{T_EE}}} \quad \text{Gl. 16}$$

| | |
|----------------------|---|
| $\dot{m}_{T08EE}...$ | Durchsatz der Ernteeinheit (Feldhäcksler) in der Gesamtarbeitszeit [t^*h^{-1}] |
| $T_{08}...$ | Gesamtarbeitszeit pro Tag [h] |
| $T_{3EE}...$ | tägliche Rüstzeit der Ernteeinheit (Feldhäcksler) [h] |
| $s_{611}...$ | Weg Hof – Feld [km] |
| $s_{612}...$ | Weg Feld – Hof [km] |
| $s_{62}...$ | Weg Feld – Feld [km] |
| $v_{T_EE}...$ | mittlere Geschwindigkeit der Ernteeinheit (Feldhäcksler) auf Wegen [km^*h^{-1}] |
| $k_4...$ | Anteil der Störzeit an der (erweiterten) Grundzeit [%] |
| $\dot{m}_{T1EE}...$ | Durchsatz der Ernteeinheit (Feldhäcksler) in der Hauptzeit [t^*h^{-1}] |
| $t_{21}...$ | Zeit je Wendung am Feld [h] |
| $t_{23}...$ | Zeit je Wechsel der Transporteinheit [h] |
| $l...$ | Länge des Schlages [km] |
| $E...$ | Ertrag [t^*ha^{-1}] |
| $b_{eff}...$ | effektive Arbeitsbreite [m] |
| $m_L...$ | mittlere Lademasse einer Transporteinheit [t] |
| $b...$ | Breite des Schlages [km] |

Die Zeit für Fahrten zwischen den Arbeitsorten wurde nur dann in die Berechnung einbezogen, wenn mehr als ein Schlag pro Tag geerntet werden kann. Die Zahl der Wendungen, Wechsel der Transporteinheiten und Fahrten zwischen den Schlägen pro Tag wurde nachträglich auf ganzzahlige Werte aufgerundet, da anteilige Werte hierfür praktisch nicht auftreten. Die ermittelten Leistungen wurden dahingehend korrigiert. Die Umrechnung der Durchsätze in Flächenleistungen erfolgte über den Ertrag.

Notwendige Anzahl an Transport- und Verdichtereinheiten

Die notwendige Anzahl an Aggregaten lässt sich allgemein aus dem Kapazitätsanspruch K_A der analysierten Arbeitsgänge und den Kapazitäten der Aggregate K_{Aggr} bestimmen (MÜLLER & PROCHNOW 1996, Gl. 17).

$$n_{Aggr} = \frac{K_A}{K_{Aggr}} \quad \text{Gl. 17}$$

| | |
|------------------|---|
| $n_{Aggr} \dots$ | notwendige Anzahl an Aggregaten |
| $K_A \dots$ | Kapazitätsanspruch [$t \cdot h^{-1}$] |
| $K_{Aggr} \dots$ | Kapazität des Aggregates [$t \cdot h^{-1}$] |

Für die Berechnung der notwendigen Anzahl an Transport- und Verdichtereinheiten wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass nur Transport- und Verdichtereinheiten des gleichen Typs eingesetzt werden. Dabei wurde für die Transporteinheiten von einem Ladevolumen von 40 m^3 je Transportzug ausgegangen. Die notwendige Anzahl an Transporteinheiten ergibt sich entsprechend Gl. 17 aus dem Durchsatz des Feldhäckslers in der Grundzeit (Kapazitätsanspruch) und der Kapazität einer Transporteinheit in der Grundzeit (Tab. A70).

Der Kapazitätsanspruch an die Verdichtereinheiten im Fahrsilo entspricht der geforderten Verdichtungszeit je Tonne Substrat. Hierfür existieren unterschiedliche Angaben in der Literatur, wobei die geforderten Verdichtungszeiten in der Praxis häufig nicht erreicht werden. Für die Modellkalkulation wurde ein Verdichtungszeitbedarf von $1,5 \text{ min} \cdot t^{-1}$ Siliergut (FÜRLI ET AL. 2007) festgelegt und damit ein Wert im unteren Bereich der Literaturangaben gewählt. Die Anzahl notwendiger Verdichtereinheiten ergibt sich aus dem Verdichtungszeitbedarf und dem Verdichtungszeitaufwand eines Verdichters in der Grundzeit. Der Verdichtungszeitaufwand kann aus der für die Verdichtung zur Verfügung stehenden Zeit des Transportumlaufes und der in dieser Zeit entladenen Masse berechnet werden (Tab. A71). Die notwendige Anzahl an Transport- und Verdichtereinheiten wurde generell auf einen ganzzahligen Wert aufgerundet.

Transportkapazität

Die Kapazität einer Transporteinheit in der Grundzeit lässt sich aus der mittleren Lademasse m_L und der Zeit des Transportumlaufes T_U berechnen. Die Zeit des Transportumlaufes setzt sich wiederum aus der Beladezeit T_{11} , der Zeit für die Lastfahrt zum Silo T_{12} , der Entladezeit T_{13} und der Zeit für die Leerfahrt zum Feldhäckslers T_{14} zusammen (Gl. 18).

$$\dot{m}_{T_{02TE}} = \frac{m_L}{T_{U02}} = \frac{m_L}{T_{11} + T_{12} + T_{13} + T_{14}} \quad \text{Gl. 18}$$

| | |
|--------------------------|--|
| $\dot{m}_{T_{02TE}}$... | Transportkapazität in der Grundzeit [$t \cdot h^{-1}$] |
| m_L ... | mittlere Lademasse einer Transporteinheit [t] |
| T_{U02} ... | Zeit des Transportumlaufes (Grundzeit) [h] |
| T_{11} ... | Beladezeit [h] |
| T_{12} ... | Zeit für die Lastfahrt der Transporteinheit zum Silo [h] |
| T_{13} ... | Entladezeit [h] |
| T_{14} ... | Zeit für die Leerfahrt der Transporteinheit zum Feldhäcksler [h] |

Die erweiterte Grundzeit T_{025} enthält durch das Parallelverfahren bedingte Wartezeiten einer Transporteinheit am Feld, bis das Befüllen des voranfahrenden Transportzuges durch den Feldhäcksler abgeschlossen ist. Die erweiterte Umlaufzeit einer Transporteinheit T_{U025} lässt sich demnach folgendermaßen darstellen (Gl. 19):

$$T_{U025} = T_{11} + T_{12} + T_{13} + T_{14} + T_{25TE} \quad \text{Gl. 19}$$

| | |
|----------------|---|
| T_{U025} ... | Zeit des Transportumlaufes (erweiterte Grundzeit) [h] |
| T_{11} ... | Beladezeit [h] |
| T_{12} ... | Zeit für die Lastfahrt der Transporteinheit zum Silo [h] |
| T_{13} ... | Entladezeit [h] |
| T_{14} ... | Zeit für die Leerfahrt der Transporteinheit zum Feldhäcksler [h] |
| T_{25TE} ... | zyklische verfahrensbedingte Verlustzeit der Transporteinheit [h] |

Die Transportkapazität in der Gesamtarbeitszeit ergibt sich aus der Anzahl der Transportumläufe pro Tag n_L , der mittleren Lademasse m_L und der Gesamtarbeitszeit T_{08} . Die Gesamtarbeitszeit der Transporteinheiten setzt sich dabei aus der erweiterten Grundzeit, der Rüstzeit, Störzeit und den Zeiten für die Fahrten zwischen Standort und Arbeitsort zusammen. Es wurde angenommen, dass bei entsprechender Arbeitsorganisation Wege zwischen den Arbeitsorten entfallen. Die Berechnung der Transportkapazität in der Gesamtarbeitszeit erfolgte nach Gl. 20 (Tab. A72).

$$\dot{m}_{T_{08TE}} = \frac{\left(T_{08} - T_3 - \frac{s_{611} + s_{612}}{v_{T14_TE}} \right) \cdot m_L}{T_{08} \cdot T_{U025} (1 + k_4)} \quad \text{Gl. 20}$$

| | |
|--------------------------|---|
| $\dot{m}_{T_{08TE}}$... | Transportkapazität in der Gesamtarbeitszeit [$t \cdot h^{-1}$] |
| T_{08} ... | Gesamtarbeitszeit pro Tag [h] |
| T_3 ... | tägliche Rüstzeit der Transporteinheit [h] |
| s_{611} | Weg Hof – Feld [km] |
| s_{612} | Weg Feld – Hof [km] |
| v_{T14_TE} ... | mittlere Geschwindigkeit der Transporteinheit bei der Leerfahrt [$km \cdot h^{-1}$] |
| m_L ... | mittlere Lademasse einer Transporteinheit [t] |
| T_{U025} ... | Zeit des Transportumlaufes (erweiterte Grundzeit) [h] |
| k_4 ... | Anteil der Störzeit an der erweiterten Grundzeit [%] |

Kapazität der Verdichtereinheiten

Die Kapazität einer Verdichtereinheit in der Hauptzeit entspricht dem reziproken Wert des Verdichtungszeitbedarfs. Ausgehend von der Annahme, dass die Verdichtung einheitlich mit $1,5 \text{ min} \cdot \text{t}^{-1}$ Siliergut erfolgt, ergeben sich auch für die Verdichtereinheiten zyklische verfahrensbedingte Verlustzeiten. In der Gesamtarbeitszeit der Verdichter wurden als Teilzeiten neben der Hauptzeit zusätzlich die Zeiten für das Entladen der Anhänger, zyklische verfahrensbedingte Verlustzeiten, die Rüstzeit, Störzeiten sowie die Zeiten für die Fahrten zwischen Standort und Arbeitsort berücksichtigt. Die Kapazität der Verdichtereinheiten in der Gesamtarbeitszeit wurde über die in das Silo eingelagerte Masse und die Gesamtarbeitszeit pro Tag nach Gl. 21 berechnet (Tab. A73).

$$\dot{m}_{T_{08VE}} = \frac{\left(T_{08} - T_3 - \frac{s_{611} + s_{612}}{v_{T_VE}} \right) \cdot m_L}{T_{08} \cdot (1 + k_4) \cdot (VB \cdot m_L + t_{13} + T_{25})} \quad \text{Gl. 21}$$

| | |
|--------------------------|--|
| $\dot{m}_{T_{08VE}}$... | Kapazität der Verdichtereinheit in der Gesamtarbeitszeit [$\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$] |
| T_{08} ... | Gesamtarbeitszeit pro Tag [h] |
| T_3 ... | tägliche Rüstzeit der Verdichtereinheit [h] |
| s_{611} | Weg Hof – Silo [km] |
| s_{612} | Weg Silo – Hof [km] |
| v_{T_VE} ... | mittlere Geschwindigkeit der Verdichtereinheit auf Wegen [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$] |
| m_L ... | mittlere Lademassee einer Transporteinheit [t] |
| k_4 ... | Anteil der Störzeit an der erweiterten Grundzeit [%] |
| VB ... | Verdichtungszeitbedarf [$\text{h} \cdot \text{t}^{-1}$] |
| t_{13} ... | mittlere Entladezeit einer Transporteinheit [h] |
| T_{25} ... | zyklische verfahrensbedingte Verlustzeit der Verdichtereinheit [h] |

Grunddaten der Kapazitätsbewertung

Die Bewertung der Kapazitäten wurde für jede Messvariante und Häcksellänge auf Basis von Messdaten bzw. Annahmen durchgeführt. Für die Modellrechnungen bei definierter Schlaggröße und einheitlichen Abmessungen wurde von rechteckigen Schlägen mit einem Verhältnis Breite zu Länge von 0,5 ausgegangen. Die Berechnungen erfolgten vereinfacht für Auf- und Abarbeit der Ernteeinheit ohne Vorgewende. Weitere Grunddaten für die Kapazitätsbewertung sind in Tab. A74 im Anhang aufgeführt.

5.2.5 Basisdaten für die Bewertung von Energieaufwand, Emissionen und Wirtschaftlichkeit

Zur Berechnung flächenbezogener Energieaufwendungen, Emissionen und Kosten sowie der entsprechenden Outputparameter mussten für die Einzelprozesse weitere Annahmen getroffen bzw. Berechnungsgrundlagen festgelegt werden. Nachfolgend werden der Maschinen- und Betriebsmitteleinsatz, Basisdaten für die Silierung, Biogasproduktion und Energiebereitstellung sowie die Gärrestaubsbringung dokumentiert.

Für die Arbeitserledigung auf dem Feld wurden selbstfahrende Feldhäcksler mit Motorleistungen und Arbeitsbreiten der Erntevorsätze entsprechend des realen Maschineneinsatzes bei den Praxisernten (Abschnitt 5.2.2) angenommen. Für Transport, Verdichtung im Silo, Entnahme der Silage und die Gärrestaubsbringung gingen einheitlich folgende Maschinen in die Berechnungen ein (**Tab. 32**):

Tab. 32: Übersicht über den für die Bilanzierung angenommenen Maschineneinsatz

| Arbeitsgang | Maschine | Beschreibung |
|---------------------|--|--|
| Transport zum Silo | Standardtraktor, Doppelzug Kippanhänger | Motornennleistung 120 kW, Ladevolumen 20 m ³ je Anhänger |
| Verdichten im Silo | Radlader | Motornennleistung 102 kW, Gewicht 10 t |
| Entnahme der Silage | Standardtraktor mit Frontlader, Silozange | Motornennleistung 67 kW, Nennvolumen 2 m ³ |
| Gärrestaubsbringung | Standardtraktor, Pumptankwagen, Schleppschlauchverteiler | Motornennleistung 120 kW, Nennvolumen 15 m ³ , Arbeitsbreite 15 m |

Für die vorliegenden Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass durch überbetriebliche Maschinenverwendung bzw. durch andere Nutzungsrichtungen eine optimale Auslastung der Maschinen gewährleistet ist. Entsprechend wurde die reale Nutzungsdauer der Maschinen der nominalen Nutzungsdauer gleichgesetzt. Ein Restwert der Maschine wurde nicht berücksichtigt. Detaillierte Maschinendaten sind der Tab. A75 zu entnehmen.

Für den Treibstoffverbrauch beim Häckseln wurden die Messwerte aus den Praxiserhebungen getrennt für die einzelnen Häcksellängen verwendet. Für die übrigen Maschinen wurden die Daten des KTBL angesetzt (KTBL 2008, Tab. A75).

Es wurde davon ausgegangen, dass die Konservierung des Siliergutes in Horizontalsilos aus Stahlbeton mit einer Breite von 8 m und einer Länge von 25 m erfolgt (KRENTLER 2006). Die Stapelhöhe im Silo wird mit 2,5 m festgelegt. Für die Gewährleistung eines ausreichenden Vorschubes wäre in einem Silo mit angeführter Dimensionierung abhängig von der Pflanzenart die Entnahme von wenigstens 3,9 bis 5,6 Tonnen Silage pro Tag nötig. Die luftdichte Abdeckung des Silos erfolgt mit handelsüblicher Silofolie und Unterziehfolie (THAYSEN & NUSSBAUM 2006). Die notwendige Menge an

Silofolie für eine luftdichte Abdeckung ergibt sich aus der oberen Fläche des Silos, wobei in der Breite und Länge jeweils ein Zuschlag von 4 m eingerechnet wurde. Der Arbeitszeitbedarf für das Abdecken des Silos wurde mit $1,4 \text{ Akmin} \cdot \text{m}^2$ Silofolie angenommen (WAGNER & WEBER 2008).

In den Berechnungen wurden bei der Silierung entstehende Verluste berücksichtigt. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass die im Laborsilo gemessenen oTM-Verluste als Verluste durch Restatmung und Fermentationsprozesse entstehen. Zusätzlich wurden pauschal für Feldverluste sowie für Verluste durch aeroben Stoffabbau und Verluste bei der Silageentnahme 6 % bei Mais, Sudangras und Triticale und 9 % bei Grünschnittroggen addiert. Die höheren Verluste des Grünschnittroggens sind mit einem geringeren TM-Gehalt zur Ernte bzw. erhöhten Feldverlusten durch das Anwelken des Erntegutes zu begründen. Die unterstellten Werte beruhen auf den nach JEROCH ET AL. (1999) zu erwartenden mittleren Verlustquoten bei günstigen Silierbedingungen.

Für den Arbeitszeitbedarf zur Entnahme der Silage aus dem Silo und dem Befüllen der Biogasanlage mit der Silage wurden Daten des KTBL (2008) zugrunde gelegt. Es wurde ein einheitlicher Arbeitszeitbedarf je m^3 Silage unterstellt, wodurch sich abhängig von der Dichte im Silo der Arbeitszeitbedarf je Tonne Silage verändert.

Der Bewertung wurde in der Standardberechnung eine Biogasanlage mit 500 kW installierter elektrischer Leistung zugrunde gelegt. Es wurde unterstellt, dass für die Biogasproduktion ausschließlich nachwachsende Rohstoffe genutzt werden, wobei wenigstens 30 % der Frischmasse-Substratzufuhr der Anlage aus Rindergülle besteht. Bei Vergleich unterschiedlich gehäckselter Silage bleibt die Beschickung mit Gülle oder anderen Kofermenten konstant. Die Verstromung des Methans erfolgt im BHKW. Die notwendige Prozesswärme wird über die Verwertung des Methans im BHKW bereitgestellt. Von einer zusätzlichen Nutzung der anfallenden Wärme wurde in der Standardvariante nicht ausgegangen. Zur Berechnung der erzeugten Energie wurden die in **Tab. 33** aufgeführten Grunddaten angenommen (NIEBAUM & DÖHLER 2006):

Tab. 33: Grunddaten für die Berechnung der erzeugten Energie

| Parameter | Wert |
|------------------------------------|--|
| Bauart BHKW | Gas-Otto-Motor |
| Eigenstrombedarf | 7 % der erzeugten elektrischen Energie |
| Heizwert Methan | $9,94 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ |
| Ausfall der Gasproduktion | $5 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ |
| elektrischer Wirkungsgrad des BHKW | 36 % |

Der Abbau an oTM in der Biogasanlage wurde als Produkt der normierten Biogasausbeute und der Dichte des Biogases berechnet. Dabei wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass im Biogas nur die Komponenten Methan und Kohlendioxid enthalten

sind, wobei die Dichten für ideale Gase bei 0 °C für diese Komponenten angenommen wurden. Die Masse an Gärrest ergibt sich aus einem unveränderten Anteil an Wasser und Rohasche des Substrates und der unabgebauten oTM.

5.2.6 Energiebilanz und Treibhausgasemissionen

Für die Bewertung der Änderung der Netto-Energieproduktion und der Netto-THG-Emissionen durch eine verringerte Schnittlängeneinstellung am Feldhäcksler wurden entlang der Prozesskette zur Stromerzeugung aus Biogassilagen den einzelnen Prozessschritten von der Ernte bis zur Ausbringung des Gärrestes Stoff- und Energieströme zugeordnet.

Zur Bestimmung des Gesamtenergiebedarfs der betrachteten Prozesse wurden alle relevanten in die Prozesse einfließenden Energieträger inklusive der Vorketten zur Gewinnung der Endenergieträger erfasst und primärenergetisch bewertet. Weiterhin wurde der kumulierte Energieaufwand (KEA) für den Betriebsstoff- und Betriebsmitteleinsatz berücksichtigt. Der kumulierte Energieaufwand gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der in Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung von ökonomischen Gütern entsteht (VDI 1997). Die Kalkulation des Energieinputs erfolgte über die prozessspezifischen Einsatzmengen von Energieträgern und Betriebsstoffen bzw. über die Massen und Einsatzzeiten von Betriebsmitteln und entsprechende Energiefaktoren aus der Literatur (**Tab. 34**). Die gesamte zugeführte Primärenergie wurde der im BHKW erzeugten Energie gegenübergestellt.

In Übereinstimmung mit der Vorgehensweise zur Bewertung des Energieaufwandes der betrachteten Prozesse wurden die klimarelevanten Emissionen durch die Herstellung bzw. Bereitstellung und Nutzung der in die Prozesse eingehenden Energieträger, Betriebsstoffe und Betriebsmittel berechnet. Zusätzlich wurden Methanemissionen der Biogasanlage und –verwertung in Höhe von 2 % der erzeugten Methanmenge in Anlehnung an die Untersuchungen von BACHMAIER ET AL. (2008) berücksichtigt. Dabei wurde ein Treibhausgaspotential (GWP-Wert) des Methans nach IPCC (2001) für einen Zeithorizont von 100 Jahren mit $23 \text{ kg CO}_2^* \text{ kg}^{-1}$ angenommen. Von weiteren Methanemissionen aus dem Gärrestlager wurde bei Unterstellung eines abgedeckten Endlagers nicht ausgegangen. Emissionen durch die Düngung mit dem Gärrest wurden nicht berücksichtigt, da diese dem Feldanbau zuzurechnen sind und hierbei keine Unterschiede zwischen den Häcksellängenvarianten angenommen wurden. Die Klimawirksamkeiten einzelner Stoffe wurden in ihrer relativen Wirksamkeit bezogen auf CO_2 beschrieben und als CO_2 -Äquivalente ($\text{CO}_2\text{äq}$) aggregiert. Die CO_2 -Emissionen ergeben sich aus den prozessspezifischen Einsatzmengen von Energieträgern und Betriebsstoffen bzw. Betriebsmitteln und den entsprechenden Emissionsfaktoren aus der Literatur (**Tab. 34**). Die Summe zusätzlicher CO_2 -Emissionen bei Einstellung einer kürzeren Häcksellänge

am Feldhäcksler wurde den CO₂-Emissionen gegengerechnet, die durch die erneuerbaren Energieträger als Produkte der Prozesskette bei Substitution fossiler Energieträger zusätzlich eingespart werden. Dabei wird in der Standardvariante von der Substitution von Strom entsprechend des „deutschen Strommixes“ (GEMIS 2009) ausgegangen.

Die für die energetische Bewertung und die Bewertung der THG-Emissionen berücksichtigten stofflichen und energetischen Einflussfaktoren sind in **Abb. 52** dargestellt.

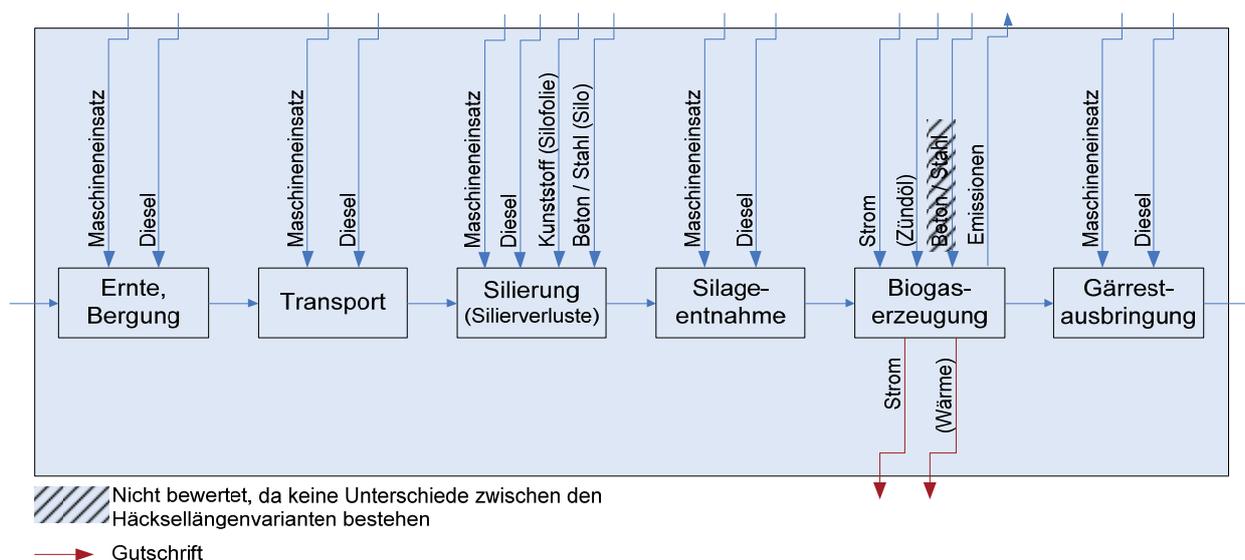


Abb. 52: Schematische Darstellung der für die energetische Bewertung und die Bewertung des Treibhauseffektes berücksichtigten stofflichen und energetischen Einflussfaktoren

Für die Bewertung des indirekten Energieinputs durch den Maschineneinsatz wurden Massen der Maschinen nach KTBL (2008) unterstellt (Tab. A75). Ein entsprechender Faktor für die indirekten Emissionen je kg Maschinenmasse war nicht verfügbar. Die indirekten Emissionen durch den Maschineneinsatz wurden daher entsprechend der Methodik nach DAALGARD ET AL. (2001) und STYLES & JONES (2007) proportional zu dem Dieserverbrauch angenommen. Die Masse der Silofolie wurde mit 141 g*m⁻² Silofolie und 37 g*m⁻² Unterziehfolie festgelegt (DLG 2009b). Das Horizontalsilo besteht aus einer 20 cm starken Bodenplatte aus Beton und aus 16 cm starken Wänden aus Stahlbeton. In **Tab. 34** sind die den Berechnungen zugrunde gelegten Energie- und Emissionsfaktoren für die einzelnen Energieträger und Betriebsmittel aufgeführt.

Tab. 34: Energie- und Emissionsfaktoren

| | Energiefaktor | Emissionsfaktor | Quelle |
|--------------------|---|---|---|
| Maschinen | 108 MJ*kg ⁻¹ | 0,90 kg CO ₂ äq*I ⁻¹ Dieselverbrauch | (KALK & HÜLSBERGEN 1996, DAALGARD ET AL. 2001, STYLES & JONES 2007) |
| Diesel | 41,1 MJ*L ⁻¹ | 3,12 kg CO ₂ äq*I ⁻¹ | (GEMIS 2009) |
| Silofolie | 81,2 MJ*kg ⁻¹ | 2,50 kg CO ₂ äq*kg ⁻¹ | (GEMIS 2009) |
| Silo | 9,9 MJ*m ⁻³ *a ⁻¹ | 1,63 kg CO ₂ äq*m ⁻³ *a ⁻¹ | (GEMIS 2009) |
| deutscher Strommix | 10,3 MJ*kWh ⁻¹ | 0,61 kg CO ₂ äq*kWh ⁻¹ | (GEMIS 2009) |

Als Ergebnis des Effektes einer kürzeren Häcksellängeneinstellung wird nachfolgend die Differenz des Energieinputs und der CO₂-Emissionen bei Ernte, Transport und Silierung zwischen der gröberen und der feineren Längeneinstellung angegeben. Weiterhin werden die Differenz der Energieaufwendungen und Emissionen für den Betrieb der Biogasanlage sowie die Differenz des Energieoutputs bzw. der Minderemissionen durch Substitution fossiler Energieträger dargestellt. Zusammenfassend wird die Änderung des Saldos durch die kürzere Häcksellängeneinstellung dokumentiert.

5.2.7 Bewertung der Kosten und Erlöse

Die Bewertung der Änderung von Kosten und Erlösen durch eine verringerte Schnittlängeneinstellung am Feldhäcksler umfasst die Verfahrenskosten bei Ernte, Transport, Silobefüllung und Entnahme der Silage, die Kosten für den Betrieb der Biogasanlage sowie die Erlöse durch die Stromerzeugung.

Der gesamte finanzielle Aufwand für die Arbeitserledigung der Arbeitsgänge Häckseln, Transport, Siloeinlagerung und Entnahme der Silage wird für die untersuchten Häcksellängeneinstellungen ermittelt und verglichen. Dabei setzen sich die Verfahrenskosten aus den Lohnkosten sowie den festen und variablen Maschinenkosten zusammen. Die Verfahrenskosten wurden für jede Maschine nach einem einheitlichen Berechnungsschema kalkuliert (Tab. A76). Zu den festen Kosten zählen Abschreibung, Zinsanspruch, Kosten für Steuern und Versicherungen sowie für die Unterbringung der Maschinen. Der Zinsanspruch wurde in Höhe von 6 %, Steuern und Versicherungen wurden in Höhe von 1 % und Unterbringungskosten in Höhe von 1 % des Anschaffungspreises der Maschine angenommen. Die variablen Maschinenkosten ergeben sich aus den Reparaturkosten sowie den Treibstoff- und Schmierstoffkosten. Der Schmierstoffverbrauch entspricht 1 % des Treibstoffverbrauches. Der Preis des Diesels wurde mit 1,10 €*l⁻¹, der Preis für Schmierstoffe mit 2 €*l⁻¹ angenommen. Die Daten zu den Anschaffungspreisen der Maschinen, Reparaturkosten und Lohnkosten wurden der Datensammlung KTBL (2008) entnommen (Tab. A75). Bei einer Transportentfernung > 2 km wurde für die Transporteinheiten ein Reparaturkostenzuschlag von 0,03 €*(km*t)⁻¹ berechnet. Die Lohnkosten liegen nach KTBL (2008) für einen landwirtschaftlichen Facharbeiter bei 16,68 €*h⁻¹ einschließlich Lohnnebenkosten.

Zur Berechnung der Kosten für den Lagerraum wurde von Investitionskosten für das Horizontalsilo von 40,90 €*m⁻³ Nutzvolumen, von einer Nutzungsdauer des Silos von 25 Jahren und einem Zinsanspruch von 4 % ausgegangen (HANFF ET AL. 2008). Die Kosten für die luftdichte Abdeckung des Silos betragen 0,4 €*m⁻² Silofolie und 0,09 €*m⁻² Unterziehfolie (THAYSEN & NUSSBAUM 2006).

Ausgangspunkt zur Berechnung der Änderung der Kosten der Stromerzeugung war eine einheitliche Biogasanlage für beide Längeneinstellungen einer Messvariante.

Folglich hatte die Häcksellänge keinen Einfluss auf die jährlichen Kapitalkosten, Versicherungskosten und Kosten für die Reparatur und Wartung der Gebäude und Anlagentechnik. Eine Ausnahme bildete das BHKW. Hier wurden Reparaturkosten in Abhängigkeit von der erzeugten elektrischen Energie unterstellt. Ein Effekt der Häcksellänge auf den Arbeitszeitbedarf ist nur für die Entnahme der Silage und die Feststoffzufuhr in die Biogasanlage, nicht jedoch für den Betrieb und die Unterhaltung der Biogasanlage zu erwarten. In die Berechnung zur Änderung der jährlichen Kosten der Biogasanlage durch eine kürzere Häcksellänge des Substrates wurden daher nur die Positionen

- Kosten für Reparatur und Wartung des BHKW's mit 1,5 €-Cent je kWh erzeugter elektrischer Energie für Gas-Otto-Motoren (KTBL 2008),
- Kosten für den Eigenstrombedarf von 15 €-Cent je kWh,
- Kosten für die Gärrestausbringung einbezogen. Die Gärrestausbringung wird dem Betrieb der Biogasanlage zugerechnet. Kosten für die Gärrestausbringung werden analog zu den Verfahrenskosten bei der Ernte und Silierung berechnet (Tab. A76).

Die Erlöse der Stromerzeugung ergeben sich aus der eingespeisten Strommenge und dem Vergütungssatz des EEG. Als Jahr der Inbetriebnahme der Biogasanlage wurde 2009 festgelegt. Es kann davon ausgegangen werden, dass für die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen der nawaRo-Bonus gezahlt wird. Bei Nutzung von mindestens 30 % Rindergülle für die Biogaserzeugung in der Anlage kann zudem der Wirtschaftsdünger-Bonus geltend gemacht werden.

Um den Effekt einer kürzeren Häcksellängeneinstellung auf die Kosten und Erlöse zu verdeutlichen, wird als Ergebnis im Folgenden die Differenz der Verfahrenskosten bei Ernte, Transport und Silierung zwischen der gröberen und der feineren Längeneinstellung angegeben. Weiterhin werden die Differenz der Kosten des Betriebes der Biogasanlage sowie die Differenz der Erlöse dargestellt. Zusammenfassend wird die Änderung des Gewinns durch die kürzere Häcksellängeneinstellung dokumentiert.

5.2.8 Sensitivitätsanalyse

Eine Reihe der Basisdaten, die den durchgeführten Berechnungen zugrunde gelegt wurden, beruhen auf Annahmen, die die Wirklichkeit mehr oder weniger gut abbilden. Zur Abschätzung der Bandbreite möglicher Ergebnisunterschiede durch unterschiedliche Randbedingungen wurde daher für ausgewählte Messvarianten eine einfache Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hierbei wurden die in der Standardberechnung unterstellten Annahmen wie folgt variiert:

1. Änderung der Transportentfernung zwischen 0,5 und 10 km
2. Erhöhung des Dieselpreises um 20 % und um 50 %
3. Änderung der Einspeisevergütung: Es entfällt der Wirtschaftsdünger-Bonus, der nach EEG nur bei einem Substratanteil von wenigsten 30 % Wirtschaftsdünger an der gesamten eingesetzten Frischmasse gezahlt wird.
4. Verkleinerung der Biogasanlage: Die Biomethanisierung der Silagen erfolgt in einer Biogasanlage mit 80 kW installierter elektrischer Leistung (Inbetriebnahmejahr 2009). Für die Verstromung wird ein BHKW mit Zündstrahl-Motor eingesetzt (elektrischer Wirkungsgrad 33 %, Zündölanteil 10 %, Zündölkosten 70 €-Cent* l^{-1} , Reparaturkosten des BHKW 1 €-Cent*kWh $^{-1}$ erzeugter elektrischer Energie).
5. Vergrößerung der Biogasanlage: Die Biomethanisierung der Silagen erfolgt in einer Biogasanlage mit 1 MW installierter elektrischer Leistung (Inbetriebnahmejahr 2009). Für die Verstromung wird ein BHKW mit Gas-Otto-Motor eingesetzt (elektrischer Wirkungsgrad 38 %).
6. Auskopplung thermischer Energie: 30 % der über Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten thermischen Energie (thermischer Wirkungsgrad des BHKW 43 %) werden ausgekoppelt und für 2 €-Cent*kWh $^{-1}$ verkauft. Die für die Erzeugung der abgegebenen Wärmemenge notwendige elektrische Arbeit wird mit dem KWK-Bonus nach EEG vergütet. Die Einsparung von CO₂-Emissionen basiert auf der Substitution von einem Mix aus 42 % Heizöl und 58 % Erdgas (0,33 kg CO₂äq*kWh $^{-1}$; GEMIS 2009).
7. Senkung des Eigenenergiebedarfs: Durch günstigere Eigenschaften der Silage bei geringerer Häcksellänge kann der Eigenenergiebedarf der Biogasanlage um 10 % (rel.) verringert werden.

Diese Änderungen der Randbedingungen wirken sich in erster Linie auf das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus. Für die energetische Bewertung und die Bewertung der THG-Emissionen wurden nur die relevanten Varianten „Auskopplung thermischer Energie“ und „Senkung des Eigenenergiebedarfs“ berechnet.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Ergebnisse der Prozessbeobachtungen

Im Folgenden sind wesentliche Ergebnisse der Datenerhebungen zu den Praxisernten für die geprüften Messvarianten und Schnittlängeneinstellungen am Feldhäcksler zusammengefasst (**Tab. 35**).

Tab. 35: Ergebnisse der Datenerhebungen zu den Praxisernten

| Mess- variante | theor. Häcksel- länge | Ertrag [dt TM* ha ⁻¹] | TM [%] | oTM [% TM] | v _{EE} [km* h _{T01} ⁻¹] | Durch- satz ¹⁾ [t FM* h _{T01} ⁻¹] | effektive Arbeits- breite ²⁾ [m] | Treibstoffver- brauch ¹⁾ [l*ha ⁻¹] | mittlere Lade- masse ³⁾ [t FM] | Schütt- dichte ⁴⁾ [kg FM*m ⁻³] | |
|-------------------|-----------------------------|---|-----------|---------------|---|--|--|---|--|--|-----|
| Mais_1 | 4 mm | 109,6 | 36,8 | 96,4 | 5,4 | 71,8 | 4,5 | 29,1 | 1,0 | 6,7 | 335 |
| | 9 mm | | | | | 98,7 | | 23,4 | 0,8 | 6,5 | 325 |
| Mais_2 | 4 mm | 96,4 | 29,9 | 95,7 | 5,3 | 51,6 | 3,0 | 42,2 | 1,3 | 7,9 | 395 |
| | 8 mm | | | | | 66,2 | | 26,4 | 0,8 | 7,3 | 365 |
| Mais_3 | 6 mm | 91,3 | 42,4 | 95,9 | 6,3 | 102,5 | 7,5 | 23,8 | 1,1 | 7,7 | 385 |
| | 8 mm | | | | | 7,3 | | 20,4 | 0,9 | 7,5 | 375 |
| | 10 mm | | | | | 7,8 | | 18,1 | 0,8 | 7,0 | 350 |
| Mais_4 | 4 mm | 111,8 | 33,0 | 95,0 | 6,6 | 133,3 | 6,0 | 28,8 | 0,9 | 7,5 | 375 |
| | 8 mm | | | | | 6,8 | | 24,9 | 0,7 | 7,2 | 360 |
| Sugr | 4 mm | 56,8 | 30,8 | 92,1 | 6,5 | 100,3 | 8,4 | 13,1 | 0,7 | 6,4 | 320 |
| | 7 mm | | | | | 6,9 | | 10,7 | 0,6 | 6,1 | 305 |
| Gsr_1 | 5,5 mm | 11,3 | 25,9 | 90,7 | 11,3 | 42,1 | 8,5 | 5,0 | 1,2 | 5,9 | 295 |
| | 9 mm | | | | | 11,8 | | 4,8 | 1,1 | 5,7 | 285 |
| Gsr_2 | 6,8 mm | 46,0 | 24,8 | 94,4 | 3,8 | 24,9 | 3,5 | 24,0 | 1,3 | 4,7 | 235 |
| | 11 mm | | | | | 4,1 | | 21,6 | 1,2 | 4,5 | 225 |
| Gsr_3 | 6,8 mm | 68,7 | 22,3 | 93,6 | 3,2 | 34,2 | 3,5 | 48,1 | 1,6 | 5,2 | 260 |
| | 11 mm | | | | | 4,1 | | 36,9 | 1,2 | 5,1 | 255 |
| Trit_1 | 4 mm | 43,7 | 30,8 | 93,4 | 7,4 | 71,7 | 6,8 | 18,9 | 1,3 | 6,2 | 310 |
| | 8 mm | | | | | 8,4 | | 15,8 | 1,1 | 5,9 | 295 |
| Trit_2 | 4 mm | 78,2 | 38,7 | 95,4 | 3,8 | 26,7 | 3,5 | 40,4 | 2,0 | 5,4 | 270 |
| | 8 mm | | | | | 5,0 | | 30,8 | 1,5 | 4,6 | 230 |
| Wro | 4 mm | 92,6 | 36,4 | 94,5 | 2,5 | 22,5 | 3,5 | 58,5 | 2,3 | 4,4 | 220 |
| | 8 mm | | | | | 2,9 | | 26,2 | 1,9 | 3,9 | 195 |

Gsr... Grünschnittroggen, Sugr... Sudangras, Trit... Triticale, Wro... Winterroggen; v_{EE}... Arbeitsgeschwindigkeit des Feldhäckslers; ¹⁾ des Feldhäckslers; ²⁾ bei Häckseln aus dem Schwad: mittlerer Schwadabstand; ³⁾ je Anhänger mit 20 m³ Ladevolumen; ⁴⁾ berechnet aus Lademasse und Ladevolumen

Mit kürzerer Häcksellängeneinstellung nahm die mittlere Geschwindigkeit der Feldhäcksler in der Hauptzeit und daraus folgend der Durchsatz in der Hauptzeit generell ab. Die Arbeitsgeschwindigkeiten der Feldhäcksler lagen bei Mais und Sudangras bei 7 bis 8 km*h⁻¹ und verringerten sich durch die kürzere Schnittlänge um 0,2 bis 2 km*h⁻¹. Damit sank der resultierende Durchsatz um 4 bis 27 %. Bei Aufnahme von Grünschnittroggen und Triticale aus dem Schwad (Gsr_1, Trit_1) konnten mit 8 bis 12 km*h⁻¹ höhere

Arbeitsgeschwindigkeiten erzielt werden, während die Arbeitsgeschwindigkeit beim Häckseln der Getreideganzpflanzen mittels Feldhäcksler und Ganzpflanzen-Schneidwerk mit 3 bis 5 km*h⁻¹ niedrig lag. Unabhängig von der Verfahrenslinie wirkte sich eine kürzere Schnittlängeneinstellung durch eine Verringerung der Arbeitsgeschwindigkeit der Feldhäcksler um 0,3 bis 1,2 km*h⁻¹ und eine Verringerung der Durchsätze um 4 bis 25 % bei den Getreideganzpflanzen aus. Der Durchsatz steht in direktem Zusammenhang mit dem Ertrag. Mit höheren Erträgen wurde bei den Getreideganzpflanzen ein größerer Effekt der Häcksellänge auf den Durchsatz ermittelt.

Mit verringerter Längeneinstellung nahm weiterhin der Dieserverbrauch der Feldhäcksler bezogen auf die Erntefläche zu. Dabei lag der Anstieg des Treibstoffverbrauches im Mittel bei 19 % mit einer Schwankungsbreite von 4 bis 31 %. Lediglich bei der Messvariante Mais_2 wurde ein noch deutlich höherer Mehrverbrauch an Diesel durch die kürzere Längeneinstellung gemessen. Eine Erklärung für den großen Unterschied im Dieserverbrauch bei dieser Messvariante lässt sich anhand der gemessenen Daten nicht ableiten. Bezogen auf die Tonne Häckselgut stieg der Treibstoffverbrauch durch die kürzere Häcksellänge um 0,1 bis 0,5 Liter. Hohe Treibstoffverbräuche und große Differenzen zwischen den Häcksellängenvarianten ergaben sich vor allem bei Ernte der Getreideganzpflanzen mit dem 232 kW-Feldhäcksler und Ganzpflanzenschneidwerk.

Eine kürzere Häcksellängeneinstellung zur Ernte beeinflusste neben der Arbeitsgeschwindigkeit und dem Dieserverbrauch der Feldhäcksler auch die Dichte des Schüttgutes beim Transport. Durch die stärkere Zerkleinerung war eine Erhöhung der Lademasse von HW 80 Kippanhängern um im Mittel 6 % (Spanne: 2 bis 17 %) möglich. Die aus der Lademasse und dem Ladevolumen berechneten Schüttdichten wiesen Werte von 305 bis 395 kg*m⁻³ für Mais und Sudangras, 225 bis 295 kg*m⁻³ für Grünschnittroggen und 195 bis 310 kg*m⁻³ für die Wintergetreidearten auf. Dabei wurden bei den Fruchtarten mit geringen Schüttdichten (Winterroggen und Wintertriticale) durch die Verkürzung der Häcksellänge die größten Effekte auf die Lademasse und Schüttdichte erzielt.

5.3.2 Funktionsbewertung

5.3.2.1 Struktur des Siliergutes

Die Änderung der physikalischen Struktur des Siliergutes mit kürzerer Schnittlängeneinstellung am Feldhäcksler wurde bereits in Versuchsschwerpunkt III im ersten Teil der vorliegenden Arbeit für die Messvarianten Mais_4 (Mais), Sogr (Sudangras), Gsr_2 (Grünschnittroggen) und Trit_2 (Triticale) ausführlich dargestellt (Abschnitt 4.3.3.1). Die **Abb. 53** gibt ergänzend hierzu einen Überblick über mittlere Partikellängen, -breiten und spezifische projizierte Oberflächen der Siliergüter der gesamten im zweiten Teil bewerteten Messvarianten und Häcksellängeneinstellungen.

In Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Versuchsschwerpunktes III wurden die folgenden Effekte einer kürzeren theoretischen Häcksellänge auf die physikalische Struktur der Siliergüter ermittelt:

- Mit kürzerer Schnittlängeneinstellung am Feldhäcksler wurde generell eine Verringerung der mittleren Partikellänge der Siliergüter erzielt. Die Unterschiede zwischen den beiden Häcksellängen einer Messvariante lagen bei 2,7 bis 5,7 mm. Eine Ausnahme bildete die Messvariante Trit_1, bei der eine nur sehr geringe Änderung der mittleren Partikellänge analysiert wurde.
- Mit kürzerer Schnittlängeneinstellung am Feldhäcksler wurde mit einer Ausnahme (Trit_2) eine Verringerung der mittleren Partikelbreite der Siliergüter erreicht. Die Änderung der Partikelbreiten lag bei 0,2 bis 2,2 mm und war vor allem bei den Siliergütern der Getreideganzpflanzen gering. Das mittlere Verhältnis Länge zu Breite der Partikel wies bei den Getreideganzpflanzen deutlich höhere Werte auf als bei Mais und Sudangras.
- Die kürzere theoretische Häcksellänge bewirkte eine Verringerung des Grobanteils und eine Erhöhung des Feinanteils der Partikellängenverteilung. Der Anteil der projizierten Oberfläche durch Partikel > 25 mm lag bei Mais und Sudangras bei 3 bis 22 % und nahm durch das kürzere Häckseln um 2 bis 11 % (abs.) ab. Bei Roggen und Triticale wurde ein Grobanteil von 15 bis 45 % und eine Abnahme des Grobanteils durch das kürzere Häckseln um 4 bis 16 % analysiert. Der Feinanteil erhöhte sich mit der kürzeren Schnittlängeneinstellung um 3 bis 10 % (abs.) bei Mais und Sudangras und um 2 bis 5 % (abs.) bei Roggen und Triticale.
- Die Änderung der Partikelgrößen bei kürzerer Schnittlängeneinstellung am Feldhäcksler war mit einer Erhöhung der spezifischen projizierten Oberfläche um 6 bis 47 % (rel.) verbunden.

Die absoluten Werte der über bildanalytische Vermessung bestimmten mittleren Partikellängen der untersuchten Siliergüter lagen um das 1,2- bis 5,7-fache über den Werten der theoretischen Häcksellängeneinstellung am Feldhäcksler. Weiterhin wurden im Vergleich der Messvarianten bei gleicher theoretischer Längeneinstellung zum Teil erhebliche Unterschiede der mittleren Partikellänge der Siliergüter gemessen. Allein aus der theoretischen Häcksellänge am Feldhäcksler lässt sich daher bei den vorliegenden Untersuchungen keine eindeutige quantitative Aussage hinsichtlich der physikalischen Struktur des Siliergutes ableiten.

5.3.2.2 Verdichtung im Silo

Für die Konservierung des Siliergutes aus den Feldversuchen kamen verschiedene Silierverfahren zur Anwendung. Die Silierung erfolgte teils im Folienschlauch, zum Teil wurden Horizontalsilos befüllt bzw. Freigärhaufen angelegt. Das eingesetzte Walzgewicht für die Verdichtung im Horizontalsilo bzw. Freigärhaufen betrug 7,7 bis 30 kg in Anpassung an die Kapazität des Feldhäckslers (**Tab. 36**). Der Verdichtungsaufwand variierte zwischen 0,6 und 4,2 min je Tonne Siliergut. Unterschiede in der mittleren Verdichtungszeit zwischen den Häcksellängeneinstellungen einer Messvariante lagen bei 0,1 bis 1,7 min je Tonne Siliergut. Die kürzere Schnittlänge wirkte sich generell positiv auf die Dichte im Silo aus. Mit stärkerer Zerkleinerung wurde eine Erhöhung der Dichte um 0,7 bis 6,3 % der Frischmasse bzw. um 0,4 bis 7,5 % der Trockenmasse ermittelt (**Tab. 36**). Dabei war der größte Effekt der Häcksellänge auf die Verdichtung im Silo bei Grünschnittroggen und Winterroggen gegeben.

Tab. 36: Kenndaten der Silobefüllung sowie gemessene Dichten der Praxissilos

| Messvariante | theor. Häcksellänge | Siloart | Walzgewicht [t] | Verdichtungszeit [min*t ⁻¹ Siliergut] | Dichte im Silo [kg FM*m ⁻³] | Δ Dichte ¹⁾ [%] | Dichte im Silo [kg TM*m ⁻³] |
|--------------|---------------------|-----------------|-----------------|--|---|----------------------------|---|
| Mais_1 | 4 mm | Schlauch-silo | - | - | 666 | +3,5 % | 236 |
| | 9 mm | | - | - | 643 | | 228 |
| Mais_2 | 4 mm | Freigärhaufen | k.A. | 1,0 | 783 | +2,9 % | 232 |
| | 8 mm | | k.A. | 0,6 | 760 | | 225 |
| Mais_3 | 6 mm | Horizontal-silo | 30 | 1,1 | 575 ²⁾ | +0,7 % | 238 |
| | 8 mm | | 30 | 1,5 | 571 ²⁾ | | 237 |
| | 10 mm | | 30 | 1,6 | 559 ²⁾ | | 231 |
| Mais_4 | 4 mm | Schlauch-silo | - | - | 719 | +1,4 % | 229 |
| | 8 mm | | - | - | 709 | | 226 |
| Gsr_1 | 5,5 mm | Schlauch-silo | - | - | 715 | +5,0 % | 179 |
| | 9 mm | | - | - | 679 | | 170 |
| Gsr_2 | 6,8 mm | Freigärhaufen | 14 | 1,7 | 637 | +6,3 % | 151 |
| | 11 mm | | 14 | 2,1 | 597 | | 141 |
| Gsr_3 | 6,8 mm | Freigärhaufen | 20,2 | 1,8 | 637 ³⁾ | +6,3 % | 143 |
| | 11 mm | | 20,2 | 1,9 | 597 ³⁾ | | 133 |
| Sugr | 4 mm | Schlauch-silo | - | - | 566 | +2,1 % | 168 |
| | 7 mm | | - | - | 554 | | 163 |
| Trit_1 | 4 mm | Horizontal-silo | 15,3 | 2,7 | 682 | +2,3 % | 201 |
| | 8 mm | | 15,3 | 4,2 | 666 | | 196 |
| Trit_2 | 4 mm | Freigärhaufen | 12,5 | 1,8 | 653 | +4,7 % | 240 |
| | 8 mm | | 12,5 | 2,4 | 622 | | 229 |
| Wro | 4 mm | Freigärhaufen | 7,7 | 2,9 | 582 | +6,2 % | 204 |
| | 8 mm | | 7,7 | 2,1 | 546 | | 191 |

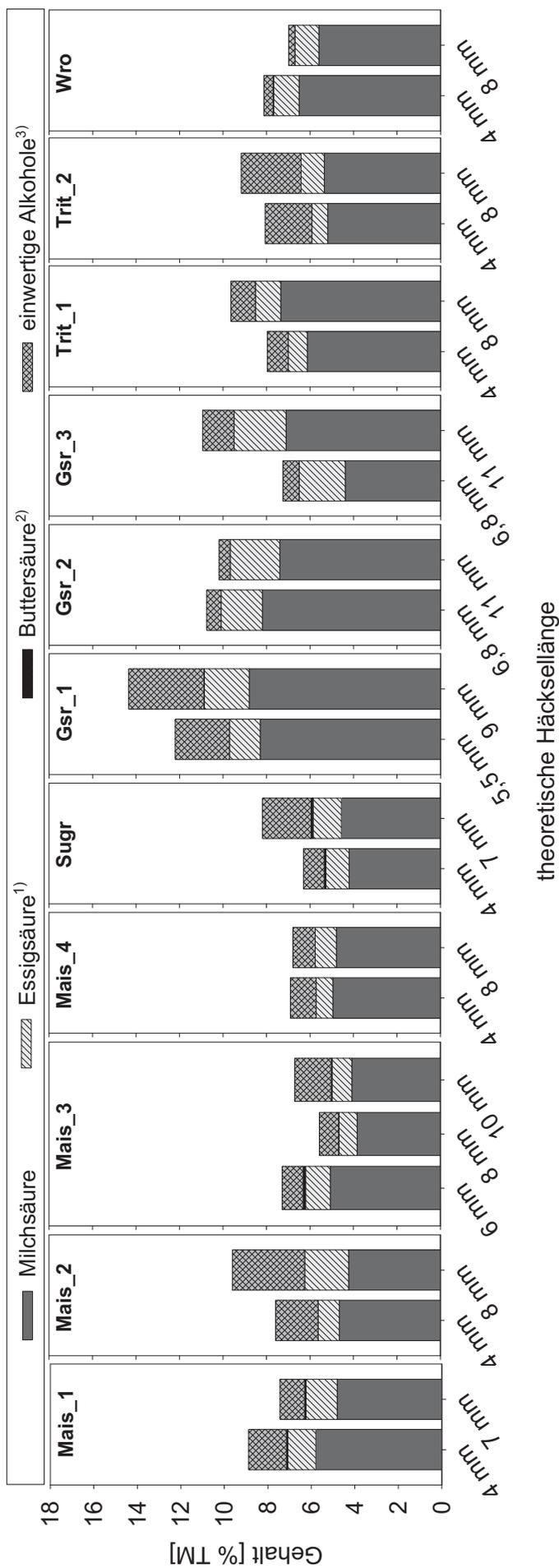
Gsr... Grünschnittroggen, Sugr... Sudangras, Trit... Triticale, Wro... Winterroggen; ¹⁾ Änderung der Dichte der kurzen Häcksellänge gegenüber der längeren Häcksellänge einer Messvariante; ²⁾ keine Messung, Berechnung aus den Daten der Messvarianten Mais_1, Mais_2 und Mais_4: Dichte [kg FM*m⁻³] = 1.275,93 – 3,25 * Partikellänge [mm] – 15,87 * TM-Gehalt [%]; R² = 0,981; ³⁾ keine Messung, Übernahme der Werte der Messvariante Gsr_2

5.3.2.3 Siliererfolg

Für die Silagen mit unterschiedlichen Häcksellängeneinstellungen einer Messvariante konnten in den Praxissilos keine einheitlichen Bedingungen hinsichtlich Lagerdauer und Entnahmezeitraum gewährleistet werden. Die Bewertung des Siliererfolges erfolgt daher auf Grundlage der einheitlich durchgeführten Laboruntersuchungen.

Ein eindeutiger Effekt der theoretischen Häcksellänge auf die Qualität der Silagen konnte hierbei nicht ermittelt werden. Die im Labormaßstab über eine Dauer von 90 Tagen konservierten Silagen wiesen ohne Ausnahme sehr gute Gärqualitäten auf. Bei Mais, Sudangras, Triticale und Winterroggen wurde in der Bewertung nach DLG-Schlüssel (DLG 2006) die volle Punktzahl erreicht. Bei Grünschnittroggen wurden geringfügige Unterschiede in der Punktzahl von maximal 5 Punkten zwischen den Häcksellängenvarianten festgestellt. Ursache hierfür waren pH-Werte von 4,0 bis 4,2, die bei TM-Gehalten unter 30 % als geringfügig zu hoch einzuschätzen sind. Der pH-Wert der übrigen Pflanzenarten lag bei 3,6 bis 4,0 und war abhängig vom TM-Gehalt des Siliergutes als ausreichend niedrig zu bewerten. Für die pH-Wert-Senkung wurde bei Grünschnittroggen ein im Mittel um 2,8 % TM höherer Gehalt an organischen Säuren gebildet verglichen mit den anderen Pflanzenarten. Der Buttersäuregehalt war grundsätzlich gering und überstieg bei keiner der Silagen einen Wert von 0,1 % TM (**Abb. 54**).

Höhere Milchsäuregehalte bei kürzeren Häcksellängen, wie sie im ersten Teil der vorliegenden Arbeit analysiert wurden, bestätigten sich nicht generell. Vor allem bei den Getreide-Ganzpflanzensilagen wurden zum Teil höhere Milchsäuregehalte bei den gröber gehäckselten Varianten ermittelt (**Abb. 54**). In Übereinstimmung mit den Untersuchungsergebnissen aus dem Versuchsschwerpunkt III (Abschnitt 4.3.3.3) wurden jedoch bei den gröbereren Häcksellängen überwiegend höhere Essigsäure- und/oder Gehalte an einwertigen Alkoholen analysiert.



Sugr... Sudangras, Gsr... Grünschnittroggen, Trit... Triticale, Wro... Winterroggen; ¹⁾Summe aus Essig- und Propionsäure; ²⁾Summe aus i-Buttersäure, n-Buttersäure, i-Valeriansäure, n-Valeriansäure und Capronsäure; ³⁾Summe aus Ethanol und Propanol

Abb. 54: Gehalte an Gär-säuren und einwertigen Alkoholen der Silagen (Laborsilo) erstellt aus den Silier-gütern der Praxisernten

5.3.2.4 Methanbildung

Die Bewertung der Methanbildung erfolgt ebenfalls auf Grundlage von Untersuchungen im Labormaßstab. **Tab. 37** gibt einen Überblick über die im Batch-Gärtest gemessenen und für die Berechnungen verwendeten Methanausbeuten und Methangehalte.

Tab. 37: oTM-Verluste, Methanausbeuten und Methangehalte unterschiedlich gehäckselter Silagen (Laborsilo) erstellt aus den Siliergütern der Praxisernten

| Mess- variante | theor. Häcksellänge | oTM-Verluste [%] | $y_{\text{CH}_4\text{-zu}}$ [$\text{I}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{oTM}_{\text{zu}}$] | $y_{\text{CH}_4\text{-orig}}$ [$\text{I}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{oTM}_{\text{orig}}$] | $\Delta y_{\text{CH}_4\text{-orig}}$ ¹⁾ | Sign. ²⁾ | c_{CH_4} [Vol-%] |
|-------------------|------------------------|---------------------|--|--|--|---------------------|------------------------------|
| Mais_1 | 4 mm | 5,1 | 344 | 328 ± 10,9 | +0,9 % | | 54,0 |
| | 9 mm | 5,2 | 342 | 325 ± 18,9 | | | 53,6 |
| Mais_2 | 4 mm | 7,8 | 335 | 311 ± 17,6 | +2,3 % | | 55,3 |
| | 8 mm | 9,3 | 332 | 304 ± 18,4 | | | 53,3 |
| Mais_3 | 6 mm | 1,9 | 341 | 335 ± 6,2 | +1,2 % | * | 52,8 |
| | 8 mm | 2,6 | 340 | 331 ± 5,4 | +5,9 % | | 53,4 |
| | 10 mm | 3,3 | 323 | 313 ± 2,6 | | | 53,9 |
| Mais_4 | 4 mm | 2,4 | 363 | 354 ± 8,7 | +2,3 % | | 54,3 |
| | 8 mm | 4,1 | 360 | 346 ± 5,1 | | | 56,9 |
| Sugr | 4 mm | 8,6 | 327 | 302 ± 10,8 | +7,5 % | * | 55,5 |
| | 7 mm | 6,1 | 299 | 281 ± 6,3 | | | 60,2 |
| Gsr_1 | 5,5 mm | 2,8 | 403 | 389 ± 4,6 | +3,5 % | | 54,9 |
| | 9 mm | 7,0 | 400 | 376 ± 8,1 | | | 55,8 |
| Gsr_2 | 6,8 mm | 2,6 | 345 | 336 ± 6,4 | +9,2 % | * | 59,3 |
| | 11 mm | 8,2 | 334 | 308 ± 3,3 | | | 59,6 |
| Gsr_3 | 6,8 mm | 3,7 | 367 | 353 ± 19,1 | +0,9 % | | 63,3 |
| | 11 mm | 3,7 | 363 | 350 ± 19,6 | | | 62,8 |
| Trit_1 | 4 mm | 5,6 | 345 | 327 ± 6,5 | +2,8 % | | 57,3 |
| | 8 mm | 6,5 | 338 | 318 ± 11,8 | | | 58,5 |
| Trit_2 | 4 mm | 4,3 | 366 | 351 ± 7,3 | +4,8 % | * | 57,0 |
| | 8 mm | 8,6 | 364 | 335 ± 1,3 | | | 57,9 |
| Wro | 4 mm | 4,0 | 336 | 323 ± 5,6 | +4,9 % | * | 56,9 |
| | 8 mm | 4,1 | 321 | 308 ± 2,7 | | | 56,5 |

Gsr... Grünschnittroggen, Sugr... Sudangras, Trit... Triticale, Wro... Winterroggen; ¹⁾ Änderung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4\text{-orig}}$ der kurzen Häcksellänge gegenüber der längeren Häcksellänge einer Messvariante; ²⁾ Mittelwertsvergleich (Adjust = SIMULATE); die mittlere Differenz der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4\text{-orig}}$ zwischen den Häcksellängeneinstellungen einer Messvariante ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant (*)

Durch die Verringerung der theoretischen Häcksellänge konnte bei gleichem Erntegut im Mittel eine Erhöhung der Methanausbeute um 3,9 % bei Beachtung der Fermentationsverluste bei der Silierung erzielt werden. Die Steigerung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4\text{-orig}}$ war jedoch nur bei fünf der zwölf Häcksellängenvergleiche statistisch signifikant. Allgemein waren die Effekte bei Mais relativ gering. Die größte Differenz wurde hier bei der Messvariante Mais_3 zwischen einer theoretischen Häcksellänge von 10 und 8 mm gemessen. Eine noch stärkere Zerkleinerung brachte nur noch eine geringe Erhöhung der Methanausbeute bei Beachtung der Silierverluste. Größere Effekte ergaben sich, wie bereits im Abschnitt 4.3.4.7 festgestellt wurde, bei Sudangras und Grünschnittroggen. Bei den Messvarianten Gsr_1 und Gsr_2 resultierte die kürzere Längeneinstellung am Feldhäcksler vor allem in einer Verringerung der Silierverluste, die sich

jedoch nicht eindeutig aus den Änderungen im Gär säuremuster herleiten lässt. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Differenzen in der mittleren Partikellänge oder der spezifischen projizierten Oberfläche und den Differenzen in der Methanausbeute war bei den Praxissilagen nicht erkennbar.

Unterschiede zwischen den Häcksellängeneinstellungen ergaben sich weiterhin im mittleren Methangehalt des Biogases. Bei der gröberen Häcksellänge wurde überwiegend ein geringfügig höherer Methangehalt im Biogas ermittelt (**Tab. 37**).

5.3.3 Kapazitätsbewertung

Nachfolgend sind die Kapazitäten der Feldhäcksler, Transport- und Verdichtereinheiten sowie die notwendige Anzahl der Aggregate für die geprüften Messvarianten und Häcksellängeneinstellungen bei einer Schlaggröße von 5 Hektar und einer Transportentfernung von 3 km (Standardberechnung) aufgeführt (**Tab. 38**).

Tab. 38: Kapazitäten des Feldhäckslers, der Transport- und Verdichtereinheiten sowie notwendige Anzahl an Aggregaten der einzelnen Messvarianten und Häcksellängeneinstellungen (Fläche 5 ha, Transportentfernung 3 km)

| Mess- variante | theor. Häcksellänge | Durchsatz des Feldhäckslers | | Transportkapazität | | | n _{TE} | Verdichterkapazität | | | n _{VE} |
|-------------------|------------------------|---|--|---|---|--|-----------------|---|---|--|-----------------|
| | | in T ₀₈ [t* <i>h</i> _{T08} ⁻¹] | Anteil T ₁ an T ₀₈ [%] | in T ₀₂ [t* <i>h</i> _{T02} ⁻¹] | in T ₀₈ [t* <i>h</i> _{T08} ⁻¹] | Anteil T ₂₅ an T ₀₂₅ [%] | | in T ₀₂ [t* <i>h</i> _{T02} ⁻¹] | in T ₀₈ [t* <i>h</i> _{T08} ⁻¹] | Anteil T ₂₅ an T ₀₂₅ [%] | |
| Mais_1 | 4 mm | 50,7 | 70,7 | 27,5 | 18,3 | 24,5 | 3 | 38,2 | 28,7 | 18,6 | 2 |
| | 9 mm | 66,0 | 66,9 | 30,0 | 24,0 | 9,4 | 3 | 38,2 | 25,0 | 28,8 | 3 |
| Mais_2 | 4 mm | 36,9 | 71,6 | 25,3 | 18,9 | 11,0 | 2 | 38,5 | 20,7 | 41,5 | 2 |
| | 8 mm | 45,7 | 69,1 | 27,3 | 24,1 | 0,0 | 2 | 38,4 | 25,1 | 28,8 | 2 |
| Mais_3 | 6 mm | 69,5 | 67,8 | 34,2 | 25,5 | 15,3 | 3 | 38,5 | 26,7 | 24,7 | 3 |
| | 8 mm | 77,4 | 65,9 | 35,0 | 28,6 | 7,4 | 3 | 38,4 | 29,9 | 15,6 | 3 |
| | 10 mm | 81,6 | 65,0 | 34,1 | 30,1 | 0,0 | 3 | 38,3 | 31,4 | 10,9 | 3 |
| Mais_4 | 4 mm | 89,7 | 67,3 | 36,8 | 24,6 | 24,3 | 4 | 38,4 | 25,7 | 27,4 | 4 |
| | 8 mm | 92,9 | 66,8 | 36,2 | 25,4 | 20,2 | 4 | 38,4 | 26,6 | 24,8 | 4 |
| Sugr | 4 mm | 67,2 | 67,0 | 30,2 | 24,8 | 6,7 | 3 | 38,2 | 25,9 | 26,2 | 3 |
| | 7 mm | 70,5 | 66,2 | 29,8 | 26,1 | 0,7 | 3 | 38,1 | 27,2 | 22,4 | 3 |
| Gsr_1 | 5,5 mm | 25,4 | 60,4 | 18,6 | 14,4 | 11,9 | 2 | 38,0 | 30,1 | 13,8 | 1 |
| | 9 mm | 26,3 | 59,8 | 18,7 | 14,9 | 9,4 | 2 | 37,9 | 31,1 | 10,8 | 1 |
| Gsr_2 | 6,8 mm | 18,5 | 74,6 | 13,5 | 9,9 | 16,9 | 2 | 37,5 | 20,7 | 40,0 | 1 |
| | 11 mm | 19,5 | 73,7 | 13,9 | 10,5 | 14,2 | 2 | 37,5 | 21,9 | 36,4 | 1 |
| Gsr_3 | 6,8 mm | 25,8 | 75,5 | 17,2 | 13,8 | 8,7 | 2 | 37,8 | 28,9 | 16,9 | 1 |
| | 11 mm | 32,4 | 73,3 | 19,3 | 17,0 | 0,0 | 2 | 37,7 | 34,7 | 0,0 | 1 |
| Trit_1 | 4 mm | 47,7 | 66,5 | 25,7 | 17,5 | 22,6 | 3 | 38,1 | 27,4 | 21,8 | 2 |
| | 8 mm | 52,5 | 64,5 | 26,1 | 19,4 | 15,5 | 3 | 38,0 | 30,4 | 13,1 | 2 |
| Trit_2 | 4 mm | 19,9 | 74,7 | 14,1 | 10,7 | 14,2 | 2 | 37,5 | 22,2 | 30,9 | 1 |
| | 8 mm | 25,6 | 71,7 | 15,1 | 13,3 | 0,1 | 2 | 37,1 | 27,8 | 18,6 | 1 |
| Wro | 4 mm | 17,3 | 76,9 | 12,7 | 9,2 | 17,1 | 2 | 37,4 | 19,3 | 43,8 | 1 |
| | 8 mm | 19,9 | 75,8 | 13,0 | 10,6 | 7,1 | 2 | 37,0 | 22,2 | 34,9 | 1 |

Gsr... Grünschnittroggen, Sugr... Sudangras, Trit... Triticale, Wro... Winterroggen; T₀₈... Gesamtarbeitszeit; T₀₁... Hauptzeit; T₀₂... Grundzeit; T₂₅... zyklische verfahrensbedingte Verlustzeit; T₀₂₅... erweiterte Grundzeit; n_{TE}... notwendige Anzahl an Transporteinheiten; n_{VE}... notwendige Anzahl an Verdichtereinheiten

Der Durchsatz der Feldhäcksler in der Gesamtarbeitszeit nahm mit kürzerer Häcksel­längeneinstellung um 3 bis 23 % und damit geringfügig weniger als der Durchsatz in der Hauptzeit ab (Abschnitt 5.3.1). In der Gesamtarbeitszeit wurden zusätzlich Zeiten für Wendungen und Anhängerwechsel, Rüstzeiten, Störzeiten und Wegezeiten berücksichtigt. Bei Einbeziehung dieser Teilzeiten lag der Anteil der Hauptzeit an der Gesamt­arbeitszeit bei 60 bis 77 %. Die kürzeren Häcksel­längenvarianten zeigten einen etwas höheren Anteil der Hauptzeit an der Gesamtarbeitszeit. Mit geringer Arbeitsgeschwin­digkeit des Feldhäckslers stieg der Zeitbedarf für das Häckseln relativ zu den Zeiten für Wendungen und Anhängerwechsel und damit der Hauptzeitanteil. Durch höhere Lade­massen der Transporteinheiten war zudem eine geringere Anzahl an Anhänger­wechseln nötig. Allgemein wurden bei geringer Arbeitsgeschwindigkeit niedrige Durch­sätze und hohe Anteile der Hauptzeit an der Gesamtarbeitszeit berechnet.

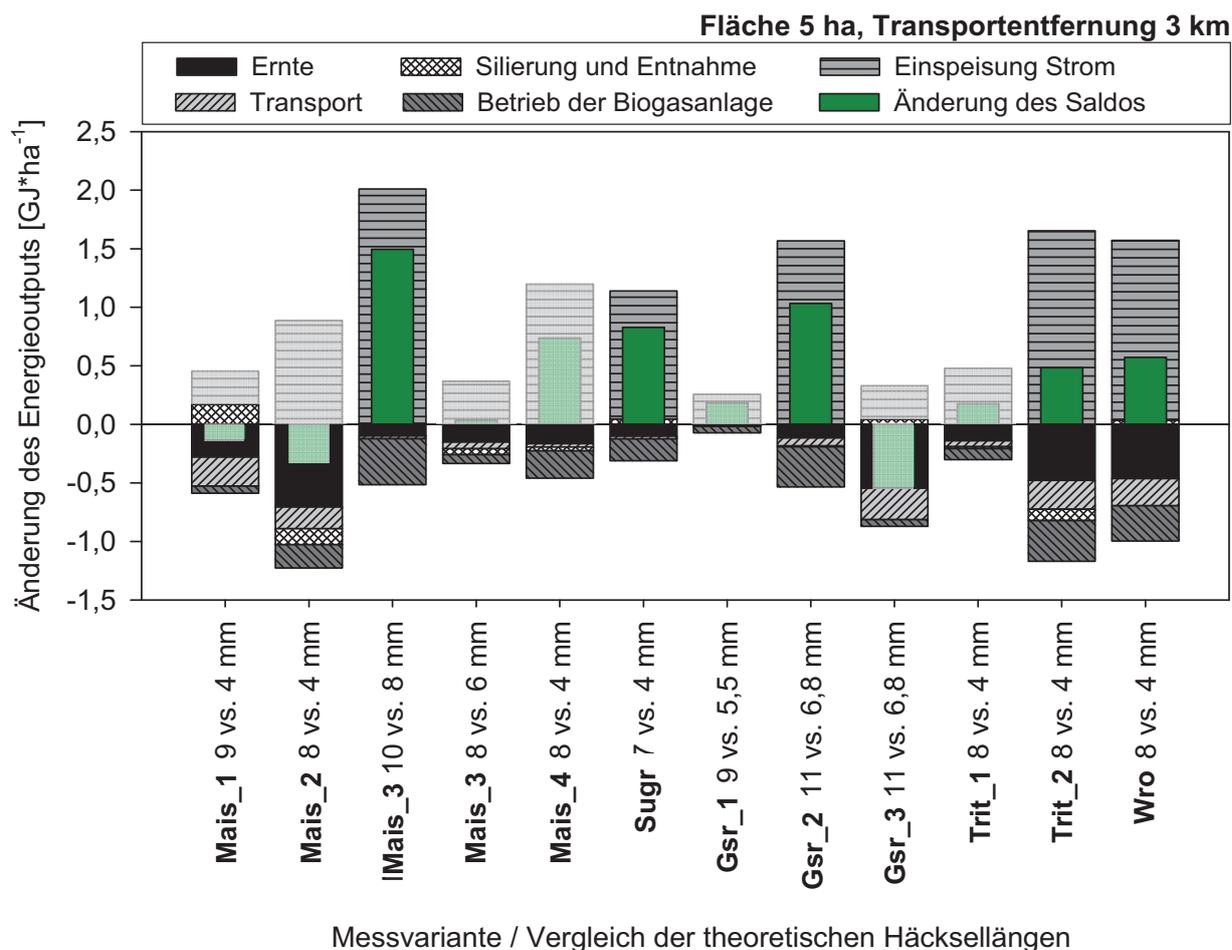
Mit abnehmender Arbeitsgeschwindigkeit des Feldhäckslers bei Verringerung der theo­retischen Häcksel­länge stieg die Beladezeit der Transporteinheiten. Dies wirkte sich negativ auf die Transportkapazität aus. Gleichzeitig ist durch den Anstieg der Schütt­dicke mit geringerer Partikelgröße des Häckselgutes eine höhere Lademasse der Transporteinheiten möglich. Dies verlängerte zusätzlich die Beladezeiten, wirkte sich insgesamt jedoch positiv auf die Transportkapazität aus. Die ermittelten Transportkapa­zitäten bei unterschiedlichen Häcksel­längen in der Grundzeit (**Tab. 38**) zeigen, dass sich diese beiden Effekte bei einem Teil der Messvarianten ausglich. Bei größeren Unterschieden in der Arbeitsgeschwindigkeit des Feldhäckslers überwog der Effekt der längeren Beladezeit (Bsp. Mais_1, Trit_2), bei geringen Geschwindigkeitsunterschieden überwog der Effekt der höheren Lademasse (Bsp. Mais_4, Suger). Bezogen auf die Gesamtarbeitszeit lagen bei einer Schlaggröße von 5 ha und einer Transportentfernung von 3 km die Transportkapazitäten bei der kürzeren Längeneinstellung generell niedriger als die Transportkapazitäten bei gröberer Häcksel­länge. Die Ursache hierfür sind zyklische verfahrensbedingte Verlustzeiten. Bei längeren Beladezeiten und gleichblei­benden Zeiten für Lastfahrten, Leerfahrten und das Entladen steigt die Wartezeit der Transporteinheiten vor dem nächsten Beladen auf dem Feld. Dies wird an den höheren Anteilen der zyklischen verfahrensbedingten Verlustzeit T_{25} an der erweiterten Grund­zeit T_{025} deutlich (**Tab. 38**). Insgesamt wurden eine Transportkapazität der HW 80-Doppelzüge zwischen 9 und 30 $t \cdot h^{-1}$ Gesamtarbeitszeit und eine Verringerung der Transportkapazität mit kürzerer Häcksel­länge um 3 bis 24 % bestimmt. Die Anzahl not­wendiger Transporteinheiten betrug 2 bis 4 bei einer Transportentfernung von 3 km und unterschied sich zwischen den Häcksel­längeneinstellungen einer Messvariante nicht.

Aufgrund der Annahme eines einheitlichen Verdichtungsaufwandes je Tonne Siliergut in der Hauptzeit unterschieden sich die Verdichterkapazitäten in der Grundzeit ebenfalls zwischen den Messvarianten und Häcksel­längeneinstellungen nur sehr gering. Ähnlich der Transportkapazität wurden jedoch niedrigere Verdichterkapazitäten in der

Gesamtarbeitszeit bei der kürzeren Häcksellängeneinstellung ermittelt. Als Folge längerer Transportumlaufzeiten bei kürzerer Schnittlänge stiegen auch bei den Verdichtereinheiten die Anteile der zyklischen verfahrensbedingten Verlustzeiten (**Tab. 38**). Eine Ausnahme bildete die Messvariante Mais_1. Hier verringerte sich bei der kürzeren Häcksellängeneinstellung der Kapazitätsanspruch an die Verdichtung im Silo in dem Maße, dass eine geringere Anzahl an Verdichtereinheiten ausreichend war, um dem Kapazitätsanspruch gerecht zu werden. Damit verbunden war eine effektivere „Ausnutzung“ der Verdichtereinheiten im Prozess bei einem geringeren Anteil an zyklischen verfahrensbedingten Verlustzeiten. Dies bewirkte eine höhere Verdichterkapazität in der Gesamtarbeitszeit verglichen mit der längeren Häcksellänge.

5.3.4 Energetische Bewertung

Auf Grundlage der in Abschnitt 5.3.3 angeführten Kapazitäten sowie der gemessenen Daten der einzelnen Praxisernten wurde die Änderung des Energieinputs durch die Verringerung der theoretischen Häcksellänge von der Ernte bis zur Gärrestausrückführung geprüft. Dabei wurde grundsätzlich eine Zunahme des Energieinputs für die Substratbereitstellung von der Ernte bis zur Silageentnahme ermittelt. Diese war im Mittel der Messvarianten zu über 70 % auf den zusätzlichen indirekten und direkten Energieaufwand für das Häckseln zurückzuführen. Dabei entsprach allein der direkte Energieinput durch den erhöhten Dieserverbrauch des Feldhäckslers etwa 60 % des zusätzlichen Energieinputs durch die Substratbereitstellung. Trotz höherer Lademassen der HW 80-Anhänger lag die Transportkapazität in der Gesamtarbeitszeit bei kürzerer Häcksellänge und einer Transportentfernung von 3 km generell niedriger verglichen mit der Transportkapazität bei größerer Häcksellänge. Der zusätzliche indirekte und direkte Energieaufwand durch den erhöhten Maschinen- und Diesereinsatz trug mit ca. 25 % zu der Gesamterhöhung des Energieinputs durch die Substratbereitstellung bei. Bei der Silierung überlagerten sich die Effekte der Änderung des Energieaufwandes durch die Einlagerung, einen geringeren Lagerraumbedarf bei kürzerer Häcksellänge und die Silageentnahme. Die Effekte glichen sich größtenteils aus, so dass die Silierung in der Summe nur eine geringe Änderung der Energiebilanz erkennen lässt, die sich teils positiv, teils negativ auf den zusätzlichen Energieaufwand auswirkt. Insgesamt war zur Realisierung der stärkeren Aufbereitung ein Mehraufwand an Energie innerhalb einer weiten Spanne von 0,02 bis 1,19 GJ*ha⁻¹ in der gesamten Ernte- und Silierkette für die Substratbereitstellung nötig (**Abb. 55**). Vor allem bei den Messvarianten Mais_2, Trit_2 und Wro, bei denen ein starker Anstieg des Dieserverbrauches zu verzeichnen war, erhöhte sich der Energieinput. Weitere zusätzliche Energieaufwendungen von 0,05 bis 0,39 GJ*ha⁻¹ waren mit dem Betrieb der Biogasanlage verbunden.



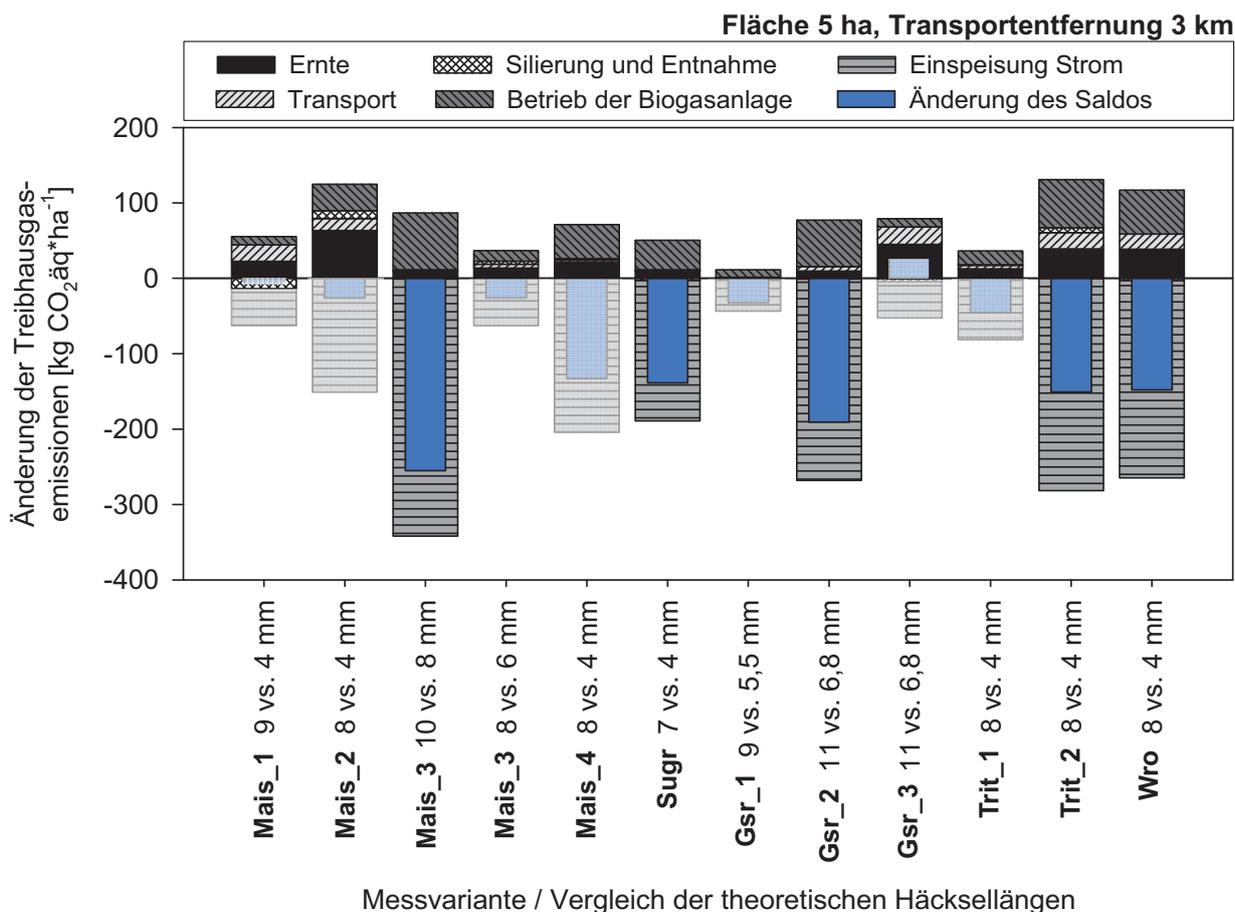
Halbtransparent dargestellt sind diejenigen Varianten, bei denen die Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ nicht statistisch gesichert nachgewiesen werden konnte

Abb. 55: Änderung des Energieinputs und Energieoutputs durch eine Verringerung der Häcksellängeneinstellung bei den Praxisernten (Fläche 5 ha, Transportentfernung 3 km)

Die höhere Stromproduktion in der Biogasanlage je Hektar Anbaufläche, die bei der kürzeren theoretischen Häcksellänge aus der Minderung der Silierverluste und der Erhöhung der Methanausbeute resultierte, ging mit $0,25$ bis $2,0 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ positiv in die Energiebilanz ein. Bei 75 % der untersuchten Messvarianten konnte eine Zunahme der Netto-Energieproduktion durch die kürzere Häcksellängeneinstellung erreicht werden. Dabei übertraf der zusätzliche Energieoutput den Mehraufwand um $0,03$ bis $1,49 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$. Berücksichtigt man jedoch, dass die Erhöhung der Methanausbeute nur bei fünf der zwölf durchgeführten Häcksellängenvergleiche gesichert nachgewiesen werden konnte, so ist nur bei 40 % der Messvarianten von einer tatsächlichen Erhöhung der Netto-Energieproduktion durch die geringere Längeneinstellung auszugehen. Die nicht signifikanten Varianten sind in **Abb. 55** halbtransparent dargestellt. Bei weiteren 35 % der Messvarianten ist demnach eine erhöhte Netto-Energieproduktion nicht gesichert, während bei 25 % der Messvarianten die erhöhten Energieaufwendungen nicht durch eine höhere Strombereitstellung in der Biogasanlage kompensiert werden konnten.

5.3.5 Bewertung der Treibhausgasemissionen

Anhand der Daten aus der Kapazitätsbewertung und den Praxisernten wurden für die einzelnen Messvarianten die zusätzlich bei verringerter Häcksellängeneinstellung anzurechnenden THG-Emissionen bei Ernte, Transport, Silierung und Silageentnahme sowie der Biogasproduktion bewertet. Dem gegenüber stehen die zusätzlichen Einsparpotenziale durch eine erhöhte Substitution fossiler Energieträger durch Biogasstrom bei kürzerer Häcksellänge bezogen auf einen Hektar Anbaufläche.



Halbtransparent dargestellt sind diejenigen Varianten, bei denen die Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ nicht statistisch gesichert nachgewiesen werden konnte

Abb. 56: Änderung der Treibhausgasemissionen durch eine Verringerung der Häcksellängeneinstellung bei den Praxisernten (Fläche 5 ha, Transportentfernung 3 km)

Zusätzliche THG-Emissionen bei der Ernte und Silierung entstehen vorrangig durch den erhöhten Kraftstoffeinsatz bei kürzerer Schnittlängeneinstellung am Feldhäcksler sowie durch einen erhöhten Maschineneinsatz. Analog zu den energetischen Kenngrößen entstanden die zusätzlichen THG-Emissionen bei der Substratbereitstellung mit etwa 70 % vorrangig durch das Häckseln mit kürzerer Häcksellänge, wobei im Mittel 50 bis 60 % den direkten Emissionen durch einen erhöhten Dieselverbrauch des Feldhäckslers zuzuschreiben sind. Der Transport des Siliergutes zum Silo trug mit im Mittel 30 % zu den zusätzlichen Emissionen bei der Substratbereitstellung bei, während der Effekt

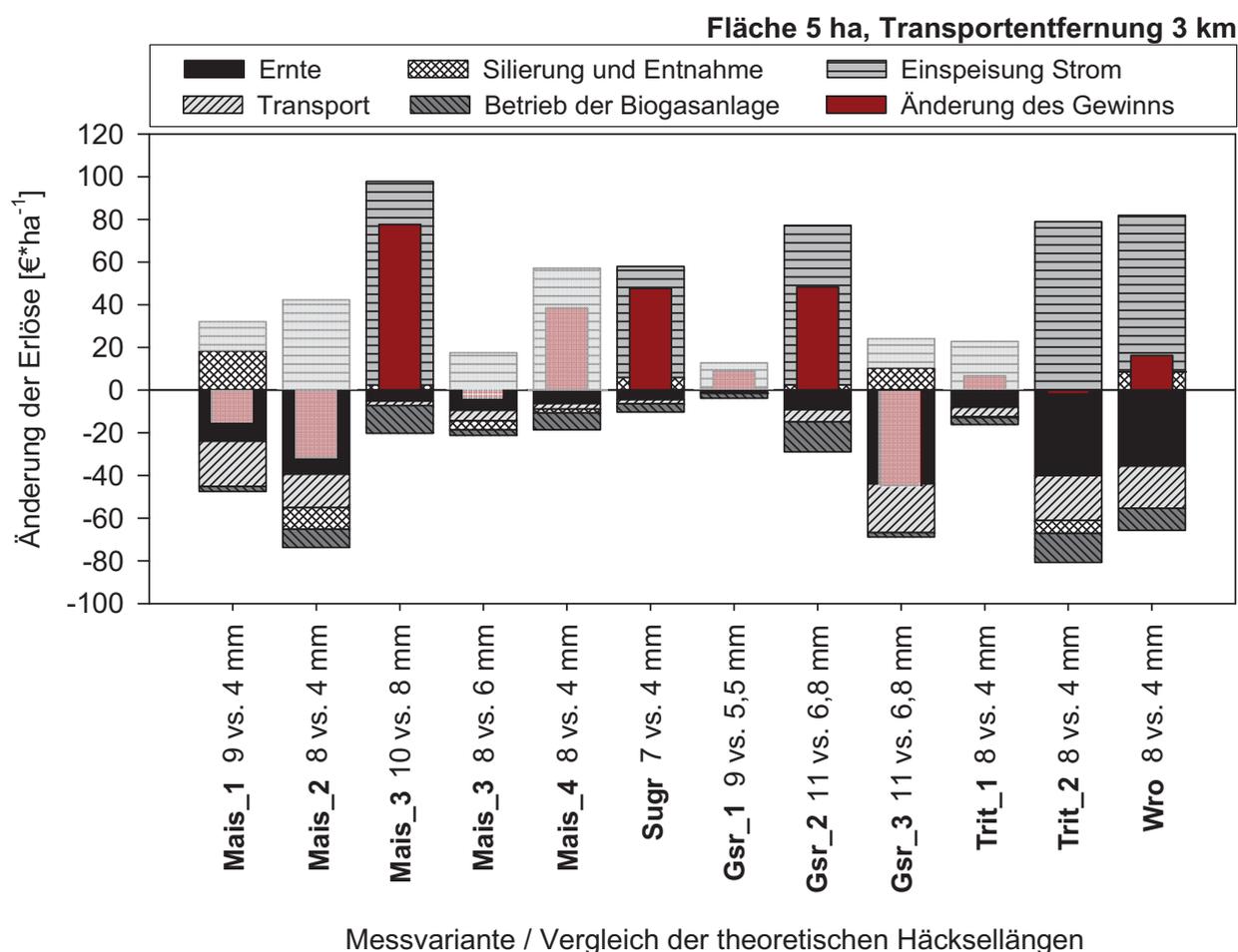
der Silierung in der Summe für die Einlagerung, den geringeren Lagerraumbedarf und die Entnahme der Silage gering war. Von der Ernte bis zur Silageentnahme ergaben sich zusätzliche THG-Emissionen von 1 bis 90 kg CO₂äq je Hektar, wobei bei den Messvarianten mit den größten Änderungen im Dieserverbrauch des Feldhäckslers (Mais_2, Gsr_3, Trit_2, Wro) die Emissionen am stärksten zunahmten (**Abb. 56**). Weitere zusätzliche THG-Emissionen durch die kürzere Häcksellängeneinstellung in ähnlicher Größenordnung wie die der Substratbereitstellung wurden dem Betrieb der Biogasanlage zugerechnet. Bereits geringe zusätzlich erzeugte Methanmengen führten jedoch zu einer deutlichen Minderung von THG-Emissionen durch die Substitution von Strom aus fossilen Energieträgern. Bei den durchgeführten Praxisernten war die Minderemission von klimarelevanten Gasen durch die zusätzliche Produktion von Biogasstrom bei kürzerer Häcksellänge mit einer Ausnahme ausreichend, um erhöhte Emissionen bei der Substratbereitstellung und dem Anlagenbetrieb auszugleichen. In der Bilanz führte dies bei 90 % der geprüften Messvarianten zu einer zusätzlichen Minderemission von Treibhausgasen von 7 bis 255 kg CO₂äq*ha⁻¹ durch die kürzere Schnittlänge. Auch bei der Bewertung der THG-Emissionen ist zu berücksichtigen, dass die Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ durch die kürzere Häcksellängeneinstellung nur bei 40 % der Messvarianten gesichert nachgewiesen wurde. Entsprechend kann nur bei 40 % der geprüften Fälle von deutlichen zusätzlichen Minderemissionen bei Nutzung von Biogassilagen mit sehr kurzer Häcksellänge für die Erzeugung von Biogasstrom gegenüber der größeren Längeneinstellung ausgegangen werden. Bei der Hälfte der durchgeführten Häcksellängenvergleiche war der positive Effekt der kürzeren Häcksellänge hinsichtlich der Minderemission klimarelevanter Gase nicht gesichert nachweisbar, während in einem Fall eine Erhöhung der Netto-THG-Emissionen festgestellt wurde.

5.3.6 Bewertung der Kosten und Erlöse

Auf Basis der in Abschnitt 5.3.3 vorgestellten Kapazitäten sowie der Daten aus den Praxismessungen wurden die Änderungen der Verfahrenskosten durch eine kürzere Schnittlängeneinstellung am Feldhäckslers entlang der Prozesskette von der Ernte bis zur Gärrestausrückführung quantitativ bewertet. Den erhöhten Kosten wird die Änderung der Erlöse durch die Vergütung des erzeugten Biogasstroms gegenübergestellt (**Abb. 57**).

Die kürzere Häcksellängeneinstellung zu den Praxisernten bewirkte eine Erhöhung der Verfahrenskosten für die Bereitstellung der Energiepflanzen um im Mittel 29 €*ha⁻¹ bei einer Spanne von 0,5 bis 71 €*ha⁻¹. Dabei kam dem Anstieg der Verfahrenskosten durch die Arbeitserledigung des Feldhäckslers mit etwa 65 % der größte Anteil an der Kostenerhöhung bei der Substratbereitstellung zu. Vor allem ein überdurchschnittlich hoher Anstieg des Dieserverbrauchs durch die Verringerung der Schnittlänge, wie er bei den Messvarianten Mais_2, Gsr_3, Trit_2 und Wro gemessen wurde, führte zu

einem deutlichen Anstieg der Verfahrenskosten. Der Anteil der Kostenerhöhung durch den Transport lag im Mittel bei 30 % der zusätzlichen Kosten für die Substratbereitstellung. Die Summe der sich gegenseitig überlagernden Einzeleffekte bei der Silierung war im Verhältnis zu der Ernte und dem Transport gering und ging zum Teil positiv, zum Teil negativ in die Bilanz ein (**Abb. 57**).



Halbtransparent dargestellt sind diejenigen Varianten, bei denen die Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ nicht statistisch gesichert nachgewiesen werden konnte

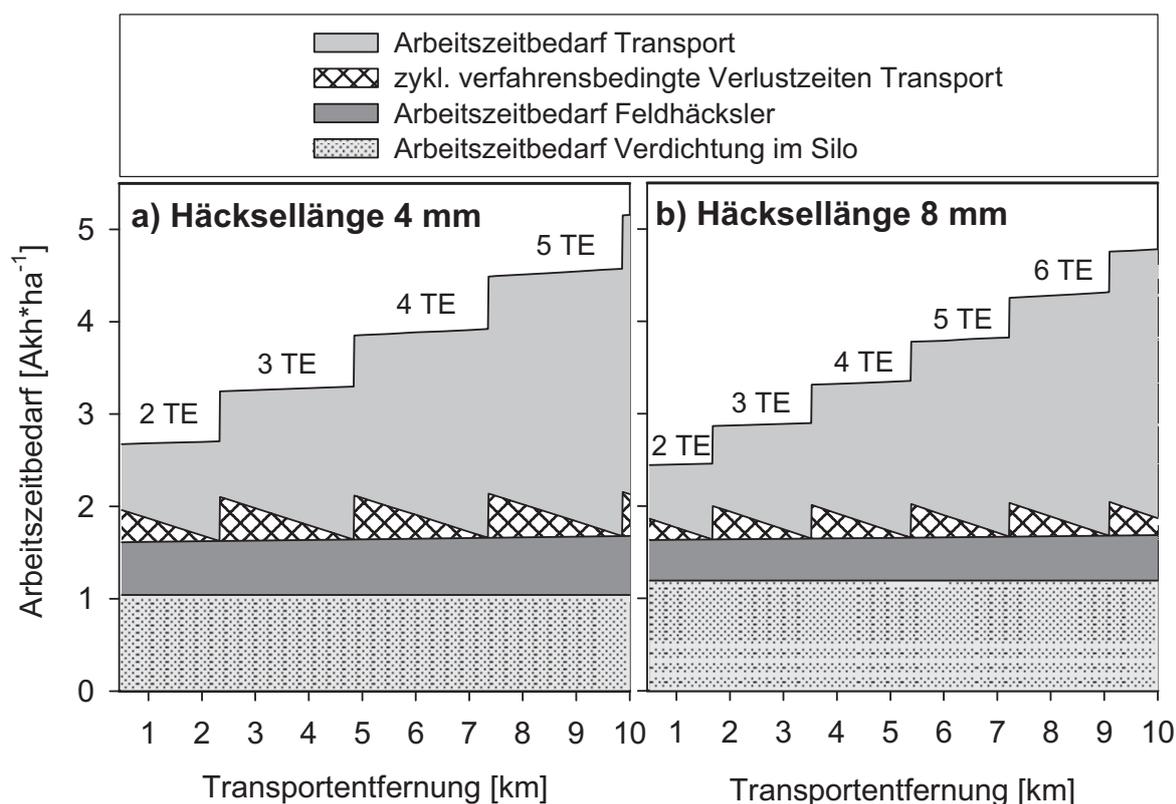
Abb. 57: Änderung der Kosten und Erlöse durch eine Verringerung der Häcksellängeneinstellung bei den Praxisernten (Fläche 5 ha, Transportentfernung 3 km)

Die Wirtschaftlichkeit einer sehr kurzen Häcksellängeneinstellung zur Ernte konnte nicht generell nachgewiesen werden. Die zusätzlichen Kosten wurden nur bei sieben der zwölf Messvarianten durch zusätzliche Erlöse infolge geringerer Silierverluste und höherer Methanausbeuten bei stärkerer mechanischer Aufbereitung kompensiert. Unter Beachtung der teilweise statistisch nicht gesicherten Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ kann nur bei einem Drittel der durchgeführten Häcksellängenvergleiche von einer eindeutig nachweisbaren Verbesserung des wirtschaftlichen Gewinns ausgegangen werden. In einem Fall ergab die kürzere Längeneinstellung trotz gesicherter Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ einen geringen finanziellen Verlust (**Abb. 57**). In den

übrigen 60 % der durchgeführten Untersuchungen war mit der sehr kurzen Häcksel­längeneinstellung zur Ernte ebenfalls ein finanzieller Verlust (35 %) bzw. kein gesicherter zusätzlicher Gewinn (25 %) verbunden.

5.3.7 Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der Bilanzierungen werden von verschiedenen Randbedingungen beeinflusst. Eine wesentliche Einflussgröße, die in diesem Zusammenhang betrachtet werden soll, ist die Transportentfernung. Die Transportentfernung hat einen bedeutenden Einfluss auf die Transportkapazität. Mit steigenden Transportentfernungen nehmen durch längere Zeiten für Last- und Leerfahrten die Umlaufzeiten zu und damit die Transportkapazitäten deutlich ab. Entsprechend steigt der Arbeitszeitbedarf für den Transport, der bei Einsatz einer Arbeitskraft je Maschine dem reziproken Wert der Kapazität entspricht. Dies ist am Beispiel der Messvariante Mais_1 in **Abb. 58** für die beiden theoretischen Häcksel­längen 4 und 8 mm dargestellt.



TE... Transporteinheiten

Abb. 58: Arbeitszeitbedarf für die Arbeitsgänge Häckseln, Transport und Verdichten in der Gesamtarbeitszeit am Beispiel Mais_1

Der Arbeitszeitbedarf für die Verdichtung im Silo ist bei Position des Silos am Hof unabhängig von der Transportentfernung, während der Arbeitszeitbedarf des Feldhäckslers durch längere Wegzeiten zwischen Standort und Arbeitsort geringfügig zunimmt (**Abb. 58**). Auffällig ist die stufenweise Zunahme des Arbeitszeitbedarfs für den Transport in der Gesamtarbeitszeit. Der Grund hierfür sind zyklische verfahrensbedingte Verlustzeiten, die sich mit steigenden Transportentfernungen innerhalb des Entfernungsbereiches einer „Stufe“ stetig verringern. Dabei bleibt der Arbeitszeitbedarf in der Gesamtarbeitszeit jeweils so lange nahezu konstant, bis zur Bewältigung des Durchsatzes des Feldhäckslers eine zusätzliche Transporteinheit benötigt wird, um Wartezeiten des Feldhäckslers zu vermeiden. Die zyklischen verfahrensbedingten Verlustzeiten haben dann den Wert Null erreicht und steigen mit der zusätzlichen Transporteinheit sprunghaft auf ein Maximum an. Dadurch nimmt der Arbeitszeitbedarf in der Gesamtarbeitszeit ebenfalls „stufenartig“ zu.

Im Vergleich der Häcksellängen wird deutlich, dass sich der Verlauf der zyklischen verfahrensbedingten Verlustzeiten und des Arbeitszeitbedarfs für den Transport mit der Transportentfernung unterscheiden. Die zyklische verfahrensbedingte Verlustzeit einer Transporteinheit kann maximal einer Beladezeit je Umlauf entsprechen. Durch längere Beladezeiten bei kürzeren Häcksellängen kann die zyklische verfahrensbedingte Verlustzeit daher etwas höhere Werte annehmen als bei größerer Häcksellänge. Aufgrund der geringeren Kapazität des Feldhäckslers und höherer Lademassen steigt die notwendige Anzahl an Transporteinheiten mit der Transportentfernung jedoch weniger schnell, so dass das Maximum der verfahrensbedingten Wartezeit bei größerer Längeneinstellung häufiger erreicht wird. Bei bestimmten Transportentfernungen übersteigt daher der Arbeitszeitbedarf für den Transport bei größerer Häcksellänge den Arbeitszeitbedarf bei kürzerer Häcksellänge. Dies tritt mit zunehmender Transportentfernung häufiger auf.

Der Energieinput, die CO₂-Emissionen und Kosten der Ernte korrelieren mit dem Arbeitszeitbedarf. Übersteigt der Arbeitszeitbedarf für den Transport bei längerer Häcksellänge den Arbeitszeitbedarf bei der kürzeren Längeneinstellung, wirkt sich dies positiv auf die Bilanzen zugunsten der kürzeren Häcksellänge aus. Die Änderung des Gewinns durch eine verringerte Längeneinstellung am Feldhäckslers in Abhängigkeit der Transportentfernung ist beispielhaft für die Messvarianten mit Mais in **Abb. 59** dargestellt. Sehr ähnliche Kurvenverläufe ergeben sich für die Änderung der Netto-Energieproduktion sowie der Netto-THG-Emissionen (Abb. A19). Bei langen Transportwegen ist die Wahrscheinlichkeit positiver Änderungen der Bilanzen durch die verringerte Längeneinstellung am Feldhäckslers daher höher als bei kurzer Transportentfernung.

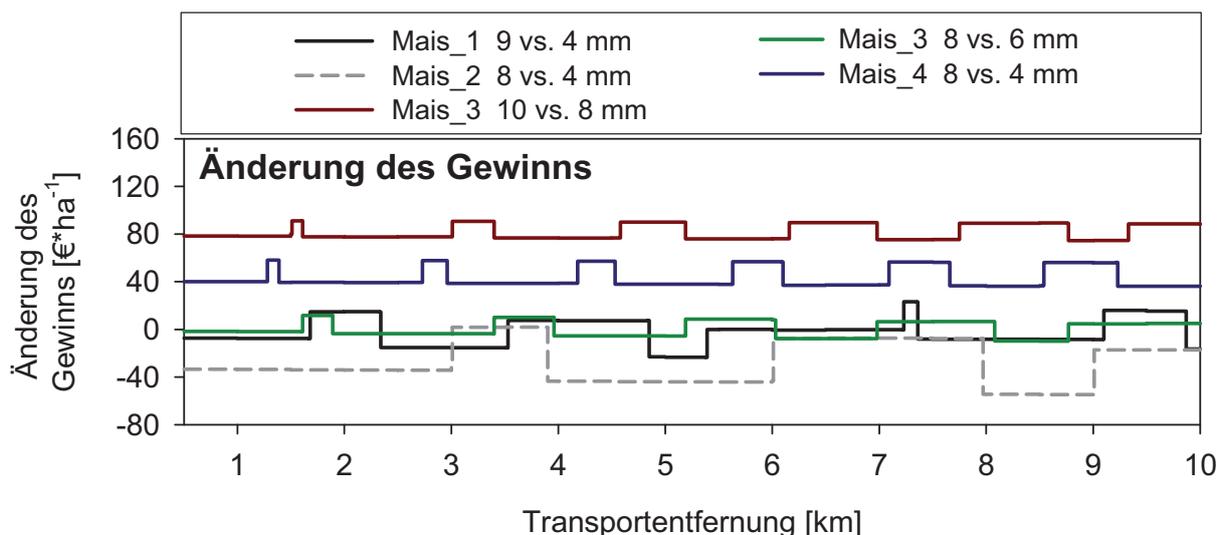


Abb. 59: Änderung des Gewinns durch eine verringerte Häcksellängeneinstellung in Abhängigkeit von der Transportentfernung am Beispiel der Messvarianten mit Mais

Neben dem dargestellten Einfluss der Transportentfernung bestimmt eine Vielzahl anderer Faktoren, die in der vorliegenden Bewertung auf den getroffenen Annahmen beruhen, die Änderung des Aufwandes und Nutzens einer kürzeren theoretischen Häcksellänge. Für die Messvarianten mit Mais wurden daher exemplarisch weitere Berechnungsvarianten hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Änderung der Energie- und THG-Bilanz sowie des ökonomischen Gewinns durch die Verringerung der theoretischen Häcksellänge geprüft (**Tab. 39**).

Ein wesentlicher Effekt der kürzeren Häcksellängeneinstellung ist die Erhöhung des Dieserverbrauchs des Feldhäckslers. Entsprechend ist der Dieselpreis ein wichtiger Faktor für die Änderung der Verfahrenskosten der Ernte. Eine Steigerung des Dieselpreises um 20 % würde mit 0,7 bis 5,0 €*ha⁻¹ und eine Steigerung um 50 % würde mit 1,7 bis 12,6 €*ha⁻¹ negativ auf die Änderung des Gewinns im Vergleich zu der Standardvariante zu Buche schlagen. Den größten Einfluss auf die Änderung des Gewinns durch eine kürzere theoretische Häcksellänge hat die Vergütung des zusätzlich erzeugten Stroms. Fehlt bei der Einspeisevergütung der Wirtschaftsdünger-Bonus, der in der Standardvariante angerechnet wurde, sinkt der zusätzliche Gewinn um 0,8 bis 5,6 €*ha⁻¹. Die Mindestvergütung des Biogasstroms ist nach der installierten elektrischen Leistung der Biogasanlage gestaffelt. Entsprechend wird der in kleinen Anlagen erzeugte Strom höher vergütet als der Strom bei einer Anlage mit hoher elektrischer Leistung. In einer 1 MW-Anlage würde die Änderung des Gewinns durch die kürzere Längeneinstellung daher bei hoher Auslastung der Anlage um 6,8 bis 47,8 €*ha⁻¹ niedriger liegen als in einer 80 kW-Anlage bei Inbetriebnahme der Anlagen im Jahr 2009. Die Auskopplung und der Verkauf von 30 % der über Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten Wärmeenergie würde die Änderung des Gewinns mit 1,2 bis 8,9 €*ha⁻¹ verglichen mit der Standardvariante positiv beeinflussen. Zudem wäre ein erheblich positiver Einfluss auf die

Energiebilanz und die Minderung der THG-Emissionen gegeben. Durch eine kürzere Häcksellänge sind weiterhin eine bessere Rührfähigkeit des Fermenterinhalt und eine geringere Schwimmschichtbildung denkbar. Wird angenommen, dass sich dies vorteilhaft durch Senkung des Eigenstrombedarfes der Biogasanlage um 10 % (rel.) auswirkt, erhöht sich der zusätzliche Gewinn durch die kürzere Häcksellängeneinstellung geringfügig um 0,1 bis 0,6 €*ha⁻¹. Ebenso werden auch die Energie- und THG-Bilanzen durch die Annahme eines um 10 % geringeren Eigenstrombedarfs kaum beeinflusst. Insgesamt ist festzustellen, dass sich die prinzipielle Aussage, ob durch die Verkürzung der Häcksellänge ein Gewinn oder Verlust entsteht, nur in einem Fall bei höherer Einspeisevergütung ändert.

Tab. 39: Einfluss verschiedener Faktoren auf die Änderung des Gewinns sowie der Energie- und THG-Bilanz durch eine verringerte Häcksellängeneinstellung am Beispiel der Messvarianten mit Mais

| Variante | Mais_1 | Mais_2 | Mais_3 10 mm vs. 8 mm | Mais_3 8 mm vs. 6 mm | Mais_4 |
|--|--------|--------|-----------------------------|----------------------------|--------|
| Änderung des Gewinns [€*ha⁻¹] | | | | | |
| Standardvariante | -15,3 | -31,4 | +77,7 | -3,6 | +38,6 |
| Steigerung des Dieselpreises um 20 % | -17,2 | -36,4 | +77,0 | -4,9 | +37,5 |
| Steigerung des Dieselpreises um 50 % | -19,9 | -44,0 | +76,0 | -6,8 | +35,8 |
| Änderung der Einspeisevergütung: | | | | | |
| - ohne Wirtschaftsdünger-Bonus | -16,1 | -33,9 | +72,1 | -4,6 | +35,3 |
| - Anlage 80 kW | -12,0 | -21,0 | +101,1 | +0,7 | +52,6 |
| - Anlage 1 MW | -18,8 | -42,2 | +53,3 | -8,1 | +24,0 |
| Auskopplung von 30 % der erzeugten Wärmeenergie | -14,1 | -27,4 | +86,6 | -2,0 | +44,0 |
| Verringerung des Eigenenergiebedarfs der Biogasanlage um 10 % (rel.) | -15,2 | -31,1 | +78,3 | -3,5 | +39,0 |
| Änderung der Netto-Energieproduktion [GJ*ha⁻¹] | | | | | |
| Standardvariante | -0,13 | -0,34 | +1,49 | +0,03 | +0,74 |
| Auskopplung von 30 % der erzeugten Wärmeenergie | -0,03 | -0,02 | +2,21 | +0,17 | +1,17 |
| Verringerung des Eigenenergiebedarfs der Biogasanlage um 10 % (rel.) | -0,13 | -0,32 | +1,53 | +0,04 | +0,76 |
| Änderung der THG-Emissionen [kg CO₂äq*ha⁻¹] | | | | | |
| Standardvariante | -7,1 | -26,2 | -255,2 | -26,1 | -132,7 |
| Auskopplung von 30 % der erzeugten Wärmeenergie | -16,3 | -54,9 | -320,1 | -38,0 | -171,6 |
| Verringerung des Eigenenergiebedarfs der Biogasanlage um 10 % (rel.) | -7,4 | -27,2 | -257,6 | -26,5 | -136,0 |

5.3.8 Zusammenfassung

Die Kennzahlen zur Änderung der Energie- und Treibhausgasbilanzen sowie der Wirtschaftlichkeit bei kürzerer theoretischer Häcksellänge zur Ernte sind in **Tab. 40** zusammenfassend dargestellt.

Tab. 40: Kennzahlentabelle für die Bewertung kürzerer Häcksellängen

| Messvariante | Vergleich der theor. Häcksellängen | Änderung der Energiebilanz [GJ*ha ⁻¹] | Änderung der THG-Emissionen [kg CO ₂ äq*ha ⁻¹] | Änderung des Gewinns [€*ha ⁻¹] |
|--------------|------------------------------------|---|---|--|
| Mais_1 | 4 mm – 9 mm | -0,13 | -7,1 | -15,3 |
| Mais_2 | 4 mm – 8 mm | -0,34 | -26,2 | -31,4 |
| Mais_3 | 8 mm – 10 mm* | +1,49 | -255,2 | +77,7 |
| Mais_3 | 6 mm – 8 mm | +0,03 | -26,1 | -3,6 |
| Mais_4 | 4 mm – 8 mm | +0,74 | -132,7 | +38,6 |
| Sugr | 4 mm – 7 mm* | +0,83 | -138,7 | +47,7 |
| Gsr_1 | 5,5 mm – 9 mm | +0,18 | -32,3 | +9,0 |
| Gsr_2 | 6,8 mm – 11 mm* | +1,03 | -190,9 | +48,3 |
| Gsr_3 | 6,8 mm – 11 mm | -0,54 | +26,5 | -44,7 |
| Trit_1 | 4 mm – 8 mm | +0,18 | -45,2 | +6,7 |
| Trit_2 | 4 mm – 8 mm* | +0,48 | -150,8 | -1,8 |
| Wro | 4 mm – 8 mm* | +0,57 | -147,9 | +16,3 |

Gsr... Grünschnittroggen, Sugr... Sudangras, Trit... Triticale, Wro... Winterroggen; * die mittlere Differenz der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ zwischen den beiden Häcksellängenvarianten war statistisch signifikant

5.4 Diskussion

5.4.1 Ergebnisse der Prozessbeobachtungen

Als Grundlage für die Bewertung des Einflusses einer verringerten Häcksellängeneinstellung am Feldhäcksler auf die Energie- und THG-Bilanz sowie die Wirtschaftlichkeit waren zunächst Kenndaten in Praxisversuchen zu ermitteln. Als wesentliche Basisdaten wurden

- Arbeitsgeschwindigkeiten der Feldhäcksler
- Treibstoffverbräuche der Feldhäcksler
- Lademassen der Transportfahrzeuge sowie
- der mittlere Zeitbedarf für weitere Teilzeiten der Arbeitserledigung

bestimmt und sollen nachfolgend diskutiert werden.

Die über gemessene Häckselzeiten und –wege ermittelten Arbeitsgeschwindigkeiten der Feldhäcksler lagen in den Praxisversuchen bei 3 bis 12 km*h⁻¹ und nahmen mit der kürzeren Häcksellängeneinstellung im Mittel um 13 % ab. Eine Verringerung der theoretischen Häcksellänge am Feldhäcksler wird üblicherweise über eine geringere Einzugs- geschwindigkeit erzielt (SHINNERS 2003). Dies wirkt sich bei konstanter Motorauslastung mindernd auf die Fahrgeschwindigkeit des Feldhäckslers aus und begrenzt bei gleich- bleibender Ertragslage den Durchsatz. Der Effekt der Schnittlängeneinstellung auf den Durchsatz wird in Abschnitt 5.4.3 näher erörtert. Neben der eingestellten Häcksellänge wirkt sich auch der Ertrag des Bestandes bzw. die Schwadmasse auf die Geschwindig- keit des Feldhäckslers in der Hauptzeit aus (HERRMANN 1999, LATSCH ET AL. 2003). Mit höheren Erträgen sinkt die Arbeitsgeschwindigkeit, der Durchsatz nimmt jedoch zu. Zur Änderung der Geschwindigkeit des Feldhäckslers bei verschiedenen Häcksellängen in Abhängigkeit vom Ertrag sind keine detaillierten Daten bekannt. Für die vorliegenden Berechnungen gingen die Messwerte der Arbeitsgeschwindigkeiten daher jeweils in Verbindung mit dem gleichzeitig ermittelten Ertrag in die Berechnungen ein und müssen entsprechend bewertet werden. Die Untersuchungen zum Einfluss der Häcksellängen- einstellung wurden auf leichten Böden in Brandenburg durchgeführt. Mittlere Erträge werden für entsprechende Landbaugebiete mit 95 bis 110 dt TM*ha⁻¹ für Silomais, 77 dt TM*ha⁻¹ für Wintertriticale-Ganzpflanzensilage und 30 dt TM*ha⁻¹ für Grünschnitt- roggan angegeben (HANFF ET AL. 2008). Die Erträge der für die Bewertung genutzten Schläge lagen größtenteils in diesem Bereich, wobei bei einem Teil der Messungen mit Grünschnittroggen und Triticale niedrigere Erträge (Messvarianten Gsr_1, Trit_1) bzw. überdurchschnittliche Erträge (Gsr_3) ermittelt wurden.

Der gemessene Treibstoffverbrauch der Feldhäcksler lag bei den Feldversuchen ab- hängig von der Motorleistung bei 32 bis 78 l*h⁻¹. Die Kalkulationsdaten des KTBL (2008)

geben in dem entsprechenden Leistungsbereich einen mittleren Dieserverbrauch von 36,3 bis 65,4 l*h⁻¹ an. Die zum Teil höheren Werte der eigenen Messungen sind sicherlich auf die geringen Schnittlängen bei der Ernte zurückzuführen. Weiterhin beeinflusst eine Reihe von standortbedingten, verfahrenstechnischen und subjektiven Faktoren den spezifischen Energiebedarf beim Häckseln. Hierzu zählen u.a. die mechanischen Eigenschaften der Pflanzen (Grenzbruchfestigkeiten, Elastizitätsmodul, Reibkoeffizienten), die wiederum von Pflanzenart, TM- und Rohfasergehalt abhängig sind, Fahrbahnbedingungen, die Vorverdichtung und Schnittgeschwindigkeit des Feldhäckslers, die Schärfe der Messer und der Abnutzungsgrad der Schneide und Gegenschneide sowie die Bedienung der Maschinen (GUTH 1995). Die vielfältigen Einflussfaktoren erklären die große Spanne in den Messergebnissen des Dieserverbrauches zwischen den Messvarianten. Im Vergleich der Häcksellängen einer Messvariante wurden jedoch die Faktoren Standort, Arbeitskraft und Maschine entsprechend den Möglichkeiten unter Praxisbedingungen einheitlich gestaltet.

Durch die Einstellung einer sehr kurzen Häcksellänge wurde im Vergleich zu einer praxisüblichen Häcksellänge im kurzen Bereich eine Erhöhung des Dieserverbrauches bezogen auf den Hektar um im Mittel 19 % festgestellt. Vor allem bei dem Feldhäckslers mit der geringsten Arbeitsbreite und Motornennleistung wurde ein deutlicher Anstieg des Dieserverbrauches ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass der Kraftstoffbedarf mit kürzerer Häcksellänge exponentiell zunimmt (SCHWEDLER zitiert in GUTH 1995). Nach Untersuchungen von DERNEDDE & HONIG (1977) steigt der Leistungsbedarf bei Halbierung der Häcksellänge von 14 auf 7 mm um 15 bis 20 %. Insbesondere bei niedriger Motorleistung ist mit einem hohen Kraftstoffverbrauch zu rechnen. Daten zur Erhöhung des Dieserverbrauches durch eine kurze Schnittlänge in der Größenordnung der eigenen Messergebnisse sind auch in der Literatur zu finden. Durch die Verringerung der theoretischen Häcksellänge von 13 auf 10 mm bei der Ernte von Silomais wurde für einen Feldhäckslers mit 574 kW Motorleistung ein um 7 % höherer Kraftstoffverbrauch je Hektar bestimmt. Bei Prüfung eines Feldhäckslers mit 455 kW Motorleistung nahm der Verbrauch um 16 % zu (KREICH 2004). CSERMELY ET AL. (2002) geben einen Anstieg des spezifischen Dieserverbrauches je Tonne Silomais für drei leistungsfähige Feldhäckslers bei Verringerung der theoretischen Häcksellänge von 7 bzw. 9 mm auf 4 mm um 7 bis 19 % an.

Durch die geringere Partikelgröße des gehäckselten Gutes bei niedrigerer Schnittlängeneinstellung steigt die Schüttdichte und damit die Lademasse der Transportfahrzeuge bei gleichbleibendem Ladevolumen. Bei den durchgeführten Untersuchungen war der Effekt der kürzeren Häcksellänge auf die Lademasse von HW 80 Kippanhängern mit im Mittel 6 % relativ gering. Von DERNEDDE & HONIG (1977) wurde durch eine etwas stärkere Reduzierung der theoretischen Häcksellänge von 14 auf 4 mm bei Mais eine relative Erhöhung der Schüttdichte um 10 % ermittelt. Abhängig vom Kornanteil wird

eine Zunahme der Schüttdichte bis 15 % in diesem Häcksellängenbereich als möglich erachtet (DERNEDDE & HONIG 1977). Untersuchungen von WAGNER ET AL. (2004) ergaben eine Erhöhung der Schüttdichte von Mais um bis zu 45 % durch Verringerung der Häcksellänge. Geprüft wurde hier jedoch ein sehr großer Häcksellängenunterschied zwischen 21 auf 5,5 mm. Die Ergebnisse verschiedener Messreihen waren zudem nicht konsistent (WAGNER ET AL. 2004). Angaben zu Schüttgutdichten in der Literatur weisen allgemein eine weite Spanne auf (**Tab. 41**). Sie sind jedoch in der Größenordnung vergleichbar mit den aus dem Ladevolumen und der gemessenen mittleren Lademasse der Transportfahrzeuge berechneten Schüttdichten der eigenen Untersuchungen.

Tab. 41: Literaturangaben zu Schüttdichten von Häckselgut

| Material | TM-Gehalt | Schüttdichte [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] | Quelle |
|--------------------|-------------------------|--|---------------------------------|
| Mais | 35 % | 300 | (KTBL 2004) |
| Mais | 34 % | 364 | (HÄBLER zitiert in NÄGELE 2008) |
| Mais | 37 – 48 % ¹⁾ | 154 – 223 | (WAGNER ET AL. 2004) |
| Halmgut | 35 % | 180 – 200 | (KTBL 2004) |
| Ganzpflanzensilage | 40 % | 330 | (KTBL 2004) |

¹⁾ kalkuliert aus Autorenangaben

Die Variabilität der berechneten Schüttdichten einer Pflanzenart zwischen den Messvarianten bei gleicher Schnittlängeneinstellung ist vor allem auf unterschiedliche TM-Gehalte und effektive Partikelgrößen zurückzuführen. Zudem hat der Füllgrad des Transportfahrzeuges einen großen Einfluss auf die Lademasse der Anhänger. Der Füllgrad wird subjektiv von dem Fahrer des Transportfahrzeuges festgelegt und kann daher erheblichen Schwankungen unterliegen.

Aus den Zeitstudien der Praxisernten wurden weiterhin Werte für den Zeitbedarf zum Wenden, zum Wechsel des Transportfahrzeuges und zum Entladen der Transporteinheit sowie für die Transportgeschwindigkeiten bei der Leer- und Lastfahrt abgeleitet und gehen als mittlere Werte in die Berechnungen ein. Vergleichbare in der Literatur verwendete Daten zu den einzelnen Positionen sind der **Tab. 42** zu entnehmen. Allgemein stimmen die gemessenen Werte gut mit den Literaturdaten überein.

Tab. 42: Vergleich eigener Ergebnisse mit Literaturangaben zu verschiedenen Teilzeiten und Geschwindigkeiten beim Häckseln und Transport

| Parameter | Zeitbedarf / Geschwindigkeit | Quelle |
|---------------------------------------|------------------------------|----------------------|
| Wendezeit | 28 s je Wendung | eigene Ergebnisse |
| Wendezeit | 18 s je Wendung | (HERRMANN 1999) |
| Wechsel der TE | 15 s je Wechsel | eigene Ergebnisse |
| Wechsel der TE | 16,2 s je Wechsel | (HERRMANN 1999) |
| Wechsel der TE | 30 s je Wechsel | (JÄGER 1991) |
| Entladezeit | 56 s je Vorgang | eigene Ergebnisse |
| Entladezeit | 60 s je Vorgang | (JÄGER 1991) |
| Entladezeit | 30,6 s je Vorgang | (LATSCH ET AL. 2003) |
| Entladezeit | 60 s je Vorgang | (SONNEN 2006) |
| Entladezeit | 30 – 48 s je Vorgang | (AMON ET AL. 2007c) |
| Transportgeschwindigkeit TE Lastfahrt | 22 km*h ⁻¹ | eigene Ergebnisse |
| Transportgeschwindigkeit TE Leerfahrt | 24 km*h ⁻¹ | eigene Ergebnisse |
| Transportgeschwindigkeit TE | 10 km*h ⁻¹ | (JÄGER 1991) |
| Transportgeschwindigkeit TE Lastfahrt | 19,2 km*h ⁻¹ | (LATSCH ET AL. 2003) |
| Transportgeschwindigkeit TE Leerfahrt | 22,9 km*h ⁻¹ | (LATSCH ET AL. 2003) |
| Transportgeschwindigkeit TE Lastfahrt | 35 km*h ⁻¹ | (AMON ET AL. 2007c) |
| Transportgeschwindigkeit TE Leerfahrt | 30 km*h ⁻¹ | (AMON ET AL. 2007c) |

TE... Transporteinheit

Insgesamt ist anzumerken, dass die Messergebnisse aus den Praxisernten mit relativ großen Unsicherheiten behaftet sind. Jede Messvariante stellt eine Einzelbestimmung dar, die in der Praxis unter unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt wurde. Eingesetzte Maschinen und ausführende Personen können die Quantität der Ergebnisse erheblich beeinflussen. Vor allem die Messergebnisse zu Treibstoffverbrauch und Lademassen sind diesbezüglich kritisch zu bewerten. Die Ableitung allgemeiner Tendenzen aus auf den Messwerten aufbauenden Berechnungen beruht auf der Übereinstimmung von Effekten bei den einzelnen Messvarianten.

5.4.2 Funktionsbewertung

Den durchgeführten Praxiserhebungen lag ein Vergleich unterschiedlicher theoretischer Häcksellängeneinstellungen bei der Ernte von Biogaspflanzen zugrunde. Die Funktion der unterschiedlichen Zerkleinerung durch den Feldhäcksler kann in erster Linie über die tatsächlich erzeugte Partikellänge des Siliergutes bewertet werden. Als Folge der Zerkleinerung sind weiterhin Effekte auf die Verdichtung im Silo, den Siliererfolg sowie die Methanbildung bei der Biomethanisierung zu beurteilen.

Die theoretische Häcksellänge, mit der ein Erntegut in einem Feldhäcksler mit zwangsweiser Gutzuführung zerkleinert wird, lässt sich mathematisch über die Einzugsgeschwindigkeit (Durchmesser und Drehzahl der Vorschubwalze) und die Schmitthäufigkeit (Drehzahl des Schneidwerkes und Anzahl der Messer) definieren (MORTASAWI 1963, KROMER 1993, SHINNERS 2003). Die theoretische Häcksellänge spiegelt jedoch nur begrenzt die effektive Häcksellänge, d.h. die mittlere Partikelgröße der beim Häckseln erzeugten Partikelgrößenverteilung wieder. Für die Abweichungen der effektiven Häcksellänge von der theoretischen Häcksellänge werden verschiedene Ursachen, bedingt durch die Maschine, die Betriebsweise und die Eigenschaften des pflanzlichen Gutes, angegeben (MORTASAWI 1963, KROMER 1993, SHINNERS 2003):

- Unterschiede in der Lage des Erntegutes beim Schnitt
- Abstumpfen der Messer im Ernteverlauf
- Einzugsschlupf
- Unterschiede in den morphologischen Eigenschaften des Erntegutes

Als Beurteilungskriterien der Häckseltechnik können nach WAGNER ET AL. (2004) ein Vergleich zwischen theoretischer Häcksellänge und effektiver Häcksellänge bzw. tatsächlicher Längenverteilung sowie die Bewertung der Überlängenfraktion herangezogen werden. Bei den eigenen Untersuchungen lagen die mittels bildanalytischer Vermessung bestimmten mittleren Partikellängen ausschließlich über den theoretischen Häcksellängeneinstellungen. Die gemessenen mittleren Partikellängen überstiegen die theoretischen Häcksellängen um den Faktor 1,2 bis 5,7. Dabei waren bei gleicher theoretischer Häcksellänge durch den Einsatz verschiedener Feldhäcksler zum Teil sehr unterschiedliche Wirkungen auf die effektive Häcksellänge gegeben. Bei einer Zerkleinerung von Mais mit einer theoretischen Häcksellänge von 4 mm wies der Quotient aus mittlerer Partikellänge und theoretischer Häcksellänge beispielhaft Werte zwischen 1,9 und 3,1 auf. Allgemein wurden bei den beiden Feldhäckslern mit 323 kW und 445 kW Motornennleistung geringere Unterschiede zwischen der theoretischen und der effektiven Häcksellänge festgestellt verglichen mit den übrigen eingesetzten Feldhäckslern. Weiterhin lag das Verhältnis von mittlerer Partikellänge und theoretischer Häcksellänge grundsätzlich bei der kürzeren Längeneinstellung über dem entsprechenden Wert der

gröberen Schnittlänge. Es ist daher zu vermuten, dass eine Verringerung der theoretischen Häcksellänge im gröberen Längenbereich einen höheren Effekt auf die Partikelgröße und damit auf die Methanbildung ausübt als die gleiche Verringerung der Längeneinstellung im sehr kurzen Häcksellängenbereich. Darauf deuten auch die Ergebnisse der Messvariante Mais_3 hin, bei der ein Vergleich der Häcksellängen 10 mm und 8 mm sowie 8 mm und 6 mm durchgeführt wurde.

KROMER (1993) bestätigt in Auswertung einer Vielzahl von Versuchen mit Silomais und Stroh eine große Spannweite im Zusammenhang zwischen theoretischer Häcksellänge und mittels Siebanalyse bestimmter mittlerer Partikellänge. Insbesondere bei kurzen Längeneinstellungen wurde eine große Streuung der Werte analysiert (KROMER 1993). Nach SHINNERS (2003) nimmt die effektive Häcksellänge üblicherweise höhere Werte als die theoretische Häcksellänge an. Die Quotienten aus gemessener und theoretischer Häcksellänge liegen bei 1,3 bis 1,6. Andere Autoren geben entsprechende Faktoren von 3 bis 4 an (DE BOEVER ET AL. 1993a). Zum Teil wurden auch höhere theoretische Häcksellängen verglichen mit der effektiven Häcksellänge analysiert (DE BOEVER ET AL. 1993b, BAL ET AL. 2000, SCHWAB ET AL. 2002).

Die verbreitete Messmethode zur Analyse der mittleren Partikellänge ist die Siebanalyse. Ein direkter Vergleich der mittels Siebanalyse bestimmten Feinheitsmerkmale mit den Ergebnissen der Bildanalyse ist jedoch nicht möglich, da unterschiedliche Bezugsgrößen zugrunde liegen. Während sich die Siebanalyse auf die Gewichtsverteilung der Partikel in separierten Längenklassen bezieht, wurde in den vorliegenden Auswertungen die Verteilung der projizierten Oberfläche über der Partikellänge bewertet. Untersuchungen von GUTH (1995) zeigen, dass die durchschnittliche Länge der Teilchen, die ein Sieb passieren, in der Regel über dem Mittel der Sieblochgrößen zweier benachbarter Siebe liegt. Weiterhin erfolgt bei der Siebanalyse die Klassifizierung nicht nach der längsten, sondern nach der kürzesten Ausdehnung eines Teilchens. Daraus ist zu folgern, dass die mittels Siebanalyse gemessenen mittleren Partikellängen niedrigere Werte aufweisen als die vorliegenden Ergebnisse der Bildanalyse.

Überlängen werden von verschiedenen Autoren unterschiedlich definiert. Bei Exakthäckslern werden Partikellängen von 20 bis 30 mm als Überlängen bezeichnet (HONIG & ROHR 1982, DERNEDDE & HONIG 1977). Ein Überlängenanteil > 5 Gew.-% ist unerwünscht, da er zu Schwierigkeiten bei der Silierung durch Entmischungen und Problemen bei der Verdichtung führt (HONIG & ROHR 1982). Der Überlängenanteil besteht bei Mais vor allem aus unzerkleinerten Lieschblättern, wobei dieser Anteil mit schlechter Wartung und Pflege des Feldhäckslers zunimmt (HONIG & ROHR 1982, DERNEDDE & HONIG 1977, DE BOEVER ET AL. 1993b). Nach DERNEDDE & HONIG (1977) kommen im unteren Häcksellängenbereich bei Mais in der Praxis Überlängen > 30 mm bis zu einem Gewichtsanteil von 8 – 12 % vor. Für Maishäcksel mit einer theoretischen

Schnittlänge von 14 mm wurde ein Überlängenanteil von 9 Gew.-% ermittelt, während dieser Anteil bei 4 mm theoretischer Häcksellänge als bedeutungslos eingeschätzt wurde (DERNEDE & HONIG 1977). LEURS (2005) ermittelte ebenfalls für Mais Überlängenanteile von 0,5 bis 0,8 Gew.-% bei einer theoretischen Häcksellänge von 5,5 mm und 2,1 bis 7,0 Gew.-% bei einer theoretischen Häcksellänge von 21 mm.

Bei den durchgeführten Praxisversuchen lagen die Anteile der projizierten Oberfläche von Partikeln mit einer Länge > 25 mm bei Mais und Sudangras mit 3 bis 22 % und bei Ganzpflanzengetreide mit 15 bis 45 % bei der gröberen Häcksellänge deutlich über dem angestrebten Wert. Ebenso wie bei der Partikellänge beziehen sich jedoch auch bei dem Überlängenanteil der Richtwert von 5 % und die Literaturdaten auf den Gewichtsanteil bei der Siebanalyse. Vor allem bei den trockenen Blattanteilen, die die Überlängen bilden, ist von einer großen projizierten Oberfläche einzelner Partikel, hingegen von einem geringen Gewicht relativ zur Oberfläche dieser Partikel auszugehen. Um die Ergebnisse der Bildanalyse hinsichtlich des Überlängenanteils bewerten zu können, wäre daher zunächst ein äquivalenter Richtwert zur Siebanalyse zu erarbeiten.

Die Einstellung einer kürzeren theoretischen Häcksellänge am Feldhäcksler hatte fast ausschließlich einen eindeutigen positiven Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung. Durch Verringerung der theoretischen Häcksellängeneinstellung am Feldhäcksler konnten bei den Messvarianten eine Verringerung der mittleren Partikellänge um 1 bis 38 % und eine Vergrößerung der spezifischen projizierten Oberfläche um 6 bis 47 % erzielt werden. Der Grobanteil nahm um 2 bis 16 % ab und der Feinanteil um 2 bis 10 % zu. Entsprechend den Ergebnissen im 1. Teil der vorliegenden Dissertation (Abschnitt 4.3.4.6) sind durch die Änderungen in der Struktur der Silagen Erhöhungen der Methanausbeute um 0,5 bis 4 % zu erwarten.

Die Verdichtung des Siliergutes im Silo ist ein wesentlicher Faktor zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Silage und zur Vermeidung von Nacherwärmung. Durch die Lagerdichte wird vor allem der Gasaustausch am geöffneten Silo bei der Silageentnahme beeinflusst. Anzustreben ist eine Mindestverdichtung, die den Gasaustausch auf $< 20 \text{ l} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ begrenzt (HONIG 1987 zitiert in THAYSEN & WAGNER 2006). Als Richtwerte für die Dichte von Maissilage werden für eine Silage mit 28 % TM-Gehalt $230 \text{ kg TM} \cdot \text{m}^{-3}$ und für eine Silage mit 33 % TM-Gehalt $270 \text{ kg TM} \cdot \text{m}^{-3}$ angegeben (HONIG 1987 zitiert in THAYSEN & WAGNER 2006). Bei Getreide-Ganzpflanzensilage gelten ähnliche Sollwerte von $230 \text{ kg TM} \cdot \text{m}^{-3}$ bei 35 % TM-Gehalt und $260 \text{ kg TM} \cdot \text{m}^{-3}$ bei 45 % TM-Gehalt. Die geforderten Lagerdichten im Silo wurden bei den durchgeführten Versuchen vorwiegend nicht erreicht. Ursache hierfür könnte ein zum Teil zu geringer Verdichtungsaufwand gewesen sein, wobei die Verdichtungszeiten überwiegend hoch waren. Auf ähnliche Defizite hinsichtlich des Verdichtungserfolges in Praxissilos wird in verschiedenen Veröffentlichungen hingewiesen, wobei die angegebenen Dichten mit den vorliegenden

Ergebnissen vergleichbar sind (z.B. LEURS 2005, MAAK & BÜSCHER 2008). In andere Untersuchungen wurden hingegen höhere Dichten bei geringerem Verdichtungsaufwand erzielt (HÄBLER ET AL. 2007).

Die Einstellung einer sehr kurzen theoretischen Häcksellänge konnte einen Beitrag zur Erhöhung der Dichte im Silo leisten. Die kürzeren Partikelgrößen des Siliergutes bei geringerer theoretischer Häcksellänge führten bei den vorliegenden Untersuchungen zu einem Anstieg der Dichte im Silo um 0,7 bis 6,3 %. Allgemein steigt mit kürzerer Häcksellänge die Verdichtbarkeit des Siliergutes (WAGNER ET AL. 2004). Vor allem die Verdichtungsgeschwindigkeit zu Beginn der Lagerung ist bei kürzeren Häcksellängen höher. Mit zunehmender Belastungsdauer werden die Differenzen in der Dichte zwischen dem unterschiedlich gehäckselten Gut geringer (DERNEDDE & HONIG 1977). Verschiedene Autoren belegen einen Anstieg der Dichte im Silo um 7 bis 19 % durch Verringerung der theoretischen Häcksellänge zur Ernte (DERNEDDE & HONIG 1977, JOHNSON ET AL. 2003a, WAGNER ET AL. 2005, Abschnitt 2.1.2.4). Die Unterschiede in der Häcksellängeneinstellung lagen hier jedoch zumeist höher als bei den eigenen Untersuchungen. Die gemessenen Dichten gehen in die Bewertung ein. Ein möglicher Effekt der höheren Dichte auf geringere Verluste durch Nacherwärmung wird jedoch nicht berücksichtigt. Für die Berechnungen wurde zudem vereinfacht angenommen, dass die gemessenen Dichten im Schlauchsilo und Freigärhaufen auf das Horizontalsilo übertragbar sind. Dichtemessungen von WAGNER ET AL. (2005) und MAAK & BÜSCHER (2008) in Schlauch- und Horizontalsilos zeigen, dass sich die Dichten zwischen den Silierverfahren nicht wesentlich unterscheiden.

Der Einfluss einer kürzeren Partikelgröße auf den Silierverlauf, auf Silierverluste und auf die Methanbildung wurde bereits in Abschnitt 4.4.5 ausführlich diskutiert. Die Messergebnisse der im zweiten Teil geprüften Siliergüter bestätigen im Wesentlichen die ermittelten Tendenzen. Mit geringerer Partikellänge waren mit Ausnahme des Sudangrases geringere Silierverluste verbunden. Ein eindeutiger Effekt auf die Gärqualität der Silagen konnte nicht nachgewiesen werden, da die Silagen generell sehr gute Qualitäten aufwiesen. Die Unterschiede in der Methanausbeute bezogen auf oTM_{zu} zwischen den Häcksellängenvarianten waren überwiegend niedrig. Bei Beachtung der Silierverluste wurde durch die Verringerung der theoretischen Häcksellänge zur Ernte eine Erhöhung der Methanausbeute bezogen auf oTM_{orig} um 0,9 bis 9,2 % erzielt. Dies übertrifft bei einigen Messvarianten die Erwartungen, die sich aus den Differenzen der mittleren Partikellänge und den Untersuchungen des ersten Teils ableiten lassen. Die Differenzen in der Methanausbeute $y_{CH_4_{orig}}$ zwischen den Häcksellängenvarianten waren jedoch nur in 40% der untersuchten Fälle statistisch gesichert nachweisbar. Für signifikante Differenzen war bei den Praxishäcksellängen eine Erhöhung der Methanausbeute $y_{CH_4_{orig}}$ von wenigstens ca. 4 % notwendig. Auch aus den Untersuchungen im ersten Teil der vorliegenden Dissertation lässt sich eine notwendige Minstdifferenz der

Methanausbeute um 4 – 8 % für den statistisch gesicherten Nachweis im Gärtest ableiten. In allen Fällen, bei denen eine signifikante Erhöhung der Methanausbeute nachgewiesen wurde, lag eine Verringerung der gemessenen mittleren Partikellänge von mehr als 3 mm vor. Bei einer geringeren Differenz der mittleren Partikellänge war keine signifikant erhöhte Methanausbeute zu messen, allerdings war auch bei drei Messvarianten trotz Änderung der mittleren Partikellänge von mehr als 3 mm keine signifikante Erhöhung der Methanausbeute zu verzeichnen. Die Bedingungen, unter welchen eine entsprechende Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ erreicht wird, sollten Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Für die Bewertung werden die im Labormaßstab gemessenen Fermentationsverluste und Methanausbeuten zugrunde gelegt. Dies ist insofern kritisch zu betrachten, da unter Praxisbedingungen erhebliche Abweichungen hinsichtlich der Fermentationsbedingungen bestehen. In Laborsilos wird eine weniger starke Kompression, jedoch ein besserer Luftabschluss erreicht (XICCATO ET AL. 1994). Die Prozessführung in einer Durchfluss-Biogasanlage im Praxismaßstab unterscheidet sich ebenfalls wesentlich von dem Batch-Verfahren im Labormaßstab. Verschiedene Faktoren, wie die Verweilzeit, die Raumbelastung, Fütterungsintervalle, Rührintensitäten u.a. haben Einfluss auf die gebildete Methanmenge in der Praxis (SCHATTAUER & WEILAND 2006). Es ist denkbar, dass sich eine erhöhte Abbaugeschwindigkeit durch kürzere Häcksellängen vor allem bei begrenzten Verweilzeiten im Durchflussreaktor positiv auf die Methanausbeute auswirkt. Zudem könnten sich Vorteile hinsichtlich einer besseren Durchmischbarkeit und einer geringeren Schwimmschichtbildung bei kürzerer theoretischer Häcksellänge ergeben. Entsprechende Effekte waren jedoch nicht quantifizierbar und wurden bei der Bewertung des Häcksellängeneffektes nicht berücksichtigt. Eine Überprüfung der getroffenen Aussagen zu den Silierverlusten und der Methanbildung im Praxismaßstab wäre wünschenswert. Die relativ geringen Unterschiede zwischen den Häcksellängenvarianten sind jedoch im Praxismaßstab nur schwer zu bestimmen, da störende Einflüsse im Allgemeinen nicht vollständig ausgeschlossen werden können. Entsprechende Untersuchungen würden ein hohes Maß an Genauigkeit erfordern und wären mit einem hohen Aufwand verbunden.

5.4.3 Kapazitätsbewertung

Die Änderung der Fahrgeschwindigkeit des Feldhäckslers auf dem Feld durch die Verringerung der theoretischen Häcksellänge hatte eine Abnahme der Kapazität des Feldhäckslers und der im Parallelverfahren verknüpften Transport- und Verdichtereinheiten zur Folge. In den vorliegenden Untersuchungen nahm der Durchsatz der Feldhäckslers durch die Einstellung einer sehr kurzen theoretischen Häcksellänge um 3 bis 23 % in der Gesamtarbeitszeit gegenüber einer praxisüblichen kurzen Häcksellänge ab. Dies stimmt mit Angaben von CSERMELY ET AL. (2002) überein, wonach bei modernen Feldhäckslern der Durchsatz im Silomais bei Verringerung der Häcksellänge in einem Häcksellängenbereich von 4 bis 15 mm um maximal 20 % und in einem Häcksellängenbereich von 7 bis 15 mm um maximal 10 bis 15 % sinkt. KREICH (2004) ermittelte für den Häcksellängenbereich 10 bis 13 mm eine Abnahme des Durchsatzes in der Hauptzeit um 8 bis 11 %. Bei geringeren Durchsätzen steigt der Arbeitszeitbedarf je Flächeneinheit. Vor allem bei hohen Erträgen und geringen Arbeitsbreiten sind eine deutliche Abnahme der Flächenleistung und eine Zunahme des Arbeitszeitbedarfs zu erwarten.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei geringen Transportentfernungen mit der Abnahme der Arbeitsgeschwindigkeit des Feldhäckslers überwiegend auch eine Abnahme der Transport- und Verdichterkapazität verbunden war. Ursache hierfür sind längere Beladezeiten und zyklische verfahrensbedingte Verlustzeiten. Mit größerer Transportentfernung steigt jedoch die Bedeutung der höheren Lademasse einer Transporteinheit für die Transportkapazität (HERRMANN 1999). Bei größeren Transportentfernungen sind bei der kurzen theoretischen Häcksellänge zum Teil höhere Transportkapazitäten gegeben als bei der größeren Längeneinstellung. Dies ist mit den höheren Lademassen und teilweise geringeren zyklischen verfahrensbedingten Verlustzeiten zu begründen, die mit einer geringeren notwendigen Anzahl an Transporteinheiten verknüpft sind. Da eine höhere Transportkapazität gleichzeitig einen geringeren Arbeitszeitbedarf sowie niedrigere feste und variable Maschinenkosten bedeutet, kann der Transport des kürzer gehäckselten Siliergutes bei längeren Transportwegen zum Teil kostengünstiger als bei größerer Häcksellänge erfolgen. Unberücksichtigt blieb bei der Auswertung, dass gegebenenfalls auch kurzfristige Wartezeiten der Ernteeinheit bei der größeren Häcksellänge sinnvoll sein können, um Kosten und eine zusätzliche Transporteinheit zu sparen bzw. sehr lange Wartezeiten der Transporteinheiten zu vermeiden (HERRMANN 1999, AMON ET AL. 2007c). Bei der Verdichtung wird von einem einheitlichen Verdichtungsaufwand ausgegangen. Der positive Effekt der kürzeren Häcksellänge auf die Verdichtbarkeit spiegelt sich demnach nicht in der Verdichterkapazität, sondern in einer höheren Lagerdichte im Silo wieder. Für die theoretische Berechnung wird unterstellt, dass nach Ablauf der festgelegten Verdichtungszeit je Tonne Siliergut eine Wartezeit bis zum Entladen der nächsten Transporteinheit folgt. Praktisch werden entsprechende Verlustzeiten jedoch

kaum auftreten. Es ist anzunehmen, dass bei längeren Transportumlaufzeiten die zusätzlich verfügbare Zeit ebenfalls für die Verdichtung genutzt wird und der Verdichtungsaufwand somit ansteigt. Dies wäre mit einem zusätzlichen Effekt auf die Lagerdichte verbunden. Anhand der gemessenen Verdichtungszeiten der Praxisversuche lässt sich ein entsprechender Trend jedoch nicht erkennen.

Das zugrunde gelegte Berechnungsmodell zur Bewertung der Kapazitäten in der Gesamtarbeitszeit geht allgemein von einer optimalen Gestaltung des Arbeitsablaufes mit geringen Anteilen an Stör- und Wartezeiten aus. Praktisch können beispielsweise witterungs- oder verkehrsbedingte Wartezeiten auftreten, die den Anteil der Hauptzeit an der Gesamtarbeitszeit herabsetzen. Weiterhin blieben Leistungsminderungen durch ungünstige Schlagformen, die eine hohe Anzahl an Wendungen nötig machen, sowie bei der Ernte des Vorgewendes eines Schlages, unberücksichtigt. Im Hinblick auf den Vergleich der Häcksellängeneinstellung spielen diese Einflussgrößen jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Von Interesse wäre die Abhängigkeit funktioneller Störungen des Feldhäckslers von der Häcksellängeneinstellung. Während der Praxisernten wurden zum Teil verstärkte Probleme des Einzuges bei den sehr kurzen Längeneinstellungen festgestellt. Die Störungen waren jedoch nicht immer eindeutig auf die Häcksellängeneinstellung zurückzuführen und wurden daher in die Bewertung nicht mit einbezogen. Mittels der verwendeten Koeffizientenmethode zur Berücksichtigung der Störzeit T_4 anteilig an der erweiterten Grundzeit wurden bei der kürzeren Häcksellänge indirekt etwas höhere Störzeiten angesetzt. Für eine differenziertere Aussage wären belastbare Daten in einer größeren Anzahl an Feldversuchen zu erarbeiten.

Defizite sind auch hinsichtlich der vorhandenen Informationen zu dem Dieselverbrauch in unterschiedlichen Zeitebenen zu sehen. Die einfache Bestimmung des Kraftstoffverbrauches nach einer festgelegten Erntefläche lässt keine Differenzierung hinsichtlich verschiedener Anteile an Neben- und Verlustzeiten während der Messperiode zu. Da sich die höheren Aufwendungen bei einer verringerten Häcksellängeneinstellung vorrangig auf den Kraftstoffbedarf beziehen, würden hier detailliertere Angaben beispielsweise durch eine kontinuierliche Verbrauchsmessung die Qualität der Bewertung verbessern.

Die vorliegende Bewertung geht von einer vollen jährlichen Ausnutzung des Feldhäckslers aus. Unberücksichtigt bleibt dabei die Wirkung geringerer Durchsätze bzw. Flächenleistungen bei kürzerer Häcksellänge auf die erntbare Fläche. Durch die verringerte Kapazität des Feldhäckslers kann gegebenenfalls die optimale Erntezeitspanne nicht eingehalten werden oder die Häckselkapazität muss entsprechend durch überbetrieblichen Maschineneinsatz bzw. Lohnunternehmen ergänzt werden. Insgesamt ist jedoch von einem relativ geringen Einfluss der Häcksellänge auf die jährliche Einsatzzeit des Feldhäckslers auszugehen. Die mittlere Abnahme des Durchsatzes des Feldhäckslers in der Gesamtarbeitszeit durch die kürzere Häcksellänge lag bei 12 %.

5.4.4 Bilanzierung

Die Erzeugung erneuerbarer Energie aus Mais und anderen Energiepflanzen durch Biomethanisierung trägt trotz der Aufwendungen an fossiler Energie und CO₂ für die Bereitstellung und Biogasproduktion zu einer deutlichen Netto-Energieproduktion und Minderung der CO₂-Emissionen bei (GERIN ET AL. 2008). Für die vorliegende Fragestellung ist von Belang, ob zusätzliche Energieaufwendungen und Emissionen bei der Einstellung einer sehr kurzen Häcksellänge zur Ernte durch die sich daraus ergebenden Vorteile kompensiert werden können. Die Erhöhung des Energieinputs bei der Substratbereitstellung wurde vorrangig durch den Anstieg des Dieserverbrauches bestimmt und lag im Mittel der untersuchten Messvarianten bei 0,40 GJ*ha⁻¹. Der Energieaufwand für die gesamte Bereitstellung von Mais und Triticale wird mit etwa 6 bis 9 GJ*ha⁻¹ angegeben (SCHUMACHER 2008, PLÖCHL ET AL. 2009). Andere Autoren gehen von einem höheren Energieaufwand abhängig von der Düngungsintensität von 16 bis 23 GJ*ha⁻¹ für Mais aus (BOCKISCH ET AL. 2000, KELM ET AL. 2003, KRAATZ 2009). Damit würde der Energieaufwand für die Biomassebereitstellung durch eine kürzere Häcksellängeneinstellung um etwa 2 bis 4 % erhöht. Die höheren Energieaufwendungen konnten in 40 % der untersuchten Fälle durch einen höheren Energieoutput bei einem Anstieg der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ um 4 % und mehr gesichert ausgeglichen werden. Nach BERGLUND & BÖRJESSON (2006) entspricht der Energieinput in ein Biogassystem nur 20 bis 40 % der Energie im produzierten Biogas, wobei dem Betrieb der Biogasanlage der höchste Energieinput zuzuschreiben ist. Aus energetischer Sicht kann eine sehr kurze Häcksellängeneinstellung demnach sinnvoll sein. Voraussetzung hierfür ist eine nachweisbare Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ bei der kürzeren Längeneinstellung, die jedoch nur bei weniger als der Hälfte der untersuchten Fälle gegeben war. Im Gesamtprozess hat die Häcksellänge sowohl auf den Energieinput als auch auf den Energiegewinn nur einen geringen Einfluss.

Die zusätzlichen THG-Emissionen bei kürzerer Häcksellänge, die ebenfalls vorrangig auf einen erhöhten Dieseleinsatz zurückzuführen sind, lagen bei 4 bis 72 kg CO₂äq*ha⁻¹. Nach Berechnungen von PLÖCHL ET AL. (2009) betragen die Emissionen für die Bereitstellung von Roggen, Triticale und Mais bei einem mittlerem Düngungsniveau etwa 1000 bis 1200 kg CO₂äq*ha⁻¹. Die zusätzlichen Emissionen bei der Ernte mit sehr kurzer Häcksellänge erhöhten die THG-Emissionen der Substratbereitstellung demnach im Mittel um 3 %. Durch die Substitution von Strom aus fossilen Energieträgern durch Biogasstrom sind hohe Einsparpotenziale an Treibhausgasen gegeben. Die Biomethanisierung von Mais kann zu einer Minderung von THG-Emissionen in Höhe von 11.000 bis 13.000 kg CO₂äq*ha⁻¹ beitragen (HANEGRAAF ET AL. 1998, BERENZ 2008). Ähnlich der Energiebilanz war auch bei den THG-Emissionen im Falle eines signifikanten Anstiegs der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ durch die kürzere Häcksellänge generell eine Minderung der Netto-CO₂-Emissionen zu verzeichnen. Es konnten Minderemissionen von 140 bis

250 kg CO₂-äq*ha⁻¹ erzielt werden. Dies entspricht im günstigen Fall einem Anteil von 3 bis 4 % des gesamten Minderungspotenzials durch die Biogasproduktion. Bei einer der zwölf untersuchten Varianten kam es wegen überdurchschnittlicher Erhöhung des Dieserverbrauchs und Verringerung des Durchsatzes zu einer leichten Erhöhung der Netto-Emissionen an Treibhausgasen. Die Einstellung einer sehr kurzen Häcksellänge zur Ernte am Feldhäcksler führt in der Regel zu einer geringfügigen zusätzlichen Minderung der Netto-THG-Emissionen. Im Ausnahmefall kann sie zusätzliche THG-Emissionen verursachen.

Der Effekt einer kürzeren Häcksellängeneinstellung auf die Wirtschaftlichkeit war nicht eindeutig. Geringere Kapazitäten der Ernte- und Silierkette und die Erhöhung des Kraftstoffverbrauches des Feldhäckslers führen zu einer Erhöhung der Verfahrenskosten der Ernteprozesskette. Höhere Lagerdichten bei der Silierung setzen die Kosten hingegen herab. Im Zusammenwirken der Einflussfaktoren wurden erhöhte Kosten für die Bereitstellung der Biogaspflanzen in der Standardberechnung um 3 bis 74 €*ha⁻¹ bei Verringerung der theoretischen Häcksellänge ermittelt. Auf Basis der Gesamtkosten, die für die Bereitstellung von Silomais beispielhaft mit 1240 €*ha⁻¹, für Grünschnittroggen mit 572 €*ha⁻¹ und für Triticale-Ganzpflanzensilage mit 932 €*ha⁻¹ unter entsprechenden Standortbedingungen angegeben werden (HANFF ET AL. 2008), entspricht dies einer Kostenerhöhung um im Mittel ca. 2 bis 5 %. Geringere Verluste bei der Silierung sowie höhere Methanausbeuten der Silagen haben allgemein einen deutlich positiven Effekt auf die erzielten Gewinne (GRUNDMANN 2003, DÖHLER ET AL. 2004). Dennoch war die Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ durch die sehr kurze Längeneinstellung am Feldhäcksler nur zum Teil ausreichend, um die zusätzlichen Kosten zu kompensieren. Bei 40 % der untersuchten Praxisernten entstand durch die kürzere Häcksellängeneinstellung ein finanzieller Verlust. Nur bei einem Drittel der geprüften Messvarianten war ein deutlicher und gesicherter zusätzlicher Gewinn durch die kürzere Häcksellänge zu verzeichnen.

Eine allgemeine Empfehlung zur Einstellung sehr kurzer Häcksellängen bei der Ernte von Biogaspflanzen lässt sich aus den gewonnenen Ergebnissen nicht ableiten. Als Schlüsselgrößen für den energetischen und ökonomischen Erfolg bzw. Misserfolg einer verringerten Häcksellängeneinstellung sind die Änderung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$, die Erhöhung des Dieserverbrauches des Feldhäckslers und die Abnahme des Durchsatzes anzusehen. Es ist überwiegend dann von einem positiven Effekt auf die Energie- und THG-Bilanz sowie auf die Wirtschaftlichkeit der gesamten Prozesskette auszugehen, wenn durch die kürzere Längeneinstellung eine signifikante Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ nachweisbar ist. Die Änderung der Methanausbeute mit der Verringerung der theoretischen Häcksellänge war unter anderem von der Pflanzenart abhängig. Vor allem bei den Messvarianten mit Mais war durch eine unzureichende Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ die kürzeste Längeneinstellung am Feldhäcksler zum großen

Teil ökonomisch nicht sinnvoll. Da Mais einen verhältnismäßig geringen Anteil an Lignin und Cellulose aufweist und im Biogasprozess gut abbaubar ist, ist der Erfolg einer noch stärkeren mechanischen Aufbereitung zur Ernte auf die Erhöhung der Methanausbeute relativ gering. Sehr kurze Häcksellängen sind entsprechend vorrangig bei cellulosereichem Erntegut bzw. bei einem späten Erntetermin zu empfehlen (Abschnitt 4.3.4.7).

Grundsätzlich wirkt sich eine Änderung der theoretischen Häcksellänge im größeren Längenbereich stärker auf den Häckselerfolg und damit auf die Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_{\text{orig}}}$ aus als im kurzen Häcksellängenbereich. Dies zeigen die Ergebnisse der Messvarianten mit Mais. Dabei wurde bei Verkürzung der Häcksellänge von 10 auf 8 mm ein deutlicher energetischer und ökonomischer Nutzen erzielt, während eine Verringerung der theoretischen Häcksellänge von 8 auf 6 mm und auch von 8 auf 4 mm keine weitere positive Wirkung ergab. Aus den dargelegten Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass zur Gewährleistung hoher Methanausbeuten und geringer Silierverluste kurze theoretische Häcksellängen für Biogassilagen im Bereich von 7 – 8 mm empfehlenswert sind. Der Nutzen einer weiteren Verringerung der Längeneinstellung müsste im Einzelfall geprüft werden und lässt sich vorab nicht abschätzen.

Ziel zukünftiger Entwicklungen könnten Aufbereitungsverfahren bei der Ernte sein, die nicht nur eine geringere Partikellänge, sondern vor allem eine Vergrößerung der verfügbaren Oberfläche des Erntegutes bewirken. Dadurch könnte der Effekt auf die Methanausbeute zusätzlich erhöht werden. Denkbar wäre die Entwicklung von energieeffizienten spleißenden Aufbereitungstechniken, wie sie auch von GUTH (1995) für eine Verbesserung der Verdaulichkeit bei der Tierfütterung vorgeschlagen werden.

Dem nur teilweise gegebenen zusätzlichen Energiegewinn durch erhöhte Methanausbeuten steht ein zusätzlicher Energieaufwand zur Erreichung kürzerer Häcksellängen gegenüber. Dieserverbrauch und Durchsatz werden durch die Erntetechnik beeinflusst. Bei leistungsstärkeren Feldhäckseln, d.h. bei höherer Motorleistung je Meter Arbeitsbreite, wirkt sich die Verringerung der Häcksellänge weniger stark auf den Durchsatz und Dieserverbrauch aus (MÖLDER 2005) und ist daher eher zu empfehlen. Als weiterer Einflussfaktor auf den Dieserverbrauch und Durchsatz gilt der Ertrag. Bei höheren Erträgen ist von einer stärkeren Verringerung des Durchsatzes und einer stärkeren Erhöhung des Dieserverbrauches je Hektar Anbaufläche auszugehen. Allerdings erhöht sich mit dem Ertrag auch der Effekt einer gesteigerten Methanausbeute je Hektar. Detaillierte Erkenntnisse zum Einfluss des Ertrages können aus den vorliegenden Ergebnissen nicht abgeleitet werden. Hierzu wären weitere, systematische Untersuchungen durchzuführen.

Der Einfluss weiterer Faktoren wurde im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse geprüft. Die Bedeutung der Transportentfernung für die Kosten der Arbeitserledigung sind vielfach belegt (z.B. GUNNARSSON ET AL. 2008, TOEWS 2009). Bei großen Schlägen und weiten

Transportentfernungen waren zum Teil höhere Transportkapazitäten bei der kürzeren Häcksellänge gegenüber der größeren Längeneinstellung zu verzeichnen. Dies führte zu geringeren Differenzen der Verfahrenskosten zwischen den Häcksellängenvarianten bzw. sogar zu einem Kostenvorteil der kürzeren Häcksellänge. Vor allem bei größeren Transportentfernungen ist eine kurze Schnittlängeneinstellung demnach empfehlenswert.

Aus energetischer, ökologischer und ökonomischer Sicht ist bei der Biogasproduktion neben der Stromeinspeisung vor allem die Auskopplung thermischer Energie vorteilhaft. Die Auskopplung von 30 % der erzeugten Wärmeenergie hatte einen deutlich positiven Effekt auf die Energiebilanz und die Minderung klimaschädlicher Gase durch die kürzere Häcksellänge. Eine mögliche Verringerung des Eigenenergiebedarfs der Biogasanlage durch einen geringeren Rühraufwand bei kürzerer theoretischer Häcksellänge um 10 % (rel.) wirkte sich hingegen kaum auf der Ergebnis der Bewertung aus. Die Änderung des ökonomischen Gewinns durch die verkürzte Häcksellängeneinstellung steht im Zusammenhang mit der nach EEG gezahlten Einspeisevergütung. Bei höheren Einspeisevergütungen durch zusätzliche Boni bzw. bei Biogasanlagen mit einer geringen installierten elektrischen Leistung sind stärker positive Effekte der kürzeren Häcksellänge auf den Gewinn zu erwarten.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Einstellung kürzerer Häcksellängen bei der Ernte nur in 40 % der untersuchten Fälle zu einer signifikanten Erhöhung des Energiegewinns und Verringerung der THG-Emissionen führte und nur in einem Drittel der Fälle die Rentabilität verbesserte. Bei den Bedingungen, unter denen diese positiven Wirkungen kürzerer Häcksellängen gesichert auftreten, handelt es sich um ein komplexes Wirkungsgefüge. Die Kenntnisse dazu sind noch nicht ausreichend. So ist es weder im Allgemeinen noch im Einzelfall möglich, eine Empfehlung zur Verkürzung der Häcksellänge zu geben, da die tatsächlichen Effekte in ihrer Bilanz vorab nicht abgeschätzt werden können. Wegen der geringen Eintreffenswahrscheinlichkeit eines zusätzlichen Gewinns von nur 33 % ist beim gegenwärtigen Kenntnisstand von sehr kurzen Häcksellängen eher abzuraten.

5.5 Schlussfolgerungen

Die Häcksellängeneinstellung zur Ernte ist ein Parameter mit vielfältigen Wirkungen auf die gesamte Prozesskette von der Ernte bis zur Nutzung von Silagen für die Biogasproduktion. Bei Verringerung der theoretischen Häcksellänge auf weniger als 7 mm können sich diese Effekte insgesamt sowohl vorteilhaft als auch nachteilig auf die Bilanzen von Energie, Treibhausgasen sowie Kosten und Erlösen auswirken. Eine der Voraussetzungen für ein positives Ergebnis ist die Erhöhung der Methanausbeute $y_{\text{CH}_4_orig}$ durch die kürzere Häcksellänge um mindestens 4 %. Hierfür ist eine Verringerung der effektiven Partikellänge um wenigstens 3 mm notwendig. Bei Änderung der theoretischen Häcksellänge im sehr kurzen Längenbereich können diese Anforderungen nur in wenigen Fällen erfüllt werden. Der wirtschaftliche Erfolg einer sehr kurzen Längeneinstellung lässt sich durch die Komplexität der Effekte im Einzelfall vorab nicht abschätzen. Aufgrund der geringen Eintreffenswahrscheinlichkeit eines gesicherten zusätzlichen Gewinns von nur 33 % ist beim gegenwärtigen Kenntnisstand von sehr kurzen Häcksellängen abzuraten. Empfehlenswert sind kurze theoretische Häcksellängen im Bereich von 7 bis 8 mm.

Bedingungen, die die Wahrscheinlichkeit für einen zusätzlichen Gewinn bei Einstellung einer sehr kurzen Häcksellänge erhöhen, sind

- der Einsatz leistungsstarker Feldhäcksler,
- erhöhte Lignin- und Cellulosegehalte in den Pflanzen, beispielsweise bei später Ernte oder faserreichen Pflanzenarten,
- lange Transportwege und
- hohe Vergütungssätze für den in der Biogasanlage erzeugten Strom sowie die zusätzliche Auskopplung der anfallenden Wärme.

Dennoch sind auch unter diesen Bedingungen zusätzliche Gewinne nicht garantiert. Ein Ziel zukünftiger Untersuchungen könnte sein, die Bedingungen näher zu quantifizieren, unter denen eine sehr kurze Häcksellängeneinstellung energetisch, ökonomisch sowie aus Sicht der Emission klimarelevanter Gase sinnvoll ist bzw. weitere Einflussparameter zu identifizieren. Vor dem Hintergrund eines relativ geringen Effektes der Häcksellängeneinstellung in Bezug auf die gesamte Prozesskette wäre jedoch der Nutzen entsprechend aufwendiger Untersuchungen abzuwägen. Von größerem Interesse scheint die Entwicklung von Aufbereitungstechniken im Feldhäcksler für die Biogasnutzung, die gezielt über die Vergrößerung der Substratoberfläche auf eine Erhöhung der Methanausbeute als entscheidende Einflussgröße wirken.

6 Schlussfolgerungen

Für eine effektive Ausschöpfung des energetischen Potenzials von pflanzlichen Substraten für die Biogasproduktion ist eine optimale Gestaltung der Ernte, Silierung und Lagerung der Energiepflanzen von großer Bedeutung.

Das Optimierungspotenzial bei der Silierung ist vorrangig auf die Verbesserung der Silagequalität und die Vermeidung hoher Silierverluste begrenzt. Unter der Voraussetzung eines guten Silierverlaufes und der Anwendung der „guten fachlichen Silierpraxis“ kann durch den Silierprozess sowie die Lagerung der Silage keine signifikante Erhöhung des Methanbildungspotenzials bei Beachtung der Silierverluste erzielt werden. Ein teilweise vermuteter Aufschlusseffekt durch die Silierung hat sich durch die gewonnenen Ergebnisse im Labormaßstab nicht bestätigt. Auch durch den alleinigen Zusatz der geprüften chemischen oder biologischen Siliermittel ist nicht mit einer gesteigerten Methanproduktion in der Biogasanlage zu rechnen, sofern keine deutliche Verbesserung der Silagequalität und Vermeidung von Silierverlusten mit dem Silierzusatz erreicht wird. Für eine optimale Konservierung von Biogassilagen sollten Energieverluste bei der Silierung möglichst gering gehalten werden. Da hohe Energieverluste insbesondere bei aeroben Umsetzungsvorgängen während der Silierung bzw. bei der Nacherwärmung der Silage entstehen, sind hier Ansatzpunkte für eine weitere Optimierung zu sehen.

Über eine verstärkte Aufbereitung des Erntegutes durch eine verringerte Längeneinstellung am Feldhäcksler kann die Methanbildung unter Einbeziehung der positiven Effekte auf die Silierung gesteigert werden. Die positiven Wirkungen bei Einstellung einer sehr kurzen theoretischen Häcksellänge von weniger als 7 mm reichen jedoch nicht aus, um generell eine verbesserte Energiebilanz und zusätzliche Gewinne gegenüber einer etwas gröberen Längeneinstellung zu gewährleisten. Unter Einbeziehung des energetischen Aufwandes und des Effektes auf die Kapazität der Ernteprozesskette ist daher eine kurze Häcksellängeneinstellung von 7 bis 8 mm in den überwiegenden Fällen als optimal anzusehen. Ansatzpunkt für eine weitere Optimierung wäre die Entwicklung energieeffizienter Aufbereitungstechniken im Feldhäcksler zur gezielten Erhöhung der Erntegutoberfläche.

7 Zusammenfassung

Die wirtschaftlich erfolgreiche Produktion von Biogas aus aufwendig erzeugten energiereichen Pflanzen macht eine optimale Gestaltung der gesamten Bereitstellungskette vom Anbau über die Ernte und Konservierung bis hin zum Eintrag in den Fermenter erforderlich. Kenntnisse zum Einfluss der Silierung sowie verschiedener Silierparameter auf die Biomethanisierung liegen bisher jedoch nur ansatzweise vor. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Effekte der Änderung der chemischen Zusammensetzung durch die Silierung sowie der Abreife, der Häcksellänge, des Silierzusatzes und der Lagerdauer auf die Methanbildung einzeln und im Zusammenwirken für ausgewählte Pflanzenarten näher zu charakterisieren. Hierfür wurden in drei Versuchsschwerpunkten Silierversuche und Batch-Gärtests im Labormaßstab durchgeführt. Für den Parameter Häcksellänge ist neben dem Effekt auf die Silierung und Methanbildung auch die Wirkung auf Energieaufwand und Kapazität der Ernteprozesskette von Interesse. Auf der Grundlage von Datenerhebungen in Feldversuchen und einer Modellberechnung zur Kapazitätsbewertung wurde in einem zweiten Teil der vorliegenden Arbeit die Einstellung einer sehr kurzen Häcksellänge am Feldhäcksler im Vergleich zu einer praxisüblichen Längeneinstellung bewertet. Als Bewertungskriterien wurden die Änderung der Netto-Energieproduktion, der Netto-THG-Emissionen sowie des ökonomischen Gewinns analysiert.

Silierung: Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zeigen, dass durch die Umsetzungsprozesse bei der Silierung die Methanausbeute bezogen auf die der Biomethanisierung zugeführten organische Trockenmasse gegenüber dem unsilierten Pflanzenmaterial steigt. Ursächlich hierfür sind Gärprodukte, die höhere spezifische Methanausbeuten und Methangehalte aufweisen als die Gärsubstrate bei der Silierung. Dennoch wird bei Beachtung der Silierverluste keine signifikante Änderung der Methanausbeute mit Bezug auf die vor der Silierung vorhandene organische Trockenmasse und damit auch keine Erhöhung des Methanhektarertrages erzielt.

Abreife: Von der Milchreife bis zur physiologischen Reife des geprüften Maises nehmen die Umsetzungen und Verluste bei der Silierung geringfügig ab. Unterschiede in der Methanausbeute bezogen auf die organische Trockenmasse zwischen den Ernteterminen sind mit 3 bis 5 % gering. Aufgrund der höheren Trockenmassekonzentration zum späten Erntetermin ist die Ernte zur Teigreife bzw. physiologischen Reife der Maispflanzen vorteilhaft gegenüber einem früheren Erntetermin.

Häcksellänge: Die Einstellung einer kürzeren Häcksellänge zur Ernte bewirkt einen verbesserten Silierverlauf und höhere Methanausbeuten. Die Effekte der Häcksellänge und der Silierung auf die Methanbildung verstärken sich jedoch nicht, sondern überlagern sich. Bei den Silagen wird der Effekt der stärkeren Aufbereitung auf die

Methanausbeute nur bei Berücksichtigung der Silierverluste deutlich. Im Bereich mittlerer Partikellängen der Häckselgüter zwischen 33 und 6 mm ist eine maximale Erhöhung der Methanausbeute um 10 bis 13 % bei Beachtung der Silierverluste zu erreichen. Der positive Effekt der Häcksellänge auf die Methanausbeute steigt mit zunehmender Reife bzw. Lignifizierung des Pflanzenmaterials. Die Einstellung einer sehr kurzen theoretischen Häcksellänge von weniger als 7 mm am Feldhäcksler kann jedoch unter Berücksichtigung erhöhter energetischer Aufwendungen zur Ernte und der Änderung der Kapazitäten der Ernteprozesskette zu einer Minderung der Netto-Energieproduktion und des ökonomischen Gewinns gegenüber einer praxisüblichen Längeneinstellung führen. Es empfehlen sich daher kurze theoretische Häckselängen von 7 bis 8 mm.

Silierzusatz: Die Änderung des Gärsäuremusters führt bei den geprüften chemischen Silierzusätzen teilweise zu einer Verringerung und bei den biologischen Silierzusätzen mit homo- und heterofermentativen MSB zu einer Erhöhung der Methanausbeute bezogen auf die der Biomethanisierung zugeführten oTM. Durch höhere Masseverluste bei heterofermentativen Umsetzungsprozessen gleichen sich diese Unterschiede jedoch aus. Ohne einen deutlichen Effekt auf die Silagequalität ist durch den Zusatz der geprüften Siliermittel keine Verbesserung der Methanausbeute unter Berücksichtigung der Silierverluste zu erwarten.

Lagerdauer: Mit zunehmender Dauer der Lagerung von Silage unter anaeroben Bedingungen steigt die Methanausbeute bezogen auf die der Biomethanisierung zugeführten oTM tendenziell an. Gleichzeitig finden Umsetzungsprozesse statt, die auch bei langer Lagerdauer noch zu einer geringfügigen Erhöhung der Masseverluste bei der Silierung führen. Unter Berücksichtigung dieser Silierverluste tritt mit längerer Lagerdauer keine signifikante Änderung der Methanausbeute ein. Bei Gewährleistung strikt anaerober Bedingungen und einer guten Konservatqualität ist die Lagerung von Silage im untersuchten Zeitraum bis zu einem Jahr ohne Minderung der Methanproduktion möglich.

Weiterer Forschungsbedarf wird hinsichtlich des Einflusses der Gärqualität und aeroben Stabilität der Silagen auf die Biomethanisierung sowie einer optimalen Aufbereitungstechnik für die Erzeugung großer Häckselgutoberflächen bei der Ernte gesehen.

Literaturverzeichnis

- Ahring B.K. (2003). Perspectives for Anaerobic Digestion. Scheper T., Ahring B.K. (Hrsg.): Biomethanation I. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 1-30.
- Amler R. (2006). Die Silomaisenernte bei optimaler Silierreife. *Gesunde Pflanzen* 58, S. 213-224.
- Amon T., Kryvoruchko V., Amon B., Zollitsch W., Mayer K., Buga S., Amid A. (2003a). Biogaserzeugung aus Mais – Einfluss der Inhaltsstoffe auf das spezifische Methanbildungsvermögen von früh- bis spätreifen Maissorten. BAL Gumpenstein (Hrsg.): Bericht über die 54. Tagung 2003 der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, 25.-27.11.2003, S. 59-68.
- Amon T., Kryvoruchko V., Amon B., Moitzi G., Buga S., Lyson D.F., Hackl E., Jeremic D., Zollitsch W., Pötsch E. (2003b). Optimierung der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen Mais und Klee gras. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft (Hrsg.): Forschungsbericht Nr. 1249 GZ 24.002/59-IIA1/01, 76 S.
- Amon T., Kryvoruchko V., Hopfner-Sixt K., Amon B., Bodiroza V., Ramusch M., Hrbek R., Friedel J.K., Zollitsch W., Boxberger J. (2006). Strategien zur nachhaltigen Biogaserzeugung aus Energiepflanzen durch standortangepasste Fruchtfolgesysteme, Sortenwahl und optimale Ernte. Beitrag zum Fachkongress Biogas 06, 22.-23.02.2006, Linz, 17 S., verfügbar unter: <http://www.nas.boku.ac.at>, erhalten am 10.03.2009.
- Amon T., Amon B., Kryvoruchko V., Zollitsch W., Mayer K., Gruber L. (2007a): Biogas production from maize and dairy cattle manure – Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118 (2007), S. 173-182.
- Amon T., Amon B., Kryvoruchko V., Machmüller A., Hopfner-Sixt K., Bodiroza V., Hrbek R., Friedel J., Pötsch E., Wagenristl H., Schreiner M., Zollitsch W. (2007b). Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology* 98, S. 3204-3212.
- Amon T., Hopfner-Sixt K., Amon B., Bauer A., Handler F., Blumauer E., Eder M., Stürmer B., Ritzmann A. (2007c). Handbuch Biomasselogistik. Optimierung der Beschaffungs- und Distributionslogistik bei großen Biogasanlagen. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT): Projektnummer 810695/8539, 67 S.
- Bachmaier H., Effenberger M., Lehner A., Gronauer A. (2008). Klimabilanz von Praxis-Biogasanlagen. KTBL (Hrsg.): Ökologische und ökonomische Bewertung nachwachsender Energieträger. KTBL-Schrift 468, Darmstadt, S. 194-200.
- Badger D.M., Bogue M.J., Stewart D.J. (1979). Biogas production from crops and organic wastes. *New Zealand Journal of Science* 22, S. 11-20.
- Bal M.A., Coors J.G., Shaver R.D. (1997). Impact of the Maturity of Corn for Use as Silage in the Diets of Dairy Cows on Intake, Digestion and Milk Production. *Journal of Dairy Science* 80, Nr. 10, S. 2497-2503.

- Bal M.A., Shaver R.D., Jirovec A.G., Shinnors K.J., Coors J.G. (2000). Crop Processing and Chop Length of Corn Silage: Effects on Intake, Digestion, and Milk Production by Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 83, Nr. 6, S. 1264-1273.
- Banemann D., Nelles M. (2008a). Nacherwärmung vermeiden. *Biogas Journal* 3/08, S. 40-43.
- Banemann D., Engler N., Fritz T., Nelles M. (2008b). Untersuchung zur homo- und heterofermentativen Silierung von Energiepflanzen für Biogasanlagen. Tagungsbeitrag Internationales Fachsymposium Trockenfermentation, 20-22. Februar 2008, Berlin, 4 S.
- Banemann D., Nelles M., Mathies E., Ramhold D., Mayrhuber E. (2008c). Adaptierung der In-Sacco-Methode für die Untersuchungen des Abbauverhaltens von Energiepflanzen in Biogas-Batch-Versuchen. *VDLUFA-Schriftenreihe* 63, S. 277-284.
- Banemann D., Nelles M., Höppner F., Hillegeist D., Gosko D. (2009). In-Sacco-Batch-Methode – Eine neue Methodik zur Ermittlung des Abbauverhaltens von pflanzlichen Inhaltsstoffen im Biogas-Prozess. Poster zur 18. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., 3.-5. Februar 2009, Hannover, 1 S.
- Baserga U., Egger K. (1997). Vergärung von Energiegras zur Biogasgewinnung. Bundesamt für Energiewirtschaft: Forschungsbericht BEW: 50379, Forschungsprogramm Biomasse, Tänikon, 41 S.
- Baserga U. (1998). Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen. Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras. *FAT-Berichte* 512, S. 1-11.
- Baxter H.D., Owen J.R., Waldo D.R. (1966). Effect of Laceration of Chopped Forage on Preservation and Feeding Value of Alfalfa-Orchardgrass Silage. *Journal of Dairy Science* 49, Nr. 11, S. 1441-1445.
- Berenz S. (2008). Energie- und Treibhausgasbilanzen sowie Ableitung der CO₂-Äquivalent-Vermeidungskosten für die Biogaserzeugung aus Biomasse. *KTBL (Hrsg.): Ökologische und ökonomische Bewertung nachwachsender Energieträger. KTBL-Schrift* 468, Darmstadt, S. 201-210.
- Berglund M., Börjesson P. (2006). Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. *Biomass and Bioenergy* 30, S. 254-266.
- Black J.R., Ely L.O., McGullough M.E., Sudweeks E.M. (1980). Effects of Stage of Maturity and Silage Additives upon the Yield of Gross and Digestible Energy in Sorghum Silage. *Journal of Animal Science* 50, Nr. 4, S. 617-624.
- BMU (2009a). Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2008 (Stand: Juni 2009). Referat KI III 1, 43 S., verfügbar unter <http://www.erneuerbare-energien.de>, erhalten am 19.09.09.
- BMU (2009b). Erneuerbare Energien in Zahlen (Stand: Juni 2009). Referat KI III 1, 80 S., verfügbar unter <http://www.bmu.de>, erhalten am 19.09.09.
- Bockisch F.-J., Aumüller C. (1989). Anforderungen an die Häckselqualität. *Landtechnik* 44 (4), S. 135-137.

- Bockisch F.-J., Ahlgrimm H.-J., Böhme H., Dämmgen U., Flachowsky G., Heinemeyer O., Höppner F., Murphy D.P.L., Rogasik J., Röver M., Sohler S. (2000). Bewertung von Verfahren der ökologischen und konventionellen landwirtschaftlichen Produktion im Hinblick auf den Energieeinsatz und bestimmte Schadgasemissionen. Bundesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 11, 206 S.
- Bodine A.B., O'Dell G.D., Moore M.E., Wheat C.K. (1983). Effect of Dry Matter Content and Length of Ensiling on Quality of Alfalfa Silage. *Journal of Dairy Science* 66, S. 2434-2437.
- Brulè M., Lemmer A., Oechsner H., Jungbluth T., Schimpf U. (2008). Einfluss der Zugabe von faserspaltenden Enzymen auf die Methanausbeute von Roggensilage. *Landtechnik* 63 (3), S. 178-179.
- Budde J., Suarez-Quiñones T., Plöchl M., Heiermann M. (2008). Methods of pre-treatment of less fermentable material and their applicability on anaerobic digestion. International Conference on Agricultural Engineering & Industry Exhibition, 23-25 June 2008, Hersonissos, Kreta (Griechenland), CD-Version 1130243; 20 S.
- Buswell A.M., Mueller H.F. (1952). Mechanism of Methane Fermentation. *Industrial and Engineering Chemistry* 44, Nr. 3, S. 550-552.
- Buxton D.R., O'Kiely P. (2003). Preharvest Plant Factors Affecting Ensiling. Al-Amoodi, L., Barbarick, K.A., Volenec, J.J., Dick, W.A. (Hrsg.). *Silage Science and Technology*. Madison, Wisconsin, USA: No. 42 in the series Agronomy; American Society of Agronomists, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc, S. 199-250.
- Castle M.E., Retter W.C., Watson J.N. (1979). Silage and milk production: comparisons between grass silage of three different chop lengths. *Grass and Forage Science* 34, S. 293-301.
- Charmley E., Thomas C. (1987). Wilting of Hbage prior to Ensiling: Effects on Conservation Losses, Silage Fermentation and Growth of Beef Cattle. *Animal Production* 45, S.191-203.
- Chynoweth D.P., Turick C.E., Owens J.M., Jerger D.E., Peck M.W. (1993). Biochemical Methane Potential of Biomass and Waste Feedstocks. *Biomass and Bioenergy* 5, Nr. 1, S. 95-111.
- Cielejewski H. (2007). Trends bei der Technik für die Futterernte. *Landtechnik* 62 (6), S. 386-387.
- Cooke K.M., Bernard J.K. (2005). Effect of Length of Cut and Kernel Processing on Use of Corn Silage by Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 88, Nr. 1, S. 310-316.
- Csermely J., Bellus Z., Kelemen Z., Schmidt J., Sipöcz J. (2002). Gärfutter im Folienschlauch (mit AG-BAG Silopressen). *FVM Műszaki Intézet* (Hrsg.): Bericht über technische und ökonomische Untersuchung von Produktionstechnologien. Gödöllő, Ungarn, 58 S.
- Czepuck K., Oechsner H., Schumacher B., Lemmer A. (2006). Biogasausbeuten im Labor im Vergleich zur rechnerischen Abschätzung. *Landtechnik* 61 (2), S. 82-83.
- Dalgaard T., Halberg N., Porter J.R. (2001). A model of fossil energy use in Danish agriculture used to compare organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 87, S. 51-65.
- Danner H., Holzer M., Mayrhuber E., Braun R. (2003). Acetic Acid Increases Stability of Silage under Aerobic Conditions. *Applied and Environmental Microbiology* 69, Nr. 1, S. 562-567.

- De Boever J.L., De Smet A., De Brabander D.L., Boucque C.V. (1993a). Evaluation of Physical Structure. 1. Grass Silage. *Journal of Dairy Science* 76, Nr. 1, S. 140-153.
- De Boever J.L., De Brabander D.L., De Smet A.M., Vanacker J.M., Boucque C.V. (1993b). Evaluation of Physical Structure. 2. Maize Silage. *Journal of Dairy Science* 76, Nr. 6, S. 1624-1634.
- Dernedde W., Honig H. (1977). Auswirkungen der Häcksellänge auf das Silomaisverfahren. *Landbauforschung Völkenrode*, 27. Jahrg., Heft 1, S. 60-66.
- Dewar W.A., McDonald P., Whittenbury R. (1963). The Hydrolysis of Grass Hemicelluloses during Ensiling. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 14, S. 411-417.
- DIN (1997). Umweltmanagement – Ökobilanz. Prinzipien und allgemeine Anforderungen. DIN EN ISO 14040, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 14 S.
- DLG (1997). DLG – Futterwerttabellen Wiederkäuer. 7. erweiterte und überarbeitete Auflage, DLG-Verlag Frankfurt am Main, 213 S.
- DLG-Zertifizierungsstelle für Produkte und Personal (2000). DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 16 S.
- DLG-Ausschuss für Futterkonservierung (2004). Grobfutterbewertung. Teil A – DLG-Schlüssel zur Bewertung von Grünfütter, Silage und Heu mit Hilfe der Sinnenprüfung. DLG e.V. (Hrsg.): DLG-Information 1/2004, 16 S.
- DLG-Ausschuss für Futterkonservierung (2006). Grobfutterbewertung. Teil B: DLG-Schlüssel zur Beurteilung der Gärqualität von Grünfüttersilagen auf der Basis der chemischen Untersuchung. DLG e.V. (Hrsg.): DLG-Information 2/2006, 5 S.
- DLG (2009a). DLG-Gütezeichen Produktliste Siliermittel, verfügbar unter <http://www.guetezeichen.de>, erhalten am 24.06.09.
- DLG (2009b). DLG-Testberichte Ernteaufbereitung und Lagerung. Silofolien und Stretchfolien. verfügbar unter <http://www.dlg.org/ernteaufbereitung.html>, erhalten am 02.09.2009.
- Döhler H., Niebaum A., Jäger P., Keymer U. (2004). Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen. KTBL (Hrsg.): *Die Landwirtschaft als Energieerzeuger*. KTBL-Schrift 420, Darmstadt, S. 101-120.
- Driehuis F., Oude Elferink S.J.W.H., Spoelstra S.F. (1999). Anaerobic lactic acid degradation during ensilage of whole crop maize inoculated with *Lactobacillus buchneri* inhibits yeast growth and improves aerobic stability. *Journal of Applied Microbiology* 87, S. 583-594.
- Dr. Pieper TuP GmbH (2007). Die aktiven Milchsäurebakterien für Topsilagen. Stand: Januar 2007, 4 S., verfügbar unter www.dr-pieper.com, erhalten am 23.09.2009.
- Edwards R.A., Donaldson E., MacGregor A.W. (1968). Ensilage of Whole-Crop Barley. I.-Effects of variety and stage of growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 19, S. 656-660.
- Edwards R.A., Harper F., Henderson A.R., Donaldson E. (1978). The Potential of Sunflower as a Crop for Ensilage. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 29, S. 332-338.
- Egg, R.P., Coble, C.G., Engler, C.R., Lewis, D.H. (1993). Feedstock Storage, Handling and Processing. *Biomass and Bioenergy* 5, S. 71-94.

- Fernandez I., Martin C., Champion M., Michalet-Doreau B. (2004). Effect of Corn Hybrid and Chop Length of Whole-Plant Corn Silage on Digestion and Intake by Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 87, Nr. 5, S. 1298-1309.
- Filya I. (2003a). The Effect of *Lactobacillus buchneri* and *Lactobacillus plantarum* on the Fermentation, Aerobic Stability, Ruminant Degradability of Low Dry Matter Corn and Sorghum Silages. *Journal of Dairy Science* 86, S. 3575-3581.
- Filya I. (2003b). The effect of *Lactobacillus buchneri*, with or without homofermentative lactic acid bacteria, on the fermentation, aerobic stability and ruminant degradability of wheat, sorghum and maize silages. *Journal of Applied Microbiology* 95, S. 1080-1086.
- FNR (2009a). Anlagenbestand und installierte elektrische Leistung der Biogasanlagen. verfügbar unter <http://www.bio-energie.de>, erhalten am 19.09.09.
- FNR (2009b). Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. verfügbar unter <http://www.bio-energie.de>, erhalten am 17.07.09.
- Fritz T., Nelles M. (2006). Siliermittel kann Gasertrag steigern. *energie pflanzen IV/2006*, S. 30.
- Fürll C., Schemel H., Ilder C., Scholz V. (2007). Anforderungen an die Logistik zur Sicherung hoher Silagequalitäten. *Agricultural Engineering Research* 13, S. 214-220.
- Garbers H., Frerichs L. (2001). Leistungs- und Technologieentwicklung von selbstfahrenden Feldhäckslern. *Landtechnik* 56 (6), S. 394-395.
- Gavala H.N., Angelidaki I., Ahring B.K. (2003). Kinetics and Modeling of Anaerobic Digestion Process. Scheper T., Ahring B.K. (Hrsg.): *Biomethanation I*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 57-93.
- GEMIS (2009). Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS). Version 4.3, Institut für angewandte Ökologie e.V. (Hrsg.), Freiburg, verfügbar unter: <http://www.oeko.de/service/gemis/>, erhalten am 02.09.2009.
- Gemmeke B., Rieger C., Weiland P. (2009). Ergebnisse des Biogas-Messprogramms II. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Gülzow, im Druck.
- Gerin P.A., Vliegen F., Jossart J.-M. (2008). Energy and CO₂ balance of maize and grass as energy crops for anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 99, S. 2620-2627.
- Ghosh S., Henry M.P. (1985). Hemicellulose Conversion by Anaerobic Digestion. *Biomass* 6, S. 257-269.
- Giardini A., Gaspari F., Vecchiattini M., Schenoni P. (1976). Effect of Maize Silage Harvest Stage on Yield, Plant Composition and Fermentation Losses. *Animal Feed Science and Technology* 1, S. 313-326.
- Gollakota K.G., Meher K.K. (1988). Effect of Particle Size, Temperature, Loading Rate and Stirring on Biogas Production from Castor Cake (Oil Expelled). *Biological Wastes* 24, S. 243-249.
- González-Fernández C., García-Encina P.A. (2009). Impact of substrate to inoculum ratio in anaerobic digestion of swine slurry. *Biomass and Bioenergy* 33, S. 1065-1069.
- Gordon C.H., Wiseman H.G., Derbyshire J.C., Jacobson W.C., Black D.T. (1959). Effect on Silage of Chopping and Bruising the Forage. *Journal of Dairy Science* 42, Nr. 8, S. 1394-1395.

- Gordon C.H. (1967). Storage Losses in Silage as Affected by Moisture Content and Structure. *Journal of Dairy Science* 50, Nr. 3, S. 397-403.
- Gordon F.J. (1982). The effects of degree of chopping grass for silage and method of concentrate allocation on the performance of dairy cows. *Grass and Forage Science* 37, S. 59-65.
- Gruber W., Linke B., Schelle H., Reinhold G., Keymer U. (2004). Gaserträge aus Sicht der Praxis. KTBL (Hrsg.): *Die Landwirtschaft als Energieerzeuger*. KTBL-Schrift 420, Darmstadt, S. 62-69.
- Grundmann P. (2003). Ökonomische Bewertung von Ansätzen zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von Biogasanlagen. *Landtechnik* 58 (5), S. 314-315.
- Gunaseelan V. N. (1997). Anaerobic Digestion of Biomass for Methane Production: A Review. *Biomass and Bioenergy* 13, Nos. 1/2, S. 83-114.
- Gunasaeeelan V.N. (2004). Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy* 26, S. 389-399.
- Gunaseelan V.N. (2007). Regression models of ultimate methane yields of fruits and vegetable solid wastes, sorghum and napiergrass on chemical composition. *Bioresource Technology* 98, S. 1270-1277.
- Gunnarson S., Malmberg A., Mathisen B., Theander O., Thyselius, L., Wünsche U. (1984). Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) for Biogas Production. *Biomass* 7, S. 85-97.
- Gunnarsson C., Vågström L., Hansson P.-A. (2008). Logistics for forage harvest to biogas production – Timeliness, capacities and costs in a Swedish case study. *Biomass and Bioenergy* 32, S. 1263-1273.
- Guth N., Bockisch F.-J. (1992). Bewertung der Häckselstruktur. *Landtechnik* 47 (5), S. 223-226.
- Guth N., Georg H., Bockisch F.-J., Ludwig G., Botka P. (1993). Automatische bildanalytische Messungen. *Landtechnik* 48 (8/9), S. 434-438.
- Guth N. (1995). Unterschiedliche Häckselgutstruktur von Halmfutter: Einfluß auf Futteraufnahme, Leistung und Kauverhalten von Rindern, Silagequalität und Häckselleistungsbedarf sowie bildanalytische Vermessung der Futterstruktur. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen, Forschungsbericht Agrartechnik Nr. 277, 305 S.
- Habig C. (1985). Influences of Substrate Composition on Biogas Yields of Methanogenic Digesters. *Biomass* 8, S. 245-253.
- Häbler J., Tölle R., Hahn J. (2007). Measurement and Modelling of Compaction in Bunker Silos. International Conference on Agricultural Engineering & Industry Exhibition, 23-25 June 2008, Hersonissos, Kreta (Griechenland), CD-version 1177130, 11 S.
- Häbler J., Tölle R., Hahn J. (2008). Vibrationswalzen zur Verdichtung von Siliergut. *Landtechnik* 63 (1), S. 28-29.
- Hahn J., Fröba N. (2009). Biomasselogistik. KTBL (Hrsg.): *Die Landwirtschaft als Energieerzeuger*. KTBL-Schrift 476, Darmstadt, S. 58-66.
- Hanegraaf M.C., Biewinga E.E., van der Bul G. (1998). Assessing the Ecological and Economic Sustainability of Energy Crops. *Biomass and Bioenergy* 15, S. 345-355.

- Hanff H., Neubert G., Brudel H. (2008). Datensammlung und die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg. Ackerbau / Grünlandwirtschaft / Tierproduktion. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hrsg.): Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, 5. überarbeitete Auflage, Reihe Landwirtschaft, Band 9, Heft IV, 126 S.
- Hartmann H., Angelidaki I., Ahring B.K. (2000). Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. *Water Science and Technology* 41, Nr. 3, 145-153.
- Hassebrauck B., Mortasawi M. (1966). Untersuchungen über die Schnittlänge von Halmguthäckseln bei verschiedenen Häckselmaschinen. *Landtechnische Forschung* 16, H.3, S. 90-95.
- Heiermann M., Schelle H., Plöchl M. (2002a). Biogaspotenziale pflanzlicher Kosubstrate. Heiermann M., Plöchl M. (Hrsg.): *Biogas und Energielandwirtschaft – Potenzial, Nutzung, Grünes Gas™, Ökologie und Ökonomie*. Tagung vom 18.-19.11.2002 in Potsdam, *Bornimer Agrartechnische Berichte* 32, 2. überarbeitete Auflage, S. 19-26.
- Heiermann M., Plöchl M., Linke B., Schelle H. (2002b). Preliminary evaluation of some cereals as energy crops for biogas production. Sayigh A.A.M. (Hrsg.): *Proceedings of the World Renewable Energy Congress VII*, 29.06.-05.07.2002 in Köln, Deutschland, CD-Version, 5 S.
- Heiermann M., Plöchl M. (2004). Crops – a big potential for biogas production. *World Renewable Energy Congress VIII*, 28.08.-03.09.2004, Denver, Colorado USA, 5 S.
- Helffrich D., Oechsner H. (2003). Hohenheimer Biogasertragstest. Vergleich verschiedener Laborverfahren zur Vergärung von Biomasse. *Landtechnik* 58 (3), S. 148-149.
- Hendriks A.T.W.M., Zeeman G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 100, S. 10-18.
- Herrmann A. (1999). Modellierung verfahrenstechnischer Bewertungskriterien bei unterschiedlicher Verknüpfung von Ernte- und Transportarbeitsgängen. Habilitation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 204 S.
- Herrmann C., Heiermann M., Idler C., Scholz V. (2008). Biogas crops – Impact of supply chain and feedstock characteristics on methane yield. *International Conference on Agricultural Engineering & Industry Exhibition*, 23-25 June 2008, Hersonissos, Kreta (Griechenland), CD-version 1127350, 20 S.
- Herrmann C., Heiermann M., Idler C., Scholz V. (2009). Einfluss der Silierung auf die Biogasbildung – Aktuelle Forschungsergebnisse. Fachverband Biogas e.V. (Hrsg.): *Biogas: dezentral erzeugen, regional profitieren, international gewinnen*. 18. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., 3.-5. Februar 2009, Hannover, S. 27-35.
- Hills D.J., Nakano K. (1984). Effects of Particle Size on Anaerobic Digestion of Tomato Solid Wastes. *Agricultural Wastes* 10, S. 285-295.
- Honig H. (1975). Umsetzungen und Verluste bei der Nachgärung. *Das wirtschaftseigene Futter*, Band 21 (1), S. 25-32.
- Honig H., Rohr K. (1982). Zur Bedeutung des Zerkleinerungsgrades von Silomais. 1. Mitteilung: Einfluß des Zerkleinerungsgrades auf die Verluste durch unverdaut ausgeschiedene Körner und Körnerbruchstücke. *Das wirtschaftseigene Futter*, Band 28 (3), S. 182-192.

- Idler C., Heckel M., Herrmann C., Heiermann M. (2007). Influence of biological additives in grass silages on the biogas yield. Research papers of IAg Eng LUA & LU of Ag, 2007, Vol. 39, Nr. 4, S. 69-82.
- IPPC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution to Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK und New York, USA, 881 S.
- Jäger P. (1991). Berechnung der Teilzeiten für die Arbeit am Feld – Teil 2. Landtechnik 46 (3), S. 123-128.
- Jänicke H. (2006). Pflanzenbauliche Maßnahmen zur Beeinflussung der Gärqualität. Bundesarbeitskreis Futtermittelkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futtermittelkonservierung – Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, S. 35-49.
- Jerger D.E., Chynoweth D.P., Isaacson H.R. (1987). Anaerobic Digestion of Sorghum Biomass. Biomass 14, S. 99-113.
- Jeroch H., Drochner W., Simon O. (1999). Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere. Ernährungsphysiologie, Futtermittelkunde, Fütterung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 555 S.
- Johnson D.G., Otterby D.E., Lundquist R.G., True J.A., Benson F.A., Smith R.E., Lindor L.K., Stommes R.C. (1984). Yield and Quality of Alfalfa as Affected by Harvesting and Storage Methods. Journal of Dairy Science 67, S. 2475-2480.
- Johnson L.M., Harrison J.H., Davidson D., Mahanna W.C., Shinnors K., Linder D. (2002). Corn Silage Management: Effect of Maturity, Inoculation, and Mechanical Processing on Pack Density and Aerobic Stability. Journal of Dairy Science 85, Nr. 2, S. 434-444.
- Johnson L.M., Harrison J.H., Davidson D., Mahanna W.C., Shinnors K. (2003a). Corn Silage Management: Effects of Hybrid, Chop Length, and Mechanical Processing on Digestion and Energy Content. Journal of Dairy Science 86, S. 208-231.
- Johnson L.M., Harrison J.H., Davidson D., Mahanna W.C., Shinnors K. (2003b). Corn Silage Management: Effects of Hybrid, Maturity, Inoculation, and Mechanical Processing on Fermentation Characteristics. Journal of Dairy Science 86, Nr. 1, S. 287-308.
- Kaiser F., Diepolder M., Eder J., Hartmann S., Prestele H., Gerlach R., Ziehfrennd G., Gronauer A. (2004). Biogas Yields from Various Renewable Raw Materials. Landtechnik 59 (4), S. 224-225.
- Kaiser F.L. (2007). Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben Abbau in Biogasreaktoren. Dissertation, Technische Universität München, 176 S.
- Kalk W.-D., Hülsbergen K.-J. (1996). Methodik zur Einbeziehung des indirekten Energieverbrauchs mit Investitionsgütern in Energiebilanzen von Landwirtschaftsbetrieben. Kühn-Archiv 90 (1), S. 41-56.
- Kalzendorf C. (2006). Siliermittelarten und ihre Wirkungsweisen. Bundesarbeitskreis Futtermittelkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futtermittelkonservierung – Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, S. 155-162.

- Karapaju P., Luostarinen E., Kalmari E., Kalmari J., Rintala J. (2002). Co-digestion of energy crops and industrial confectionery by-products with cow manure: batch-scale and farm-scale evaluation. *Water Science and Technology* 45, Nr. 10, S. 275-280.
- Karpenstein-Machan M. (2005). *Energiepflanzenbau für Biogasanlagenbetreiber*. DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main, 192 S.
- Kelm M., Wachendorf M., Trott H., Volkens K., Taube F. (2004). Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. III. Energy efficiency in forage production from grassland and maize for silage. *Grass and Forage Science* 59, S. 69-79.
- Kiesewalter S., Albert E., Röhrich C., Riehl G. (2007). *Nutzungsalternativen für Grünland*. SLL (Hrsg.): Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 2/2007, 113 S.
- Kraatz S. (2009). *Ermittlung der Energieeffizienz in der Tierhaltung am Beispiel der Milchviehhaltung*. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, 199 S.
- Kreich F.-H. (2004). *Durchsatzleistung und Kraftstoffverbrauch im Mais*. DLG-Prüfbericht 5432 F, 4 S.
- Krentler J.-G. (2006). *Neue Entwicklungen beim Bau von Fahrsilos*. *Landtechnik* 61 (6), S. 390-391.
- Kromer K.-H. (1993). *Zerkleinerung von Mais in Trommelschneidwerken*. *Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 14 Nr. 60*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 188 S.
- KTBL (2004). *Betriebsplanung Landwirtschaft 2004/05. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft*. 19. Auflage, Darmstadt, 573 S.
- KTBL (2008). *Betriebsplanung Landwirtschaft 2008/09. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft*. 21. Auflage, Darmstadt, 752 S.
- Kuhn (1986). *Radiometrische Bestimmung der Lagerdichte von Gärfuttermilagen*. *Arbeiten zur Mechanisierung der Pflanzen- und Tierproduktion Schlieben/Bornim* 10, S. 24-31.
- Kung Jr L., Ranjit N.K. (2001). The Effect of *Lactobacillus buchneri* and Other Additives on the Fermentation and Aerobic Stability of Barley Silage. *Journal of Dairy Science* 84, S. 1149-1155.
- Kung Jr L., Stokes M.R., Lin C.J. (2003). *Silage Additives*. Al-Amoodi, L., Barbarick, K.A., Volenec, J.J., Dick, W.A. (Hrsg.). *Silage Science and Technology*. Madison, Wisconsin, USA: No. 42 in the series *Agronomy*; American Society of Agronomists, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc., S. 305-360.
- Latsch R., Prochnow A., Berg W. (2003). Häcksler oder Ladewagen? *Neue Landwirtschaft* 11, S. 54-57.
- Lehtomäki A. (2006). *Biogas production from Energy Crops and Crop residues*. Dissertation, University of Jyväskylä, 91 S., verfügbar unter <http://dissertations.jyu.fi/studbiol/9513925595.pdf>, erhalten am 07.05.2007.
- Lengerken J.v., Zimmermann K. (1991). *Handbuch Futtermittelprüfung*. 1. Auflage, Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin GmbH, Berlin, 652 S.

- Leurs K. (2005). Einfluss von Häcksellänge, Aufbereitungsgrad und Sorte auf die Siliereigenschaften von Mais. Dissertation, Hohe Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, 159 S.
- Li X., Hansen W.P., Otterby D.E., Linn J.G., Kuehn C.S. (1992). Effect of additives on fermentation of Corn Silage Containing Different Amounts of Added Nitrate Nitrogen. *Journal of Dairy Science* 75, S. 1555-1561.
- Lindgren S.E., Axelsson L.T., McFeeters R.F. (1990). Anaerobic l-lactate degradation by *Lactobacillus plantarum*. *FEMS Microbiology Letters* 66, S. 209-214.
- Linke B., Mähnert P., Heiermann M., Mumme J. (2006). Grundlagen und Verfahren der Biogasgewinnung. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hrsg.): Biogas in der Landwirtschaft – Leitfaden für Landwirte und Investoren im Land Brandenburg. 3. überarbeitete Auflage, Potsdam, S. 13-25.
- Liu G., Zhang R., El-Mashad H.M., Dong R. (2009). Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes. *Bioresource Technology* 100, S. 5103-5108.
- Llabrés-Luengo P., Mata-Alvarez J. (1988). Influence of Temperature, Buffer, Composition and Straw Particle Length on the Anaerobic Digestion of Wheat Straw-Pig Manure Mixtures. *Resources, Conservation and Recycling* 1, S. 27-37.
- Maak C., Büscher W. (2008). Verdichtung von Siliergütern bei der Folienschlauchtechnologie. *Landtechnik* 63 (5), S. 282-283.
- Madhukara K., Nand K., Raju N.R., Srilatha H.R. (1993). Ensilage of Mangopeel for Methane Generation. *Process Biochemistry* 28, S. 119-123.
- Madhukara K., Srilatha H.R., Srinath K., Bharathi K., Nand K. (1997). Production of methane from green pea shells in floating dome digesters. *Process Biochemistry* 32, Nr. 6, S. 509-513.
- Madigan M.T., Martinko J.M. (2006). Brock Mikrobiologie. 11. überarbeitete Auflage, Pearson Education Deutschland GmbH., München, Deutschland, 1203 S.
- MacGregor A.W., Edwards R.A. (1968). Ensilage of Whole-Crop Barley. II.-Composition of barley and barley silage at different stages of growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 19, S. 661-666.
- Mähnert P., Heiermann M., Plöchl M., Schelle H., Linke B. (2002). Verwertungsalternativen für Grünlandbestände – Futtergräser als Kosubstrat für die Biomethanisierung. *Landtechnik* 57 (5), S. 260-261.
- Mähnert P., Heiermann M., Linke B. (2005). Batch- and Semi-continuous Biogas Production from Different Grass Species. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript EE 05 010, Vol. VII., 11 S.
- Mähnert P. (2007). Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, 191 S.
- Mayne C. S., Gordon F. J. (1986). The effect of harvesting system on nutrient losses during silage making. 1. Field losses. *Grass and Forage Science* 41, Nr 1, S. 17-26.

- McDonald P., Stirling A.C., Henderson A.R., Whittenbury R. (1964). Fermentation Studies on Inoculated Herbages. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 15, S. 429-436.
- McDonald P., Henderson A.R., Ralton I. (1973). Energy Changes During Ensilage. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 24, S. 827-834.
- McDonald P., Henderson A.R., Heron S.J.E. (1991). *The Biochemistry of Silage*. 2nd Edition. Chalcombe Publications, Marlow, England, 341 S.
- McEniry J., O'Kiely P., Clipson N.J.W., Forristal P.D., Doyle E.M. (2007). The relative impacts of wilting, chopping, compaction and air infiltration on the conservation characteristics of ensiled grass. *Grass and Forage Science* 62, S. 470-484.
- McGechan M.B. (1990). A Review of Losses Arising During Conservation of Grass Forage: Part 2, Storage Losses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 45, S. 1-30.
- Meier D. (2008). Trockenfermentation braucht Struktur. *energie pflanzen II/2008*, S. 36-39.
- Messer H.J.M., Hawkins J.C. (1977). The Influence of Moisture Content and Chop Length of Forage Maize on Silage Bulk Density and the Pressure on Bunker Silo Walls. *Journal of agricultural Engineering Research* 22, S. 175-182.
- Miller W.J., Clifton C.M. (1965). Relation of dry matter content in ensiled material and other factors to nutrient losses by seepage. *Journal of Dairy Science* 48, Nr. 7, S. 917-923.
- Mölder R. (2005). Was bringen größere Häcksellängen beim Silieren von Mais? *profi 3*, S. 62-64.
- Moll E., Stauber T. (2008). Datensichtung, Unterstützung bei der Problemanalyse, erste Schritte einer Datenanalyse. Julius-Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (Hrsg.): jki Bericht Nr. 143, 66 S.
- Moorhead K.K., Nordstedt R.A. (1993). Batch anaerobic digestion of water hyacinth: Effect of particle size, plant nitrogen content, and inoculum volume. *Bioresource Technology* 44, 71-76.
- Morrison I.M. (1979). Changes in the cell wall components of laboratory silages and the effect of various additives on these changes. *Journal of Agricultural Science* 93, S. 581-586.
- Morrison T.A., Jung H.G., Buxton D.R., Hatfield R.D. (1998). Cell-Wall Composition of Maize Internodes of Varying Maturity. *Crop Science* 38, S. 455-460.
- Mortasawi M. (1963). Die Schnittlänge von Halmguthäckseln. Dissertation, Landwirtschaftliche Hochschule Hohenheim, 151 S.
- Mshandete A., Björnsson L., Kivaisi A.K., Rubindamayugi M.S.T., Mattiasson B. (2006). Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste. *Renewable Energy* 31, S. 2385-2392.
- Muck R.E., Holmes B.J. (2006). Bag Silo densities and losses. *Transaction of the ASABE* 49 (5), S. 1277-1284.
- Muck R.E. (1988). Factors Influencing Silage Quality and their Implications for Management. *Journal of Dairy Science* 71, S. 2992-3002.
- Muck R.E., Moser L.E., Pitt R.E. (2003). Postharvest Factors Affecting Ensiling. Al-Amoodi, L., Barbarick, K.A., Volenec, J.J., Dick, W.A. (Hrsg.). *Silage Science and Technology*. Madison, Wisconsin, USA: No. 42 in the series Agronomy; American Society of Agronomists, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc., S. 251-304.

- Mukengele M., Oechsner H. (2007). Einfluss der Silierung auf den spezifischen Methanertrag bei Mais. *Landtechnik* 62 (1), S. 20-21.
- Müller J., Fübbeck A. (1997). Mit 74 Messern dem Häcksler Konkurrenz machen? *top agrar* 7, S. 70-73.
- Müller J., Bauer R. (2006). Futterkonservierung. In: *Die Landwirtschaft - Pflanzliche Erzeugung*, 12. erweiterte Auflage, BLV Buchverlag, München, 866 S.
- Müller M., Prochnow A. (1996). Zur Bewertung von Maschinen und Verfahren in der Pflanzenproduktion. *Agrartechnische Forschung* 2, Heft 1, S. 70-77.
- Murdoch J.C., Balch D.A., Holdsworth M.C., Wood M. (1955). The effect of Chopping, Lacerating and Wilting of Herbage on the Chemical Composition of Silage. *Journal of the British Grassland Society* 10, S. 181-188.
- Nadeau E. (2007). Effects of plant species, stage of maturity and additive on the feeding value of whole-crop cereal silage. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 87, S. 789-801.
- Nägele H.-J. (2009). Bewertung von Überladeverfahren in der Ladewagenkette. Masterarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, 93 S.
- Naumann C., Bassler R., Seibold R., Barth C. (1976). *Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch)*. Band III: Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. 3. Auflage, 7. Ergänzungslieferung 2007, VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- Neureiter M., Dos Santos J. T. P., Lopez C. P., Pichler H., Kirchmayr R., Braun R. (2005). Effect of silage preparation on methane yields from whole crop maize silages. Ahring, B. K. & Hartmann, H. (Hrsg.): *Proceedings of the 4th Int. Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste*, Copenhagen/Denmark, Vol. 1, S. 109-115.
- Niebaum A., Döhler H. (2006). *Modellanlagen*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): *Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung*. 3. überarbeitete Auflage, Gülzow, S. 117-136.
- Nishino N., Yoshida M., Shiota H., Sakaguchi E. (2003). Accumulation of 1,2-propanediol and enhancement of aerobic stability in whole crop maize silage inoculated with *Lactobacillus buchneri*. *Journal of Applied Microbiology* 94, S. 800-807.
- Nishino N., Wada H., Yoshida M., Shiota H. (2004). Microbial Counts, Fermentation Products, and Aerobic Stability of Whole Crop Corn and a Total Mixed Ration Ensiled With and Without Inoculation of *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus buchneri*. *Journal of Dairy Science* 87, S. 2563-2570.
- Nussbaum, H. (2006). Erzeugung hochwertiger Silagen als Basis des wirtschaftlichen Erfolgs. Fachverband Biogas e.V. (Hrsg.): *Wirtschaftsmotor Biogas*. Tagungsband der 15. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., 25.-27.01.2006, Hannover, S. 155-164.
- Nussbaum H. (2008). Einfluss verschiedener Gärprodukte auf die Dynamik und Ausbeute an Biogas. DLG-Gütezeichen Gespräch Siliermittel, 16.10.2008, Groß-Umstadt.
- Oechsner H., Lemmer A., Neuberger C. (2003). Feldfrüchte als Gärsubstrat in Biogasanlagen. *Landtechnik* 58 (3), S. 146-147.

- Oechsner H., Lemmer A. (2009). Wie lässt sich die Effizienz einer Biogasanlage steigern? Fachverband Biogas e.V. (Hrsg.) Biogas: dezentral erzeugen, regional profitieren, international gewinnen. 18. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., 3.-5. Februar 2009, Hannover, S. 105-112.
- Oude Elferink S.J.W.H., Krooneman J., Gottschal J.C., Spoelstra S.F., Folkert F., Driehuis F. (2001). Anaerobic Conversion of Lactic Acid to Acetic Acid and 1,2-Propanediol by *Lactobacillus buchneri*. *Applied and Environmental Microbiology* 67, Nr. 1, S. 125-132.
- Pahlow G., Muck R.E., Driehuis F., Oude Elferink S.J.W.H., Spoelstra S.F. (2003). Microbiology of Ensilage. Al-Amoodi, L., Barbarick, K.A., Volenec, J.J., Dick, W.A. (Hrsg.): *Silage Science and Technology*. Madison, Wisconsin, USA: No. 42 in the series Agronomy; American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc, S. 30-93.
- Pahlow G. (2006). Gärungsbiologische Grundlagen und biochemische Prozesse der Silagebereitung. Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (Hrsg.): *Praxishandbuch Futterkonservierung – Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien*. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, S. 11-20.
- Pakarinen O., Lehtomäki A., Rissanen S., Rintala J. (2008). Storing energy crops for methane production: Effects of solids content and biological additive. *Bioresource Technology* 99, S. 7074-7082.
- Palmowski, L. (2000). Zerkleinerungs- und Abbauverhalten organischer Materialien. Dissertation, Göttingen, 144 S.
- Panditharatne S., Allen V.G., Fontenot J.P., Jayasuriya M.C.N. (1986). Ensilage Characteristics of Tropical Grasses as Influenced by Stage of Growth, Additives and Chopping Length. *Journal of Animal Science* 63, S. 197-207.
- Phillip D., Moore K.J., Pedersen J.F., Grant R.J., Redfaern D.D., Mitchell R.B. (2007). Ensilage performance of sorghum hybrids varying in extractable sugars. *Biomass and Bioenergy* 31, S. 492-296.
- Piening J., Banemann D., Engler N., Nelles M. (2007). Untersuchungen zur homo- und heterofermentativen Silierung von Energiepflanzen für Biogasanlagen. Tagungsband der Internationalen Konferenz "Fortschritte beim Biogas - Biogasproduktion aus landwirtschaftlicher Biomasse und organischen Reststoffen", Stuttgart-Hohenheim 2007, 4 S.
- Playne M.J., McDonald P. (1966). The Buffering Constituents of Hbage and of Silage. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 17, S. 264-268.
- Plöchl M. (2007). Einflüsse der Silagequalität auf den Biogas-Ertrag. Pieper, W. (Hrsg.): 10. Symposium „Fütterung und Management von Kühen mit hohen Leistungen“, 25.10.2007, Neuruppin, Deutschland.
- Plöchl M., Heiermann M., Linke B., Schelle H. (2009). Biogas Crops – Part II: Balance of Greenhouse Gas Emissions and Energy from Using Field Crops for Anaerobic Digestion. *CIGR Ejournal*, Manuscript 1086, Vol. XI, June, 2009, verfügbar unter <http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/viewFile/1086/1191>, erhalten am 07.09.2009.

- Pötsch E.M., Resch R. (2002). Einfluss von Futteraufbereitung und Erntetechnik auf den Gärverlauf und die Silagequalität von Grünlandfutter. BAL Gumpenstein (Hrsg.): Zeitgemäße Futterkonservierung. 8. Alpenländisches Expertenforum, 9.-10.04.2002, Irdning, S. 11-16.
- Pouech P., Fruteau H., Bewa H. (1998). Agricultural crops for biogas production on anaerobic digestion plants. Proceedings of the 10th European Conference Biomass for Energy and Industry, C.A.R.M.E.N., Würzburg/Germany, S. 163-165.
- Prochnow A., Heiermann M., Drenckhan A., Schelle H. (2005). Seasonal pattern of biomethanisation of grass from landscape management. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, Manuscript EE 05 011, Vol. VII, 17 S.
- Rani D. S. and Nand K. (2004). Ensilage of pineapple processing waste for methane generation. *Waste Management* 24, S. 523-528.
- Ranjit N.K., Kung Jr L. (2000). The Effect of *Lactobacillus buchneri*, *Lactobacillus plantarum*, or a Chemical Preservative on the Fermentation and Aerobic Stability of Corn Silage. *Journal of Dairy Science* 83, S. 526-535.
- Ranjit N.K., Taylor C.C., Kung Jr L. (2002). Effect of *Lactobacillus buchneri* 40788 on the fermentation, aerobic stability and nutritive value of maize silage. *Grass and Forage Science* 57, S. 73-81.
- Raposo F., Borja R., Martín M.A., Martín A., de la Rubia M.A., Rincón B. (2009). Influence of inoculum-substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation. *Chemical Engineering Journal* 149, S. 70-77.
- Rees, D.V.H., Audsley E., Neale M.A. (1983). Some physical properties that affect the rate of diffusion of oxygen into silage. *Journal of agricultural Science* 100, S. 601-605.
- Röhling I., Wild G. (2008). Biogasproduktion in Bayern 2007. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 7 S., verfügbar unter <http://www.lfl.bayern.de/ilb/technik/32565/>, erhalten am 30.07.2009.
- Rooke J.A., Hatfield R.D. (2003). *Biochemistry of Ensiling*. Al-Amoodi, L., Barbarick, K.A., Volenec, J.J., Dick, W.A. (Hrsg.): *Silage Science and Technology*. Madison, Wisconsin, USA: No. 42 in the series *Agronomy*; American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc, S. 95-139.
- Ruppel K.A., Pitt R.E., Chase L.E., Galton D.M. (1995). Bunker Silo Management and Its Relationship to Forage Preservation on Dairy Farms. *Journal of Dairy Science* 78, S. 141-154.
- Ruxton I.B., McDonald P. (1974). The Influence of Oxygen on Ensilage. I. Laboratory Studies. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 25, S. 107-115.
- Sahm H. (1981). Biologie der Methan-Bildung. *Chemie Ingenieur Technik* 53, Nr. 11, S. 854-863.
- Schattauer A., Weiland P. (2006). Grundlagen der anaeroben Fermentation. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): *Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung*. 3. überarbeitete Auflage, Gülzow, S. 25-35.
- Schaumann (2009). Siliermittel für Energiepflanzensilagen zur Biogas-Produktion. verfügbar unter www.schaumann.de, erhalten am 10.09.2009.

- Schittenhelm S. (2008). Chemical composition and methane yield of maize hybrids with contrasting maturity. *European Journal of Agronomy* 29, S. 72-79.
- Scholwin F., Weidele T., Gattermann H., Schattauer A., Weiland P. (2006). Anlagentechnik zur Biogasbereitstellung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung. 3. überarbeitete Auflage, Gülzow, S. 36-85.
- Schumacher B., Böhmel C., Oechsner H. (2006). Welchen Energiemais wann ernten für die Biogasgewinnung? *Landtechnik* 61 (2), S. 84-85.
- Schumacher B., Oechsner H., Senn T., Jungbluth T. (2007). Aufbereitung von Nachwachsenden Rohstoffen zur Optimierung der Biogasausbeute. VDI Wissensforum IWB GmbH (Hrsg.): Biogas 2007 - Energieträger der Zukunft. VDI-Berichte Nr. 1983, Tagung vom 14.-15.06.2007 in Berlin, S. 157-168.
- Schumacher B. (2008). Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung von Energiepflanzen in Biogas und Bioethanol. Dissertation, Universität Hohenheim, 204 S.
- Schwab E.C., Shaver R.D., Shinnors K.J., Lauer J.G., Coors J.G. (2002). Processing and Chop Length Effects in Brown-Midrib Corn Silage on Intake, Digestion, and Milk Production by Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 85, Nr. 3, S. 613-623.
- Seale D.R., Quinn C.M., Whittaker P.A., Wilson R.K. (1982). Microbiological and chemical changes during the ensilage of long, chopped and minced grass. *Irish Journal of agricultural Research* 21, Nr. 2/3, S. 147-158.
- Sharma S.K., Mishra I.M., Sharma M.P., Saini J.S. (1988). Effect of Particle Size on Biogas Generation from Biomass Residues. *Biomass* 17, S. 251-263.
- Shinnors K.J. (2003). Engineering Principles of Silage Harvesting Equipment. Al-Amoodi, L., Barbarick, K.A., Volenec, J.J., Dick, W.A. (Hrsg.): *Silage Science and Technology*. Madison, Wisconsin, USA: No. 42 in the series Agronomy; American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc., S. 361-403.
- Sonnen J. (2006). Simulation von Ernteprozessketten für Siliergüter. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin, 207 S.
- Spiekers H. (2006). Produktbeschreibung der Silierzusätze. Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (Hrsg.): *Praxishandbuch Futterkonservierung*. Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien. 7. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main, S. 219-295.
- Steinhöfel O., Thaysen J. (2006). Silagen aus Getreideganzpflanzen. Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (Hrsg.): *Praxishandbuch Futterkonservierung*. 7. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main, S. 109-113.
- Strauss C., Vetter A. (2008). Development and comparison of optimised cropping systems for the production of energy plants under the variety of regional conditions in Germany („EVA“). *Aspects of Applied Biology* 90, Biomass and Energy Crops III, S. 93-99.
- Strauss C., Vetter A., Nehring A. (2009). Standortangepasste Anbausysteme. Fachverband Biogas e.V. (Hrsg.): *Biogas: dezentral erzeugen, regional profitieren, international gewinnen*. 18. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., 3.-5. Februar 2009, Hannover, S. 9-17.

- Styles D., Jones M.B. (2007). Energy Crops in Ireland: Quantifying the potential life-cycle greenhouse gas reductions of energy-crop electricity. *Biomass & Bioenergy* 31, S. 759-772.
- TGL (1974). Fachbereichstandard Zeitgliederung in der Land- und Forstwirtschaft. Begriffe, Kurzzeichen, Erläuterungen. TGL 22289, 6 S.
- Thaysen J., Banemann D., Junge R. (2008). Siliermittel zur Steigerung der Methanausbeute – Ergebnisse aus Batchversuchen und Praxiseinsätzen. Deutsches Maiskomitee e.V. (Hrsg.): Tagungsband – Tagung des Ausschusses Futterkonservierung und Fütterung. 12./13. März 2008, Futterkamp/Deutschland, S. 10-11.
- Thaysen J., Honig H. (2006). Mengen- und Qualitätseffekte von Siliermitteln und –zusätzen. Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futterkonservierung – Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, S. 169-177.
- Thaysen J., Jänicke H. (2006). Maissilierung. Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futterkonservierung – Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, S. 101-108.
- Thaysen J., Nußbaum H. (2006). Siloanlagen, Silobau, Siloabdeckung. Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futterkonservierung – Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, S. 66-76.
- Thaysen J., Wagner A. (2006). Allgemeine Grundsätze der Silierung. Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (Hrsg.): Praxishandbuch Futterkonservierung. 7. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main, S. 51-65.
- Toews, T. (2009). Biomasetransport – Was kostet die Logistik von Gülle & Co? FNR/KTBL-Kongress: Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven. 15.-16. September 2009, Weimar, im Druck.
- Tong X., Smith L.H., McCarty P.L. (1990). Methane Fermentation of Selected Lignocellulosic Materials. *Biomass* 21, S. 239-255.
- Van Soest P.J. (1981). Limiting Factors in Plant Residues of Low Biodegradability. *Agriculture and Environment* 6, S. 135-143.
- Van Soest P.J., Robertson J.B., Lewis B.A. (1991). Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. Symposium: Carbohydrate Methodology, Metabolism, and Nutritional Implications in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science* 74, S. 3583-3597.
- VDI Richtlinien Ausschuss Kumulierter Energieaufwand (1997). Kumulierter Energieaufwand. Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4600, Beuth Verlag Berlin, 19 S.
- VDI Fachausschuss Regenerative Energien (2006). Vergärung organischer Stoffe. Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4630, Beuth Verlag Berlin, 92 S.
- Wagner A., Leurs K., Büscher W. (2004). Einfluss der Häcksellänge auf Verdichtbarkeit, Silierung und Nacherwärmung von Silomais. *Agrartechnische Forschung* 10, Heft 4, S. 54-61.

- Wagner A., Leurs K., Büscher W. (2005). Silomais – Einfluss der Häcksellänge auf Verdichtung, Silierung und Nacherwärmung. *Landtechnik* 60 (1), S. 22-23.
- Wagner A., Weber U. (2008). Silage aus dem Schlauch. *Biogas Journal* 2/08, S. 58-63.
- Waite R., Gorrod R.R.N. (1959). The Structural Carbohydrates of Grasses. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 10, S. 308-317.
- Weiland P. (2001). Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate. VDI (Hrsg.): *Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven*. Tagung vom 19./20.06.2001 in Hannover, VDI-Berichte Nr. 1620, S. 19-32.
- Weiland P. (2003). Production and Energetic Use of Biogas from Energy Crops and Wastes in Germany. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 109, S. 263-274.
- Weiland P. (2005). Landwirtschaftliche Vergärungsanlagen. Bischofsberger W., Dichtl N., Rosenwinkel K.-H., Seyfried C.F., Böhnke B. (Hrsg.): *Anaerobtechnik*. 2. vollständig überarbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 533-555.
- Weinberg Z.G., Szakacs G., Ashbell G., Hen Y. (1999). The effect of *Lactobacillus buchneri* and *L. plantarum*, applied at ensiling, on the ensiling fermentation and aerobic stability of wheat and sorghum silages. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 23, S. 218-222.
- Weiß D., Brückner C. (2008). Aufbereitung landwirtschaftlicher Biomasse für den Vergärungsprozess. SLL (Hrsg.): *Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft*, Heft 19/2008, 100 S.
- 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*, 11.-20. Juni 1974, Moskau, S. 663-672.
- Weißbach F., Kuhla S. (1995). Stoffverluste bei der Bestimmung des Trockenmassegehaltes von Silagen und Grünfütter. *Entstehende Fehler und Möglichkeiten der Korrektur*. *Übersicht Tierernährung* 23/1995, S. 189-214.
- Weißbach F. (2008a). Zur Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Maissilagen als Substrat für die Biogasgewinnung. *Deutsches Maiskomitee e.V. (Hrsg.): Tagungsband - Tagung des Ausschusses Futtermittelkonservierung und Fütterung*. 12./13. März 2008, Futterkamp/Deutschland, S. 12-13.
- Weißbach F. (2008b). Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. *Landtechnik* 63 (6), S. 356-358.
- 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 Grassilagen als Substrat für Biogasanlagen. *Landtechnik* 63 (4), S. 210-211.
- Weißbach F., Strubelt C. (2008c). Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Zuckerrübensilagen als Substrat für Biogasanlagen. *Landtechnik* 63 (6), S. 354-355.
- Wellenbrock K.-H., Hertwig F., Verch G. (2007). Ergebnisse der Prüfungen von Silomaisarten für die Biogaserzeugung. *Falkenrehde*, Vortrag am 04.12.2007.

- Westfall P.H., Tobias R.D., Rom D., Wolfinger R.D., Hochberg Y. (1999). Multiple Comparisons and Multiple Tests Using the SAS® System. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA, 416 S.
- Wilkinson J.M., Bolsen K.K., Lin C.J. (2003). History of Silage. Al-Amoodi, L., Barbarick, K.A., Volenec, J.J., Dick, W.A. (Hrsg.): Silage Science and Technology. Madison, Wisconsin, USA: No. 42 in the series Agronomy; American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc., S. 1-30.
- Wilson R.K. (1985). Laboratory Studies on Chemical, Electrical-Resistance and Physical Changes in Grass Silage over the First 14 Days. Irish Journal of agricultural Research 24, S. 39-47.
- Woolford M.K. (1990). The detrimental effects of air on silage. Journal of Applied Bacteriology 68, S. 101-116.
- Xiccato G., Cinetto M., Carazzolo A., Cossu M.E. (1994). The effect of silo type and dry matter content on the maize silage fermentation process and ensiling loss. Animal Feed Science and Technology 49, S. 311-323.
- Zacharias H. (2008). Untersuchung des Einflusses einer Auswahl von chemischen und biologischen Siliermitteln auf die Biogasbildung als Grundlage zur ökonomischen Bewertung. Masterarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, 123 S.
- Zacharias H., Plöchl M., Herrmann C., Heiermann M., Auerbach H. (2008). Welche Siliermittel für Biogassilage? Neue Landwirtschaft 8/2008, S. 85-87.
- Zauner E., Küntzel U. (1986). Methane Production from Ensiled Plant Material. Biomass 10, S. 207-223.
- Zeng M., Mosier N. S., Huang C.-P., Sherman D. M., Ladisch M. R. (2007). Microscopic Examination of Changes of Plant Cell Structure in Corn Stover Due to Hot Water Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis. Biotechnology and Bioengineering. 97, Nr. 2, S. 265-278.
- Zimmer E., Gordon C.H. (1964). Effects of Wilting, Grinding, and Aerating on Losses and Quality in Alfalfa Silage. Journal of Dairy Science 47, Nr. 6, S. 652-653.
- Zimmer E. (1967a). Der Einfluß der mechanischen Aufbereitung auf die Silierfähigkeit von Halmfutter. Grundlagen Landtechnik, Bd. 17, Nr. 6, S. 197-202.
- Zimmer E. (1967b). Nährstoffverluste bei der Vergärung von Futterpflanzen. 1. Mitteilung: Der Einfluss der Siloform auf die Höhe der Verluste. Das wirtschaftseigene Futter, Band 13 (4), S. 271-286.
- Zubr J. (1986). Methanogenic Fermentation of Fresh and Ensiled Plant Materials. Biomass 11, S.159-171.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----|
| Abb. 1: | Methanausbeuten ($\bar{x} \pm s$) und Ligningehalte von Ganzpflanzensilagen verschiedener Pflanzenarten..... | 3 |
| Abb. 2: | Einsatzhäufigkeit von Energiepflanzen in Biogasanlagen nach a) GEMMEKE ET AL. (2009) und b) einer Vollerhebung in Bayern (RÖHLING & WILD 2008)..... | 4 |
| Abb. 3: | Verfahren zur Ernte und Einbringung von Siliergütern nach SONNEN (2006)..... | 8 |
| Abb. 4: | Schematische Darstellung der Verluste bei der Silierung und Höhe der Energieverluste nach ZIMMER (1980 zitiert in MCDONALD ET AL. 1991)..... | 15 |
| Abb. 5: | Intensität der Säurebildung in Abhängigkeit von der Gärdauer bei verschiedenem Zerkleinerungsgrad am Beispiel Klee gras (MURDOCH 1955, zitiert in ZIMMER 1967a)..... | 20 |
| Abb. 6: | a) Atmungsintensität in Abhängigkeit von der Gärdauer bei verschiedenem Zerkleinerungsgrad (nach SIMPSON 1961, zitiert in ZIMMER 1967a) und b) Einfluss der Häcksellänge auf die Trockenmassedichte (DERNEDDE & HONIG 1977)..... | 21 |
| Abb. 7: | Systematik der Silierzusätze nach MCDONALD ET AL. (1991) und WEISBACH (2005, zitiert in KALZENDORF 2006)..... | 23 |
| Abb. 8: | Verdichtungsapparatur zur Silierung im Labormaßstab (links) und Lagerung der Siliergläser (rechts)..... | 40 |
| Abb. 9: | Versuchsaufbau der Bildanalyse (links) und Beispiel eines für die Bildanalyse gescannten Bildes einer Maisprobe (rechts, Maßstab 1 : 4)..... | 43 |
| Abb. 10: | Schematische (links) und fotografische Darstellung (rechts) der Batch-Gärtests. | 48 |
| Abb. 11: | a) Summenverteilung der projizierten Oberfläche über die Länge der Partikel sowie b) mittlere Partikellänge, -breite und spezifische projizierte Oberfläche ($\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen) der Sorte Oldham bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge..... | 55 |
| Abb. 12: | a) Summenverteilung der projizierten Oberfläche über die Länge der Partikel sowie b) mittlere Partikellänge, -breite und spezifische projizierte Oberfläche ($\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen) der Sorte LG3237 bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge..... | 56 |
| Abb. 13: | a) Summenverteilung der projizierten Oberfläche über die Länge der Partikel sowie b) mittlere Partikellänge, -breite und spezifische projizierte Oberfläche ($\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen) der Sorte LG3237 bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge..... | 57 |
| Abb. 14: | Rohnährstoffgehalte des Siliergutes Mais der Sorten Oldham, LG3237 und Benicia zu jeweils 3 Ernteterminen | 58 |
| Abb. 15: | Anteile an Gerüstsubstanzen der Maissilagen der Sorten Oldham, LG3237 und Benicia zu jeweils 3 Ernteterminen..... | 59 |
| Abb. 16: | Zeitlicher Verlauf der Methanausbeute am Beispiel von a) Siliergut und b) Silage der Maissorte Oldham zum 1. Erntetermin (dargestellt ist jeweils die mittlere Wiederholung einer Variante)..... | 62 |

| | | |
|----------|--|----|
| Abb. 17: | Methanausbeuten von a) Siliergut und b) Silage der Maissorte Oldham unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; n = 3..... | 63 |
| Abb. 18: | Methanausbeuten von a) Siliergut und b) Silage der Maissorte LG3237 unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; n = 3..... | 64 |
| Abb. 19: | Methanausbeuten von a) Siliergut und b) Silage der Maissorte Benicia unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; n = 3..... | 64 |
| Abb. 20: | a) Summenverteilung der projizierten Oberfläche über die Länge der Partikel sowie b) mittlere Partikellänge, -breite und spezifische projizierte Oberfläche ($\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen) bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Laborhäcksler) von Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale..... | 70 |
| Abb. 21: | Mittlere Rohrnährstoffgehalte des Siliergutes und der Silagen von Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale in Versuchsschwerpunkt II..... | 71 |
| Abb. 22: | Mittlere Anteile der Gerüstsubstanzen des Siliergutes und der Silagen von Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale in Versuchsschwerpunkt II..... | 72 |
| Abb. 23: | Summe der Methanausbeute sowie spezifische Methanrate von a) Siliergut und b) Silagen des Grünschnittroggens bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (dargestellt ist jeweils die mittlere Wiederholung einer Variante)..... | 76 |
| Abb. 24: | Summe der Methanausbeute sowie spezifische Methanrate von a) Siliergut und b) Silagen des Sudangrases bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (dargestellt ist jeweils die mittlere Wiederholung einer Variante)..... | 77 |
| Abb. 25: | Summe der Methanausbeute sowie spezifische Methanrate von a) Siliergut und b) Silagen von Triticale bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (dargestellt ist jeweils die mittlere Wiederholung einer Variante)..... | 78 |
| Abb. 26: | Summenverteilung der projizierten Oberfläche über die Länge der Partikel bei jeweils zwei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Feldhäcksler) von Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale..... | 82 |
| Abb. 27: | Mittlere Partikellänge, -breite und spezifische projizierte Oberfläche ($\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen) bei jeweils zwei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Feldhäcksler) von Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale. ... | 82 |
| Abb. 28: | Mittlere Rohrnährstoffgehalte des Siliergutes und der Silagen von Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale in Versuchsschwerpunkt III | 84 |
| Abb. 29: | Mittlere Anteile der Gerüstsubstanzen des Siliergutes und der Silagen von Mais, Grünschnittroggen, Sudangras und Triticale in Versuchsschwerpunkt III ... | 84 |
| Abb. 30: | Methanausbeute von Mais mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 8 mm bei Variation von Lagerdauer und Silierzusatz; n=3..... | 93 |
| Abb. 31: | Methanausbeute von Mais mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 8 mm bei Variation der Lagerdauer; n=3..... | 94 |
| Abb. 32: | Methanausbeute von Grünschnittroggen mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 6,8 mm und b) 11 mm bei Variation von Lagerdauer und Silierzusatz; n=3..... | 94 |
| Abb. 33: | Methanausbeute von Grünschnittroggen mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 6,8 mm und b) 11 mm bei Variation der Lagerdauer; n=3..... | 96 |

| | | |
|----------|--|-----|
| Abb. 34: | Methanausbeute von Sudangras mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 7 mm bei Variation von Lagerdauer und Silierzusatz; n=3..... | 97 |
| Abb. 35: | Methanausbeute von Sudangras mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 7 mm bei Variation der Lagerdauer; n=3..... | 98 |
| Abb. 36: | Methanausbeute von Triticale mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 8 mm bei Variation von Lagerdauer und Silierzusatz; n=3..... | 98 |
| Abb. 37: | Methanausbeute von Triticale mit einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 8 mm bei Variation der Lagerdauer; n=3..... | 100 |
| Abb. 38: | Zusammenhang zwischen a) dem ADF-Gehalt und der Methanausbeute $y_{CH_4_orig}$ bzw. b) dem ADF-Gehalt und der Geschwindigkeitskonstante k am Beispiel der Silagen des Versuchsschwerpunktes III; n = 62.... | 105 |
| Abb. 39: | Zusammenhang zwischen der Summe der Gehalte an Essigsäure, Buttersäure und einwertigen Alkoholen und dem oTM-Verlust bei der Silierung sowie den Methanausbeuten $y_{CH_4_zu}$ und $y_{CH_4_orig}$ am Beispiel der Silagen von a) Mais und b) Triticale des Versuchsschwerpunktes III..... | 107 |
| Abb. 40: | Verlauf des Methangehaltes im Biogas von Siliergut und Silagen von a) Mais, b) Grünschnittroggen, c) Sudangras und d) Triticale am Beispiel der Varianten mit grober Häcksellänge, 90 Tage Lagerdauer ohne Silierzusatz im Versuchsschwerpunkt III..... | 108 |
| Abb. 41: | Zusammenhang zwischen mittlerer Partikellänge und mittlerer projizierter Oberfläche des untersuchten Häckselgutes | 110 |
| Abb. 42: | Zusammenhang zwischen mittlerer Partikellänge und Fein- bzw. Grobanteil der Häckselgüter..... | 110 |
| Abb. 43: | Zusammenhang zwischen mittlerer Partikellänge und Methanausbeute (Bezugsbasis oTM _{orig}) bei a) Siliergut und b) Silagen von Mais im Versuchsschwerpunkt I..... | 112 |
| Abb. 44: | Zusammenhang zwischen mittlerer Partikellänge und Methanausbeute (Bezugsbasis oTM _{orig}) bei a) Siliergut und b) Silagen von Grünschnittroggen, Triticale und Sudangras im Versuchsschwerpunkt II und III..... | 113 |
| Abb. 45: | Zusammenhang zwischen der Wirkung der Zerkleinerung auf die Methanausbeute und dem TM-Gehalt des frischen Maises in Versuchsschwerpunkt I sowie dem ADF-Gehalt des Siliergutes verschiedener Pflanzenarten in Versuchsschwerpunkt II und III..... | 115 |
| Abb. 46: | Wirkung von TM-Gehalt und mittlerer Partikellänge des frischen Maises auf die Geschwindigkeitskonstante k im Batch-Gärtest für die geprüften Maissorten im Versuchsschwerpunkt I | 117 |
| Abb. 47: | Einfluss des Verhältnisses $oTM_{Substrat} : oTM_{Inoculum}$ auf Methanausbeute, Methangehalt und Geschwindigkeit der Methanbildung im Batch-Gärtest bei frischem Mais A (TM = 25 %) und frischem Mais B (TM = 44 %); n = 5..... | 160 |
| Abb. 48: | Prinzip und Abfolge der Berechnungen zur Bewertung kürzerer Häcksellängen.. | 171 |
| Abb. 49: | Wege des Feldhäckslers am Beispiel der Messvariante Mais_3 (links) und Wägung der Lademassen der Transporteinheiten mit Radlastwaagen (rechts)... | 174 |

| | | |
|----------|--|------|
| Abb. 50: | Schematische Darstellung der Verteilung der Messstellen zur Bestimmung der Dichte am Siloanschnitt | .175 |
| Abb. 51: | Zeitgliederungsauszug für selbstfahrende Ernteeinheiten nach SONNEN (2006) . | 177 |
| Abb. 52: | Schematische Darstellung der für die energetische Bewertung und die Bewertung des Treibhauseffektes berücksichtigten stofflichen und energetischen Einflussfaktoren | .186 |
| Abb. 53: | Mittlere Partikellängen, -breiten und spezifische projizierte Oberflächen ($\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen) der mit unterschiedlicher Längeneinstellung gehäckselten Siliergüter Mais, Sudangras (Sugr), Grünschnittroggen (Gsr), Triticale (Trit) und Winterroggen (Wro)..... | .193 |
| Abb. 54: | Gehalte an Gärsäuren und einwertigen Alkoholen der Silagen (Laborsilo) erstellt aus den Siliergütern der Praxisernten | .196 |
| Abb. 55: | Änderung des Energieinputs und Energieoutputs durch eine Verringerung der Häcksellängeneinstellung bei den Praxisernten (Fläche 5 ha, Transportentfernung 3 km)..... | .201 |
| Abb. 56: | Änderung der Treibhausgasemissionen durch eine Verringerung der Häcksellängeneinstellung bei den Praxisernten (Fläche 5 ha, Transportentfernung 3 km)..... | .202 |
| Abb. 57: | Änderung der Kosten und Erlöse durch eine Verringerung der Häcksellängeneinstellung bei den Praxisernten (Fläche 5 ha, Transportentfernung 3 km)..... | .204 |
| Abb. 58: | Arbeitszeitbedarf für die Arbeitsgänge Häckseln, Transport und Verdichten in der Gesamtarbeitszeit am Beispiel Mais_1..... | .205 |
| Abb. 59 | Änderung des Gewinns durch eine verringerte Häcksellängeneinstellung in Abhängigkeit von der Transportentfernung am Beispiel der Messvarianten mit Mais..... | .207 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------|---|----|
| Tab. 1: | Biogasausbeute und Methangehalt einzelner Stoffklassen pflanzlicher Biomasse. | 5 |
| Tab. 2: | Wichtige Umsetzungswege homo- und heterofermentativer MSB und damit verbundene TM- und Energieverluste (MCDONALD ET AL. 1991)..... | 11 |
| Tab. 3: | Charakteristik der wichtigsten Gärschädlinge bei der Silierung nach MCDONALD ET AL. (1991), JEROCH ET AL. (1999) und PAHLOW ET AL. (2003)..... | 13 |
| Tab. 4: | Wichtige Umsetzungswege von Clostridien, Enterobakterien und Hefen sowie damit verbundene TM- und Energieverluste (MCDONALD ET AL. 1991)..... | 17 |
| Tab. 5: | Einfluss der Partikelgröße auf die Biogas- bzw. Methanbildung und den anaeroben Abbau organischer Materialien – Ergebnisse aus der Literatur (Auswahl)..... | 28 |
| Tab. 6: | Vergleich der Methanausbeute von frischem und siliertem Pflanzenmaterial - Ergebnisse aus der Literatur (Auswahl)..... | 30 |
| Tab. 7: | Beschreibung des in Versuchsschwerpunkt I geprüften Maises | 37 |
| Tab. 8: | Beschreibung der in Versuchsschwerpunkt II und III geprüften Erntegüter..... | 37 |
| Tab. 9: | Übersicht der durchgeführten Versuche zur Analyse der Prozessgrundlagen – Versuchsschwerpunkt I bis III..... | 38 |
| Tab. 10: | Art und Menge der Silierzusätze in Versuchsschwerpunkt III..... | 40 |
| Tab. 11: | Chemische Charakterisierung des Inoculums für Batch-Gärtests, n=41..... | 49 |
| Tab. 12: | TM-Verlust und Gärqualität von Maissilagen (Laborsilo) der Sorte Oldham (S220) bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge; n=3..... | 60 |
| Tab. 13: | TM-Verlust und Gärqualität von Maissilagen (Laborsilo) der Sorte LG3237 bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge; n=3..... | 61 |
| Tab. 14: | TM-Verlust und Gärqualität von Maissilagen (Laborsilo) der Sorte Benicia bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge; n=3..... | 61 |
| Tab. 15: | TM-Verlust und Gärqualität von Grünschnittroggensilagen (Laborsilo) unterschiedlicher theoretischer Häcksellängen; n=3..... | 73 |
| Tab. 16: | TM-Verlust und Gärqualität von Sudangrassilagen (Laborsilo) unterschiedlicher theoretischer Häcksellängen; n=3..... | 74 |
| Tab. 17: | TM-Verlust und Gärqualität von Triticalesilagen (Laborsilo) unterschiedlicher theoretischer Häcksellängen; n=3..... | 74 |
| Tab. 18: | TM-Verlust und Gärqualität von Maissilagen (Laborsilo) bei Variation von Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer; n=3..... | 85 |
| Tab. 19: | TM-Verlust und Gärqualität von Grünschnittroggensilagen (Laborsilo) bei Variation von Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer; n=3..... | 87 |
| Tab. 20: | TM-Verlust und Gärqualität von Sudangrassilagen (Laborsilo) bei Variation von Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer; n=3..... | 89 |
| Tab. 21: | TM-Verlust und Gärqualität von Triticalesilagen (Laborsilo) bei Variation von Häcksellänge, Silierzusatz und Lagerdauer; n=3..... | 90 |

| | | |
|----------|---|------|
| Tab. 22: | Korrelationsmatrix der bildanalytisch ermittelten Feinheitsmerkmale; n = 48..... | .109 |
| Tab. 23: | Pearsonsche Korrelationskoeffizienten zwischen den Feinheitsmerkmalen und den Methanausbeuten von Siliergut und Silagen (ohne Zusatz, 90 Tage Lagerdauer) im Versuchsschwerpunkt I bis III..... | .111 |
| Tab. 24: | Lineare Regressionen zwischen der mittleren Partikellänge bzw. der mittleren projizierten Oberfläche und der Methanausbeute (Bezugsbasis $\sigma_{TM_{orig}}$) von Siliergut und Silagen verschiedener Pflanzenarten | .113 |
| Tab. 25: | Pearsonsche Korrelationskoeffizienten zwischen den Feinheitsmerkmalen und der Geschwindigkeit der Methanbildung von Siliergut und Silagen der Pflanzenarten Mais und Triticale im Versuchsschwerpunkt I bis III..... | .115 |
| Tab. 26: | Vergleich der Inhaltsstoffe des Siliergutes der eigenen Untersuchungen mit Literaturangaben; alle Angaben in [% TM]..... | .118 |
| Tab. 27: | Literaturangaben zu im Batch-Gärtest ermittelten Methanausbeuten $y_{CH_4, zu}$ und Methangehalten c_{CH_4} im Biogas der geprüften Pflanzenarten (Ganzpflanze)..... | 121 |
| Tab. 28: | Theoretische Methanausbeuten und Methangehalte wichtiger Gärsubstrate und Gärprodukte der Silierung berechnet nach BUSWELL & MUELLER (1952)..... | .126 |
| Tab. 29: | Literaturangaben zu Änderungen von TM-Verlust, pH-Wert und Gärsäuremuster (Differenz Silierzusatz – Kontrolle) durch Zusatz von Siliermitteln..... | .153 |
| Tab. 30: | Gehalte an 1,2-Propandiol und 2,3-Butandiol sowie TM-Gehalte und Methanausbeuten der Maissilagen des Versuchsschwerpunktes III nach alter (WEIßBACH & KUHLA 1995) und neuer TM-Korrektur (WEIßBACH & STRUBELT 2008a)..... | .162 |
| Tab. 31: | Beschreibung der Messvarianten und eingesetzten Erntemaschinen bei der Praxisernte von Mais, Sudangras (Sugr), Grünschnittroggen (Gsr), Triticale (Trit) und Winterroggen (Wro)..... | .173 |
| Tab. 32: | Übersicht über den für die Bilanzierung angenommenen Maschineneinsatz..... | .183 |
| Tab. 33: | Grunddaten für die Berechnung der erzeugten Energie..... | .184 |
| Tab. 34: | Energie- und Emissionsfaktoren | .186 |
| Tab. 35: | Ergebnisse der Datenerhebungen zu den Praxisernten..... | .190 |
| Tab. 36: | Kenndaten der Silobefüllung sowie gemessene Dichten der Praxissilos | .194 |
| Tab. 37: | σ_{TM} -Verluste, Methanausbeuten und Methangehalte unterschiedlich gehäckselter Silagen (Laborsilo) erstellt aus den Siliergütern der Praxisernten..... | .197 |
| Tab. 38: | Kapazitäten des Feldhäckslers, der Transport- und Verdichtereinheiten sowie notwendige Anzahl an Aggregaten der einzelnen Messvarianten und Häcksel-längeneinstellungen (Fläche 5 ha, Transportentfernung 3 km)..... | 198 |
| Tab. 39: | Einfluss verschiedener Faktoren auf die Änderung des Gewinns sowie der Energie- und THG-Bilanz durch eine verringerte Häcksel-längeneinstellung am Beispiel der Messvarianten mit Mais | 208 |
| Tab. 40: | Kennzahlentabelle für die Bewertung kürzerer Häcksel-längen | 209 |
| Tab. 41: | Literaturangaben zu Schüttdichten von Häckselgut..... | 212 |
| Tab. 42: | Vergleich eigener Ergebnisse mit Literaturangaben zu verschiedenen Teilzeiten und Geschwindigkeiten beim Häckseln und Transport..... | 213 |

Anhang zur Dissertation

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|-----|
| Abb. A1: | Fotografische Darstellung der Maissorte Oldham zum 1. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhäcksler); VS I..... | 261 |
| Abb. A2: | Fotografische Darstellung der Maissorte Oldham zum 2. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhäcksler); VS I..... | 262 |
| Abb. A3: | Fotografische Darstellung der Maissorte Oldham zum 3. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhäcksler); VS I..... | 263 |
| Abb. A4: | Fotografische Darstellung der Maissorte LG3237 zum 1. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhäcksler); VS I..... | 264 |
| Abb. A5: | Fotografische Darstellung der Maissorte LG3237 zum 2. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhäcksler); VS I..... | 265 |
| Abb. A6: | Fotografische Darstellung der Maissorte LG3237 zum 3. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhäcksler); VS I..... | 266 |
| Abb. A7: | Fotografische Darstellung der Maissorte Benicia zum 1. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhäcksler); VS I..... | 267 |
| Abb. A8: | Fotografische Darstellung der Maissorte Benicia zum 2. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhäcksler); VS I..... | 268 |
| Abb. A9: | Fotografische Darstellung der Maissorte Benicia zum 3. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhäcksler); VS I..... | 269 |
| Abb. A10: | Fotografische Darstellung des gehäckselten Grünschnittroggens bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm, b) 6 mm, c) 12 mm und d) 16 mm (Laborhäcksler); VS II..... | 270 |
| Abb. A11: | Fotografische Darstellung des gehäckselten Sudangrases bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm, b) 6 mm, c) 8 mm, d) 12 mm und e) 16 mm (Laborhäcksler); VS II | 271 |
| Abb. A12: | Fotografische Darstellung der gehäckselten Triticale bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm, b) 8 mm, c) 12 mm und d) 16 mm (Laborhäcksler); VS I..... | 273 |
| Abb. A13: | Fotografische Darstellung des gehäckselten Maises bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 8 mm (Feldhäcksler); VS III..... | 274 |
| Abb. A14: | Fotografische Darstellung des gehäckselten Grünschnittroggens bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 6,8 mm und b) 11 mm (Feldhäcksler); VS III. | 275 |
| Abb. A15: | Fotografische Darstellung des gehäckselten Sudangrases bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 7 mm (Feldhäcksler); VS III..... | 276 |
| Abb. A16: | Fotografische Darstellung der gehäckselten Triticale bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 8 mm (Feldhäcksler); VS III..... | 277 |
| Abb. A17: | Zeitgliederungsauszug für Transporteinheiten (TE) nach SONNEN (2006)..... | 322 |
| Abb. A18: | Zeitgliederungsauszug für Verdichtereinheiten (VE) nach SONNEN (2006)..... | 323 |
| Abb. A19: | Änderung der Netto-Energieproduktion und der Netto-THG-Emissionen durch eine verringerte Häcksellängeneinstellung am Feldhäcksler in Abhängigkeit von der Transportentfernung am Beispiel der Messvarianten mit Mais..... | 332 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tab. A1: | Daten zu Anbau und Bestandesführung; Versuchsschwerpunkt I | 260 |
| Tab. A2: | Daten zu Anbau und Bestandesführung; Versuchsschwerpunkt II und III..... | 260 |
| Tab. A3: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte Oldham zum 1. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseinstellungen (Parzellenhäcksler); VS I..... | 261 |
| Tab. A4: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte Oldham zum 2. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseinstellungen (Parzellenhäcksler); VS I..... | 262 |
| Tab. A5: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte Oldham zum 3. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseinstellungen (Parzellenhäcksler); VS I..... | 263 |
| Tab. A6: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte LG3237 zum 1. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseinstellungen (Parzellenhäcksler); VS I..... | 264 |
| Tab. A7: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte LG3237 zum 2. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseinstellungen (Parzellenhäcksler); VS I..... | 265 |
| Tab. A8: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte LG3237 zum 3. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseinstellungen (Parzellenhäcksler); VS I..... | 266 |
| Tab. A9: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte Benicia zum 1. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseinstellungen (Parzellenhäcksler); VS I..... | 267 |
| Tab. A10: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte Benicia zum 2. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseinstellungen (Parzellenhäcksler); VS I..... | 268 |
| Tab. A11: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte Benicia zum 3. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseinstellungen (Parzellenhäcksler); VS I..... | 269 |
| Tab. A12: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Grünschnittroggen bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Laborhäcksler); VS II..... | 270 |
| Tab. A13: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Sudangras bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Laborhäcksler); VS II..... | 272 |
| Tab. A14: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Triticale bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Laborhäcksler); VS II..... | 273 |
| Tab. A15: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Mais bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Feldhäcksler); VS III..... | 274 |
| Tab. A16: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Grünschnittroggen bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Feldhäcksler); VS III..... | 275 |
| Tab. A17: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Sudangras bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Feldhäcksler); VS III..... | 276 |
| Tab. A18: | Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Triticale bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Feldhäcksler); VS III..... | 277 |
| Tab. A19: | Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Mais der Sorte Oldham bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I. | 278 |
| Tab. A20: | Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Mais der Sorte LG3237 bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I..... | 279 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tab. A21: | Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Mais der Sorte Benicia bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I.. | 280 |
| Tab. A22: | Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Grünschnittroggen mit unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II..... | 281 |
| Tab. A23: | Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Sudangras mit unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II | 281 |
| Tab. A24: | Chemische Charakterisierung von frischer und siliertes Triticale mit unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II..... | 281 |
| Tab. A25: | Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Mais bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III..... | 282 |
| Tab. A26: | Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Grünschnittroggen bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III..... | 283 |
| Tab. A27: | Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Sudangras bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III..... | 284 |
| Tab. A28: | Chemische Charakterisierung von frischer und siliertes Triticale bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III..... | 285 |
| Tab. A29: | Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateriale-Verhältnis von frischem und siliertem Mais der Sorte Oldham im Batch-Gärtetest unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I (n = 3)..... | 286 |
| Tab. A30: | Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Mais der Sorte Oldham unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I (n = 3)..... | 287 |
| Tab. A31: | Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateriale-Verhältnis von frischem und siliertem Mais der Sorte LG3237 im Batch-Gärtetest unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I (n = 3)..... | 288 |
| Tab. A32: | Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Mais der Sorte LG3237 unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I (n = 3)..... | 289 |
| Tab. A33: | Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateriale-Verhältnis von frischem und siliertem Mais der Sorte Benicia im Batch-Gärtetest unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I (n = 3)..... | 290 |
| Tab. A34: | Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Mais der Sorte Benicia unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I (n = 3)..... | 291 |

| | |
|--|-----|
| Tab. A35: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateriale-Verhältnis von frischem und siliertem Grünschnittroggen im Batch-Gärtest bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II (n = 3)..... | 292 |
| Tab. A36: Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Grünschnittroggen bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II (n = 3)..... | 292 |
| Tab. A37: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateriale-Verhältnis von frischem und siliertem Sudangras im Batch-Gärtest bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II (n = 3)..... | 293 |
| Tab. A38: Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Sudangras bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II (n = 3)... | 293 |
| Tab. A39: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateriale-Verhältnis von frischer und siliertem Triticale im Batch-Gärtest bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II (n = 3)..... | 294 |
| Tab. A40: Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischer und siliertem Triticale bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Laborhäcksler); VS II (n = 3)..... | 294 |
| Tab. A41: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateriale-Verhältnis von frischem und siliertem Mais im Batch-Gärtest bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)..... | 295 |
| Tab. A42: Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Mais bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3).... | 296 |
| Tab. A43: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateriale-Verhältnis von frischem und siliertem Grünschnittroggen im Batch-Gärtest bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)..... | 297 |
| Tab. A44: Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Grünschnittroggen bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)..... | 298 |
| Tab. A45: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateriale-Verhältnis von frischem und siliertem Sudangras im Batch-Gärtest bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)..... | 299 |
| Tab. A46: Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Sudangras bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3) | 300 |
| Tab. A47: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateriale-Verhältnis von frischer und siliertem Triticale im Batch-Gärtest bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)..... | 301 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tab. A48: | Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischer und silierter Triticale bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)..... | 302 |
| Tab. A49: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{zu}) von Mais unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 303 |
| Tab. A50: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{orig}) von Mais unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 304 |
| Tab. A51: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) des Methangehaltes im Biogas bei der Biomethanisierung von Mais unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 305 |
| Tab. A52: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Geschwindigkeitskonstante k bei der Biomethanisierung von Mais unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 306 |
| Tab. A53: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{zu}) von Grünschnittroggen unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 307 |
| Tab. A54: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{orig}) von Grünschnittroggen unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 308 |
| Tab. A55: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) des Methangehaltes im Biogas bei der Biomethanisierung von Grünschnittroggen unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 309 |
| Tab. A56: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Geschwindigkeitskonstante k bei der Biomethanisierung von Grünschnittroggen unter Variation von Lagerdauer, Häcksellänge und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III.... | 310 |
| Tab. A57: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{zu}) von Sudangras unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 311 |
| Tab. A58: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{orig}) von Sudangras unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 312 |
| Tab. A59: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) des Methangehaltes im Biogas bei der Biomethanisierung von Sudangras unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 313 |
| Tab. A60: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Geschwindigkeitskonstante k bei der Biomethanisierung von Sudangras unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 314 |
| Tab. A61: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{zu}) von Triticale unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 315 |
| Tab. A62: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{orig}) von Triticale unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 316 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tab. A63: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) des Methangehaltes im Biogas bei der Biomethanisierung von Triticale unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 317 |
| Tab. A64: | Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Geschwindigkeitskonstante k bei der Biomethanisierung von Triticale unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III..... | 318 |
| Tab. A65: | Pearsonsche Korrelationskoeffizienten zwischen der Änderung der Substratzusammensetzung durch die Silierung und den Methanausbeuten bzw. dem Methangehalt im Biogas der Silagen des Versuchsschwerpunktes III..... | 319 |
| Tab. A66: | Pearsonsche Korrelationskoeffizienten zwischen den Parametern des Gär-säuremusters und den Methanausbeuten bzw. dem Methangehalt im Biogas der Silagen des Versuchsschwerpunktes III..... | 319 |
| Tab. A67: | Pearsonsche Korrelationskoeffizienten zwischen der Änderung der Substratzusammensetzung durch die Silierung und der Geschwindigkeit der Methanbildung im Batch-Gärtest der Silagen des Versuchsschwerpunktes III..... | 320 |
| Tab. A68: | Pearsonsche Korrelationskoeffizienten zwischen den Parametern des Gär-säuremusters und der Geschwindigkeit der Methanbildung im Batch-Gärtest der Silagen des Versuchsschwerpunktes III..... | 321 |
| Tab. A69: | Berechnung des Durchsatzes des Feldhäckslers in der Gesamtarbeitszeit nach HERRMANN (1999)..... | 324 |
| Tab. A70: | Berechnung der notwendigen Anzahl an Transporteinheiten..... | 325 |
| Tab. A71: | Berechnung der notwendigen Anzahl an Verdichtereinheiten..... | 326 |
| Tab. A72: | Berechnung der Transportkapazität in der Gesamtarbeitszeit..... | 326 |
| Tab. A73: | Berechnung der Kapazität der Verdichtereinheiten in der Gesamtarbeitszeit..... | 328 |
| Tab. A74: | Grunddaten der Leistungsbewertung..... | 329 |
| Tab. A75: | Kenndaten der für die Bilanzierung zugrunde gelegten Maschinen (HANFF ET AL. 2008, KTBL 2008)..... | 330 |
| Tab. A76: | Schema zur Berechnung von Verfahrenskosten..... | 331 |

Tab. A1: Daten zu Anbau und Bestandesführung; Versuchsschwerpunkt I

| Mais | |
|------------------|--|
| Bodenbearbeitung | Frühjahrsfurche; Pflügen mit Packer (07.04.06) Grubbern (12.04.06) Saatbettbereitung; Kreiselegge (25.04.06) |
| Aussaat | 02.05.06 |
| Saatstärke | 9 Körner/m ² |
| Reihenabstand | 75 cm |
| Düngung | Grunddüngung 600 kg/ha Thomaskali (22.03.06) 140 kg N/ha als Harnstoff (19.04.06) |
| Pflanzenschutz | 1,25 l/ha Spectrum+ 2,5 l/ha Stomp SC (08.05.06) |
| Beregung | 20 mm (22.07.06) |

Tab. A2: Daten zu Anbau und Bestandesführung; Versuchsschwerpunkt II und III

| | Mais | | Sudangras | | Wintertriticale | |
|------------------|---|--|--|--|-----------------|-----------|
| | Betrieb A | Betrieb B | Betrieb A | Betrieb B | Betrieb A | Betrieb B |
| Bodenbearbeitung | Pflügen (25.04.07) | Scheiben (22.09.05) Grubbern (23.09.05) | Scheiben (18.05.06) Pflügen mit Packer (22.05.06) Saatbettbereitung (22.05.06) | Grubbern/Walzen (12.10.06) Striegeln (15.10.06) | | |
| Aussaat | 28.04.07 | 24.09.05 | 23.05.06 | 13.10.06 | | |
| Saatstärke | 8 keimf. Körner/m ² | 90 kg/ha | 25 kg/ha | 140 kg/ha | | |
| Reihenabstand | 75 cm | 12,5 cm | 12 cm | 25 cm | | |
| Düngung | 20 m ² /ha Rindergülle (24.04.07) 50 t/ha Rindermist (24.04.06) | 12 m ² /ha Gärrest (22.09.05) 200 l/ha AHL (03.04.06) 150 l/ha AHL (28.04.06) | 20 m ² /ha Rindergülle (17.05.06) 10 t/ha Rindermist (18.05.06) | 12 m ³ /ha Gärrest (11.10.06) 150 l/ha AHL (08.03.07) 160 l/ha AHL (11.04.07) | | |
| Pflanzenschutz | 2,5 l/ha Gardo Gold; 1 l/ha Cellisto; 0,1 l/ha Certrol B (23.06.07) | 1,7 l/ha IPU (03.04.06) | 3 l/ha Artett (25.06.06) | 50 g/ha Concert (08.03.07) | | |



Abb. A1: Fotografische Darstellung der Maissorte Oldham zum 1. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhackler); VS I

Tab. A3: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte Oldham zum 1. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseleinstellungen (Parzellenhackler); VS I

| Häckseleinstellung | | fein | mittel | grob |
|---|--|------------------|-------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g | 5 x 10 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 20342 | 17207 | 8297 |
| <i>Partikellänge</i> | | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 1,9 ± 0,2 | 1,8 ± 0,2 | 1,5 ± 0,2 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 61,5 | 63,3 | 56,6 |
| mittlere Partikellänge (50 %) ¹⁾ | [mm] | 7,7 ± 0,7 | 10,1 ± 0,5 | 17,3 ± 1,8 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 5,0 ± 0,3 | 5,9 ± 0,1 | 11,2 ± 0,8 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 11,7 ± 1,4 | 17,2 ± 1,8 | 24,9 ± 2,7 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 6,7 ± 1,1 | 11,3 ± 1,7 | 13,6 ± 2,1 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 15,1 ± 2,3 | 10,0 ± 2,5 | 1,6 ± 1,5 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 2,3 ± 1,6 | 11,3 ± 4,1 | 24,6 ± 7,2 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 3,9 ± 0,3 | 4,6 ± 0,2 | 8,2 ± 0,7 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 2,2 ± 0,2 | 2,3 ± 0,1 | 4,5 ± 0,3 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 5,9 ± 0,5 | 8,0 ± 0,9 | 12,5 ± 1,4 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 3,7 ± 0,4 | 5,7 ± 1,0 | 8,0 ± 1,2 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 2,3 | 2,6 | 2,7 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 18,1 ± 3,9 | 27,4 ± 2,3 | 89,0 ± 14,8 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 8,8 ± 0,8 | 10,1 ± 0,7 | 35,7 ± 5,0 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 39,4 ± 9,4 | 79,2 ± 18,3 | 182,4 ± 38,1 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 30,6 ± 9,1 | 69,0 ± 17,8 | 146,7 ± 35,4 |
| spez. proj. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 110,1 ± 4,1 | 109,5 ± 8,2 | 94,9 ± 6,7 |

¹⁾ flächengewichtet; dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen



Abb. A1: Fotografische Darstellung der Maissorte Oldham zum 2. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhäcksler); VS I

Tab. A4: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte Oldham zum 2. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseleinstellungen (Parzellenhäcksler); VS I

| Häckseleinstellung | | fein | mittel | grob |
|--|--|------------------|-------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g | 5 x 10 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 30227 | 22398 | 11211 |
| <i>Partikellänge</i> | | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 1,5 ± 0,1 | 1,3 ± 0,2 | 1,3 ± 0,1 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 62,6 | 52,3 | 69,9 |
| mittlere Partikellänge (50 %) ¹⁾ | [mm] | 6,7 ± 0,4 | 11,7 ± 0,9 | 15,6 ± 2,6 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 4,1 ± 0,2 | 6,2 ± 0,4 | 9,7 ± 1,8 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 10,7 ± 0,7 | 19,9 ± 1,5 | 23,4 ± 3,3 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 6,6 ± 0,5 | 13,6 ± 1,2 | 13,7 ± 1,9 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 23,5 ± 2,4 | 13,2 ± 0,7 | 4,5 ± 1,7 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 2,1 ± 0,9 | 15,7 ± 2,7 | 21,5 ± 7,9 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 3,3 ± 0,3 | 4,8 ± 0,6 | 7,2 ± 1,1 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 1,9 ± 0,1 | 2,2 ± 0,2 | 3,7 ± 0,7 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 5,3 ± 0,4 | 8,7 ± 1,0 | 11,3 ± 1,6 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 3,4 ± 0,3 | 6,6 ± 0,9 | 7,6 ± 1,0 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 2,2 | 2,7 | 2,6 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 13,4 ± 1,8 | 34,0 ± 6,1 | 72,8 ± 24,7 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 7,7 ± 0,9 | 9,9 ± 0,9 | 28,0 ± 8,7 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 30,7 ± 4,5 | 100,2 ± 18,3 | 158,2 ± 47,6 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 23,0 ± 4,1 | 90,3 ± 17,6 | 130,3 ± 39,1 |
| spez. proj. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 98,3 ± 7,8 | 97,4 ± 13,2 | 79,7 ± 7,5 |

¹⁾ flächengewichtet; dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen



Abb. A2: Fotografische Darstellung der Maissorte Oldham zum 3. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhackslers); VS I

Tab. A5: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte Oldham zum 3. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseleinstellungen (Parzellenhackslers); VS I

| Häckseleinstellung | | fein | mittel | grob |
|--|--|------------------|-------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g | 5 x 10 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 50205 | 21845 | 9748 |
| <i>Partikellänge</i> | | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 1,2 ± 0,0 | 1,4 ± 0,2 | 1,6 ± 0,2 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 47,9 | 89,2 | 67,4 |
| mittlere Partikellänge (50 %)¹⁾ | [mm] | 6,4 ± 0,5 | 12,3 ± 1,5 | 15,4 ± 0,9 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 3,6 ± 0,3 | 6,6 ± 1,0 | 9,9 ± 0,6 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 10,6 ± 0,8 | 21,4 ± 2,9 | 22,7 ± 1,9 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 7,0 ± 0,5 | 14,8 ± 2,0 | 12,8 ± 2,0 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 29,1 ± 2,9 | 10,4 ± 5,1 | 3,5 ± 2,1 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 2,1 ± 0,9 | 18,6 ± 5,2 | 18,9 ± 5,3 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 3,1 ± 0,2 | 5,2 ± 0,7 | 6,8 ± 0,8 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 1,6 ± 0,1 | 2,5 ± 0,4 | 3,7 ± 0,5 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 5,4 ± 0,2 | 9,1 ± 0,9 | 10,4 ± 1,0 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 3,8 ± 0,1 | 6,6 ± 0,6 | 6,7 ± 0,7 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 2,2 | 2,7 | 2,8 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 12,5 ± 1,7 | 40,8 ± 10,4 | 68,0 ± 7,9 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 5,9 ± 0,9 | 12,6 ± 3,4 | 27,5 ± 4,5 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 32,1 ± 3,8 | 118,9 ± 27,6 | 138,7 ± 22,0 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 26,2 ± 4,3 | 106,4 ± 24,5 | 111,2 ± 22,1 |
| spez. proj. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 79,9 ± 2,8 | 72,1 ± 5,7 | 53,5 ± 4,8 |

¹⁾ flächengewichtet; dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen



Abb. A3: Fotografische Darstellung der Maissorte LG3237 zum 1. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhackslers); VS I

Tab. A6: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte LG3237 zum 1. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseleinstellungen (Parzellenhackslers); VS I

| Häckseleinstellung | | fein | mittel | grob |
|---|--|------------------|------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g | 5 x 10 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 28667 | 27306 | 13759 |
| <i>Partikellänge</i> | | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 1,6 ± 0,1 | 1,4 ± 0,1 | 1,3 ± 0,2 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 77,0 | 60,6 | 68,0 |
| mittlere Partikellänge (50 %) ¹⁾ | [mm] | 7,4 ± 0,4 | 9,8 ± 1,3 | 14,4 ± 0,7 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 4,5 ± 0,2 | 5,2 ± 0,6 | 8,8 ± 0,5 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 12,1 ± 1,3 | 17,1 ± 1,7 | 21,1 ± 1,6 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 7,6 ± 1,1 | 11,9 ± 1,2 | 12,2 ± 1,6 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 20,5 ± 1,7 | 17,5 ± 2,2 | 7,1 ± 2,9 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 3,8 ± 2,5 | 11,7 ± 2,4 | 14,6 ± 5,4 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 3,4 ± 0,2 | 3,7 ± 0,5 | 6,3 ± 0,3 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 1,8 ± 0,1 | 1,7 ± 0,2 | 3,0 ± 0,2 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 5,6 ± 0,5 | 7,0 ± 0,7 | 10,1 ± 0,5 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 3,8 ± 0,5 | 5,3 ± 0,6 | 7,1 ± 0,5 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 2,5 | 2,8 | 2,6 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 15,8 ± 2,1 | 22,7 ± 6,8 | 56,7 ± 5,5 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 6,7 ± 0,8 | 9,4 ± 3,4 | 20,8 ± 2,7 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 38,6 ± 7,2 | 66,2 ± 14,8 | 122,1 ± 14,4 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 31,9 ± 6,6 | 56,8 ± 15,0 | 101,3 ± 14,2 |
| spez. proj. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 101,3 ± 11,1 | 98,9 ± 13,1 | 77,6 ± 10,2 |

¹⁾ flächengewichtet; dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen



Abb. A4: Fotografische Darstellung der Maissorte LG3237 zum 2. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhäcksler); VS I

Tab. A7: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte LG3237 zum 2. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseleinstellungen (Parzellenhäcksler); VS I

| Häckseleinstellung | | fein | mittel | grob |
|--|--|------------------|------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g | 5 x 10 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 35676 | 35878 | 19108 |
| <i>Partikellänge</i> | | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 1,3 ± 0,1 | 1,2 ± 0,0 | 1,1 ± 0,1 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 50,7 | 63,4 | 67,7 |
| mittlere Partikellänge (50 %) ¹⁾ | [mm] | 6,6 ± 0,3 | 9,5 ± 0,6 | 15,1 ± 2,4 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 4,0 ± 0,2 | 4,7 ± 0,4 | 8,2 ± 1,6 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 10,5 ± 0,7 | 17,5 ± 0,8 | 24,1 ± 2,1 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 6,5 ± 0,5 | 12,8 ± 0,7 | 15,9 ± 0,9 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 25,1 ± 2,0 | 20,7 ± 2,4 | 11,3 ± 2,5 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 1,3 ± 0,8 | 13,1 ± 1,3 | 23,5 ± 4,2 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 3,2 ± 0,2 | 3,4 ± 0,3 | 6,0 ± 1,4 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 1,7 ± 0,1 | 1,4 ± 0,1 | 2,7 ± 0,7 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 5,2 ± 0,2 | 6,8 ± 0,7 | 10,2 ± 2,2 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 3,5 ± 0,2 | 5,4 ± 0,6 | 7,5 ± 1,6 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 2,2 | 2,8 | 2,7 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 13,2 ± 1,5 | 21,0 ± 3,5 | 59,2 ± 19,7 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 6,7 ± 0,7 | 9,0 ± 4,4 | 18,1 ± 6,5 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 30,3 ± 4,1 | 66,5 ± 9,0 | 148,3 ± 43,3 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 23,6 ± 3,8 | 57,5 ± 9,2 | 130,2 ± 37,2 |
| spez. proj. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 91,5 ± 8,7 | 96,7 ± 10,4 | 73,9 ± 12,2 |

¹⁾ flächengewichtet; dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen



Abb. A5: Fotografische Darstellung der Maissorte LG3237 zum 3. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhackslers); VS I

Tab. A8: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte LG3237 zum 3. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseleinstellungen (Parzellenhackslers); VS I

| Häckseleinstellung | | fein | mittel | grob |
|---|--|------------------|------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g | 5 x 10 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 52576 | 39902 | 16759 |
| <i>Partikellänge</i> | | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 1,1 ± 0,1 | 1,1 ± 0,1 | 1,2 ± 0,1 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 49,4 | 70,7 | 103,7 |
| mittlere Partikellänge (50 %) ¹⁾ | [mm] | 6,1 ± 0,5 | 9,8 ± 1,0 | 15,3 ± 1,0 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 3,3 ± 0,2 | 4,9 ± 0,6 | 8,8 ± 0,8 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 10,3 ± 0,9 | 17,5 ± 1,5 | 24,7 ± 1,9 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 6,9 ± 0,8 | 12,6 ± 1,2 | 15,9 ± 1,9 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 31,7 ± 2,8 | 20,3 ± 3,1 | 5,4 ± 2,5 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 1,7 ± 1,0 | 12,0 ± 2,6 | 24,0 ± 4,1 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 2,8 ± 0,2 | 3,6 ± 0,6 | 5,7 ± 0,7 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 1,4 ± 0,1 | 1,5 ± 0,3 | 2,6 ± 0,4 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 4,9 ± 0,5 | 7,0 ± 0,9 | 10,2 ± 0,9 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 3,6 ± 0,4 | 5,5 ± 0,6 | 7,6 ± 0,6 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 2,2 | 2,8 | 3,1 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 11,1 ± 2,1 | 23,3 ± 6,4 | 60,6 ± 4,3 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 3,6 ± 0,9 | 6,0 ± 1,6 | 20,3 ± 2,0 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 29,3 ± 5,1 | 70,9 ± 14,5 | 142,2 ± 21,2 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 25,7 ± 4,5 | 64,8 ± 13,2 | 121,9 ± 21,6 |
| spez. proj. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 90,5 ± 6,4 | 86,7 ± 6,5 | 74,5 ± 12,7 |

¹⁾ flächengewichtet; dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen



Abb. A6: Fotografische Darstellung der Maissorte Benicia zum 1. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhackslers); VS I

Tab. A9: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte Benicia zum 1. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseleinstellungen (Parzellenhackslers); VS I

| Häckseleinstellung | | fein | mittel | grob |
|---|--|------------------|-------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g | 5 x 10 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 25696 | 17411 | 8646 |
| Partikellänge | | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 1,8 ± 0,1 | 1,7 ± 0,2 | 1,6 ± 0,4 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 63,4 | 56,8 | 99,5 |
| mittlere Partikellänge (50 %) ¹⁾ | [mm] | 7,3 ± 0,4 | 10,7 ± 0,9 | 16,8 ± 1,5 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 4,5 ± 0,3 | 6,3 ± 0,5 | 10,8 ± 1,1 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 11,5 ± 0,7 | 17,3 ± 2,0 | 25,1 ± 2,5 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 6,9 ± 0,6 | 11,0 ± 1,5 | 14,4 ± 1,8 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 19,5 ± 2,7 | 10,7 ± 2,3 | 1,7 ± 2,0 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 2,3 ± 1,1 | 10,2 ± 4,2 | 25,0 ± 5,8 |
| Partikelbreite | | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 3,5 ± 0,2 | 4,4 ± 0,3 | 7,5 ± 1,1 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 2,0 ± 0,2 | 2,2 ± 0,2 | 4,2 ± 0,7 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 5,5 ± 0,2 | 7,3 ± 0,6 | 11,3 ± 1,4 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 3,6 ± 0,1 | 5,1 ± 0,4 | 7,1 ± 0,8 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 2,4 | 2,8 | 2,7 |
| Projizierte Oberfläche | | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 15,8 ± 2,4 | 29,8 ± 3,7 | 78,5 ± 14,4 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 7,4 ± 1,1 | 10,1 ± 1,3 | 31,7 ± 5,2 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 35,5 ± 4,9 | 73,4 ± 11,1 | 159,9 ± 33,9 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 28,1 ± 5,0 | 63,3 ± 10,0 | 128,1 ± 29,6 |
| spez. proj. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 111,5 ± 8,3 | 104,6 ± 8,4 | 97,8 ± 8,2 |

¹⁾ flächengewichtet; dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen



Abb. A7: Fotografische Darstellung der Maissorte Benicia zum 2. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhackslers); VS I

Tab. A10: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte Benicia zum 2. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseleinstellungen (Parzellenhackslers); VS I

| Häckseleinstellung | | fein | mittel | grob |
|---|--|------------------|-------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g | 5 x 10 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 26570 | 17100 | 11826 |
| <i>Partikellänge</i> | | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 1,5 ± 0,1 | 1,6 ± 0,1 | 1,5 ± 0,5 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 72,7 | 83,1 | 113,0 |
| mittlere Partikellänge (50 %) ¹⁾ | [mm] | 7,1 ± 0,5 | 11,0 ± 1,3 | 17,4 ± 1,9 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 4,3 ± 0,3 | 6,2 ± 0,5 | 10,6 ± 1,5 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 11,1 ± 1,2 | 18,5 ± 3,3 | 26,0 ± 3,0 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 6,8 ± 1,2 | 12,3 ± 2,8 | 15,4 ± 1,7 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 22,0 ± 2,8 | 11,1 ± 2,0 | 4,9 ± 3,2 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 2,5 ± 1,5 | 12,9 ± 6,6 | 27,0 ± 7,0 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 3,5 ± 0,3 | 4,7 ± 0,7 | 6,7 ± 1,2 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 1,9 ± 0,2 | 2,3 ± 0,3 | 3,4 ± 0,8 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 5,4 ± 0,5 | 8,3 ± 1,2 | 10,9 ± 1,5 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 3,5 ± 0,4 | 6,0 ± 0,9 | 7,5 ± 0,9 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 2,2 | 2,6 | 2,7 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 15,0 ± 2,6 | 32,4 ± 8,6 | 76,6 ± 17,5 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 7,7 ± 0,6 | 10,9 ± 1,3 | 29,2 ± 7,0 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 34,4 ± 7,5 | 93,5 ± 39,2 | 164,3 ± 42,1 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 26,8 ± 7,2 | 82,7 ± 38,0 | 135,0 ± 35,5 |
| spez. proj. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 90,2 ± 7,0 | 88,6 ± 5,5 | 80,9 ± 7,7 |

¹⁾ flächengewichtet; dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen



Abb. A8: Fotografische Darstellung der Maissorte Benicia zum 3. Erntetermin bei den Häckseleinstellungen a) fein, b) mittel, c) grob (Parzellenhäcksler); VS I

Tab. A11: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung der Maissorte Benicia zum 3. Erntetermin bei unterschiedlichen Häckseleinstellungen (Parzellenhäcksler); VS I

| Häckseleinstellung | | fein | mittel | grob |
|--|--|------------------|------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g | 5 x 10 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 36555 | 31585 | 9541 |
| <i>Partikellänge</i> | | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 1,3 ± 0,1 | 1,2 ± 0,1 | 1,6 ± 0,2 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 65,3 | 62,3 | 72,1 |
| mittlere Partikellänge (50 %) ¹⁾ | [mm] | 7,3 ± 0,9 | 9,3 ± 0,9 | 15,0 ± 1,8 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 4,0 ± 0,4 | 4,8 ± 0,4 | 9,3 ± 0,9 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 12,7 ± 2,1 | 16,1 ± 1,7 | 22,8 ± 3,5 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 8,6 ± 1,8 | 11,3 ± 1,4 | 13,5 ± 2,6 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 25,1 ± 4,3 | 20,1 ± 2,2 | 3,1 ± 2,4 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 5,4 ± 3,3 | 9,4 ± 3,1 | 19,7 ± 8,4 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 3,3 ± 0,3 | 3,9 ± 0,4 | 6,5 ± 0,9 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 1,7 ± 0,2 | 1,7 ± 0,2 | 3,3 ± 0,4 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 5,7 ± 0,6 | 7,2 ± 0,8 | 10,6 ± 1,5 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 3,9 ± 0,5 | 5,5 ± 0,7 | 7,3 ± 1,1 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 2,3 | 2,5 | 2,8 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 15,6 ± 3,2 | 22,7 ± 4,4 | 62,8 ± 15,7 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 7,0 ± 1,4 | 6,5 ± 0,9 | 23,0 ± 5,2 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 41,1 ± 10,0 | 68,4 ± 15,3 | 143,5 ± 38,7 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 34,2 ± 9,3 | 61,9 ± 14,6 | 120,5 ± 34,3 |
| spez. proj. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 96,6 ± 3,6 | 83,3 ± 7,4 | 64,0 ± 4,9 |

¹⁾ flächengewichtet; dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen

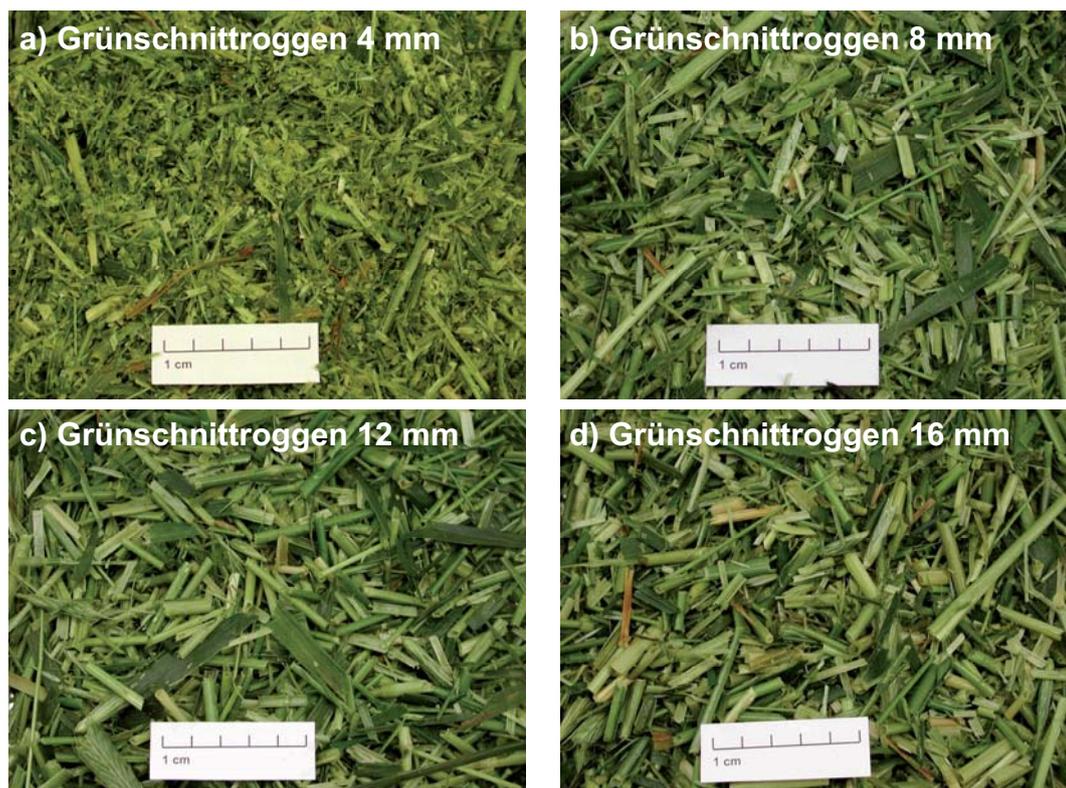


Abb. A9: Fotografische Darstellung des gehäckselten Grünschnitttroggens bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm, b) 6 mm, c) 12 mm und d) 16 mm (Laborhäcksler); VS II

Tab. A12: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Grünschnitttroggen bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Laborhäcksler); VS II

| theoretische Häcksellänge | [mm] | 4 | 8 | 12 | 16 |
|--|--|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g | 5 x 15 g | 5 x 20 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 38817 | 7660 | 4914 | 4775 |
| <i>Partikellänge</i> | | | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 2,8 ± 0,3 | 6,2 ± 0,5 | 7,5 ± 0,7 | 5,9 ± 0,9 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 85,9 | 99,7 | 100,7 | 103,5 |
| mittlere Partikellänge (50 %) ¹⁾ | [mm] | 6,6 ± 0,9 | 13,6 ± 1,4 | 19,4 ± 1,4 | 21,5 ± 1,2 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 4,1 ± 0,5 | 9,0 ± 0,8 | 13,2 ± 1,0 | 15,5 ± 1,4 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 11,6 ± 1,3 | 21,3 ± 2,0 | 28,7 ± 2,2 | 30,1 ± 2,4 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 7,5 ± 1,0 | 12,3 ± 1,4 | 15,5 ± 2,1 | 14,6 ± 2,1 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 21,9 ± 4,4 | 2,0 ± 0,4 | 1,2 ± 0,3 | 1,6 ± 0,5 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 5,6 ± 1,8 | 17,8 ± 3,6 | 31,0 ± 4,7 | 35,3 ± 6,0 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 2,3 ± 0,5 | 2,9 ± 0,2 | 3,0 ± 0,1 | 3,4 ± 0,1 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 1,4 ± 0,3 | 1,9 ± 0,1 | 2,0 ± 0,1 | 2,2 ± 0,1 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 3,5 ± 0,8 | 4,2 ± 0,3 | 4,0 ± 0,2 | 4,8 ± 0,2 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 2,1 ± 0,6 | 2,4 ± 0,2 | 2,0 ± 0,3 | 2,6 ± 0,1 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 5,2 | 8,9 | 10,9 | 12,6 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 9,9 ± 0,6 | 31,8 ± 3,4 | 59,0 ± 7,0 | 62,7 ± 5,5 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 6,3 ± 0,6 | 17,7 ± 2,2 | 30,9 ± 5,1 | 34,4 ± 5,2 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 20,0 ± 0,6 | 57,2 ± 5,7 | 102,2 ± 7,3 | 102,5 ± 10,3 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 13,6 ± 0,6 | 39,5 ± 4,3 | 71,3 ± 6,5 | 68,1 ± 11,6 |
| spez. proj. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 143,6 ± 10,6 | 95,0 ± 6,8 | 73,2 ± 9,0 | 47,0 ± 2,6 |

¹⁾ flächengewichtet; dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen



Abb. A10: Fotografische Darstellung des gehäckselten Sudangrases bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm, b) 6 mm, c) 8 mm, d) 12 mm und e) 16 mm (Laborhäcksler); VS II

Tab. A13: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Sudangras bei unterschiedlicher theoretischer Häcksel-
länge (Laborhäcksler); VS II

| theoretische Häcksellänge [mm] | 4 | 6 | 8 | 12 | 16 |
|--|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | 5 x 10 g | 5 x 10 g | 5 x 10 g | 5 x 20 g | 5 x 20 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | 24914 | 9010 | 10461 | 6731 | 3555 |
| Partikellänge | | | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | 1,9 ± 0,4 | 2,8 ± 0,5 | 1,8 ± 0,2 | 1,7 ± 0,4 | 2,6 ± 1,3 |
| längstes Partikel (gemessen) | 41,4 | 53,6 | 74,1 | 88,2 | 86,5 |
| mittlere Partikellänge (50 %) ¹⁾ | 7,6 ± 0,4 | 10,0 ± 0,2 | 11,9 ± 0,9 | 20,9 ± 1,6 | 26,4 ± 1,7 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | 4,7 ± 0,2 | 7,1 ± 0,2 | 7,9 ± 0,5 | 14,8 ± 1,4 | 19,9 ± 1,0 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | 11,8 ± 0,7 | 14,4 ± 0,5 | 17,9 ± 1,9 | 28,1 ± 2,5 | 33,5 ± 3,6 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | 7,0 ± 0,6 | 7,3 ± 0,5 | 10,0 ± 1,6 | 13,3 ± 1,3 | 13,6 ± 3,1 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | 16,9 ± 1,9 | 5,4 ± 0,6 | 5,7 ± 0,5 | 2,5 ± 0,8 | 1,5 ± 0,3 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | 2,6 ± 0,6 | 4,6 ± 1,4 | 10,7 ± 4,1 | 31,5 ± 6,4 | 56,5 ± 8,4 |
| Partikelbreite | | | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | 3,5 ± 0,2 | 4,2 ± 0,2 | 4,7 ± 0,5 | 6,0 ± 0,6 | 6,9 ± 0,7 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | 2,0 ± 0,1 | 2,5 ± 0,2 | 2,6 ± 0,3 | 3,4 ± 0,3 | 4,0 ± 0,4 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | 5,5 ± 0,4 | 6,3 ± 0,2 | 7,4 ± 0,8 | 9,9 ± 1,2 | 10,9 ± 0,9 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | 3,5 ± 0,4 | 3,8 ± 0,2 | 4,8 ± 0,5 | 6,5 ± 1,0 | 7,0 ± 0,6 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | 2,9 | 3,7 | 3,5 | 3,6 | 4,4 |
| Projizierte Oberfläche | | | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | 15,3 ± 1,6 | 28,1 ± 1,8 | 37,6 ± 6,4 | 99,2 ± 20,0 | 149,3 ± 15,4 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | 7,6 ± 0,6 | 14,0 ± 1,4 | 16,7 ± 2,4 | 47,8 ± 10,1 | 76,6 ± 5,3 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | 31,8 ± 3,8 | 53,0 ± 3,7 | 77,8 ± 13,5 | 181,0 ± 38,6 | 255,6 ± 37,5 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | 24,2 ± 4,1 | 39,0 ± 3,6 | 61,1 ± 11,5 | 133,2 ± 30,8 | 179,0 ± 32,9 |
| spez. projiz. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 79,2 ± 5,4 | 58,1 ± 7,5 | 43,9 ± 5,2 | 38,6 ± 6,3 |

¹⁾ flächengewichtet dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen

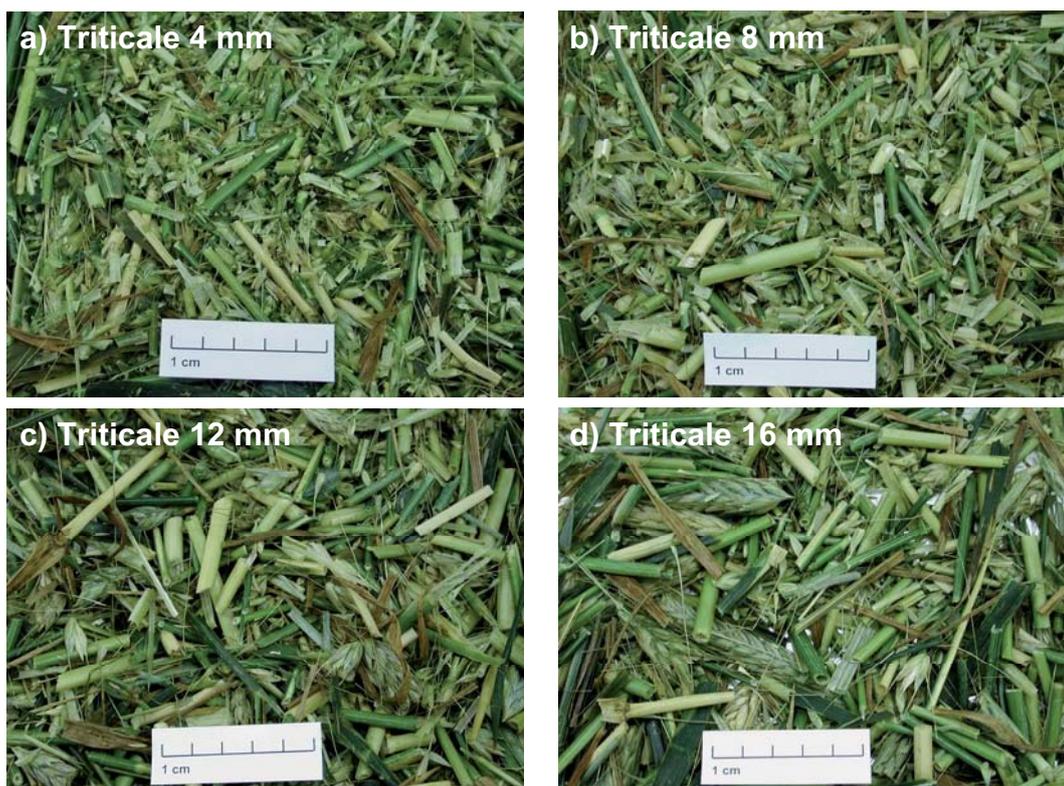


Abb. A11: Fotografische Darstellung der gehäckselten Triticale bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm, b) 8 mm, c) 12 mm und d) 16 mm (Laborhäcksler); VS II

Tab. A14: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Triticale bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Laborhäcksler); VS II

| theoretische Häcksellänge | [mm] | 4 | 8 | 12 | 16 |
|--|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 15 g | 5 x 20 g | 5 x 20 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 7304 | 6775 | 4571 | 4611 |
| <i>Partikellänge</i> | | | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 5,7 ± 0,5 | 7,6 ± 0,3 | 10,9 ± 0,6 | 8,5 ± 0,7 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 108,5 | 103,7 | 101,3 | 153,9 |
| mittlere Partikellänge (50 %) ¹⁾ | [mm] | 13,3 ± 2,0 | 15,3 ± 1,1 | 25,3 ± 2,6 | 33,1 ± 2,8 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 8,3 ± 1,0 | 10,1 ± 0,6 | 17,7 ± 1,4 | 22,3 ± 2,5 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 22,4 ± 3,9 | 24,4 ± 2,2 | 35,5 ± 4,4 | 44,6 ± 4,3 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 14,1 ± 3,0 | 14,3 ± 2,0 | 17,8 ± 3,1 | 22,2 ± 2,8 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 2,3 ± 0,7 | 1,7 ± 1,0 | 0,7 ± 0,1 | 1,0 ± 0,2 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 20,2 ± 6,2 | 21,0 ± 3,4 | 48,8 ± 8,5 | 72,7 ± 6,2 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 3,1 ± 0,4 | 3,2 ± 0,3 | 3,3 ± 0,2 | 3,7 ± 0,1 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 1,9 ± 0,2 | 1,9 ± 0,3 | 1,9 ± 0,1 | 2,5 ± 0,3 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 4,7 ± 0,7 | 5,0 ± 0,3 | 5,3 ± 0,5 | 5,6 ± 0,2 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 2,8 ± 0,5 | 3,2 ± 0,4 | 3,4 ± 0,4 | 3,1 ± 0,1 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 9,9 | 12,2 | 21,6 | 20,0 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 28,9 ± 5,9 | 39,5 ± 4,6 | 85,2 ± 9,6 | 127,2 ± 17,7 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 18,4 ± 4,4 | 20,3 ± 2,2 | 44,0 ± 6,3 | 62,8 ± 13,3 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 60,9 ± 15,0 | 81,3 ± 9,6 | 143,1 ± 17,4 | 205,0 ± 23,5 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 42,5 ± 12,8 | 61,0 ± 11,3 | 99,0 ± 12,5 | 142,1 ± 15,2 |
| spez. proj. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 60,3 ± 6,0 | 49,5 ± 3,3 | 43,7 ± 3,1 | 35,2 ± 2,1 |

¹⁾ flächengewichtet, dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen



Abb. A12: Fotografische Darstellung des gehäckselten Mais bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 8 mm (Feldhäcksler); VS III

Tab. A15: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Mais bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Feldhäcksler); VS III

| theoretische Häcksellänge | [mm] | 4 | 8 |
|---|--|-------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 13238 | 11368 |
| <i>Partikellänge</i> | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 1,5 ± 0,1 | 1,5 ± 0,1 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 55,8 | 52,8 |
| mittlere Partikellänge (50 %)¹⁾ | [mm] | 12,3 ± 0,3 | 15,0 ± 0,8 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 8,3 ± 0,7 | 10,5 ± 0,5 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 16,8 ± 0,7 | 20,6 ± 2,2 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 8,5 ± 1,3 | 10,1 ± 2,0 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 9,5 ± 1,4 | 6,3 ± 0,6 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 7,0 ± 3,5 | 13,3 ± 4,9 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 6,3 ± 0,4 | 7,3 ± 0,7 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 3,5 ± 0,4 | 4,1 ± 0,4 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 9,4 ± 0,3 | 10,7 ± 1,0 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 5,9 ± 0,3 | 6,6 ± 0,6 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 3,9 | 4,4 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 45,8 ± 3,5 | 66,4 ± 7,9 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 19,0 ± 3,1 | 29,1 ± 3,1 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 92,9 ± 7,7 | 130,7 ± 20,2 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 73,9 ± 9,4 | 101,6 ± 17,5 |
| spez. projiz. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 57,3 ± 3,0 | 54,3 ± 6,0 |

¹⁾ flächengewichtet dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen

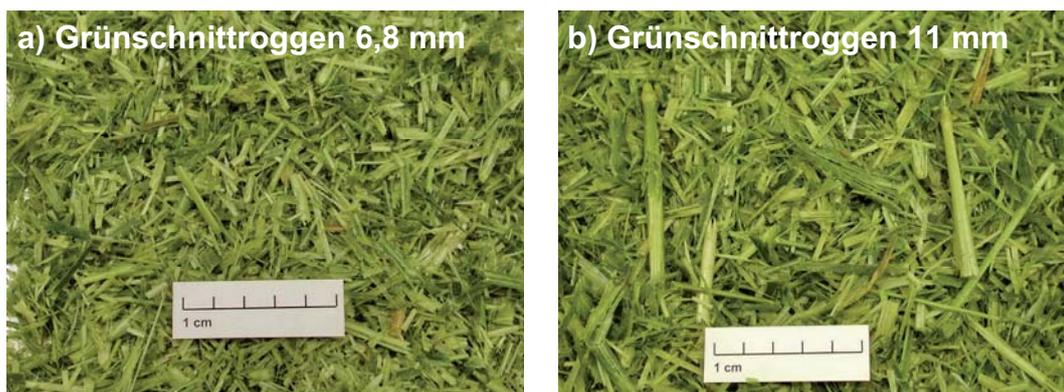


Abb. A13: Fotografische Darstellung des gehäckselten Grünschnittroggens bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 6,8 mm und b) 11 mm (Feldhäcksler); VS III

Tab. A16: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Grünschnittroggen bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Feldhäcksler); VS III

| theoretische Häcksellänge | [mm] | 6,8 | 11 |
|---|--|-------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 28739 | 17667 |
| <i>Partikellänge</i> | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 2,8 ± 0,3 | 3,2 ± 0,6 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 90,2 | 87,0 |
| mittlere Partikellänge (50 %)¹⁾ | [mm] | 11,0 ± 0,5 | 14,2 ± 0,7 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 7,3 ± 0,4 | 10,6 ± 0,6 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 17,5 ± 1,2 | 20,8 ± 2,3 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 10,1 ± 0,9 | 10,2 ± 2,0 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 6,1 ± 1,4 | 3,8 ± 1,4 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 11,5 ± 2,1 | 15,9 ± 5,2 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 1,7 ± 0,2 | 1,9 ± 0,2 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 1,1 ± 0,1 | 1,2 ± 0,1 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 2,9 ± 0,3 | 3,3 ± 0,3 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 1,8 ± 0,2 | 2,1 ± 0,2 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 7,9 | 8,9 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 16,6 ± 2,0 | 26,2 ± 3,2 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 9,6 ± 0,8 | 17,5 ± 2,1 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 34,7 ± 5,0 | 49,5 ± 9,3 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 25,1 ± 4,3 | 31,9 ± 7,7 |
| spez. projiz. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 151,8 ± 4,7 | 134,8 ± 4,7 |

¹⁾ flächengewichtet, dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen



Abb. A14: Fotografische Darstellung des gehäckselten Sudangrases bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 7 mm (Feldhäcksler); VS III

Tab. A17: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Sudangras bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Feldhäcksler); VS III

| theoretische Häcksellänge | [mm] | 4 | 7 |
|---|--|-------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 45605 | 26993 |
| <i>Partikellänge</i> | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 1,1 ± 0,2 | 1,2 ± 0,1 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 75,4 | 114,3 |
| mittlere Partikellänge (50 %)¹⁾ | [mm] | 10,6 ± 0,9 | 14,4 ± 1,0 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 6,0 ± 0,5 | 8,6 ± 0,6 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 16,9 ± 2,0 | 24,0 ± 1,9 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 10,9 ± 1,7 | 15,3 ± 1,6 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 14,6 ± 2,4 | 8,2 ± 1,4 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 10,4 ± 4,5 | 21,5 ± 3,3 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 2,3 ± 0,1 | 2,7 ± 0,1 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 1,2 ± 0,1 | 1,4 ± 0,1 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 4,2 ± 0,2 | 4,7 ± 0,3 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 3,1 ± 0,1 | 3,3 ± 0,2 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 3,7 | 4,6 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 19,6 ± 3,5 | 34,1 ± 4,8 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 8,2 ± 1,1 | 14,8 ± 2,1 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 44,7 ± 7,2 | 76,6 ± 14,0 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 36,6 ± 6,6 | 61,8 ± 13,9 |
| spez. projiz. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 116,7 ± 5,6 | 102,4 ± 6,5 |

¹⁾ flächengewichtet, dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen



Abb. A15: Fotografische Darstellung der gehäckselten Triticale bei einer theoretischen Häcksellänge von a) 4 mm und b) 8 mm (Feldhäcksler); VS III

Tab. A18: Ergebnisse der bildanalytischen Vermessung von Triticale bei unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Feldhäcksler); VS III

| theoretische Häcksellänge | [mm] | 4 | 8 |
|--|--|------------------|-------------------|
| n x gemessene Probenmasse | | 5 x 10 g | 5 x 10 g |
| Anzahl gezählter Partikel gesamt | | 20465 | 14572 |
| <i>Partikellänge</i> | | | |
| 50 % Partikelanzahl bei Länge | [mm] | 3,4 ± 0,4 | 3,5 ± 0,4 |
| längstes Partikel (gemessen) | [mm] | 77,2 | 93,9 |
| mittlere Partikellänge (50 %) ¹⁾ | [mm] | 8,8 ± 0,7 | 12,7 ± 1,4 |
| Unteres Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 5,7 ± 0,5 | 8,6 ± 0,6 |
| Oberes Quartil Partikellänge ¹⁾ | [mm] | 14,2 ± 1,1 | 21,3 ± 3,4 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 8,5 ± 0,8 | 12,7 ± 2,8 |
| Feinanteil < 4 mm Länge ¹⁾ | [%] | 8,8 ± 2,2 | 4,2 ± 0,5 |
| Grobanteil > 25 mm Länge ¹⁾ | [%] | 6,8 ± 1,8 | 19,0 ± 6,5 |
| <i>Partikelbreite</i> | | | |
| mittlere Partikelbreite (50 %) ¹⁾ | [mm] | 2,8 ± 0,5 | 2,7 ± 0,1 |
| Unteres Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 1,6 ± 0,3 | 1,5 ± 0,1 |
| Oberes Quartil Partikelbreite ¹⁾ | [mm] | 4,4 ± 0,7 | 4,3 ± 0,2 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm] | 2,8 ± 0,5 | 2,8 ± 0,1 |
| mittleres Verhältnis Länge : Breite | [-] | 6,5 | 8,3 |
| <i>Projizierte Oberfläche</i> | | | |
| mittlere Oberfläche (50 %) ¹⁾ | [mm ²] | 16,1 ± 2,5 | 26,7 ± 4,2 |
| Unteres Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 9,2 ± 1,0 | 14,7 ± 2,3 |
| Oberes Quartil Oberfläche ¹⁾ | [mm ²] | 32,5 ± 4,3 | 57,3 ± 11,2 |
| Interquartilabstand ¹⁾ | [mm ²] | 23,3 ± 3,4 | 42,4 ± 11,8 |
| spez. projiz. Oberfläche | [dm ² *100g ⁻¹ TM] | 76,8 ± 8,5 | 66,8 ± 6,4 |

¹⁾ flächengewichtet, dargestellt sind $\bar{x} \pm s$ der Messwiederholungen

Tab. A19: Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Mais der Sorte Oldham bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I

| Siliegut/ Silage | Erntetermin | Häcksellänge | TM [%] | oTM [% TM] | XP [% TM] | XL [% TM] | XF [% TM] | NfE [% TM] | Zucker [% TM] | Stärke [% TM] | NDF [% TM] | ADF [% TM] | ADL [% TM] | NH ₃ -N [% N _{Ges}] | C/N |
|---------------------|----------------|--------------|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---|-----|
| Siliegut | 1. Erntetermin | fein | 24,1 | 95,3 | 8,2 | 3,1 | 20,2 | 63,8 | 15,7 | 18,0 | 38,0 | 22,5 | 3,3 | n.b. | 31 |
| | | mittel | 23,1 | 95,1 | 9,1 | 2,5 | 22,7 | 60,8 | 19,5 | 12,8 | 42,9 | 24,3 | 2,9 | n.b. | 32 |
| | | grob | 24,2 | 95,4 | 9,7 | 2,4 | 19,1 | 64,2 | 18,4 | 16,9 | 40,0 | 22,7 | 3,2 | n.b. | 29 |
| | 2. Erntetermin | fein | 28,8 | 95,7 | 8,5 | 2,8 | 17,9 | 66,5 | 7,9 | 29,4 | 38,8 | 21,9 | 4,2 | n.b. | 33 |
| | | mittel | 27,3 | 95,1 | 8,3 | 2,6 | 18,8 | 65,4 | 12,3 | 24,9 | 40,5 | 24,0 | 3,2 | n.b. | 34 |
| | | grob | 27,6 | 94,9 | 8,5 | 2,7 | 20,4 | 63,3 | 10,2 | 20,0 | 42,0 | 24,8 | 4,1 | n.b. | 33 |
| | 3. Erntetermin | fein | 36,2 | 95,3 | 8,3 | 2,8 | 17,5 | 66,7 | 4,1 | 29,6 | 54,4 | 21,0 | 3,0 | n.b. | 34 |
| | | mittel | 34,8 | 94,5 | 7,7 | 2,3 | 20,6 | 63,8 | 6,5 | 21,1 | 51,9 | 24,0 | 2,8 | n.b. | 36 |
| | | grob | 37,6 | 95,4 | 8,2 | 2,7 | 15,8 | 68,8 | 4,8 | 30,2 | 39,9 | 20,4 | 2,9 | n.b. | 34 |
| Silage | 1. Erntetermin | fein | 24,1 ± 0,1 | 95,3 | 9,2 | 3,3 | 20,4 | 62,4 | 7,9 | n.b. | 40,6 | 21,8 | 3,0 | 6,7 | 30 |
| | | mittel | 22,4 ± 0,0 | 94,8 | 8,8 | 2,4 | 23,7 | 59,9 | 11,8 | n.b. | 45,7 | 24,3 | 2,5 | 7,2 | 32 |
| | | grob | 22,4 ± 0,5 | 94,9 | 10,5 | 2,4 | 21,9 | 60,1 | 10,2 | n.b. | 43,5 | 22,5 | 2,1 | 7,4 | 27 |
| | 2. Erntetermin | fein | 28,6 ± 0,2 | 95,5 | 8,7 | 3,4 | 18,1 | 65,4 | 2,9 | n.b. | 31,0 | 19,5 | 2,5 | 6,6 | 31 |
| | | mittel | 26,3 ± 1,2 | 95,3 | 8,2 | 3,1 | 18,2 | 65,9 | 6,0 | n.b. | 37,1 | 22,5 | 2,9 | 5,7 | 35 |
| | | grob | 26,6 ± 0,7 | 95,9 | 8,6 | 2,9 | 19,1 | 65,3 | 7,2 | n.b. | 35,7 | 23,5 | 2,2 | 10,0 | 33 |
| | 3. Erntetermin | fein | 36,2 ± 0,1 | 95,7 | 8,2 | 3,2 | 17,6 | 66,7 | 4,3 | n.b. | 31,0 | 18,1 | 1,9 | 5,9 | 32 |
| | | mittel | 34,8 ± 0,6 | 95,8 | 8,7 | 3,3 | 16,0 | 67,8 | 5,3 | n.b. | 31,1 | 17,0 | 1,7 | 7,2 | 32 |
| | | grob | 36,4 ± 0,6 | 96,0 | 8,8 | 3,2 | 16,0 | 68,0 | 4,7 | n.b. | 30,9 | 17,0 | 1,7 | 6,6 | 31 |

n.b. ... nicht bestimmt

Tab. A20: Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Mais der Sorte LG3237 bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I

| Siliegut/ Silage | Erntetermin | Häcksellänge | TM [%] | oTM [% TM] | XP [% TM] | XL [% TM] | XF [% TM] | NFE [% TM] | Zucker [% TM] | Stärke [% TM] | NDF [% TM] | ADF [% TM] | ADL [% TM] | NH ₃ -N [% N _{Ges.}] | C/N [-] | |
|---------------------|----------------|--------------|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|--|------------|----|
| Siliegut | 1. Erntetermin | fein | 24,0 | 95,4 | 8,4 | 2,6 | 19,0 | 65,3 | 18,3 | 16,3 | 43,9 | 22,9 | 1,8 | n.b. | 33 | |
| | | mittel | 23,7 | 95,2 | 8,1 | 2,1 | 22,0 | 63,0 | 22,1 | 13,4 | 45,0 | 24,1 | 2,1 | n.b. | 34 | |
| | | grob | 24,1 | 95,5 | 8,6 | 2,3 | 19,8 | 64,8 | 19,9 | 16,2 | 44,1 | 23,2 | 2,2 | n.b. | 33 | |
| | 2. Erntetermin | fein | 28,2 | 95,9 | 9,0 | 2,7 | 16,3 | 67,9 | 10,0 | 29,6 | n.b. | n.b. | 22,4 | 3,4 | n.b. | 32 |
| | | mittel | 27,1 | 94,9 | 7,7 | 3,0 | 20,9 | 63,3 | 10,7 | 20,3 | 50,1 | 25,5 | 3,4 | n.b. | 37 | |
| | | grob | 28,8 | 95,9 | 7,2 | 3,2 | 17,6 | 67,9 | 11,7 | 26,9 | 42,0 | 22,9 | 2,7 | n.b. | 39 | |
| | 3. Erntetermin | fein | 37,1 | 95,3 | 7,3 | 3,1 | 18,6 | 66,3 | 4,9 | 25,6 | 50,1 | 20,6 | 2,1 | n.b. | 38 | |
| | | mittel | 36,4 | 94,5 | 7,5 | 2,3 | 17,8 | 66,8 | 6,7 | 32,0 | 44,3 | 22,2 | 2,2 | n.b. | 37 | |
| | | grob | 35,0 | 94,7 | 7,3 | 2,8 | 17,1 | 67,6 | 5,2 | 27,4 | 43,4 | 21,1 | 2,4 | n.b. | 38 | |
| Silage | 1. Erntetermin | fein | 24,0 ± 0,1 | 95,3 | 8,8 | 2,9 | 20,9 | 62,7 | 9,0 | n.b. | 41,5 | 22,5 | 2,5 | 6,9 | 30 | |
| | | mittel | 22,2 ± 0,2 | 95,0 | 8,5 | 2,2 | 22,6 | 61,6 | 14,0 | n.b. | 44,1 | 23,5 | 2,6 | 7,3 | 34 | |
| | | grob | 23,8 ± 0,1 | 95,6 | 9,1 | 2,6 | 20,8 | 63,2 | 12,1 | n.b. | 39,9 | 20,8 | 2,0 | 7,1 | 31 | |
| | 2. Erntetermin | fein | 27,9 ± 0,6 | 95,5 | 8,8 | 3,2 | 17,7 | 65,9 | 5,3 | n.b. | 33,4 | 19,5 | 2,0 | 5,6 | 31 | |
| | | mittel | 25,6 ± 0,6 | 95,4 | 7,8 | 2,9 | 20,4 | 64,2 | 7,6 | n.b. | 36,4 | 22,2 | 3,5 | 7,5 | 37 | |
| | | grob | 27,9 ± 0,7 | 96,1 | 8,1 | 3,5 | 17,8 | 66,6 | 5,8 | n.b. | 33,4 | 21,4 | 2,6 | 7,6 | 35 | |
| | 3. Erntetermin | fein | 36,0 ± 0,1 | 95,9 | 7,9 | 3,1 | 16,5 | 68,5 | 4,7 | n.b. | 31,7 | 17,6 | 2,3 | 6,2 | 33 | |
| | | mittel | 34,5 ± 0,3 | 95,6 | 8,4 | 3,4 | 17,9 | 66,0 | 6,1 | n.b. | 31,6 | 17,8 | 1,8 | 5,9 | 32 | |
| | | grob | 34,8 ± 0,2 | 95,6 | 8,0 | 3,4 | 16,9 | 67,3 | 5,2 | n.b. | 30,7 | 17,9 | 2,2 | 6,8 | 34 | |

n.b. ... nicht bestimmt

Tab. A21: Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Mais der Sorte Benicia bei Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I

| Siliegut/ Silage | Erntetermin | Häcksellänge | TM [%] | oTM [% TM] | XP [% TM] | XL [% TM] | XF [% TM] | NFE [% TM] | Zucker [% TM] | Stärke [% TM] | NDF [% TM] | ADF [% TM] | ADL [% TM] | NH ₃ -N [% N _{Ges}] | C/N |
|---------------------|----------------|--------------|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---|-----|
| Siliegut | 1. Erntetermin | fein | 22,9 | 95,8 | 8,3 | 2,2 | 23,8 | 61,5 | 16,6 | 11,6 | 50,6 | 27,3 | 2,9 | n.b. | 34 |
| | | mittel | 21,9 | 95,4 | 8,3 | 2,3 | 24,5 | 60,3 | 18,3 | 9,3 | 52,4 | 28,6 | 2,6 | n.b. | 33 |
| | | grob | 21,7 | 95,3 | 8,6 | 1,8 | 25,6 | 59,3 | 17,6 | 8,7 | 52,8 | 29,4 | 4,2 | n.b. | 33 |
| | 2. Erntetermin | fein | 26,5 | 96,4 | 8,4 | 2,8 | 19,0 | 66,2 | 9,3 | 24,1 | 51,5 | 25,9 | 1,9 | n.b. | 34 |
| | | mittel | 25,4 | 97,1 | 8,9 | 2,9 | 18,4 | 66,9 | 9,3 | 27,6 | 41,6 | 25,1 | 3,8 | n.b. | 32 |
| | | grob | 25,5 | 95,9 | 8,0 | 2,8 | 21,1 | 64,0 | 9,8 | 22,3 | 50,4 | 25,7 | 3,1 | n.b. | 35 |
| | 3. Erntetermin | fein | 32,6 | 96,0 | 8,1 | 2,3 | 18,1 | 67,4 | 5,4 | 28,0 | 45,8 | 21,2 | 2,5 | n.b. | 34 |
| | | mittel | 32,7 | 95,6 | 8,3 | 2,3 | 19,9 | 65,1 | 6,3 | 23,8 | 48,7 | 24,3 | 3,2 | n.b. | 34 |
| | | grob | 33,5 | 95,1 | 7,9 | 2,6 | 21,5 | 63,1 | 4,9 | 25,0 | 55,7 | 24,1 | 2,9 | n.b. | 36 |
| Silage | 1. Erntetermin | fein | 22,8 ± 0,2 | 95,8 | 8,4 | 3,0 | 26,1 | 58,3 | 8,5 | n.b. | 50,2 | 26,7 | 3,2 | 6,3 | 32 |
| | | mittel | 21,2 ± 1,1 | 95,1 | 8,3 | 2,1 | 26,8 | 57,9 | 11,6 | n.b. | 50,5 | 27,3 | 2,9 | 6,0 | 34 |
| | | grob | 21,2 ± 0,5 | 95,6 | 8,4 | 2,3 | 25,4 | 59,6 | 10,6 | n.b. | 48,7 | 26,6 | 3,0 | 7,4 | 34 |
| | 2. Erntetermin | fein | 26,4 ± 0,4 | 96,0 | 8,9 | 3,1 | 20,3 | 63,7 | 5,4 | n.b. | 36,1 | 22,1 | 2,7 | 6,9 | 31 |
| | | mittel | 24,8 ± 0,5 | 96,0 | 7,5 | 2,9 | 23,8 | 61,8 | 6,5 | n.b. | 42,6 | 25,6 | 3,1 | 6,0 | 39 |
| | | grob | 25,3 ± 0,6 | 96,0 | 8,1 | 2,9 | 22,4 | 62,6 | 5,5 | n.b. | 37,9 | 22,6 | 2,4 | 8,9 | 35 |
| | 3. Erntetermin | fein | 32,6 ± 0,4 | 96,3 | 8,2 | 2,7 | 16,7 | 68,7 | 4,7 | n.b. | 30,3 | 18,6 | 2,4 | 6,2 | 32 |
| | | mittel | 31,1 ± 0,2 | 95,6 | 8,3 | 2,9 | 20,8 | 63,6 | 7,1 | n.b. | 35,1 | 22,0 | 3,0 | 6,8 | 33 |
| | | grob | 32,5 ± 0,7 | 96,1 | 7,9 | 3,2 | 19,6 | 65,4 | 4,2 | n.b. | 34,2 | 20,8 | 2,5 | 8,1 | 35 |

n.b. ... nicht bestimmt

Tab. A22: Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Grünschnittroggen mit unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Lagerdauer [d] | TM [%] | oTM [% TM] | XP [% TM] | XL [% TM] | XF [% TM] | NFE [% TM] | Zucker [% TM] | NDF [% TM] | ADF [% TM] | ADL [% TM] | NH ₃ -N [% N _{Ges}] | C/N [-] |
|----------------------|----------------------|-------------------|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---|------------|
| Siliergut | 4 - 16 | 0 | 24,1 ± 0,8 | 94,2 | 9,6 | 1,6 | 39,6 | 43,4 | 6,5 | 69,1 | 43,3 | 4,7 | n.b. | 29 |
| Silage | 4 | 90 | 23,5 ± 0,2 | 94,2 | 10,1 | 2,4 | 38,3 | 43,4 | 2,7 | 62,7 | 40,6 | 4,5 | 14,0 | 29 |
| | 8 | 90 | 23,3 ± 0,2 | 94,2 | 10,4 | 2,6 | 38,6 | 42,7 | 1,7 | 62,8 | 41,3 | 4,5 | 15,3 | 28 |
| | 12 | 90 | 23,3 ± 0,3 | 94,4 | 10,1 | 3,4 | 41,4 | 39,4 | 2,7 | 63,0 | 42,0 | 4,8 | 16,9 | 29 |
| | 16 | 90 | 22,3 ± 0,4 | 94,1 | 10,7 | 3,1 | 40,5 | 39,8 | 1,5 | 62,7 | 41,5 | 4,3 | 14,1 | 27 |

n.b. ... nicht bestimmt

Tab. A23: Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Sudangras mit unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Lagerdauer [d] | TM [%] | oTM [% TM] | XP [% TM] | XL [% TM] | XF [% TM] | NFE [% TM] | Zucker [% TM] | NDF [% TM] | ADF [% TM] | ADL [% TM] | NH ₃ -N [% N _{Ges}] | C/N [-] |
|----------------------|----------------------|-------------------|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---|------------|
| Siliergut | 4 - 16 | 0 | 29,4 ± 0,9 | 95,0 | 4,6 | 1,9 | 28,8 | 59,8 | 26,0 | 58,9 | 33,7 | 5,9 | n.b. | 63 |
| Silage | 4 | 90 | 27,8 ± 0,3 | 94,9 | 5,7 | 1,7 | 29,4 | 58,2 | 8,2 | 48,2 | 32,9 | 6,3 | 5,9 | 50 |
| | 6 | 90 | 27,0 ± 0,7 | 94,6 | 4,0 | 1,4 | 31,7 | 57,5 | 8,1 | 52,1 | 34,5 | 6,0 | 6,9 | 68 |
| | 8 | 90 | 27,2 ± 0,5 | 95,1 | 5,3 | 1,4 | 29,2 | 59,2 | 7,1 | 49,8 | 33,2 | 5,9 | 7,0 | 51 |
| | 12 | 90 | 27,6 ± 0,7 | 95,0 | 5,5 | 1,1 | 29,2 | 59,2 | 8,1 | 49,8 | 33,6 | 5,6 | 5,2 | 51 |
| | 16 | 90 | 27,5 ± 0,8 | 94,8 | 5,2 | 1,3 | 28,9 | 59,5 | 7,6 | 49,5 | 33,7 | 5,9 | 4,1 | 54 |

n.b. ... nicht bestimmt

Tab. A24: Chemische Charakterisierung von frischer und siliierter Triticale mit unterschiedlicher theoretischer Häcksellänge (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Lagerdauer [d] | TM [%] | oTM [% TM] | XP [% TM] | XL [% TM] | XF [% TM] | NFE [% TM] | Zucker [% TM] | NDF [% TM] | ADF [% TM] | ADL [% TM] | NH ₃ -N [% N _{Ges}] | C/N [-] |
|----------------------|----------------------|-------------------|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---|------------|
| Siliergut | 6 - 16 | 0 | 36,5 ± 0,3 | 95,1 | 7,6 | 1,5 | 26,9 | 59,1 | 11,6 | 47,6 | 29,0 | 4,9 | n.b. | 37 |
| Silage | 6 | 90 | 33,4 ± 0,2 | 94,7 | 9,3 | 1,7 | 30,6 | 53,2 | 13,1 | 46,2 | 29,4 | 5,1 | 11,3 | 31 |
| | 8 | 90 | 32,9 ± 0,5 | 94,7 | 9,4 | 2,0 | 30,5 | 52,8 | 12,9 | 45,9 | 29,6 | 5,4 | 15,2 | 30 |
| | 12 | 90 | 33,1 ± 0,2 | 94,8 | 9,0 | 2,3 | 30,1 | 53,5 | 13,8 | 46,9 | 30,1 | 5,7 | 15,9 | 32 |
| | 16 | 90 | 33,6 ± 0,1 | 94,8 | 9,2 | 2,4 | 28,0 | 55,2 | 13,3 | 44,3 | 29,1 | 4,8 | 15,5 | 32 |

n.b. ... nicht bestimmt

Tab. A25: Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Mais bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Zusatz | Lagerdauer [d] | TM [%] | oTM [% TM] | XP [% TM] | XL [% TM] | XF [% TM] | NFE [% TM] | Zucker [% TM] | NDF [% TM] | ADF [% TM] | ADL [% TM] | NH ₃ -N [% N _{Ges}] | C/N [-] |
|----------------------|----------------------|-------------|-------------------|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---|------------|
| Siliergut | 4 | ohne | 0 | 33,4 | 94,6 | 6,3 | 2,8 | 22,1 | 63,4 | 13,9 | 44,7 | 26,6 | 2,7 | n.b. | 43 |
| Silage | 4 | ohne | 10 | 33,0 ± 0,3 | 95,3 | 6,5 | 3,3 | 20,1 | 65,3 | 6,0 | 39,9 | 23,5 | 3,1 | 3,2 | 43 |
| | 4 | ohne | 90 | 32,5 ± 0,0 | 95,5 | 6,1 | 2,9 | 18,9 | 67,6 | 5,7 | 35,5 | 22,2 | 3,4 | 11,7 | 45 |
| | 4 | ohne | 180 | 32,8 ± 0,4 | 95,3 | 6,2 | 3,4 | 18,4 | 67,3 | 6,3 | 34,5 | 20,0 | 2,2 | 10,2 | 44 |
| | 4 | ohne | 365 | 32,5 ± 0,1 | 95,5 | 6,1 | 3,3 | 20,4 | 65,8 | 1,3 | 37,7 | 22,7 | 3,4 | 13,6 | 45 |
| Siliergut | 4 | Chem. A | 0 | 33,4 | 94,9 | 6,0 | 3,0 | 20,2 | 65,8 | 11,7 | 42,3 | 24,7 | 3,4 | n.b. | 46 |
| Silage | 4 | Chem. A | 90 | 32,3 ± 0,9 | 95,8 | 6,5 | 2,7 | 18,1 | 68,6 | 8,4 | 32,5 | 21,1 | 2,6 | 6,4 | 43 |
| Siliergut | 4 | MSB-komb. A | 0 | 34,3 | 94,5 | 6,6 | 2,4 | 20,9 | 64,7 | 11,9 | 44,4 | 25,6 | 2,8 | n.b. | 41 |
| Silage | 4 | MSB-komb. A | 90 | 32,8 ± 0,6 | 95,5 | 6,2 | 2,8 | 18,9 | 67,5 | 4,5 | 36,5 | 21,7 | 2,9 | 8,6 | 43 |
| Siliergut | 8 | ohne | 0 | 32,5 | 95,4 | 7,5 | 2,2 | 19,9 | 65,8 | 11,7 | 41,6 | 24,3 | 3,4 | n.b. | 37 |
| Silage | 8 | ohne | 10 | 32,1 ± 0,2 | 95,8 | 6,9 | 3,2 | 18,8 | 66,8 | 4,7 | 37,1 | 21,4 | 2,8 | 4,5 | 40 |
| | 8 | ohne | 90 | 31,3 ± 0,4 | 95,6 | 7,2 | 2,9 | 18,4 | 67,1 | 4,6 | 36,7 | 21,9 | 2,8 | 9,1 | 39 |
| | 8 | ohne | 180 | 31,0 ± 0,6 | 95,5 | 6,1 | 2,9 | 18,4 | 68,0 | 4,1 | 33,8 | 20,7 | 2,0 | 13,4 | 43 |
| | 8 | ohne | 365 | 30,4 ± 1,3 | 95,4 | 6,7 | 3,2 | 20,0 | 65,5 | 1,2 | 36,9 | 23,1 | 3,7 | 14,7 | 41 |
| Siliergut | 8 | Chem. A | 0 | 32,9 | 94,7 | 6,9 | 2,9 | 21,1 | 63,9 | 11,9 | 44,1 | 25,3 | 2,8 | n.b. | 40 |
| Silage | 8 | Chem. A | 90 | 31,8 ± 0,8 | 95,7 | 7,6 | 3,2 | 18,9 | 66,0 | 6,2 | 34,6 | 21,1 | 2,0 | 6,6 | 37 |
| Siliergut | 8 | MSB-komb. A | 0 | 33,5 | 94,6 | 7,2 | 2,7 | 20,6 | 64,0 | 12,2 | 44,5 | 25,1 | 2,9 | n.b. | 38 |
| Silage | 8 | MSB-komb. A | 90 | 29,3 ± 0,5 | 95,3 | 7,6 | 2,5 | 21,0 | 64,2 | 5,7 | 37,9 | 22,9 | 2,7 | 10,5 | 36 |
| Siliergut | 8 | MSB-ho | 0 | 32,6 | 95,3 | 7,1 | 2,8 | 20,1 | 65,2 | 11,8 | 42,0 | 23,7 | 2,9 | n.b. | 38 |
| Silage | 8 | MSB-ho | 90 | 30,6 ± 1,2 | 95,5 | 8,0 | 2,8 | 19,8 | 64,9 | 5,0 | 35,5 | 21,3 | 2,0 | 9,0 | 35 |
| Siliergut | 8 | MSB-komb. B | 0 | 33,0 | 95,4 | 7,5 | 2,9 | 18,7 | 66,4 | 12,0 | 41,5 | 23,6 | 2,4 | n.b. | 36 |
| Silage | 8 | MSB-komb. B | 90 | 31,4 ± 0,9 | 95,8 | 7,5 | 3,5 | 18,8 | 66,0 | 4,6 | 35,4 | 20,9 | 2,2 | 10,2 | 37 |

n.b. nicht bestimmt

Tab. A26: Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Grünschnittroggen bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Zusatz | Lagerdauer [d] | TM [%] | oTM [% TM] | XP [% TM] | XL [% TM] | XF [% TM] | NfE [% TM] | Zucker [% TM] | NDF [% TM] | ADF [% TM] | ADL [% TM] | NH ₃ -N [% N _{Gas}] | C/N [-] |
|----------------------|----------------------|-------------|-------------------|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---|------------|
| Siliergut | 6,8 | ohne | 0 | 24,3 | 94,5 | 9,8 | 1,9 | 37,3 | 45,6 | 7,9 | 67,2 | 41,6 | 4,2 | n.b. | 29 |
| Silage | 6,8 | ohne | 10 | 23,9 ± 0,3 | 94,0 | 10,8 | 2,4 | 37,4 | 43,5 | 4,0 | 60,5 | 40,0 | 3,9 | 9,6 | 26 |
| | 6,8 | ohne | 90 | 23,9 ± 0,3 | 94,4 | 10,4 | 1,6 | 39,2 | 43,2 | 3,7 | 62,1 | 40,4 | 4,9 | 12,4 | 27 |
| | 6,8 | ohne | 180 | 23,8 ± 0,4 | 94,2 | 10,9 | 2,5 | 40,4 | 40,4 | 3,4 | 61,8 | 41,4 | 5,4 | 14,1 | 27 |
| | 6,8 | ohne | 365 | 23,7 ± 0,1 | 94,0 | 10,7 | 2,2 | 38,5 | 42,6 | 3,2 | 56,6 | 39,0 | 5,7 | 14,5 | 26 |
| Siliergut | 6,8 | Chem. B | 0 | 23,8 | 94,5 | 9,8 | 1,7 | 39,3 | 43,7 | 8,5 | 69,0 | 43,0 | 4,5 | n.b. | 30 |
| Silage | 6,8 | Chem. B | 10 | 23,8 ± 0,1 | 94,4 | 9,7 | 1,3 | 39,2 | 44,2 | 3,6 | 62,4 | 42,1 | 4,3 | 12,9 | 29 |
| | 6,8 | Chem. B | 90 | 23,7 ± 0,1 | 94,3 | 10,3 | 3,2 | 39,9 | 40,9 | 3,0 | 64,0 | 41,9 | 5,0 | 15,6 | 28 |
| Siliergut | 6,8 | MSB-komb. A | 0 | 23,9 | 93,7 | 10,0 | 1,8 | 39,0 | 43,0 | 7,0 | 66,9 | 41,9 | 5,4 | n.b. | 29 |
| Silage | 6,8 | MSB-komb. A | 10 | 23,8 ± 0,2 | 94,0 | 10,0 | 1,6 | 37,5 | 44,8 | 3,6 | 60,1 | 41,3 | 4,3 | 10,1 | 28 |
| | 6,8 | MSB-komb. A | 90 | 22,9 ± 0,0 | 93,8 | 8,9 | 3,5 | 41,2 | 40,2 | 0,4 | 64,2 | 42,5 | 5,3 | 24,6 | 31 |
| Siliergut | 11 | ohne | 0 | 25,3 | 94,2 | 10,5 | 1,9 | 37,8 | 43,9 | 7,6 | 65,5 | 43,7 | 4,4 | n.b. | 28 |
| Silage | 11 | ohne | 10 | 24,3 ± 0,2 | 94,2 | 10,8 | 1,6 | 37,9 | 43,9 | 5,2 | 59,9 | 39,5 | 3,9 | 9,0 | 26 |
| | 11 | ohne | 90 | 23,5 ± 0,2 | 93,9 | 11,7 | 2,7 | 37,2 | 42,4 | 2,8 | 59,1 | 38,1 | 4,7 | 11,8 | 25 |
| | 11 | ohne | 180 | 23,3 ± 0,2 | 94,0 | 10,8 | 2,3 | 43,8 | 37,0 | 2,1 | 62,4 | 42,3 | 5,4 | 18,0 | 26 |
| | 11 | ohne | 365 | 23,4 ± 0,3 | 93,6 | 9,2 | 2,2 | 39,8 | 42,4 | 0,8 | 59,4 | 42,1 | 6,3 | 40,3 | 29 |
| Siliergut | 11 | Chem. B | 0 | 24,3 | 94,2 | 11,0 | 1,7 | 38,0 | 43,6 | 8,5 | 64,9 | 40,5 | 4,0 | n.b. | 27 |
| Silage | 11 | Chem. B | 10 | 24,2 ± 0,1 | 94,4 | 10,9 | 1,6 | 38,8 | 43,0 | 5,1 | 60,5 | 39,5 | 4,2 | 10,6 | 26 |
| | 11 | Chem. B | 90 | 24,2 ± 0,1 | 94,0 | 12,1 | 2,6 | 36,9 | 42,5 | 4,9 | 59,3 | 38,5 | 4,9 | 12,5 | 25 |
| Siliergut | 11 | MSB-komb. A | 0 | 25,5 | 94,5 | 10,3 | 1,9 | 37,6 | 44,6 | 7,2 | 66,5 | 42,1 | 4,2 | n.b. | 28 |
| Silage | 11 | MSB-komb. A | 10 | 25,1 ± 0,2 | 94,4 | 10,2 | 1,9 | 38,5 | 43,8 | 4,5 | 61,5 | 40,3 | 4,5 | 9,3 | 28 |
| | 11 | MSB-komb. A | 90 | 24,0 ± 0,1 | 94,1 | 9,9 | 3,0 | 40,1 | 41,1 | 0,6 | 63,0 | 40,8 | 4,7 | 21,0 | 28 |

n.b. nicht bestimmt

Tab. A27: Chemische Charakterisierung von frischem und siliertem Sudangras bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Zusatz | Lagerdauer [d] | TM [%] | oTM [% TM] | XP [% TM] | XL [% TM] | XF [% TM] | NfE [% TM] | Zucker [% TM] | NDF [% TM] | ADF [% TM] | ADL [% TM] | NH ₃ -N [% N _{Ges}] | C/N [-] |
|----------------------|----------------------|-------------|-------------------|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---|------------|
| Siliergut | 4 | ohne | 0 | 30,6 | 92,1 | 4,8 | 2,2 | 30,0 | 55,1 | 16,3 | 62,4 | 39,4 | 5,8 | n.b. | 57 |
| Silage | 4 | ohne | 10 | 30,1 ± 0,5 | 90,1 | 5,2 | 1,7 | 29,3 | 53,8 | 6,8 | 56,6 | 39,1 | 5,3 | 4,3 | 50 |
| | 4 | ohne | 90 | 29,8 ± 0,8 | 87,3 | 5,3 | 1,8 | 27,9 | 52,3 | 6,2 | 47,3 | 39,3 | 4,8 | 7,2 | 48 |
| | 4 | ohne | 180 | 29,3 ± 0,3 | 89,8 | 5,3 | 1,4 | 31,5 | 51,7 | 4,5 | 50,9 | 40,8 | 6,8 | 6,4 | 48 |
| | 4 | ohne | 365 | 28,5 ± 0,3 | 90,7 | 5,5 | 1,3 | 31,7 | 52,2 | 5,6 | 52,7 | 39,3 | 5,3 | 7,0 | 45 |
| Siliergut | 4 | Chem. B | 0 | 30,9 | 91,9 | 4,0 | 1,9 | 28,7 | 57,2 | 15,1 | 57,1 | 41,2 | 6,6 | n.b. | 64 |
| Silage | 4 | Chem. B | 10 | 30,5 ± 0,2 | 91,4 | 5,3 | 1,9 | 29,3 | 54,9 | 12,7 | 56,3 | 38,1 | 5,8 | 12,3 | 51 |
| | 4 | Chem. B | 90 | 30,1 ± 0,3 | 90,8 | 5,8 | 1,6 | 28,2 | 55,3 | 9,1 | 47,4 | 38,1 | 5,6 | 13,8 | 46 |
| Siliergut | 4 | MSB-komb. A | 0 | 30,9 | 90,2 | 4,7 | 2,9 | 27,4 | 55,2 | 17,0 | 59,5 | 37,5 | 7,8 | n.b. | 56 |
| Silage | 4 | MSB-komb. A | 10 | 30,5 ± 0,0 | 89,6 | 4,7 | 2,1 | 29,3 | 53,6 | 6,1 | 56,9 | 40,7 | 5,4 | 3,9 | 55 |
| | 4 | MSB-komb. A | 90 | 29,1 ± 0,4 | 88,7 | 5,3 | 1,8 | 29,6 | 52,0 | 0,6 | 50,1 | 42,5 | 5,6 | 5,5 | 48 |
| Siliergut | 7 | ohne | 0 | 31,0 | 92,1 | 6,3 | 2,2 | 27,8 | 55,8 | 15,7 | 59,4 | 36,6 | 4,4 | n.b. | 43 |
| Silage | 7 | ohne | 10 | 30,1 ± 0,1 | 82,1 | 7,3 | 2,0 | 27,7 | 45,1 | 6,2 | 51,8 | 41,3 | 4,7 | 4,8 | 35 |
| | 7 | ohne | 90 | 29,6 ± 0,4 | 91,8 | 6,7 | 1,4 | 29,2 | 54,6 | 5,8 | 49,4 | 36,8 | 4,7 | 7,8 | 39 |
| | 7 | ohne | 180 | 29,0 ± 0,5 | 82,0 | 5,9 | 1,3 | 28,4 | 46,4 | 4,2 | 48,5 | 36,4 | 4,3 | 9,4 | 36 |
| | 7 | ohne | 365 | 28,5 ± 0,2 | 89,3 | 6,8 | 1,5 | 30,3 | 50,8 | 7,4 | 50,9 | 36,3 | 4,0 | 9,2 | 38 |
| Siliergut | 7 | Chem. B | 0 | 31,2 | 91,4 | 6,6 | 1,7 | 27,2 | 55,9 | 16,5 | 55,1 | 37,1 | 4,6 | n.b. | 39 |
| Silage | 7 | Chem. B | 10 | 30,4 ± 0,2 | 90,6 | 7,5 | 1,8 | 29,7 | 51,6 | 12,0 | 54,2 | 36,6 | 4,9 | 11,1 | 36 |
| | 7 | Chem. B | 90 | 30,4 ± 0,1 | 88,6 | 7,1 | 1,5 | 27,0 | 53,0 | 10,7 | 44,5 | 36,7 | 5,2 | 13,4 | 38 |
| Siliergut | 7 | MSB-komb. A | 0 | 29,8 | 89,8 | 5,9 | 1,9 | 26,2 | 55,8 | 15,5 | 55,2 | 40,9 | 5,1 | n.b. | 44 |
| Silage | 7 | MSB-komb. A | 10 | 29,1 ± 0,5 | 86,6 | 6,4 | 1,7 | 28,7 | 49,8 | 6,4 | 53,3 | 40,4 | 4,5 | 5,0 | 40 |
| | 7 | MSB-komb. A | 90 | 27,9 ± 0,1 | 88,3 | 6,4 | 1,7 | 27,8 | 52,5 | 1,5 | 48,7 | 41,6 | 4,6 | 6,6 | 38 |

n.b. nicht bestimmt

Tab. A28: Chemische Charakterisierung von frischer und siliierter Triticale bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Zusatz | Lagerdauer [d] | TM [%] | oTM [% TM] | XP [% TM] | XL [% TM] | XF [% TM] | NFE [% TM] | Zucker [% TM] | NDF [% TM] | ADF [% TM] | ADL [% TM] | NH ₃ -N [% N _{Ges}] | C/N [-] |
|----------------------|----------------------|-------------|-------------------|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---|------------|
| Siliergut | 4 | ohne | 0 | 39,3 | 95,4 | 7,2 | 1,6 | 26,4 | 60,2 | 7,7 | 44,3 | 25,5 | 4,4 | n.b. | 38 |
| Silage | 4 | ohne | 10 | 38,4 ± 0,1 | 95,6 | 8,4 | 1,7 | 27,1 | 58,3 | 6,4 | 43,8 | 27,0 | 4,3 | 8,5 | 33 |
| | 4 | ohne | 90 | 38,1 ± 0,6 | 95,4 | 8,6 | 2,1 | 26,6 | 58,2 | 6,5 | 41,3 | 26,9 | 4,6 | 14,2 | 33 |
| | 4 | ohne | 180 | 38,6 ± 0,2 | 95,6 | 7,8 | 2,2 | 26,2 | 59,4 | 6,4 | 43,2 | 28,2 | 4,6 | 15,0 | 35 |
| | 4 | ohne | 365 | 38,3 ± 0,9 | 95,7 | 8,0 | 2,2 | 28,1 | 57,4 | 2,7 | 43,8 | 28,6 | 5,3 | 16,9 | 36 |
| Siliergut | 4 | Chem. B | 0 | 39,1 | 95,5 | 7,6 | 1,5 | 24,7 | 61,7 | 7,9 | 45,8 | 28,6 | 4,3 | n.b. | 36 |
| Silage | 4 | Chem. B | 10 | 38,2 ± 0,1 | 95,7 | 8,5 | 1,5 | 26,5 | 59,2 | 12,0 | 41,9 | 26,5 | 4,2 | 11,6 | 33 |
| | 4 | Chem. B | 90 | 36,6 ± 0,3 | 95,3 | 8,8 | 2,0 | 25,8 | 58,7 | 21,2 | 40,2 | 26,4 | 4,2 | 19,3 | 33 |
| Siliergut | 4 | MSB-komb. A | 0 | 36,8 | 95,6 | 8,1 | 1,7 | 25,1 | 60,7 | 8,5 | 47,4 | 28,9 | 5,1 | n.b. | 34 |
| Silage | 4 | MSB-komb. A | 10 | 36,0 ± 0,4 | 95,4 | 8,6 | 1,7 | 28,2 | 57,0 | 5,4 | 44,4 | 28,0 | 4,9 | 8,7 | 32 |
| | 4 | MSB-komb. A | 90 | 34,9 ± 0,2 | 95,3 | 8,4 | 2,0 | 27,0 | 57,9 | 6,3 | 43,4 | 28,5 | 4,8 | 15,2 | 32 |
| Siliergut | 8 | ohne | 0 | 38,0 | 95,3 | 6,7 | 1,3 | 26,1 | 61,2 | 8,0 | 44,1 | 28,5 | 4,7 | n.b. | 42 |
| Silage | 8 | ohne | 10 | 35,7 ± 0,2 | 95,1 | 7,8 | 2,1 | 26,5 | 58,7 | 7,3 | 43,5 | 27,6 | 4,5 | 7,2 | 36 |
| | 8 | ohne | 90 | 35,5 ± 0,2 | 94,8 | 8,1 | 1,8 | 27,0 | 57,9 | 7,5 | 42,9 | 27,9 | 4,7 | 11,4 | 34 |
| | 8 | ohne | 180 | 35,7 ± 0,5 | 95,2 | 7,7 | 2,0 | 25,0 | 60,6 | 5,7 | 42,8 | 27,7 | 4,7 | 12,0 | 35 |
| | 8 | ohne | 365 | 35,4 ± 0,6 | 95,2 | 8,1 | 2,7 | 28,4 | 56,0 | 2,5 | 44,2 | 29,2 | 4,8 | 12,7 | 37 |
| Siliergut | 8 | Chem. B | 0 | 39,0 | 94,7 | 7,9 | 1,3 | 29,6 | 55,9 | 8,7 | 46,4 | 31,3 | 4,6 | n.b. | 35 |
| Silage | 8 | Chem. B | 10 | 38,1 ± 0,2 | 95,4 | 8,3 | 1,8 | 27,8 | 57,5 | 11,2 | 42,8 | 27,4 | 4,7 | 12,4 | 34 |
| | 8 | Chem. B | 90 | 37,7 ± 0,1 | 95,3 | 8,8 | 1,6 | 28,0 | 56,9 | 17,6 | 43,1 | 27,9 | 4,6 | 16,3 | 33 |
| Siliergut | 8 | MSB-komb. A | 0 | 39,3 | 95,2 | 7,4 | 1,2 | 25,0 | 61,6 | 8,1 | 46,8 | 30,3 | 5,3 | n.b. | 37 |
| Silage | 8 | MSB-komb. A | 10 | 38,1 ± 0,0 | 95,4 | 8,4 | 1,7 | 28,1 | 57,2 | 7,3 | 45,2 | 28,1 | 4,8 | 7,6 | 34 |
| | 8 | MSB-komb. A | 90 | 36,2 ± 0,0 | 95,2 | 8,5 | 2,0 | 27,5 | 57,2 | 8,7 | 44,5 | 29,5 | 4,7 | 13,6 | 33 |

n.b. nicht bestimmt

Tab. A29: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmaterial-Verhältnis von frischem und siliertem Mais der Sorte Oldham im Batch-Gärtest unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Erntetermin | Häcksel- länge | Y _{CH4_zu} 30 d | | Y _{CH4_orig} 30 d | | Y _{CH4_zu} 30 d | | Y _{CH4_orig} 30 d | | C _{CH4} | k (Y _{CH4_zu}) [d ⁻¹] | a _i |
|----------------------|----------------|-------------------|---|---|---|---|--|--|--|---------|------------------|---|----------------|
| | | | [N*kg ⁻¹ oTM _{zu}] | [N*kg ⁻¹ oTM _{zu}] | [N*kg ⁻¹ oTM _{orig}] | [N*kg ⁻¹ oTM _{orig}] | [N*kg ⁻¹ FM _{zu}] | [N*kg ⁻¹ FM _{zu}] | [N*kg ⁻¹ FM _{orig}] | [Vol-%] | | | |
| Siliergut | 1. Erntetermin | fein | 347,3 ^{cd} ± 4,3 | 347,3 ^{cd} ± 4,3 | 347,3 ^{cd} ± 4,3 | 79,7 ± 1,0 | 79,7 ± 1,0 | 55,0 ^{bc} ± 0,3 | 0,270 ^{def} ± 0,01 | 0,33 | | | |
| | | mittel | 326,7 ^{bcd} ± 8,3 | 326,7 ^{bc} ± 8,3 | 326,7 ^{bc} ± 8,3 | 71,6 ± 1,8 | 71,6 ± 1,8 | 54,3 ^{ab} ± 0,2 | 0,240 ^{cdef} ± 0,01 | 0,32 | | | |
| | | grob | 315,0 ^{ab} ± 10,2 | 315,0 ^{ab} ± 10,2 | 315,0 ^{ab} ± 10,2 | 72,7 ± 2,4 | 72,7 ± 2,4 | 52,8 ^a ± 1,5 | 0,206 ^{bcd} ± 0,03 | 0,33 | | | |
| | 2. Erntetermin | fein | 355,3 ^{def} ± 10,0 | 355,3 ^d ± 10,0 | 355,3 ^d ± 10,0 | 97,9 ± 2,8 | 97,9 ± 2,8 | 54,3 ^{ab} ± 0,1 | 0,247 ^{cdef} ± 0,00 | 0,40 | | | |
| | | mittel | 326,2 ^{bc} ± 5,5 | 326,2 ^{bc} ± 5,5 | 326,2 ^{bc} ± 5,5 | 84,6 ± 1,4 | 84,6 ± 1,4 | 54,7 ^b ± 0,6 | 0,209 ^{bcde} ± 0,02 | 0,37 | | | |
| | | grob | 315,1 ^{ab} ± 5,7 | 315,1 ^{ab} ± 5,7 | 315,1 ^{ab} ± 5,7 | 82,6 ± 1,5 | 82,6 ± 1,5 | 54,5 ^{ab} ± 0,6 | 0,189 ^{abc} ± 0,02 | 0,38 | | | |
| | 3. Erntetermin | fein | 334,5 ^{bcde} ± 11,2 | 334,5 ^{bcd} ± 11,2 | 334,5 ^{bcd} ± 11,2 | 115,5 ± 3,9 | 115,5 ± 3,9 | 54,4 ^{ab} ± 0,6 | 0,220 ^{bcdef} ± 0,01 | 0,49 | | | |
| | | mittel | 327,1 ^{bcd} ± 5,9 | 327,1 ^{bc} ± 5,9 | 327,1 ^{bc} ± 5,9 | 107,4 ± 1,9 | 107,4 ± 1,9 | 53,8 ^{ab} ± 0,6 | 0,189 ^{abc} ± 0,02 | 0,49 | | | |
| | | grob | 296,8 ^a ± 14,4 | 296,8 ^a ± 14,4 | 296,8 ^a ± 14,4 | 106,5 ± 5,2 | 106,5 ± 5,2 | 54,1 ^{ab} ± 0,7 | 0,159 ^{ab} ± 0,02 | 0,51 | | | |
| Silage | 1. Erntetermin | fein | 364,4 ^f ± 5,6 | 351,0 ^{cd} ± 5,6 | 351,0 ^{cd} ± 5,6 | 83,5 ± 1,3 | 80,6 ± 1,3 | 56,7 ^c ± 0,2 | 0,278 ^f ± 0,00 | 0,33 | | | |
| | | mittel | 344,1 ^{bcdef} ± 7,0 | 325,7 ^{bc} ± 5,9 | 325,7 ^{bc} ± 5,9 | 72,9 ± 1,5 | 71,2 ± 1,3 | 53,9 ^{ab} ± 1,0 | 0,236 ^{cdef} ± 0,05 | 0,31 | | | |
| | | grob | 340,9 ^{bcdef} ± 7,3 | 309,8 ^{ab} ± 6,2 | 309,8 ^{ab} ± 6,2 | 72,5 ± 0,5 | 70,7 ± 1,8 | 55,5 ^{bc} ± 0,8 | 0,275 ^f ± 0,02 | 0,31 | | | |
| | 2. Erntetermin | fein | 360,8 ^{ef} ± 5,9 | 350,9 ^{cd} ± 5,1 | 350,9 ^{cd} ± 5,1 | 98,6 ± 2,2 | 96,6 ± 1,4 | 55,2 ^{bc} ± 0,4 | 0,274 ^{ef} ± 0,01 | 0,39 | | | |
| | | mittel | 347,6 ^{cdef} ± 12,2 | 333,7 ^{bcd} ± 15,4 | 333,7 ^{bcd} ± 15,4 | 87,2 ± 3,4 | 86,2 ± 4,5 | 55,4 ^{bc} ± 0,3 | 0,252 ^{cdef} ± 0,03 | 0,36 | | | |
| | | grob | 331,5 ^{bcd} ± 16,9 | 319,9 ^{ab} ± 9,4 | 319,9 ^{ab} ± 9,4 | 84,5 ± 2,9 | 83,7 ± 2,4 | 54,1 ^{ab} ± 0,4 | 0,219 ^{bcdef} ± 0,04 | 0,37 | | | |
| | 3. Erntetermin | fein | 353,6 ^{cdef} ± 11,6 | 351,3 ^{cd} ± 10,1 | 351,3 ^{cd} ± 10,1 | 122,3 ± 3,5 | 121,3 ± 3,5 | 54,1 ^{ab} ± 0,3 | 0,137 ^a ± 0,02 | 0,49 | | | |
| | | mittel | 346,7 ^{cdef} ± 5,8 | 349,4 ^{cd} ± 1,8 | 349,4 ^{cd} ± 1,8 | 115,5 ± 0,7 | 114,7 ± 0,6 | 54,7 ^b ± 0,4 | 0,228 ^{cdef} ± 0,01 | 0,47 | | | |
| | | grob | 328,4 ^{bcd} ± 11,8 | 317,9 ^{ab} ± 11,9 | 317,9 ^{ab} ± 11,9 | 114,9 ± 4,3 | 114,0 ± 4,3 | 54,0 ^{ab} ± 0,1 | 0,230 ^{cdef} ± 0,01 | 0,50 | | | |

abc... Mittelwerte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben innerhalb einer Tabellenspalte sind signifikant verschieden ($\alpha = 0,05$; Adjust = SIMULATE)

Tab. A30: Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Mais der Sorte Oldham unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Erntetermin | Häcksellänge | $Y_{CH_4_max}$ [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu}$] | b | c | R^2 | $r_{CH_4_max}$ [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu} \cdot d^{-1}$] | $t(r_{CH_4_max})$ [d] |
|----------------------|----------------|--------------|---|--------------|--------------|-------|--|---------------------------|
| Siliergut | 1. Erntetermin | fein | 356,0 ± 4,3 | 1,277 ± 0,02 | 2,746 ± 0,04 | 0,998 | 83,3 ± 0,8 | 0,53 ± 0,04 |
| | | mittel | 334,9 ± 10,3 | 1,282 ± 0,03 | 3,085 ± 0,10 | 0,996 | 69,7 ± 3,2 | 0,60 ± 0,06 |
| | | grob | 309,3 ± 23,7 | 1,693 ± 0,36 | 3,142 ± 0,13 | 0,993 | 63,0 ± 6,8 | 1,34 ± 0,64 |
| | 2. Erntetermin | fein | 356,5 ± 7,7 | 1,407 ± 0,03 | 2,865 ± 0,03 | 0,997 | 76,7 ± 1,9 | 0,81 ± 0,05 |
| | | mittel | 339,7 ± 4,2 | 1,300 ± 0,05 | 3,590 ± 0,22 | 0,998 | 60,4 ± 3,6 | 0,75 ± 0,14 |
| | | grob | 315,0 ± 9,6 | 1,564 ± 0,11 | 3,517 ± 0,15 | 0,995 | 54,8 ± 4,2 | 1,33 ± 0,27 |
| | 3. Erntetermin | fein | 335,8 ± 7,7 | 1,400 ± 0,06 | 3,290 ± 0,12 | 0,996 | 63,1 ± 2,7 | 0,91 ± 0,10 |
| | | mittel | 335,9 ± 9,8 | 1,356 ± 0,05 | 3,900 ± 0,30 | 0,997 | 54,0 ± 4,6 | 0,97 ± 0,15 |
| | | grob | 310,0 ± 8,3 | 1,390 ± 0,15 | 4,725 ± 1,08 | 0,998 | 42,2 ± 6,8 | 1,19 ± 0,25 |
| Silage | 1. Erntetermin | fein | 367,6 ± 4,3 | 1,327 ± 0,04 | 2,612 ± 0,05 | 0,996 | 88,7 ± 0,3 | 0,59 ± 0,07 |
| | | mittel | 344,9 ± 8,3 | 1,480 ± 0,36 | 2,981 ± 0,27 | 0,995 | 74,9 ± 8,6 | 0,94 ± 0,72 |
| | | grob | 341,6 ± 10,2 | 1,335 ± 0,08 | 2,633 ± 0,14 | 0,996 | 82,1 ± 6,6 | 0,61 ± 0,17 |
| | 2. Erntetermin | fein | 354,3 ± 5,7 | 1,530 ± 0,02 | 2,462 ± 0,03 | 0,995 | 87,6 ± 1,9 | 0,89 ± 0,04 |
| | | mittel | 358,0 ± 20,8 | 1,240 ± 0,11 | 3,107 ± 0,61 | 0,996 | 78,0 ± 4,6 | 0,48 ± 0,17 |
| | | grob | 329,1 ± 15,3 | 1,558 ± 0,29 | 3,084 ± 0,31 | 0,995 | 67,2 ± 7,0 | 1,15 ± 0,61 |
| | 3. Erntetermin | fein | 357,3 ± 23,8 | 1,280 ± 0,08 | 6,101 ± 1,49 | 0,990 | 44,7 ± 4,7 | 1,12 ± 0,07 |
| | | mittel | 345,9 ± 5,0 | 1,499 ± 0,06 | 3,089 ± 0,18 | 0,998 | 68,5 ± 4,9 | 1,05 ± 0,10 |
| | | grob | 326,3 ± 10,6 | 1,441 ± 0,04 | 3,068 ± 0,07 | 0,996 | 65,2 ± 3,6 | 0,93 ± 0,07 |

Tab. A31: Methan ausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmaterial-Verhältnis von frischem und siliertem Mais der Sorte LG3237 im Batch-Gärtest unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Erntetermin | Häcksel- länge | Y _{CH4_zu} 30 d [N*kg ⁻¹ oTM _{zu}] | Y _{CH4_orig} 30 d [N*kg ⁻¹ oTM _{orig}] | Y _{CH4_zu} 30 d [N*kg ⁻¹ FM _{zu}] | Y _{CH4_orig} 30 d [N*kg ⁻¹ FM _{orig}] | C _{CH4} [Vol-%] | k (Y _{CH4_zu}) [d ⁻¹] | a _i |
|----------------------|----------------|-------------------|--|--|---|---|-----------------------------|---|----------------|
| Siliergut | 1. Erntetermin | fein | 363,0 ^{efg} ± 4,4 | 363,0 ^{de} ± 4,4 | 83,3 ± 1,0 | 83,3 ± 1,0 | 53,9 ^{ab} ± 0,6 | 0,252 ^{efgh} ± 0,01 | 0,33 |
| | | mittel | 349,1 ^{bcd} ± 7,0 | 349,1 ^{bcd} ± 7,0 | 78,9 ± 1,6 | 78,9 ± 1,6 | 54,0 ^{ab} ± 1,5 | 0,249 ^{defg} ± 0,03 | 0,33 |
| | | grob | 332,4 ^{abcd} ± 16,1 | 332,4 ^{abc} ± 16,1 | 76,4 ± 3,7 | 76,4 ± 3,7 | 54,5 ^{ab} ± 0,1 | 0,255 ^{efgh} ± 0,00 | 0,33 |
| | 2. Erntetermin | fein | 356,6 ^{def} ± 8,8 | 356,6 ^{cde} ± 8,8 | 96,5 ± 2,4 | 96,5 ± 2,4 | 55,7 ^{bc} ± 1,8 | 0,242 ^{defg} ± 0,01 | 0,39 |
| | | mittel | 333,5 ^{abcd} ± 5,8 | 333,5 ^{abc} ± 5,8 | 85,8 ± 1,5 | 85,8 ± 1,5 | 55,4 ^{bc} ± 0,7 | 0,214 ^{cde} ± 0,01 | 0,37 |
| | | grob | 332,2 ^{abcd} ± 6,5 | 332,2 ^{abc} ± 6,5 | 91,7 ± 1,8 | 91,7 ± 1,8 | 54,8 ^{ab} ± 0,3 | 0,203 ^{bcd} ± 0,01 | 0,40 |
| | 3. Erntetermin | fein | 362,1 ^{efg} ± 8,8 | 362,1 ^{de} ± 8,8 | 128,0 ± 3,1 | 128,0 ± 3,1 | 53,2 ^a ± 0,1 | 0,213 ^{cde} ± 0,00 | 0,50 |
| | | mittel | 326,1 ^{ab} ± 10,8 | 326,1 ^{ab} ± 10,8 | 112,3 ± 3,7 | 112,3 ± 3,7 | 53,8 ^{ab} ± 0,4 | 0,187 ^{abc} ± 0,02 | 0,49 |
| | | grob | 321,7 ^a ± 6,2 | 321,7 ^a ± 6,2 | 106,8 ± 2,0 | 106,8 ± 2,0 | 54,4 ^{ab} ± 0,1 | 0,145 ^a ± 0,02 | 0,50 |
| Silage | 1. Erntetermin | fein | 378,6 ^{fg} ± 7,1 | 356,5 ^{cde} ± 6,3 | 86,5 ± 1,5 | 81,7 ± 1,4 | 55,1 ^{abc} ± 0,3 | 0,221 ^{cdef} ± 0,03 | 0,33 |
| | | mittel | 377,6 ^{fg} ± 7,0 | 347,4 ^{abcde} ± 11,2 | 79,6 ± 2,2 | 77,9 ± 2,7 | 55,0 ^{abc} ± 0,4 | 0,283 ^{gh} ± 0,03 | 0,31 |
| | | grob | 357,5 ^{def} ± 7,6 | 346,0 ^{abcde} ± 1,2 | 81,4 ± 1,3 | 79,5 ± 0,4 | 55,2 ^{abc} ± 0,4 | 0,299 ^h ± 0,01 | 0,33 |
| | 2. Erntetermin | fein | 388,2 ^g ± 2,5 | 370,6 ^e ± 4,7 | 103,4 ± 2,5 | 100,2 ± 1,3 | 57,1 ^c ± 0,8 | 0,269 ^{fgh} ± 0,01 | 0,38 |
| | | mittel | 373,8 ^{efg} ± 6,4 | 355,2 ^{cde} ± 13,4 | 91,3 ± 3,6 | 91,1 ± 3,6 | 55,4 ^{bc} ± 0,1 | 0,266 ^{fgh} ± 0,00 | 0,35 |
| | | grob | 353,7 ^{cdef} ± 12,4 | 341,6 ^{abcd} ± 7,3 | 94,7 ± 2,3 | 94,1 ± 2,0 | 55,0 ^{ab} ± 0,6 | 0,246 ^{defg} ± 0,03 | 0,39 |
| | 3. Erntetermin | fein | 361,9 ^{efg} ± 6,0 | 350,1 ^{bcd} ± 4,9 | 125,0 ± 1,7 | 123,6 ± 1,7 | 54,2 ^{ab} ± 0,5 | 0,240 ^{defg} ± 0,00 | 0,49 |
| | | mittel | 364,5 ^{efg} ± 7,6 | 348,3 ^{bcd} ± 5,2 | 120,3 ± 1,7 | 119,7 ± 1,7 | 54,1 ^{ab} ± 0,3 | 0,175 ^{abc} ± 0,01 | 0,51 |
| | | grob | 327,4 ^{abc} ± 13,6 | 326,4 ^{ab} ± 12,7 | 108,9 ± 4,3 | 108,3 ± 4,2 | 54,6 ^{ab} ± 0,3 | 0,163 ^{ab} ± 0,01 | 0,51 |

abc... Mittelwerte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben innerhalb einer Tabellenspalte sind signifikant verschieden ($\alpha = 0,05$; Adjust = SIMULATE)

Tab. A32: Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Mais der Sorte LG3237 unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Erntetermin | Häcksellänge | y_{CH4_max} [$N * kg^{-1} oTM_{zu}$] | b | c | R ² | r_{CH4_max} [$N * kg^{-1} oTM_{zu} * d^{-1}$] | $t(r_{CH4_max})$ [d] |
|----------------------|----------------|--------------|--|--------------|--------------|----------------|---|--------------------------|
| Siliergut | 1. Erntetermin | fein | 369,8 ± 8,2 | 1,387 ± 0,11 | 2,804 ± 0,06 | 0,998 | 82,2 ± 3,6 | 0,75 ± 0,20 |
| | | mittel | 360,4 ± 19,1 | 1,364 ± 0,32 | 2,944 ± 0,04 | 0,998 | 81,7 ± 10,3 | 0,70 ± 0,60 |
| | | grob | 338,5 ± 16,3 | 1,329 ± 0,04 | 2,847 ± 0,07 | 0,998 | 74,8 ± 3,3 | 0,65 ± 0,06 |
| | 2. Erntetermin | fein | 382,3 ± 7,7 | 1,111 ± 0,06 | 3,465 ± 0,33 | 0,998 | 83,6 ± 0,6 | 0,24 ± 0,11 |
| | | mittel | 363,9 ± 1,5 | 1,146 ± 0,07 | 3,866 ± 0,11 | 0,999 | 68,1 ± 4,2 | 0,37 ± 0,18 |
| | | grob | 358,3 ± 8,4 | 1,217 ± 0,03 | 3,912 ± 0,21 | 0,999 | 61,2 ± 1,5 | 0,58 ± 0,06 |
| | 3. Erntetermin | fein | 368,9 ± 9,0 | 1,435 ± 0,03 | 3,322 ± 0,08 | 0,998 | 68,1 ± 2,5 | 1,00 ± 0,03 |
| | | mittel | 342,6 ± 12,8 | 1,327 ± 0,02 | 4,041 ± 0,35 | 0,999 | 53,5 ± 2,7 | 0,92 ± 0,09 |
| | | grob | 330,9 ± 13,0 | 1,554 ± 0,33 | 4,779 ± 0,27 | 0,997 | 44,2 ± 1,4 | 1,66 ± 0,87 |
| Silage | 1. Erntetermin | fein | 373,0 ± 10,7 | 1,760 ± 0,19 | 2,897 ± 0,18 | 0,997 | 80,5 ± 5,7 | 1,38 ± 0,34 |
| | | mittel | 387,3 ± 4,5 | 1,298 ± 0,03 | 2,601 ± 0,26 | 0,999 | 95,5 ± 11,1 | 0,54 ± 0,08 |
| | | grob | 356,6 ± 11,2 | 1,364 ± 0,06 | 2,387 ± 0,11 | 0,997 | 93,2 ± 1,7 | 0,60 ± 0,07 |
| | 2. Erntetermin | fein | 396,4 ± 3,2 | 1,253 ± 0,04 | 2,802 ± 0,12 | 0,997 | 92,4 ± 2,0 | 0,49 ± 0,07 |
| | | mittel | 388,3 ± 5,4 | 1,212 ± 0,02 | 2,861 ± 0,04 | 0,998 | 91,0 ± 1,7 | 0,41 ± 0,04 |
| | | grob | 358,9 ± 18,0 | 1,379 ± 0,19 | 2,964 ± 0,25 | 0,998 | 77,5 ± 12,3 | 0,78 ± 0,44 |
| | 3. Erntetermin | fein | 363,4 ± 4,5 | 1,489 ± 0,00 | 2,905 ± 0,04 | 0,999 | 76,3 ± 1,7 | 0,97 ± 0,02 |
| | | mittel | 350,1 ± 8,9 | 1,966 ± 0,07 | 3,573 ± 0,09 | 0,996 | 63,2 ± 3,1 | 2,02 ± 0,11 |
| | | grob | 319,1 ± 17,0 | 1,806 ± 0,09 | 3,891 ± 0,08 | 0,995 | 51,3 ± 1,9 | 1,95 ± 0,15 |

Tab. A33: Methan ausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmaterial-Verhältnis von frischem und siliertem Mais der Sorte Benicia im Batch-Gärtest unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Erntetermin | Häcksel- länge | Y_{CH4_zu} 30 d [N*kg ⁻¹ oTM _{zu}] | Y_{CH4_orig} 30 d [N*kg ⁻¹ oTM _{orig}] | Y_{CH4_zu} 30 d [N*kg ⁻¹ FM _{zu}] | Y_{CH4_orig} 30 d [N*kg ⁻¹ FM _{orig}] | C _{CH4} [Vol-%] | k (Y_{CH4_zu}) [d ⁻¹] | a _i |
|----------------------|----------------|-------------------|--|--|---|---|-----------------------------|--|----------------|
| Siliergut | 1. Erntetermin | fein | 355,4 ^{cd} ± 0,3 | 355,4 ^{cd} ± 0,3 | 78,0 ± 0,1 | 78,0 ± 0,1 | 54,2 ^a ± 0,5 | 0,229 ^{cde} ± 0,02 | 0,32 |
| | | mittel | 337,1 ^{abcd} ± 7,3 | 337,1 ^{abcd} ± 7,3 | 70,3 ± 1,5 | 70,3 ± 1,5 | 54,7 ^a ± 0,5 | 0,235 ^{de} ± 0,00 | 0,30 |
| | | grob | 341,8 ^{bcd} ± 5,3 | 341,8 ^{bcd} ± 5,3 | 70,7 ± 1,1 | 70,7 ± 1,1 | 54,9 ^{ab} ± 0,1 | 0,247 ^{de} ± 0,01 | 0,30 |
| | 2. Erntetermin | fein | 352,5 ^{cd} ± 7,6 | 352,5 ^{cd} ± 7,6 | 90,1 ± 1,9 | 90,1 ± 1,9 | 54,3 ^a ± 0,2 | 0,241 ^{de} ± 0,01 | 0,36 |
| | | mittel | 343,3 ^{bcd} ± 9,4 | 343,3 ^{bcd} ± 9,4 | 84,8 ± 2,3 | 84,8 ± 2,3 | 54,1 ^a ± 0,1 | 0,223 ^{cd} ± 0,00 | 0,36 |
| | | grob | 343,9 ^{bcd} ± 4,0 | 343,9 ^{bcd} ± 4,0 | 84,1 ± 1,0 | 84,1 ± 1,0 | 57,7 ^{de} ± 0,2 | 0,168 ^{ab} ± 0,01 | 0,35 |
| | 3. Erntetermin | fein | 341,9 ^{bcd} ± 9,5 | 341,9 ^{bcd} ± 9,5 | 107,0 ± 3,0 | 107,0 ± 3,0 | 57,0 ^{bcd} ± 0,3 | 0,215 ^{bcd} ± 0,01 | 0,44 |
| | | mittel | 315,9 ^{ab} ± 7,9 | 315,9 ^{ab} ± 7,9 | 98,8 ± 2,5 | 98,8 ± 2,5 | 57,3 ^{cde} ± 1,0 | 0,178 ^{abc} ± 0,01 | 0,44 |
| | | grob | 309,1 ^a ± 7,5 | 309,1 ^a ± 7,5 | 98,4 ± 2,4 | 98,4 ± 2,4 | 54,1 ^a ± 0,7 | 0,150 ^a ± 0,04 | 0,46 |
| Silage | 1. Erntetermin | fein | 348,7 ^{cd} ± 12,6 | 331,1 ^{abc} ± 12,3 | 76,1 ± 2,3 | 72,7 ± 2,7 | 55,5 ^{abcd} ± 1,3 | 0,228 ^{cde} ± 0,04 | 0,31 |
| | | mittel | 362,4 ^d ± 9,5 | 344,5 ^{bcd} ± 5,3 | 73,0 ± 2,3 | 71,7 ± 1,3 | 55,6 ^{abcd} ± 0,7 | 0,259 ^{de} ± 0,02 | 0,29 |
| | | grob | 344,0 ^{bcd} ± 15,7 | 327,5 ^{abc} ± 15,4 | 69,8 ± 4,2 | 67,7 ± 3,3 | 55,3 ^{abc} ± 0,8 | 0,279 ^e ± 0,01 | 0,30 |
| | 2. Erntetermin | fein | 353,6 ^{cd} ± 1,3 | 341,1 ^{bcd} ± 4,3 | 89,6 ± 1,0 | 87,1 ± 1,2 | 55,0 ^{ab} ± 0,1 | 0,265 ^{de} ± 0,01 | 0,36 |
| | | mittel | 346,9 ^{cd} ± 14,5 | 330,2 ^{abc} ± 11,0 | 82,6 ± 3,7 | 81,4 ± 2,7 | 55,0 ^{ab} ± 0,2 | 0,251 ^{de} ± 0,02 | 0,34 |
| | | grob | 336,6 ^{abcd} ± 6,8 | 331,1 ^{abc} ± 15,0 | 81,8 ± 3,4 | 80,9 ± 3,7 | 55,5 ^{abcd} ± 0,1 | 0,255 ^{de} ± 0,01 | 0,37 |
| | 3. Erntetermin | fein | 365,0 ^d ± 9,3 | 361,2 ^d ± 9,4 | 114,6 ± 3,7 | 113,0 ± 3,0 | 57,8 ^{de} ± 0,6 | 0,244 ^{de} ± 0,00 | 0,45 |
| | | mittel | 353,9 ^{cd} ± 16,5 | 335,9 ^{abcd} ± 14,3 | 105,3 ± 4,3 | 104,8 ± 4,4 | 58,1 ^e ± 1,1 | 0,231 ^{cde} ± 0,02 | 0,42 |
| | | grob | 326,8 ^{abc} ± 7,8 | 319,9 ^{ab} ± 3,4 | 102,1 ± 1,1 | 101,8 ± 1,1 | 55,8 ^{abcd} ± 1,7 | 0,226 ^{cde} ± 0,03 | 0,46 |

abc... Mittelwerte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben innerhalb einer Tabellenspalte sind signifikant verschieden ($\alpha = 0,05$; Adjust = SIMULATE)

Tab. A34: Parameter und Kennwerte der Hill-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Mais der Sorte Benicia unter Variation von Erntetermin und Häcksellänge; Versuchsschwerpunkt I (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Erntetermin | Häcksellänge | $y_{\text{CH}_4, \text{max}}$ [$\text{N}^* \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$] | b | c | R^2 | $r_{\text{CH}_4, \text{max}}$ [$\text{N}^* \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}^* \text{d}^{-1}$] | $t(r_{\text{CH}_4, \text{max}})$ [d] |
|----------------------|----------------|--------------|--|--------------|--------------|-------|--|---|
| Silliergut | 1. Erntetermin | fein | 372,7 ± 5,0 | 1,215 ± 0,08 | 3,362 ± 0,09 | 0,997 | 75,0 ± 6,6 | 0,49 ± 0,21 |
| | | mittel | 354,8 ± 8,8 | 1,205 ± 0,03 | 3,324 ± 0,02 | 0,999 | 72,0 ± 2,9 | 0,46 ± 0,07 |
| | | grob | 357,0 ± 6,9 | 1,236 ± 0,03 | 3,098 ± 0,12 | 0,999 | 76,0 ± 2,6 | 0,50 ± 0,05 |
| | 2. Erntetermin | fein | 357,5 ± 8,3 | 1,354 ± 0,02 | 3,005 ± 0,07 | 0,997 | 74,2 ± 0,3 | 0,74 ± 0,04 |
| | | mittel | 357,9 ± 5,4 | 1,283 ± 0,03 | 3,382 ± 0,11 | 0,999 | 67,9 ± 2,0 | 0,66 ± 0,06 |
| | | grob | 400,4 ± 9,0 | 1,065 ± 0,01 | 5,558 ± 0,33 | 0,999 | 58,6 ± 4,0 | 0,22 ± 0,06 |
| | 3. Erntetermin | fein | 348,3 ± 8,5 | 1,424 ± 0,01 | 3,350 ± 0,13 | 0,998 | 63,9 ± 2,8 | 0,98 ± 0,02 |
| | | mittel | 332,1 ± 10,6 | 1,364 ± 0,03 | 4,184 ± 0,16 | 0,999 | 49,4 ± 0,3 | 1,06 ± 0,05 |
| | | grob | 329,2 ± 15,1 | 1,425 ± 0,10 | 4,965 ± 1,15 | 0,999 | 42,1 ± 8,1 | 1,50 ± 0,69 |
| Silage | 1. Erntetermin | fein | 360,3 ± 22,5 | 1,319 ± 0,24 | 3,268 ± 0,28 | 0,996 | 74,1 ± 15,0 | 0,72 ± 0,61 |
| | | mittel | 374,1 ± 12,7 | 1,255 ± 0,04 | 2,922 ± 0,21 | 0,998 | 83,6 ± 4,3 | 0,51 ± 0,06 |
| | | grob | 356,4 ± 12,2 | 1,192 ± 0,07 | 2,800 ± 0,24 | 0,998 | 87,7 ± 3,9 | 0,36 ± 0,11 |
| | 2. Erntetermin | fein | 349,1 ± 1,5 | 1,469 ± 0,02 | 2,596 ± 0,07 | 0,996 | 82,2 ± 1,9 | 0,84 ± 0,02 |
| | | mittel | 354,6 ± 12,0 | 1,257 ± 0,04 | 3,013 ± 0,27 | 0,996 | 77,1 ± 7,8 | 0,53 ± 0,04 |
| | | grob | 330,1 ± 3,3 | 1,396 ± 0,03 | 2,789 ± 0,04 | 0,993 | 73,1 ± 2,0 | 0,77 ± 0,07 |
| | 3. Erntetermin | fein | 364,5 ± 10,5 | 1,547 ± 0,02 | 2,871 ± 0,03 | 0,998 | 77,3 ± 1,6 | 1,06 ± 0,04 |
| | | mittel | 361,9 ± 20,1 | 1,358 ± 0,07 | 3,218 ± 0,37 | 0,998 | 70,6 ± 3,8 | 0,79 ± 0,10 |
| | | grob | 331,3 ± 13,0 | 1,396 ± 0,05 | 3,213 ± 0,43 | 0,997 | 64,2 ± 6,0 | 0,87 ± 0,03 |

Tab. A35: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateral-Verhältnis von frischem und siliertem Grünschnittrognen im Batch-Gärtest bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Lagerdauer [d] | Y_{CH4_zu} 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu}$] | Y_{CH4_orig} 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{orig}$] | Y_{CH4_zu} 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot FM_{zu}$] | Y_{CH4_orig} 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot FM_{orig}$] | C_{CH4} [Vol-%] | k (Y_{CH4_zu}) | a_i |
|----------------------|----------------------|-------------------|---|---|--|--|-------------------------|----------------------------|-------|
| Siliergut | 4 | 0 | 357,9 ^{bc} ± 7,1 | 357,9 ^{bcd} ± 7,1 | 78,3 ± 3,7 | 78,3 ± 3,7 | 62,5 ^a ± 0,9 | 0,116 ^{ab} ± 0,00 | 0,31 |
| | 8 | 0 | 343,9 _c ± 12,5 | 343,9 ^{abc} ± 12,5 | 76,5 ± 2,8 | 76,5 ± 2,8 | 62,1 ^a ± 0,5 | 0,103 ^a ± 0,00 | 0,31 |
| | 12 | 0 | 337,0 ^{ab} ± 3,6 | 337,0 ^{ab} ± 3,6 | 75,0 ± 0,8 | 75,0 ± 0,8 | 61,6 ^a ± 3,8 | 0,112 ^{ab} ± 0,01 | 0,31 |
| | 16 | 0 | 317,4 ^a ± 6,7 | 317,4 ^a ± 6,7 | 70,6 ± 1,5 | 70,6 ± 1,5 | 59,1 ^a ± 0,7 | 0,122 ^{bc} ± 0,00 | 0,31 |
| Silage | 4 | 90 | 377,0 ^d ± 6,6 | 372,7 ^d ± 9,0 | 83,4 ± 2,0 | 82,9 ± 2,0 | 62,7 ^a ± 0,2 | 0,134 ^{cd} ± 0,00 | 0,31 |
| | 8 | 90 | 371,1 ^d ± 10,8 | 364,3 ^{cd} ± 8,7 | 81,5 ± 1,9 | 81,0 ± 1,9 | 63,4 ^a ± 0,3 | 0,121 ^{bc} ± 0,00 | 0,30 |
| | 12 | 90 | 364,7 ^{cd} ± 9,6 | 358,4 ^{cd} ± 9,7 | 80,2 ± 2,2 | 79,7 ± 2,2 | 59,5 ^a ± 1,6 | 0,137 ^d ± 0,00 | 0,30 |
| | 16 | 90 | 368,6 ^d ± 1,2 | 347,3 ^{bc} ± 6,8 | 77,4 ± 1,7 | 77,0 ± 1,7 | 59,6 ^a ± 0,6 | 0,146 ^d ± 0,01 | 0,29 |

abc... Mittelwerte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben innerhalb einer Tabellenspalte sind signifikant verschieden ($\alpha = 0,05$; Adjust = SIMULATE)

Tab. A36: Parameter und Kennwerte der Hill-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Grünschnittrognen bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Lagerdauer [d] | Y_{CH4_max} [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu}$] | b | c | R^2 | r_{CH4_max} [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu} \cdot d^{-1}$] | $t(r_{CH4_max})$ [d] |
|----------------------|----------------------|-------------------|--|--------------|--------------|-------|---|--------------------------|
| Siliergut | 4 | 0 | 432,1 ± 10,1 | 1,156 ± 0,02 | 7,760 ± 0,20 | 0,999 | 39,4 ± 2,4 | 0,80 ± 0,13 |
| | 8 | 0 | 438,3 ± 16,7 | 1,092 ± 0,03 | 9,617 ± 0,16 | 0,998 | 35,3 ± 3,2 | 0,56 ± 0,19 |
| | 12 | 0 | 431,3 ± 3,2 | 1,037 ± 0,04 | 9,401 ± 0,49 | 0,998 | 40,7 ± 6,1 | 0,21 ± 0,22 |
| | 16 | 0 | 402,7 ± 10,7 | 1,013 ± 0,02 | 8,690 ± 0,22 | 0,999 | 41,5 ± 0,6 | 0,12 ± 0,01 |
| Silage | 4 | 90 | 417,7 ± 6,3 | 1,291 ± 0,02 | 5,847 ± 0,10 | 0,998 | 45,6 ± 1,2 | 1,18 ± 0,10 |
| | 8 | 90 | 431,8 ± 4,7 | 1,180 ± 0,04 | 7,132 ± 0,43 | 0,997 | 41,8 ± 1,3 | 0,85 ± 0,14 |
| | 12 | 90 | 474,7 ± 17,2 | 0,933 ± 0,02 | 8,552 ± 0,17 | 0,999 | n.b. | n.b. |
| | 16 | 90 | 447,6 ± 8,8 | 1,009 ± 0,02 | 6,941 ± 0,48 | 0,999 | 61,1 ± 0,1 | 0,06 ± 0,02 |

n.b. ... nicht berechenbar

Tab. A37: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmaterial-Verhältnis von frischem und siliertem Sudangras im Batch-Gärtest bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Lagerdauer [d] | Y_{CH4_zu} 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu}$] | Y_{CH4_orig} 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{orig}$] | Y_{CH4_zu} 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot FM_{zu}$] | Y_{CH4_orig} 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot FM_{orig}$] | C_{CH4} [Vol.-%] | k (Y_{CH4_zu}) | a_i |
|----------------------|----------------------|-------------------|---|---|--|--|-------------------------|-----------------------------|-------|
| Siliergut | 4 | 0 | 311,4 ^{cd} ± 4,3 | 311,4 ^{cd} ± 4,3 | 85,2 ± 1,2 | 85,2 ± 1,2 | 56,5 ^a ± 0,5 | 0,130 ^{abc} ± 0,01 | 0,38 |
| | 6 | 0 | 297,0 ^{bc} ± 2,6 | 297,0 ^{bc} ± 2,6 | 80,2 ± 0,7 | 80,2 ± 0,7 | 55,5 ^a ± 0,4 | 0,145 ^c ± 0,00 | 0,37 |
| | 8 | 0 | 300,0 ^{bc} ± 12,4 | 300,0 ^{bcd} ± 12,4 | 84,1 ± 3,5 | 84,1 ± 3,5 | 57,4 ^a ± 1,8 | 0,125 ^{abc} ± 0,00 | 0,39 |
| | 12 | 0 | 287,6 ^{ab} ± 4,2 | 287,6 ^{ab} ± 4,2 | 81,7 ± 1,2 | 81,7 ± 1,2 | 56,8 ^a ± 1,6 | 0,123 ^{ab} ± 0,01 | 0,39 |
| | 16 | 0 | 277,5 ^a ± 6,9 | 277,5 ^a ± 6,9 | 78,8 ± 2,0 | 78,8 ± 2,0 | 56,9 ^a ± 1,6 | 0,112 ^a ± 0,01 | 0,40 |
| Silage | 4 | 90 | 329,8 ^{de} ± 6,9 | 316,0 ^d ± 4,6 | 86,9 ± 1,1 | 86,3 ± 1,2 | 57,4 ^a ± 0,2 | 0,129 ^{abc} ± 0,00 | 0,37 |
| | 6 | 90 | 329,6 ^{de} ± 7,8 | 309,6 ^{cd} ± 3,2 | 84,1 ± 1,1 | 83,2 ± 0,9 | 57,7 ^a ± 0,4 | 0,143 ^{bc} ± 0,02 | 0,35 |
| | 8 | 90 | 339,9 ^e ± 5,7 | 312,8 ^{cd} ± 1,1 | 88,0 ± 0,3 | 87,0 ± 0,3 | 58,0 ^a ± 0,4 | 0,133 ^{bc} ± 0,01 | 0,36 |
| | 12 | 90 | 309,2 ^c ± 7,7 | 284,4 ^{ab} ± 4,8 | 81,0 ± 1,4 | 80,1 ± 1,5 | 57,5 ^a ± 0,7 | 0,131 ^{abc} ± 0,01 | 0,36 |
| | 16 | 90 | 309,8 ^c ± 2,6 | 278,5 ^a ± 4,3 | 80,8 ± 1,7 | 79,8 ± 1,7 | 58,0 ^a ± 0,3 | 0,133 ^{bc} ± 0,00 | 0,37 |

abc... Mittelwerte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben innerhalb einer Tabellenspalte sind signifikant verschieden ($\alpha = 0,05$; Adjust = SIMULATE)

Tab. A38: Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Sudangras bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Lagerdauer [d] | Y_{CH4_max} [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu}$] | b | c | R^2 | r_{CH4_max} [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu} \cdot d^{-1}$] | $t(r_{CH4_max})$ [d] |
|----------------------|----------------------|-------------------|--|--------------|---------------|-------|---|--------------------------|
| Siliergut | 4 | 0 | 534,8 ± 23,3 | 0,741 ± 0,01 | 18,172 ± 1,51 | 0,999 | n.b. | n.b. |
| | 6 | 0 | 461,4 ± 10,8 | 0,752 ± 0,02 | 13,367 ± 0,90 | 0,999 | n.b. | n.b. |
| | 8 | 0 | 493,9 ± 33,8 | 0,790 ± 0,07 | 16,974 ± 4,69 | 0,999 | n.b. | n.b. |
| | 12 | 0 | 436,2 ± 22,9 | 0,835 ± 0,08 | 13,894 ± 2,18 | 0,998 | n.b. | n.b. |
| | 16 | 0 | 395,7 ± 31,4 | 0,933 ± 0,04 | 12,055 ± 1,87 | 0,999 | n.b. | n.b. |
| Silage | 4 | 90 | 490,3 ± 5,2 | 0,834 ± 0,01 | 12,266 ± 0,65 | 0,999 | n.b. | n.b. |
| | 6 | 90 | 473,7 ± 35,4 | 0,830 ± 0,03 | 11,044 ± 3,88 | 0,999 | n.b. | n.b. |
| | 8 | 90 | 526,1 ± 19,1 | 0,796 ± 0,03 | 13,948 ± 0,79 | 0,999 | n.b. | n.b. |
| | 12 | 90 | 463,9 ± 12,5 | 0,811 ± 0,04 | 13,390 ± 0,63 | 0,997 | n.b. | n.b. |
| | 16 | 90 | 431,8 ± 7,6 | 0,863 ± 0,02 | 10,937 ± 0,17 | 0,997 | n.b. | n.b. |

n.b. nicht berechenbar

Tab. A39: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmaterial-Verhältnis von frischer und silierter Triticale im Batch-Gärtest bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Laborhäcksler); Versuchsschwerpunkt II (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Lagerdauer [d] | $Y_{CH_4_zu}$ 30 d [N*kg ⁻¹ oTM _{zu}] | $Y_{CH_4_orig}$ 30 d [N*kg ⁻¹ oTM _{orig}] | $Y_{CH_4_zu}$ 30 d [N*kg ⁻¹ FM _{zu}] | $Y_{CH_4_orig}$ 30 d [N*kg ⁻¹ FM _{orig}] | C_{CH_4} [Vol-%] | k (Y _{CH₄_zu}) | a _i |
|----------------------|----------------------|-------------------|---|---|--|--|--------------------------|-------------------------------------|----------------|
| Siliergut | 6 | 0 | 335,7 ^c ± 2,6 | 335,7 ^{cd} ± 2,6 | 114,8 ± 0,9 | 114,8 ± 0,9 | 55,7 ^{ab} ± 0,4 | 0,148 ^a ± 0,03 | 0,51 |
| | 8 | 0 | 323,5 ^{bc} ± 4,9 | 323,5 ^{bc} ± 4,9 | 112,9 ± 1,7 | 112,9 ± 1,7 | 55,2 ^a ± 0,5 | 0,157 ^a ± 0,01 | 0,52 |
| | 12 | 0 | 320,0 ^b ± 5,2 | 320,0 ^b ± 5,2 | 111,4 ± 1,8 | 111,4 ± 1,8 | 55,3 ^a ± 0,6 | 0,137 ^a ± 0,02 | 0,52 |
| | 16 | 0 | 302,3 ^a ± 5,2 | 302,3 ^a ± 5,2 | 105,1 ± 1,8 | 105,1 ± 1,8 | 55,5 ^{ab} ± 0,8 | 0,132 ^a ± 0,01 | 0,52 |
| Silage | 4 | 90 | 369,4 ^d ± 4,6 | 338,7 ^d ± 6,9 | 117,0 ± 1,4 | 114,9 ± 2,5 | 57,3 ^{ab} ± 1,6 | 0,230 ^b ± 0,03 | 0,47 |
| | 8 | 90 | 374,1 ^d ± 4,1 | 329,7 ^{bcd} ± 2,4 | 116,5 ± 0,9 | 113,0 ± 1,2 | 57,9 ^b ± 0,7 | 0,245 ^b ± 0,01 | 0,46 |
| | 12 | 90 | 375,8 ^d ± 2,5 | 334,1 ^{cd} ± 4,1 | 118,0 ± 1,7 | 114,6 ± 1,6 | 57,9 ^b ± 0,6 | 0,230 ^b ± 0,01 | 0,47 |
| | 16 | 90 | 370,7 ^d ± 7,0 | 335,1 ^{cd} ± 5,3 | 117,9 ± 1,9 | 115,2 ± 1,8 | 57,4 ^{ab} ± 0,7 | 0,223 ^b ± 0,01 | 0,47 |

abc... Mittelwerte mit unterschiedlichen Hochbuchstaben innerhalb einer Tabellenspalte sind signifikant verschieden ($\alpha = 0,05$; Adjust = SIMULATE)

Tab. A40: Parameter und Kennwerte der Hill-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischer und silierter Triticale bei unterschiedlichen theoretischen Häcksellängen (Laborhäcksler); VS II (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Lagerdauer [d] | $Y_{CH_4_max}$ [N*kg ⁻¹ oTM _{zu}] | b | c | R ² | $r_{CH_4_max}$ [N*kg ⁻¹ oTM _{zu} *d ⁻¹] | t(r _{CH₄_max}) [d] |
|----------------------|----------------------|-------------------|--|--------------|--------------|----------------|---|--|
| Siliergut | 6 | 0 | 385,0 ± 10,3 | 1,174 ± 0,06 | 5,928 ± 1,07 | 0,999 | 46,7 ± 11,3 | 0,72 ± 0,35 |
| | 8 | 0 | 358,7 ± 6,8 | 1,204 ± 0,03 | 5,253 ± 0,20 | 0,999 | 46,1 ± 1,1 | 0,73 ± 0,10 |
| | 12 | 0 | 363,3 ± 10,4 | 1,137 ± 0,06 | 6,048 ± 0,60 | 0,999 | 40,3 ± 4,7 | 0,95 ± 0,34 |
| | 16 | 0 | 344,7 ± 8,1 | 1,219 ± 0,06 | 6,302 ± 0,37 | 0,999 | 36,7 ± 2,8 | 0,95 ± 0,31 |
| Silage | 4 | 90 | 385,1 ± 5,6 | 1,214 ± 0,03 | 3,423 ± 0,38 | 0,997 | 76,0 ± 9,2 | 0,50 ± 0,13 |
| | 8 | 90 | 381,6 ± 8,0 | 1,253 ± 0,04 | 3,118 ± 0,20 | 0,996 | 80,0 ± 3,3 | 0,54 ± 0,08 |
| | 12 | 90 | 381,1 ± 4,1 | 1,303 ± 0,02 | 3,240 ± 0,15 | 0,996 | 74,9 ± 3,6 | 0,68 ± 0,09 |
| | 16 | 90 | 376,8 ± 7,6 | 1,303 ± 0,03 | 3,362 ± 0,13 | 0,996 | 71,3 ± 2,2 | 0,71 ± 0,09 |

Tab. A41: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateral-Verhältnis von frischem und siliertem Mais im Batch-Gärtest bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksel- länge [mm] | Silier- zusatz | Lagerdauer [d] | $Y_{CH_4_zu}$ 30 d [$N^*kg^{-1} oTM_{zu}$] | $Y_{CH_4_orig}$ 30 d [$N^*kg^{-1} oTM_{orig}$] | $Y_{CH_4_zu}$ 30 d [$N^*kg^{-1} FM_{zu}$] | $Y_{CH_4_orig}$ 30 d [$N^*kg^{-1} FM_{orig}$] | C_{CH_4} | k ($Y_{CH_4_zu}$) [d^{-1}] | a_i |
|----------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|---|---|--|--|------------|---|-------|
| Siliergut | 4 | ohne | 0 | 355,3±3,6 | 355,3±3,6 | 112,1±1,1 | 112,1±1,1 | 54,5±0,7 | 0,220±0,01 | 0,43 |
| Silage | 4 | ohne | 10 | 359,8±13,6 | 358,0±16,8 | 113,1±5,4 | 113,0±5,3 | 54,8±1,1 | 0,231±0,04 | 0,43 |
| | 4 | ohne | 90 | 362,6±9,2 | 354,1±8,7 | 112,5±2,7 | 111,7±2,7 | 54,3±0,2 | 0,233±0,01 | 0,44 |
| | 4 | ohne | 180 | 361,7±10,9 | 353,4±6,4 | 112,9±2,1 | 111,5±1,9 | 54,6±1,2 | 0,231±0,04 | 0,44 |
| | 4 | ohne | 365 | 362,5±0,5 | 353,2±1,7 | 112,6±0,5 | 111,4±0,5 | 54,9±0,4 | 0,263±0,01 | 0,42 |
| Siliergut | 4 | Chem. A | 0 | 364,4±5,4 | 364,4±5,4 | 115,5±1,7 | 115,5±1,7 | 53,6±0,1 | 0,225±0,01 | 0,45 |
| Silage | 4 | Chem. A | 90 | 362,9±11,1 | 353,5±13,9 | 112,4±4,6 | 111,9±4,5 | 54,2±0,3 | 0,245±0,00 | 0,44 |
| Siliergut | 4 | MSB-komb. A | 0 | 360,6±13,7 | 360,6±13,7 | 116,9±4,5 | 116,9±4,5 | 55,0±0,7 | 0,229±0,00 | 0,44 |
| Silage | 4 | MSB-komb. A | 90 | 367,3±12,7 | 350,1±11,2 | 114,9±3,7 | 113,4±3,7 | 54,9±0,3 | 0,151±0,02 | 0,45 |
| Siliergut | 8 | ohne | 0 | 329,9±6,6 | 329,9±6,6 | 102,1±2,1 | 102,1±2,1 | 54,3±0,9 | 0,216±0,01 | 0,43 |
| Silage | 8 | ohne | 10 | 341,7±13,0 | 338,4±13,5 | 105,0±4,3 | 104,8±4,2 | 55,3±0,2 | 0,251±0,03 | 0,43 |
| | 8 | ohne | 90 | 359,8±7,1 | 345,5±5,1 | 107,7±1,6 | 106,8±1,6 | 56,9±0,4 | 0,276±0,01 | 0,40 |
| | 8 | ohne | 180 | 373,1±9,6 | 352,9±5,2 | 110,3±1,7 | 108,9±1,6 | 57,8±0,3 | 0,267±0,01 | 0,40 |
| | 8 | ohne | 365 | 378,4±18,5 | 351,4±22,6 | 109,8±7,6 | 108,1±7,5 | 56,1±0,0 | 0,271±0,01 | 0,45 |
| Siliergut | 8 | Chem. A | 0 | 337,1±4,0 | 337,1±4,0 | 105,2±1,2 | 105,2±1,2 | 55,8±0,3 | 0,222±0,01 | 0,42 |
| Silage | 8 | Chem. A | 90 | 343,4±11,5 | 333,6±6,7 | 104,4±2,1 | 103,9±2,0 | 56,3±0,8 | 0,233±0,03 | 0,41 |
| Siliergut | 8 | MSB-komb. A | 0 | 325,3±9,8 | 325,3±9,8 | 103,0±3,1 | 103,0±3,1 | 55,6±0,2 | 0,220±0,01 | 0,43 |
| Silage | 8 | MSB-komb. A | 90 | 371,5±16,2 | 328,8±9,7 | 103,8±2,9 | 102,4±2,6 | 56,0±1,2 | 0,174±0,04 | 0,39 |
| Siliergut | 8 | MSB-ho | 0 | 332,0±11,3 | 332,0±11,3 | 103,1±3,5 | 103,1±3,5 | 54,9±0,5 | 0,223±0,02 | 0,43 |
| Silage | 8 | MSB-ho | 90 | 357,9±7,6 | 331,9±3,8 | 104,6±2,6 | 102,4±1,5 | 57,1±0,5 | 0,260±0,02 | 0,40 |
| Siliergut | 8 | MSB-komb. B | 0 | 334,8±8,3 | 334,8±8,3 | 105,5±2,6 | 105,5±2,6 | 55,5±0,7 | 0,228±0,01 | 0,43 |
| Silage | 8 | MSB-komb. B | 90 | 361,6±13,8 | 342,1±16,8 | 108,8±5,6 | 107,4±5,5 | 57,0±1,4 | 0,227±0,05 | 0,41 |

Tab. A42: Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Mais bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Silierzusatz | Lagerdauer [d] | $y_{\text{CH}_4, \text{max}}$ [$\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{OTM}$] | b | c | R^2 | $r_{\text{CH}_4, \text{max}}$ [$\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{OTM}_{\text{zu}} \cdot \text{d}^{-1}$] | $t(t_{\text{CH}_4, \text{max}})$ [d] |
|----------------------|----------------------|--------------|-------------------|---|--------------|--------------|-------|---|---|
| Siliergut | 4 | ohne | 0 | 363,1 ± 10,2 | 1,368 ± 0,07 | 3,343 ± 0,17 | 0,998 | 67,8 ± 2,7 | 0,85 ± 0,13 |
| Silage | 4 | ohne | 10 | 355,8 ± 9,4 | 1,624 ± 0,16 | 3,025 ± 0,50 | 0,998 | 73,5 ± 10,9 | 1,26 ± 0,44 |
| | 4 | ohne | 90 | 356,3 ± 9,6 | 1,591 ± 0,01 | 2,934 ± 0,13 | 0,998 | 74,0 ± 1,3 | 1,16 ± 0,04 |
| | 4 | ohne | 180 | 359,0 ± 11,4 | 1,561 ± 0,11 | 3,022 ± 0,42 | 0,997 | 73,5 ± 9,5 | 1,15 ± 0,32 |
| | 4 | ohne | 365 | 352,2 ± 2,5 | 1,639 ± 0,03 | 2,538 ± 0,07 | 0,996 | 84,8 ± 1,8 | 1,07 ± 0,01 |
| Siliergut | 4 | Chem. A | 0 | 362,3 ± 6,4 | 1,546 ± 0,02 | 3,070 ± 0,10 | 0,998 | 71,9 ± 1,5 | 1,13 ± 0,01 |
| Silage | 4 | Chem. A | 90 | 356,0 ± 13,4 | 1,637 ± 0,02 | 2,788 ± 0,03 | 0,998 | 78,0 ± 2,2 | 1,17 ± 0,04 |
| Siliergut | 4 | MSB-komb. A | 0 | 369,7 ± 14,6 | 1,355 ± 0,04 | 3,220 ± 0,06 | 0,999 | 71,6 ± 1,9 | 0,80 ± 0,09 |
| Silage | 4 | MSB-komb. A | 90 | 384,1 ± 9,1 | 1,420 ± 0,11 | 4,964 ± 1,07 | 0,995 | 51,0 ± 4,6 | 1,38 ± 0,11 |
| Siliergut | 8 | ohne | 0 | 332,4 ± 11,7 | 1,473 ± 0,13 | 3,276 ± 0,10 | 0,998 | 62,5 ± 3,0 | 1,05 ± 0,28 |
| Silage | 8 | ohne | 10 | 341,8 ± 13,0 | 1,365 ± 0,13 | 2,929 ± 0,27 | 0,996 | 73,8 ± 6,0 | 0,74 ± 0,26 |
| | 8 | ohne | 90 | 357,4 ± 3,0 | 1,398 ± 0,11 | 2,613 ± 0,11 | 0,997 | 85,1 ± 3,8 | 0,72 ± 0,18 |
| | 8 | ohne | 180 | 371,4 ± 10,7 | 1,402 ± 0,09 | 2,687 ± 0,02 | 0,997 | 85,6 ± 3,8 | 0,75 ± 0,15 |
| | 8 | ohne | 365 | 368,3 ± 21,1 | 1,605 ± 0,02 | 2,485 ± 0,14 | 0,996 | 90,4 ± 1,9 | 1,00 ± 0,03 |
| Siliergut | 8 | Chem. A | 0 | 351,1 ± 2,4 | 1,263 ± 0,09 | 3,477 ± 0,16 | 0,999 | 66,0 ± 2,5 | 0,62 ± 0,20 |
| Silage | 8 | Chem. A | 90 | 336,6 ± 4,4 | 1,604 ± 0,27 | 2,954 ± 0,24 | 0,996 | 70,9 ± 3,8 | 1,17 ± 0,52 |
| Siliergut | 8 | MSB-komb. A | 0 | 338,8 ± 6,0 | 1,272 ± 0,11 | 3,508 ± 0,29 | 0,998 | 63,2 ± 1,4 | 0,64 ± 0,22 |
| Silage | 8 | MSB-komb. A | 90 | 384,8 ± 20,6 | 1,408 ± 0,31 | 4,652 ± 1,55 | 0,994 | 60,0 ± 16,6 | 1,04 ± 0,32 |
| Siliergut | 8 | MSB-ho | 0 | 336,9 ± 11,4 | 1,396 ± 0,08 | 3,240 ± 0,13 | 0,998 | 64,6 ± 4,9 | 0,89 ± 0,20 |
| Silage | 8 | MSB-ho | 90 | 355,2 ± 4,9 | 1,432 ± 0,10 | 2,733 ± 0,16 | 0,996 | 80,3 ± 6,2 | 0,82 ± 0,21 |
| Siliergut | 8 | MSB-komb. B | 0 | 344,2 ± 7,9 | 1,311 ± 0,03 | 3,293 ± 0,14 | 0,998 | 66,3 ± 3,5 | 0,71 ± 0,05 |
| Silage | 8 | MSB-komb. B | 90 | 367,6 ± 23,0 | 1,438 ± 0,10 | 3,271 ± 0,86 | 0,997 | 71,5 ± 13,3 | 0,97 ± 0,27 |

Tab. A43: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateral-Verhältnis von frischem und siliertem Grünschnitttroggen im Batch-Gärtest bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksel- länge [mm] | Silier- zusatz | Lagerdauer [d] | $Y_{CH_4_zu}$ 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu}$] | $Y_{CH_4_orig}$ 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{orig}$] | $Y_{CH_4_zu}$ 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot FM_{zu}$] | $Y_{CH_4_orig}$ 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot FM_{orig}$] | C_{CH_4} | k ($Y_{CH_4_zu}$) [d^{-1}] | a_i |
|----------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|--|--|---|---|------------|---|-------|
| Siliergut | 6,8 | ohne | 0 | 325,2±0,9 | 325,2±0,9 | 74,8±0,2 | 74,8±0,2 | 57,5±1,5 | 0,108±0,02 | 0,46 |
| Silage | 6,8 | ohne | 10 | 332,2±6,7 | 323,1±3,2 | 74,6±0,7 | 74,2±0,7 | 60,5±0,6 | 0,140±0,02 | 0,42 |
| | 6,8 | ohne | 90 | 344,7±6,8 | 335,9±6,4 | 77,7±1,5 | 77,2±1,5 | 59,3±0,7 | 0,118±0,02 | 0,45 |
| | 6,8 | ohne | 180 | 345,9±8,7 | 334,8±3,8 | 77,4±0,9 | 76,9±0,8 | 60,3±0,6 | 0,139±0,02 | 0,41 |
| | 6,8 | ohne | 365 | 329,9±12,8 | 317,2±13,9 | 73,4±3,1 | 72,8±3,2 | 59,6±1,7 | 0,128±0,03 | 0,34 |
| Siliergut | 6,8 | Chem. B | 0 | 318,4±3,4 | 318,4±3,4 | 71,7±0,8 | 71,7±0,8 | 60,1±0,7 | 0,145±0,02 | 0,38 |
| Silage | 6,8 | Chem. B | 10 | 326,2±6,0 | 324,8±6,1 | 73,4±1,4 | 73,1±1,4 | 60,6±0,8 | 0,137±0,02 | 0,42 |
| | 6,8 | Chem. B | 90 | 332,7±8,7 | 328,2±9,3 | 74,5±2,1 | 73,9±2,1 | 61,4±1,0 | 0,138±0,01 | 0,41 |
| Siliergut | 6,8 | MSB-komb. A | 0 | 317,6±7,2 | 317,6±7,2 | 71,0±1,6 | 71,0±1,6 | 60,7±1,3 | 0,161±0,02 | 0,38 |
| Silage | 6,8 | MSB-komb. A | 10 | 329,1±4,7 | 320,1±4,4 | 71,9±1,0 | 71,5±1,0 | 60,8±0,8 | 0,147±0,02 | 0,40 |
| | 6,8 | MSB-komb. A | 90 | 335,4±5,7 | 319,0±4,7 | 72,2±1,1 | 71,2±1,0 | 63,0±0,7 | 0,140±0,01 | 0,40 |
| Siliergut | 11 | ohne | 0 | 293,3±3,0 | 293,3±3,0 | 69,9±0,7 | 69,9±0,7 | 57,1±1,7 | 0,108±0,03 | 0,47 |
| Silage | 11 | ohne | 10 | 320,6±3,1 | 307,0±4,5 | 73,4±1,1 | 73,0±1,1 | 59,3±0,5 | 0,146±0,01 | 0,42 |
| | 11 | ohne | 90 | 333,7±3,6 | 308,3±3,3 | 73,5±0,7 | 73,0±0,8 | 59,6±0,5 | 0,129±0,02 | 0,44 |
| | 11 | ohne | 180 | 346,2±7,5 | 317,4±6,4 | 75,9±1,5 | 75,1±1,5 | 60,3±1,6 | 0,147±0,01 | 0,41 |
| | 11 | ohne | 365 | 343,5±20,7 | 313,4±15,7 | 75,2±3,8 | 74,0±3,6 | 61,3±1,9 | 0,125±0,02 | 0,33 |
| Siliergut | 11 | Chem. B | 0 | 304,1±15,3 | 304,1±15,3 | 69,7±3,5 | 69,7±3,5 | 58,1±1,9 | 0,128±0,03 | 0,39 |
| Silage | 11 | Chem. B | 10 | 312,4±0,6 | 311,0±0,9 | 71,4±0,2 | 71,3±0,2 | 59,6±0,5 | 0,140±0,01 | 0,42 |
| | 11 | Chem. B | 90 | 319,0±4,6 | 311,5±4,1 | 71,5±0,9 | 71,3±0,9 | 59,5±0,6 | 0,144±0,01 | 0,41 |
| Siliergut | 11 | MSB-komb. A | 0 | 304,6±5,5 | 304,6±5,5 | 73,5±1,3 | 73,5±1,3 | 58,0±1,4 | 0,125±0,02 | 0,41 |
| Silage | 11 | MSB-komb. A | 10 | 323,7±6,0 | 316,7±4,4 | 76,7±1,1 | 76,4±1,0 | 59,6±1,0 | 0,131±0,01 | 0,44 |
| | 11 | MSB-komb. A | 90 | 342,9±8,8 | 318,5±10,3 | 77,5±2,5 | 76,4±2,6 | 61,6±0,7 | 0,134±0,01 | 0,42 |

Tab. A44: Parameter und Kennwerte der Hill-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Grünschnitt-roggen bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Silierzusatz | Lagerdauer [d] | $y_{\text{CH}_4, \text{max}}$ [$\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{oTM}$] | b | c | R^2 | $r_{\text{CH}_4, \text{max}}$ [$\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{oTM}_{\text{zu}} \cdot \text{d}^{-1}$] | $t(r_{\text{CH}_4, \text{max}})$ [d] |
|----------------------|----------------------|--------------|-------------------|---|------------|------------|-------|---|---|
| Siliergut | 6,8 | ohne | 0 | 368,2±14,4 | 1,281±0,17 | 7,386±0,33 | 0,997 | 33,5±6,2 | 1,44±0,92 |
| Silage | 6,8 | ohne | 10 | 377,0±8,8 | 1,178±0,08 | 6,117±0,28 | 0,998 | 43,5±6,9 | 0,74±0,38 |
| | 6,8 | ohne | 90 | 382,4±13,3 | 1,318±0,11 | 6,443±0,35 | 0,998 | 38,1±0,6 | 1,43±0,60 |
| | 6,8 | ohne | 180 | 384,1±6,7 | 1,249±0,07 | 5,737±0,40 | 0,998 | 44,1±3,5 | 0,99±0,30 |
| | 6,8 | ohne | 365 | 356,9±29,6 | 1,397±0,23 | 5,792±0,41 | 0,998 | 40,7±10,8 | 1,59±0,99 |
| Siliergut | 6,8 | Chem. B | 0 | 382,0±11,2 | 1,037±0,06 | 6,995±0,62 | 0,998 | 43,8±7,0 | 0,29±0,17 |
| Silage | 6,8 | Chem. B | 10 | 377,8±9,6 | 1,130±0,04 | 6,541±0,52 | 0,998 | 42,5±4,9 | 0,56±0,21 |
| | 6,8 | Chem. B | 90 | 386,5±4,3 | 1,144±0,06 | 6,411±0,15 | 0,999 | 43,5±2,4 | 0,61±0,26 |
| Siliergut | 6,8 | MSB-komb. A | 0 | 378,9±15,3 | 1,004±0,07 | 6,424±0,14 | 0,998 | 43,3 ¹⁾ | 0,32 ¹⁾ |
| Silage | 6,8 | MSB-komb. A | 10 | 369,0±10,7 | 1,174±0,07 | 5,778±0,30 | 0,998 | 45,0±6,7 | 0,68±0,30 |
| | 6,8 | MSB-komb. A | 90 | 377,7±8,4 | 1,201±0,01 | 5,921±0,30 | 0,998 | 43,2±1,2 | 0,81±0,07 |
| Siliergut | 11 | ohne | 0 | 329,1±8,8 | 1,309±0,18 | 7,296±0,96 | 0,997 | 30,6±9,0 | 1,63±1,09 |
| Silage | 11 | ohne | 10 | 357,7±7,0 | 1,181±0,06 | 5,756±0,07 | 0,998 | 43,1±3,3 | 0,70±0,23 |
| | 11 | ohne | 90 | 360,0±8,6 | 1,355±0,18 | 5,800±0,49 | 0,997 | 39,9±5,5 | 1,44±0,83 |
| | 11 | ohne | 180 | 376,6±10,9 | 1,259±0,02 | 5,379±0,25 | 0,998 | 45,5±1,0 | 0,96±0,03 |
| | 11 | ohne | 365 | 365,9±38,7 | 1,496±0,34 | 5,698±0,16 | 0,997 | 40,9±5,5 | 1,82±1,12 |
| Siliergut | 11 | Chem. B | 0 | 341,5±28,9 | 1,234±0,20 | 6,517±0,39 | 0,997 | 37,2±9,6 | 1,04±0,92 |
| Silage | 11 | Chem. B | 10 | 355,6±6,3 | 1,137±0,03 | 6,341±0,39 | 0,997 | 40,6±1,4 | 0,56±0,12 |
| | 11 | Chem. B | 90 | 356,7±7,6 | 1,179±0,04 | 5,870±0,19 | 0,998 | 42,1±2,8 | 0,71±0,20 |
| Siliergut | 11 | MSB-komb. A | 0 | 349,5±22,9 | 1,197±0,21 | 7,014±0,07 | 0,997 | 36,8±7,1 | 0,92±1,04 |
| Silage | 11 | MSB-komb. A | 10 | 359,7±2,2 | 1,244±0,11 | 6,175±0,20 | 0,998 | 38,8±3,1 | 1,03±0,52 |
| | 11 | MSB-komb. A | 90 | 380,1±6,9 | 1,254±0,05 | 5,988±0,39 | 0,998 | 41,6±4,6 | 0,97±0,15 |

¹⁾ n = 1

Tab. A45: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateriale-Verhältnis von frischem und siliertem Sudangras im Batch-Gärtest bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksel- länge [mm] | Silier- zusatz | Lagerdauer [d] | $Y_{CH_4_zu}$ 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu}$] | $Y_{CH_4_orig}$ 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{orig}$] | $Y_{CH_4_zu}$ 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot FM_{zu}$] | $Y_{CH_4_orig}$ 30 d [$N \cdot kg^{-1} \cdot FM_{orig}$] | C_{CH_4} | k ($Y_{CH_4_zu}$) [d^{-1}] | a_i |
|----------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|--|--|---|---|------------|---|-------|
| Siliergut | 4 | ohne | 0 | 317,1±11,7 | 317,1±11,7 | 89,3±3,3 | 89,3±3,3 | 54,0±2,4 | 0,160±0,01 | 0,38 |
| Silage | 4 | ohne | 10 | 317,8±12,2 | 303,4±12,4 | 86,1±3,7 | 85,2±3,6 | 55,8±0,1 | 0,140±0,01 | 0,37 |
| | 4 | ohne | 90 | 327,4±2,7 | 301,8±10,8 | 85,3±3,7 | 84,3±3,6 | 55,5±0,4 | 0,139±0,02 | 0,36 |
| | 4 | ohne | 180 | 333,3±14,3 | 309,7±8,1 | 87,6±2,2 | 86,7±2,1 | 56,4±0,5 | 0,133±0,00 | 0,36 |
| | 4 | ohne | 365 | 345,7±3,8 | 314,5±1,1 | 89,3±0,5 | 87,8±0,2 | 55,8±0,2 | 0,128±0,00 | 0,35 |
| Siliergut | 4 | Chem. B | 0 | 305,6±6,6 | 305,6±6,6 | 86,7±1,9 | 86,7±1,9 | 53,5±0,2 | 0,150±0,01 | 0,38 |
| Silage | 4 | Chem. B | 10 | 311,2±7,6 | 305,0±7,8 | 86,8±2,2 | 86,5±2,2 | 53,2±1,6 | 0,146±0,01 | 0,38 |
| | 4 | Chem. B | 90 | 320,9±9,6 | 306,9±13,8 | 87,7±3,7 | 86,9±4,0 | 54,3±0,3 | 0,148±0,02 | 0,37 |
| Siliergut | 4 | MSB-komb. A | 0 | 287,6±1,7 | 287,6±1,7 | 80,1±0,5 | 80,1±0,5 | 53,1±1,9 | 0,145±0,00 | 0,38 |
| Silage | 4 | MSB-komb. A | 10 | 321,2±9,8 | 312,8±9,0 | 87,8±2,5 | 87,1±2,5 | 56,2±1,2 | 0,142±0,01 | 0,37 |
| | 4 | MSB-komb. A | 90 | 325,6±3,4 | 299,7±4,1 | 84,2±1,3 | 82,9±1,3 | 56,3±0,5 | 0,109±0,02 | 0,35 |
| Siliergut | 7 | ohne | 0 | 290,4±2,9 | 290,4±2,9 | 82,8±0,8 | 82,8±0,8 | 53,3±0,8 | 0,128±0,02 | 0,38 |
| Silage | 7 | ohne | 10 | 307,3±10,5 | 269,7±17,7 | 75,8±6,5 | 75,1±6,3 | 57,0±3,2 | 0,113±0,02 | 0,34 |
| | 7 | ohne | 90 | 298,5±16,3 | 281,4±16,4 | 81,3±4,7 | 80,0±4,7 | 60,2±1,7 | 0,102±0,02 | 0,37 |
| | 7 | ohne | 180 | 322,6±5,0 | 275,4±22,1 | 76,7±8,4 | 76,0±8,0 | 60,1±0,5 | 0,107±0,01 | 0,33 |
| | 7 | ohne | 365 | 330,1±4,7 | 293,9±11,2 | 84,0±3,9 | 82,6±3,7 | 60,4±0,4 | 0,105±0,02 | 0,35 |
| Siliergut | 7 | Chem. B | 0 | 283,3±1,9 | 283,3±1,9 | 80,8±0,5 | 80,8±0,5 | 54,7±2,7 | 0,127±0,01 | 0,38 |
| Silage | 7 | Chem. B | 10 | 310,2±12,4 | 299,1±9,6 | 85,4±2,7 | 85,2±2,7 | 58,6±1,2 | 0,124±0,01 | 0,38 |
| | 7 | Chem. B | 90 | 297,5±8,7 | 280,6±6,3 | 80,1±1,8 | 79,7±2,0 | 55,0±0,9 | 0,161±0,02 | 0,36 |
| Siliergut | 7 | MSB-komb. A | 0 | 289,7±5,5 | 289,7±5,5 | 77,4±1,5 | 77,4±1,5 | 53,2±0,4 | 0,140±0,01 | 0,36 |
| Silage | 7 | MSB-komb. A | 10 | 288,7±4,7 | 270,6±6,8 | 72,6±2,0 | 72,0±2,0 | 54,8±0,4 | 0,149±0,01 | 0,34 |
| | 7 | MSB-komb. A | 90 | 302,2±19,0 | 276,4±15,3 | 74,4±4,2 | 73,3±4,1 | 55,5±0,1 | 0,141±0,01 | 0,33 |

Tab. A46: Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischem und siliertem Sudangras bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Silierzusatz | Lagerdauer [d] | $y_{\text{CH}_4, \text{max}}$ [$\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{OTM}$] | b | c | R^2 | $r_{\text{CH}_4, \text{max}}$ [$\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{OTM}_{\text{zu}} \cdot \text{d}^{-1}$] | $t(r_{\text{CH}_4, \text{max}})$ [d] |
|----------------------|----------------------|--------------|-------------------|---|------------|------------|-------|---|---|
| Siliergut | 4 | ohne | 0 | 358,9±20,2 | 1,143±0,13 | 5,470±0,61 | 0,997 | 50,1±8,5 | 0,49±0,44 |
| Silage | 4 | ohne | 10 | 344,2±14,5 | 1,270±0,03 | 5,589±0,36 | 0,993 | 39,9±3,0 | 1,05±0,16 |
| | 4 | ohne | 90 | 348,0±11,0 | 1,364±0,11 | 5,397±0,57 | 0,996 | 40,7±3,5 | 1,35±0,38 |
| | 4 | ohne | 180 | 363,8±7,0 | 1,317±0,14 | 5,813±0,70 | 0,996 | 40,6±2,1 | 1,23±0,47 |
| | 4 | ohne | 365 | 368,7±7,8 | 1,403±0,08 | 5,634±0,34 | 0,995 | 40,5±1,3 | 1,56±0,19 |
| Siliergut | 4 | Chem. B | 0 | 385,8±43,0 | 0,989±0,18 | 7,515±1,29 | 0,998 | 37,3 ¹⁾ | 0,81 ¹⁾ |
| Silage | 4 | Chem. B | 10 | 344,1±21,9 | 1,235±0,13 | 5,593±0,32 | 0,996 | 41,9±5,7 | 0,88±0,49 |
| | 4 | Chem. B | 90 | 349,0±16,1 | 1,260±0,07 | 5,343±0,34 | 0,996 | 42,8±4,0 | 0,96±0,30 |
| Siliergut | 4 | MSB-komb. A | 0 | 368,3±30,2 | 0,969±0,12 | 8,105±1,45 | 0,998 | 39,0 ¹⁾ | 0,43 ¹⁾ |
| Silage | 4 | MSB-komb. A | 10 | 352,3±1,9 | 1,259±0,02 | 5,615±0,57 | 0,996 | 41,0±4,1 | 1,00±0,04 |
| | 4 | MSB-komb. A | 90 | 335,8±14,7 | 1,705±0,29 | 5,860±0,45 | 0,995 | 36,1±3,3 | 2,59±0,95 |
| Siliergut | 7 | ohne | 0 | 361,9±33,5 | 1,081±0,22 | 8,113±1,06 | 0,998 | 33,5±7,7 | 0,95±1,01 |
| Silage | 7 | ohne | 10 | 339,2±30,4 | 1,401±0,26 | 6,692±0,78 | 0,997 | 32,7±3,4 | 1,76±1,11 |
| | 7 | ohne | 90 | 332,3±18,3 | 1,441±0,22 | 7,074±0,49 | 0,998 | 29,6±3,2 | 2,14±1,14 |
| | 7 | ohne | 180 | 357,6±13,6 | 1,423±0,14 | 6,825±0,11 | 0,999 | 32,5±1,7 | 1,98±0,62 |
| | 7 | ohne | 365 | 360,3±15,2 | 1,475±0,22 | 6,757±0,36 | 0,998 | 33,4±2,8 | 2,16±1,01 |
| Siliergut | 7 | Chem. B | 0 | 353,0±25,4 | 1,068±0,15 | 8,071±0,86 | 0,998 | 34,1±5,5 | 0,64±0,70 |
| Silage | 7 | Chem. B | 10 | 362,5±25,7 | 1,186±0,04 | 7,027±0,76 | 0,998 | 35,5±0,4 | 0,87±0,17 |
| | 7 | Chem. B | 90 | 371,9±15,2 | 0,950±0,07 | 6,906±0,69 | 0,998 | n.b. | n.b. |
| Siliergut | 7 | MSB-komb. A | 0 | 382,1±21,9 | 0,939±0,06 | 8,742±1,24 | 0,998 | n.b. | n.b. |
| Silage | 7 | MSB-komb. A | 10 | 351,6±17,0 | 1,022±0,08 | 6,812±0,31 | 0,998 | 41,6±3,3 | 0,27±0,10 |
| | 7 | MSB-komb. A | 90 | 343,1±12,8 | 1,194±0,02 | 5,959±0,57 | 0,997 | 39,5±4,8 | 0,78±0,11 |

¹⁾ n = 1; n.b. ... nicht berechenbar

Tab. A47: Methanausbeuten, Methangehalte im Biogas, Geschwindigkeitskonstanten und Impfmateral-Verhältnis von frischer und silierter Triticale im Batch-Gärtest bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksel- länge [mm] | Silier- zusatz | Lagerdauer [d] | $Y_{CH_4_zu}$ 30 d [N*kg ⁻¹ oTM _{zu}] | $Y_{CH_4_orig}$ 30 d [N*kg ⁻¹ oTM _{orig}] | $Y_{CH_4_zu}$ 30 d [N*kg ⁻¹ FM _{zu}] | $Y_{CH_4_orig}$ 30 d [N*kg ⁻¹ FM _{orig}] | C _{CH₄} [Vol-%] | k ($Y_{CH_4_zu}$) [d ⁻¹] | a _i |
|----------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|---|---|--|--|--|---|----------------|
| Siliergut | 4 | ohne | 0 | 352,2±1,5 | 352,2±1,5 | 131,9±0,6 | 131,9±0,6 | 56,2±0,8 | 0,251±0,01 | 0,53 |
| Silage | 4 | ohne | 10 | 359,4±8,1 | 348,8±7,5 | 131,9±2,9 | 130,5±2,8 | 56,8±0,9 | 0,261±0,01 | 0,52 |
| | 4 | ohne | 90 | 366,0±8,5 | 350,8±7,3 | 133,0±2,8 | 131,1±2,7 | 57,0±1,2 | 0,258±0,01 | 0,52 |
| | 4 | ohne | 180 | 357,4±7,1 | 347,6±5,0 | 132,0±1,9 | 130,1±1,8 | 57,0±0,9 | 0,251±0,01 | 0,53 |
| | 4 | ohne | 365 | 353,7±10,6 | 341,0±6,0 | 129,6±2,0 | 127,5±2,2 | 55,4±0,4 | 0,184±0,01 | 0,50 |
| Siliergut | 4 | Chem. B | 0 | 341,8±6,3 | 341,8±6,3 | 127,5±2,3 | 127,5±2,3 | 56,6±0,9 | 0,238±0,02 | 0,52 |
| Silage | 4 | Chem. B | 10 | 346,2±23,6 | 339,5±24,3 | 126,7±9,1 | 126,6±9,1 | 56,6±0,6 | 0,262±0,02 | 0,51 |
| | 4 | Chem. B | 90 | 357,4±2,5 | 335,0±3,3 | 124,7±1,3 | 124,4±1,3 | 56,1±1,0 | 0,288±0,02 | 0,49 |
| Siliergut | 4 | MSB-komb. A | 0 | 336,5±6,9 | 336,5±6,9 | 118,2±2,4 | 118,2±2,4 | 55,9±2,5 | 0,245±0,02 | 0,49 |
| Silage | 4 | MSB-komb. A | 10 | 355,8±10,1 | 339,6±6,8 | 122,3±4,8 | 119,2±2,4 | 57,0±0,2 | 0,243±0,06 | 0,49 |
| | 4 | MSB-komb. A | 90 | 367,4±6,8 | 342,1±6,4 | 122,2±1,9 | 119,6±2,2 | 57,3±0,1 | 0,255±0,05 | 0,47 |
| Siliergut | 8 | ohne | 0 | 339,5±4,8 | 339,5±4,8 | 123,0±1,7 | 123,0±1,7 | 57,1±1,5 | 0,221±0,01 | 0,51 |
| Silage | 8 | ohne | 10 | 342,4±9,9 | 320,0±11,1 | 116,4±3,9 | 115,3±4,1 | 57,0±1,6 | 0,259±0,02 | 0,48 |
| | 8 | ohne | 90 | 364,2±2,0 | 335,3±1,3 | 122,5±0,5 | 120,6±0,6 | 57,9±1,7 | 0,256±0,02 | 0,48 |
| | 8 | ohne | 180 | 365,0±9,6 | 336,0±4,0 | 124,1±2,4 | 120,8±1,7 | 57,8±1,7 | 0,249±0,02 | 0,48 |
| | 8 | ohne | 365 | 353,6±3,5 | 323,3±8,6 | 119,1±2,3 | 116,1±3,5 | 55,8±1,0 | 0,200±0,03 | 0,46 |
| Siliergut | 8 | Chem. B | 0 | 331,1±6,1 | 331,1±6,1 | 122,3±2,3 | 122,3±2,3 | 57,0±1,8 | 0,200±0,02 | 0,52 |
| Silage | 8 | Chem. B | 10 | 334,4±5,2 | 328,7±5,3 | 121,6±2,0 | 121,4±2,0 | 56,7±1,6 | 0,247±0,02 | 0,52 |
| | 8 | Chem. B | 90 | 338,9±4,9 | 329,3±5,4 | 121,7±1,9 | 121,5±2,0 | 56,5±1,6 | 0,262±0,02 | 0,51 |
| Siliergut | 8 | MSB-komb. A | 0 | 336,6±3,4 | 336,6±3,4 | 126,0±1,3 | 126,0±1,3 | 57,1±1,6 | 0,223±0,02 | 0,53 |
| Silage | 8 | MSB-komb. A | 10 | 349,3±4,7 | 337,0±4,8 | 126,9±1,8 | 126,0±1,8 | 55,8±0,4 | 0,234±0,04 | 0,52 |
| | 8 | MSB-komb. A | 90 | 374,2±7,4 | 342,6±6,1 | 129,1±2,3 | 127,2±2,2 | 57,0±0,9 | 0,237±0,01 | 0,49 |

Tab. A48: Parameter und Kennwerte der HILL-Funktion bei Anpassung an die Daten des Batch-Gärtests von frischer und silierter Triticale bei Variation von Häcksellänge (Feldhäcksler), Silierzusatz und Lagerdauer; Versuchsschwerpunkt III (n = 3)

| Siliergut/ Silage | Häcksellänge [mm] | Silierzusatz | Lagerdauer [d] | $Y_{CH_4,max}$ [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM$] | b | c | R^2 | $r_{CH_4,max}$ [$N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu} \cdot d^{-1}$] | $t(r_{CH_4,max})$ [d] |
|----------------------|----------------------|--------------|-------------------|---|--------------|--------------|-------|---|--------------------------|
| Siliergut | 4 | ohne | 0 | 364,1 ± 3,0 | 1,234 ± 0,01 | 3,052 ± 0,10 | 0,998 | 78,7 ± 2,0 | 0,49 ± 0,02 |
| Silage | 4 | ohne | 10 | 364,8 ± 8,9 | 1,307 ± 0,03 | 2,827 ± 0,04 | 0,997 | 81,9 ± 3,2 | 0,60 ± 0,06 |
| | 4 | ohne | 90 | 368,7 ± 9,1 | 1,343 ± 0,03 | 2,826 ± 0,15 | 0,997 | 81,8 ± 4,2 | 0,67 ± 0,03 |
| | 4 | ohne | 180 | 358,7 ± 11,0 | 1,373 ± 0,02 | 2,869 ± 0,11 | 0,996 | 77,6 ± 0,6 | 0,74 ± 0,02 |
| | 4 | ohne | 365 | 340,5 ± 9,4 | 1,791 ± 0,27 | 3,533 ± 0,05 | 0,994 | 60,7 ± 2,4 | 1,69 ± 0,42 |
| Siliergut | 4 | Chem. B | 0 | 355,7 ± 6,2 | 1,242 ± 0,00 | 3,227 ± 0,23 | 0,998 | 72,5 ± 5,8 | 0,54 ± 0,04 |
| Silage | 4 | Chem. B | 10 | 365,7 ± 34,6 | 1,131 ± 0,11 | 3,152 ± 0,42 | 0,996 | 88,7 ± 12,3 | 0,26 ± 0,23 |
| | 4 | Chem. B | 90 | 365,7 ± 4,5 | 1,225 ± 0,02 | 2,635 ± 0,16 | 0,997 | 92,3 ± 5,0 | 0,41 ± 0,06 |
| Siliergut | 4 | MSB-komb. A | 0 | 345,1 ± 20,9 | 1,332 ± 0,28 | 3,049 ± 0,09 | 0,996 | 75,7 ± 5,8 | 0,66 ± 0,53 |
| Silage | 4 | MSB-komb. A | 10 | 368,0 ± 19,3 | 1,272 ± 0,05 | 3,261 ± 0,95 | 0,997 | 76,3 ± 17,4 | 0,64 ± 0,33 |
| | 4 | MSB-komb. A | 90 | 370,2 ± 7,5 | 1,389 ± 0,12 | 2,881 ± 0,51 | 0,997 | 81,9 ± 15,7 | 0,80 ± 0,38 |
| Siliergut | 8 | ohne | 0 | 358,3 ± 7,2 | 1,196 ± 0,05 | 3,593 ± 0,14 | 0,998 | 68,2 ± 6,5 | 0,48 ± 0,16 |
| Silage | 8 | ohne | 10 | 353,8 ± 9,1 | 1,198 ± 0,05 | 3,019 ± 0,20 | 0,997 | 80,0 ± 6,2 | 0,41 ± 0,13 |
| | 8 | ohne | 90 | 372,7 ± 4,0 | 1,256 ± 0,05 | 2,964 ± 0,17 | 0,997 | 82,3 ± 6,4 | 0,53 ± 0,13 |
| | 8 | ohne | 180 | 375,9 ± 9,0 | 1,251 ± 0,06 | 3,054 ± 0,19 | 0,998 | 80,9 ± 5,4 | 0,53 ± 0,17 |
| | 8 | ohne | 365 | 360,2 ± 16,6 | 1,414 ± 0,28 | 3,722 ± 0,60 | 0,996 | 63,0 ± 8,6 | 0,99 ± 0,62 |
| Siliergut | 8 | Chem. B | 0 | 349,7 ± 7,3 | 1,240 ± 0,02 | 3,915 ± 0,40 | 0,998 | 59,1 ± 6,6 | 0,65 ± 0,10 |
| Silage | 8 | Chem. B | 10 | 351,4 ± 6,8 | 1,160 ± 0,06 | 3,254 ± 0,19 | 0,998 | 76,9 ± 9,5 | 0,35 ± 0,17 |
| | 8 | Chem. B | 90 | 351,1 ± 5,2 | 1,182 ± 0,03 | 3,999 ± 0,19 | 0,998 | 80,8 ± 7,1 | 0,37 ± 0,09 |
| Siliergut | 8 | MSB-komb. A | 0 | 354,5 ± 4,3 | 1,204 ± 0,05 | 3,562 ± 0,26 | 0,998 | 67,7 ± 9,0 | 0,50 ± 0,17 |
| Silage | 8 | MSB-komb. A | 10 | 359,3 ± 4,1 | 1,268 ± 0,12 | 3,316 ± 0,53 | 0,998 | 72,6 ± 14,3 | 0,64 ± 0,40 |
| | 8 | MSB-komb. A | 90 | 384,4 ± 9,8 | 1,270 ± 0,02 | 3,194 ± 0,13 | 0,997 | 77,7 ± 1,4 | 0,60 ± 0,04 |

Tab. A49: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten ($\sigma\text{TM}_{\text{zu}}$) von Mais unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | | | |
|---|-------------|-------------|---------------|---------------|----------------------------|---------------|------------------------|------------|--------|-------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze | | |
| Methanausbeute [$\text{I}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ $\sigma\text{TM}_{\text{zu}}$] | 4 mm | 0 d | ohne | Chem. A | -9,19 | 0,9989 | -39,77 | 21,39 | | |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | -4,79 | 1,0000 | -35,36 | 25,79 | | |
| | | 90 d | ohne | Chem. A | -0,35 | 1,0000 | -30,93 | 30,23 | | |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | -4,68 | 1,0000 | -35,26 | 25,89 | | |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-komb. A | 4,40 | 1,0000 | -26,17 | 34,98 | | |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-komb. A | -4,33 | 1,0000 | -34,91 | 26,25 | | |
| | 8 mm | 0 d | ohne | Chem. A | -7,20 | 0,9999 | -37,77 | 23,38 | | |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | 4,57 | 1,0000 | -26,00 | 35,15 | | |
| | | 0 d | ohne | MSB-ho | -2,11 | 1,0000 | -32,68 | 28,47 | | |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. B | -4,85 | 1,0000 | -35,43 | 25,72 | | |
| | | 90 d | ohne | Chem. A | 16,41 | 0,8217 | -14,17 | 46,98 | | |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | -11,65 | 0,9849 | -42,23 | 18,92 | | |
| | | 90 d | ohne | MSB-ho | 1,97 | 1,0000 | -28,61 | 35,54 | | |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. B | -1,75 | 1,0000 | -32,32 | 28,83 | | |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-komb. A | 11,77 | 0,9833 | -18,81 | 42,35 | | |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-ho | 5,09 | 1,0000 | -25,49 | 35,66 | | |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-komb. B | 2,34 | 1,0000 | -28,23 | 32,92 | | |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-komb. A | -28,06 | 0,1044 | -58,64 | 2,52 | | |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-ho | -14,44 | 0,9196 | -45,01 | 16,14 | | |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-komb. B | -18,15 | 0,6985 | -48,72 | 12,42 | | |
| | | 0 d | MSB-komb. A | MSB-ho | -6,68 | 1,0000 | -37,26 | 23,89 | | |
| | | 0 d | MSB-komb. A | MSB-komb. B | -9,43 | 0,9983 | -40,00 | 21,15 | | |
| | | 90 d | MSB-komb. A | MSB-ho | 13,62 | 0,9472 | -16,95 | 44,20 | | |
| | | 90 d | MSB-komb. A | MSB-komb. B | 9,91 | 0,9970 | -20,67 | 40,48 | | |
| | | 0 d | MSB-ho | MSB-komb. B | -2,75 | 1,0000 | -33,32 | 27,83 | | |
| | | 90 d | MSB-ho | MSB-komb. B | -3,72 | 1,0000 | -34,29 | 26,86 | | |
| | | | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | | |
| | | | 4 mm | ohne | 0 d | 90 d | -7,35 | 0,9999 | -37,92 | 23,23 |
| | | | | Chem. A | 0 d | 90 d | 1,49 | 1,0000 | -29,08 | 32,07 |
| | | | | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | -7,24 | 0,9999 | -37,82 | 23,34 |
| | 8 mm | ohne | 0 d | 90 d | -29,91 | 0,0410 * | -60,49 | 0,67 | | |
| | | Chem. A | 0 d | 90 d | -6,31 | 1,0000 | -36,88 | 24,27 | | |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | -46,14 | 0,0005 * | -76,71 | -15,56 | | |
| | | MSB-ho | 0 d | 90 d | -25,84 | 0,1813 | -56,41 | 4,74 | | |
| | MSB-komb. B | 0 d | 90 d | -26,80 | 0,1435 | -57,38 | 3,77 | | | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | | | |
| | ohne | 0 d | 4 mm | 8 mm | 25,34 | 0,2028 | -5,23 | 55,92 | | |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | 2,78 | 1,0000 | -27,80 | 33,36 | | |
| | Chem. A | 0 d | 4 mm | 8 mm | 27,34 | 0,1265 | -3,24 | 57,92 | | |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | 19,54 | 0,5889 | -11,04 | 50,11 | | |
| | MSB-komb. A | 0 d | 4 mm | 8 mm | 34,71 | 0,0138 * | 4,13 | 65,28 | | |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | -4,19 | 1,0000 | -34,78 | 26,38 | | |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A50: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{orig}) von Mais unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | |
|---|-------------|-------------|---------------|---------------|----------------------------|----------------|------------------------|------------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze |
| Methanausbeute [$\text{I}_N \cdot \text{kg}^{-1}$ oTM_{orig}] | 4 mm | 0 d | ohne | Chem. A | -9,19 | 0,9979 | -37,98 | 19,60 |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | -4,79 | 1,0000 | -33,56 | 24,00 |
| | | 90 d | ohne | Chem. A | 0,60 | 1,0000 | -28,19 | 29,39 |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | 4,05 | 1,0000 | -24,74 | 32,84 |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-komb. A | 4,40 | 1,0000 | -24,38 | 33,19 |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-komb. A | 3,45 | 1,0000 | -25,34 | 32,24 |
| | 8 mm | 0 d | ohne | Chem. A | -7,20 | 0,9998 | -35,98 | 21,59 |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | 4,57 | 1,0000 | -24,21 | 33,36 |
| | | 0 d | ohne | MSB-ho | -2,11 | 1,0000 | -30,90 | 26,68 |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. B | -4,85 | 1,0000 | -33,64 | 23,93 |
| | | 90 d | ohne | Chem. A | 11,94 | 0,9706 | -16,85 | 40,73 |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | 16,77 | 0,7127 | -12,02 | 45,55 |
| | | 90 d | ohne | MSB-ho | 13,58 | 0,9124 | -15,20 | 42,37 |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. B | 3,42 | 1,0000 | -25,36 | 32,21 |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-komb. A | 11,77 | 0,9734 | -17,02 | 40,56 |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-ho | 5,09 | 1,0000 | -23,70 | 33,88 |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-komb. B | 2,34 | 1,0000 | -26,45 | 31,13 |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-komb. A | 4,82 | 1,0000 | -23,97 | 33,61 |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-ho | 1,64 | 1,0000 | -27,15 | 30,43 |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-komb. B | -8,52 | 0,9988 | -37,31 | 20,27 |
| | | 0 d | MSB-komb. A | MSB-ho | -6,68 | 0,9999 | -35,47 | 22,11 |
| | | 0 d | MSB-komb. A | MSB-komb. B | -9,43 | 0,9971 | -38,22 | 19,36 |
| | | 90 d | MSB-komb. A | MSB-ho | -3,18 | 1,0000 | -31,97 | 25,61 |
| | | 90 d | MSB-komb. A | MSB-komb. B | -13,34 | 0,9229 | -42,13 | 15,45 |
| | 0 d | MSB-ho | MSB-komb. B | -2,75 | 1,0000 | -31,54 | 26,04 | |
| | 90 d | MSB-ho | MSB-komb. B | -10,16 | 0,9931 | -38,95 | 18,63 | |
| | | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | |
| | 4 mm | ohne | 0 d | 90 d | 1,11 | 1,0000 | -27,68 | 29,90 |
| | | Chem. A | 0 d | 90 d | 10,90 | 0,9869 | -17,89 | 39,69 |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | 9,94 | 0,9944 | -18,84 | 38,73 |
| | 8 mm | ohne | 0 d | 90 d | -15,62 | 0,7979 | -44,41 | 13,16 |
| | | Chem. A | 0 d | 90 d | 3,51 | 1,0000 | -25,27 | 32,30 |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | -3,43 | 1,0000 | -32,22 | 25,36 |
| | | MSB-ho | 0 d | 90 d | 0,07 | 1,0000 | -28,72 | 28,86 |
| | MSB-komb. B | 0 d | 90 d | -7,35 | 0,9998 | -36,13 | 21,44 | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | |
| | ohne | 0 d | 4 mm | 8 mm | 25,34 | 0,1292 | -3,44 | 54,13 |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | 8,61 | 0,9986 | -20,18 | 37,40 |
| | Chem. A | 0 d | 4 mm | 8 mm | 27,34 | 0,0769 | -1,45 | 56,13 |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | 19,96 | 0,4485 | -8,83 | 48,74 |
| | MSB-komb. A | 0 d | 4 mm | 8 mm | 34,71 | 0,0080 * | 5,92 | 63,49 |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | 21,33 | 0,3419 | -7,46 | 50,12 |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A51: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) des Methangehaltes im Biogas bei der Biomethanisierung von Mais unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | |
|------------------------------|-----------------|-------------|---------------|---------------|----------------------------|-----------|------------------------|------------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze |
| Methan- gehalt [Vol-%] | 4 mm | 0 d | ohne | Chem. A | 0,9 | 0,9430 | -1,1 | 2,8 |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | -0,5 | 0,9998 | -2,5 | 1,4 |
| | | 90 d | ohne | Chem. A | 0,1 | 1,0000 | -1,9 | 2,0 |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | -0,5 | 0,9993 | -2,5 | 1,4 |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-komb. A | -1,4 | 0,4257 | -3,3 | 0,6 |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-komb. A | -0,6 | 0,9971 | -2,6 | 1,3 |
| | 8 mm | 0 d | ohne | Chem. A | -1,5 | 0,3302 | -3,4 | 0,5 |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | -1,3 | 0,5681 | -3,2 | 0,7 |
| | | 0 d | ohne | MSB-ho | -0,6 | 0,9985 | -2,5 | 1,4 |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. B | -1,1 | 0,7328 | -3,1 | 0,8 |
| | | 90 d | ohne | Chem. A | 0,6 | 0,9979 | -1,3 | 2,5 |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | 0,9 | 0,9498 | -1,1 | 2,8 |
| | | 90 d | ohne | MSB-ho | -0,2 | 1,0000 | -2,2 | 1,7 |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. B | -0,1 | 1,0000 | -2,0 | 1,9 |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-komb. A | 0,2 | 1,0000 | -1,7 | 2,1 |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-ho | 0,9 | 0,9374 | -1,1 | 2,8 |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-komb. B | 0,3 | 1,0000 | -1,6 | 2,3 |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-komb. A | 0,3 | 1,0000 | -1,7 | 2,2 |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-ho | -0,8 | 0,9598 | -2,8 | 1,1 |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-komb. B | -0,7 | 0,9948 | -2,6 | 1,3 |
| | 0 d | MSB-komb. A | MSB-ho | 0,7 | 0,9939 | -1,3 | 2,6 | |
| | 0 d | MSB-komb. A | MSB-komb. B | 0,1 | 1,0000 | -1,8 | 2,1 | |
| | 90 d | MSB-komb. A | MSB-ho | -1,1 | 0,7629 | -3,0 | 0,8 | |
| | 90 d | MSB-komb. A | MSB-komb. B | -0,9 | 0,9084 | -2,9 | 1,0 | |
| | 0 d | MSB-ho | MSB-komb. B | -0,5 | 0,9993 | -2,5 | 1,4 | |
| | 90 d | MSB-ho | MSB-komb. B | 0,2 | 1,0000 | -1,8 | 2,1 | |
| | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | | |
| | 4 mm | ohne | 0 d | 90 d | 0,2 | 1,0000 | -1,7 | 2,2 |
| | | Chem. A | 0 d | 90 d | -0,6 | 0,9979 | -2,5 | 1,3 |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | 0,2 | 1,0000 | -1,8 | 2,1 |
| | 8 mm | ohne | 0 d | 90 d | -2,6 | 0,0021 * | -4,5 | -0,6 |
| | | Chem. A | 0 d | 90 d | -0,5 | 0,9998 | -2,4 | 1,5 |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | -0,4 | 1,0000 | -2,4 | 1,5 |
| | | MSB-ho | 0 d | 90 d | -2,2 | 0,0142 * | -4,2 | -0,3 |
| | MSB-komb. B | 0 d | 90 d | -1,5 | 0,2998 | -3,4 | 0,4 | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | |
| | ohne | 0 d | 4 mm | 8 mm | 0,2 | 1,0000 | -1,8 | 2,1 |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | -2,6 | 0,0019 * | -4,5 | -0,6 |
| | Chem. A | 0 d | 4 mm | 8 mm | -2,2 | 0,0180 * | -4,1 | -0,2 |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | -2,0 | 0,0316 * | -4,0 | -0,1 |
| | MSB- komb. A | 0 d | 4 mm | 8 mm | -0,6 | 0,9989 | -2,5 | 1,4 |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | -1,2 | 0,6965 | -3,1 | 0,8 |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A52: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Geschwindigkeitskonstante k bei der Biomethanisierung von Mais unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | |
|--|-------------|-------------|---------------|---------------|----------------------------|-----------|------------------------|------------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze |
| Geschwindigkeitskonstante [d ⁻¹] | 4 mm | 0 d | ohne | Chem. A | -0,01 | 1,0000 | -0,07 | 0,06 |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | -0,01 | 1,0000 | -0,07 | 0,05 |
| | | 90 d | ohne | Chem. A | -0,01 | 1,0000 | -0,08 | 0,05 |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | 0,08 | 0,0036 * | 0,02 | 0,15 |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-komb. A | 0,00 | 1,0000 | -0,07 | 0,06 |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-komb. A | 0,09 | 0,0004 * | 0,03 | 0,16 |
| | 8 mm | 0 d | ohne | Chem. A | -0,01 | 1,0000 | -0,07 | 0,06 |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | 0,00 | 1,0000 | -0,07 | 0,06 |
| | | 0 d | ohne | MSB-ho | -0,01 | 1,0000 | -0,07 | 0,06 |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. B | -0,01 | 1,0000 | -0,08 | 0,05 |
| | | 90 d | ohne | Chem. A | 0,04 | 0,5081 | -0,02 | 0,11 |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | 0,10 | 0,0002 * | 0,04 | 0,17 |
| | | 90 d | ohne | MSB-ho | 0,02 | 0,9995 | -0,05 | 0,08 |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. B | 0,05 | 0,2908 | -0,01 | 0,11 |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-komb. A | 0,00 | 1,0000 | -0,06 | 0,07 |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-ho | 0,00 | 1,0000 | -0,06 | 0,06 |
| | | 0 d | Chem. A | MSB-komb. B | -0,01 | 1,0000 | -0,07 | 0,06 |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-komb. A | 0,06 | 0,0811 | 0,00 | 0,12 |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-ho | -0,03 | 0,9699 | -0,09 | 0,04 |
| | | 90 d | Chem. A | MSB-komb. B | 0,01 | 1,0000 | -0,06 | 0,07 |
| | 0 d | MSB-komb. A | MSB-ho | 0,00 | 1,0000 | -0,07 | 0,06 | |
| | 0 d | MSB-komb. A | MSB-komb. B | -0,01 | 1,0000 | -0,07 | 0,06 | |
| | 90 d | MSB-komb. A | MSB-ho | -0,09 | 0,0019 * | -0,15 | -0,02 | |
| | 90 d | MSB-komb. A | MSB-komb. B | -0,05 | 0,1892 | -0,12 | 0,01 | |
| | 0 d | MSB-ho | MSB-komb. B | 0,00 | 1,0000 | -0,07 | 0,06 | |
| | 90 d | MSB-ho | MSB-komb. B | 0,03 | 0,8489 | -0,03 | 0,10 | |
| | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | | |
| | 4 mm | ohne | 0 d | 90 d | -0,01 | 1,0000 | -0,08 | 0,05 |
| | | Chem. A | 0 d | 90 d | -0,02 | 0,9982 | -0,08 | 0,04 |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | 0,08 | 0,0061 * | 0,02 | 0,14 |
| | | 8 mm | ohne | 0 d | 90 d | -0,06 | 0,0735 | -0,12 |
| | Chem. A | | 0 d | 90 d | -0,01 | 1,0000 | -0,07 | 0,05 |
| | MSB-komb. A | | 0 d | 90 d | 0,05 | 0,3883 | -0,02 | 0,11 |
| | MSB-ho | | 0 d | 90 d | -0,04 | 0,7256 | -0,10 | 0,03 |
| | MSB-komb. B | 0 d | 90 d | 0,00 | 1,0000 | -0,06 | 0,06 | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | |
| | ohne | 0 d | 4 mm | 8 mm | 0,00 | 1,0000 | -0,06 | 0,07 |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | -0,04 | 0,4770 | -0,11 | 0,02 |
| | Chem. A | 0 d | 4 mm | 8 mm | 0,00 | 1,0000 | -0,06 | 0,07 |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | 0,01 | 1,0000 | -0,05 | 0,07 |
| | MSB-komb. A | 0 d | 4 mm | 8 mm | 0,01 | 1,0000 | -0,05 | 0,07 |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | -0,02 | 0,9890 | -0,09 | 0,04 |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A53: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{zu}) von Grünschnittrogen unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | | |
|---|-------------|-------------|---------------|---------------|----------------------------|----------------|------------------------|------------|-------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze | |
| Methanausbeute [$\text{I}_N \cdot \text{kg}^{-1}$ oTM_{zu}] | 6,8 mm | 0 d | ohne | Chem. B | 6,73 | 0,9976 | -13,07 | 26,54 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 7,53 | 0,9906 | -12,27 | 27,34 | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | 6,00 | 0,9994 | -13,81 | 25,81 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 3,17 | 1,0000 | -16,64 | 22,97 | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | 11,97 | 0,6917 | -7,84 | 31,77 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 9,30 | 0,9381 | -10,51 | 29,11 | |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,80 | 1,0000 | -19,01 | 20,61 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | -2,83 | 1,0000 | -22,64 | 16,97 | |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -2,67 | 1,0000 | -22,47 | 17,14 | |
| | | | 0 d | ohne | Chem. B | -10,80 | 0,8236 | -30,61 | 9,01 |
| | 11 mm | 0 d | ohne | MSB-komb. A | -11,30 | 0,7739 | -31,11 | 8,51 | |
| | | | ohne | Chem. B | 8,13 | 0,9802 | -11,67 | 27,94 | |
| | | 10 d | ohne | MSB-komb. A | -3,13 | 1,0000 | -22,94 | 16,67 | |
| | | | ohne | Chem. B | 14,70 | 0,3575 | -5,11 | 34,51 | |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | -9,17 | 0,9448 | -28,97 | 10,64 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | -0,50 | 1,0000 | -20,31 | 19,31 | |
| | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | -11,27 | 0,7773 | -31,07 | 8,54 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | -23,87 | 0,0067 * | -43,67 | -4,06 | |
| | | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | | |
| | | 6,8 mm | ohne | 0 d | 10 d | -7,07 | 0,9960 | -26,87 | 12,74 |
| 0 d | 90 d | | | -19,53 | 0,0570 | -39,34 | 0,27 | | |
| ohne | 10 d | | 90 d | -12,47 | 0,6313 | -32,27 | 7,34 | | |
| | Chem. B | | 0 d | 10 d | -7,80 | 0,9864 | -27,61 | 12,01 | |
| Chem. B | 0 d | | 90 d | -14,30 | 0,4032 | -34,11 | 5,51 | | |
| | 10 d | | 90 d | -6,50 | 0,9985 | -26,31 | 13,31 | | |
| MSB-komb. A | 0 d | | 10 d | -11,43 | 0,7567 | -31,24 | 8,37 | | |
| | 0 d | | 90 d | -17,77 | 0,1245 | -37,57 | 2,04 | | |
| MSB-komb. A | 10 d | | 90 d | -6,33 | 0,9990 | -26,14 | 13,47 | | |
| | ohne | | 0 d | 10 d | -27,23 | 0,0016 * | -47,04 | -7,43 | |
| 11 mm | ohne | | 0 d | 90 d | -40,37 | <0,0001 * | -60,17 | -20,56 | |
| | | | 10 d | 90 d | -13,13 | 0,5442 | -32,94 | 6,67 | |
| | Chem. B | | 0 d | 10 d | -8,30 | 0,9764 | -28,11 | 11,51 | |
| | | | 0 d | 90 d | -14,87 | 0,3398 | -34,67 | 4,94 | |
| | Chem. B | 10 d | 90 d | -6,57 | 0,9984 | -26,37 | 13,24 | | |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | -19,07 | 0,0700 | -38,87 | 0,74 | |
| | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | -38,23 | <0,0001 * | -58,04 | -18,43 | | |
| | | 10 d | 90 d | -19,17 | 0,0671 | -38,97 | 0,64 | | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | | |
| | ohne | 0 d | 6,8 mm | 11 mm | 31,83 | <0,0001 * | 12,03 | 51,64 | |
| 6,8 mm | | | 11 mm | 11,67 | 0,7322 | -8,14 | 31,47 | | |
| 90 d | | 6,8 mm | 11 mm | 11,00 | 0,8043 | -8,81 | 30,81 | | |
| | | 6,8 mm | 11 mm | 14,30 | 0,4032 | -5,51 | 34,11 | | |
| Chem. A | | 10 d | 6,8 mm | 11 mm | 13,80 | 0,4637 | -6,01 | 33,61 | |
| | | 90 d | 6,8 mm | 11 mm | 13,73 | 0,4715 | -6,07 | 33,54 | |
| MSB-komb. A | 0 d | 6,8 mm | 11 mm | 13,00 | 0,5614 | -6,81 | 32,81 | | |
| | 10 d | 6,8 mm | 11 mm | 5,37 | 0,9999 | -14,44 | 25,17 | | |
| | | 90 d | 6,8 mm | 11 mm | -7,47 | 0,9919 | -27,27 | 12,34 | |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A54: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{orig}) von Grünschnitttroggen unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | | |
|---|-----------|-------------|---------------|---------------|----------------------------|-----------|------------------------|------------|-------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze | |
| Methanausbeute [$\text{I}_N \cdot \text{kg}^{-1}$ oTM_{orig}] | 6,8 mm | 0 d | ohne | Chem. B | 6,73 | 0,9964 | -12,78 | 26,25 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 7,53 | 0,9886 | -11,98 | 27,05 | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | -1,67 | 1,0000 | -21,18 | 17,85 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 2,97 | 1,0000 | -16,55 | 22,48 | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | 7,63 | 0,9869 | -11,88 | 27,15 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 16,90 | 0,1555 | -2,61 | 36,41 | |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,80 | 1,0000 | -18,71 | 20,31 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | 4,63 | 1,0000 | -14,88 | 24,15 | |
| | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | 9,27 | 0,9313 | -10,25 | 28,78 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | 9,27 | 0,9313 | -10,25 | 28,78 | |
| | 11 mm | 0 d | ohne | Chem. B | -10,80 | 0,8055 | -30,31 | 8,71 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | -11,30 | 0,7511 | -30,81 | 8,21 | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | -4,03 | 1,0000 | -23,55 | 15,48 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | -9,67 | 0,9084 | -29,18 | 9,85 | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | -3,13 | 1,0000 | -22,65 | 16,38 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | -10,17 | 0,8679 | -29,68 | 9,35 | |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,50 | 1,0000 | -20,01 | 19,01 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | -5,63 | 0,9995 | -25,15 | 13,88 | |
| | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | -5,63 | 0,9995 | -25,15 | 13,88 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | -7,03 | 0,9945 | -26,55 | 12,48 | |
| | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | | | |
| 6,8 mm | ohne | 0 d | 0 d | 10 d | 2,10 | 1,0000 | -21,16 | 21,61 | |
| | | | 0 d | 90 d | -10,70 | 0,8163 | -33,96 | 8,81 | |
| | | | 10 d | 90 d | -12,80 | 0,5672 | -32,90 | 6,71 | |
| | | Chem. B | 0 d | 10 d | -6,30 | 0,9982 | -25,81 | 13,21 | |
| | | | 0 d | 90 d | -9,80 | 0,8981 | -29,31 | 9,71 | |
| | | | 10 d | 90 d | -3,50 | 1,0000 | -23,01 | 16,01 | |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | -2,47 | 1,0000 | -21,98 | 17,05 | |
| | | | 0 d | 90 d | -1,33 | 1,0000 | -20,85 | 18,18 | |
| | | | 10 d | 90 d | 1,13 | 1,0000 | -18,38 | 20,65 | |
| | 11 mm | ohne | 0 d | 10 d | -13,63 | 0,4607 | -33,15 | 5,88 | |
| | | | 0 d | 90 d | -15,00 | 0,3063 | -34,51 | 4,51 | |
| | | | 10 d | 90 d | -1,37 | 1,0000 | -20,88 | 18,15 | |
| | | Chem. B | 0 d | 10 d | -6,87 | 0,9958 | -26,38 | 12,65 | |
| | | | 0 d | 90 d | -7,33 | 0,9918 | -26,85 | 12,18 | |
| | | | 10 d | 90 d | -0,47 | 1,0000 | -19,98 | 19,05 | |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | -12,00 | 0,6719 | -31,51 | 7,51 | |
| | | | 0 d | 90 d | -13,87 | 0,4346 | -33,38 | 5,65 | |
| | | | 10 d | 90 d | -1,87 | 1,0000 | -21,38 | 17,65 | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | | |
| ohne | 0 d | 6,8 mm | 6,8 mm | 11 mm | 31,83 | <0,0001 * | 12,03 | 51,64 | |
| | | | 6,8 mm | 11 mm | 16,10 | 0,2099 | -3,41 | 35,61 | |
| | | 10 d | 6,8 mm | 11 mm | 27,53 | 0,0010 * | 8,02 | 47,05 | |
| | | | 6,8 mm | 11 mm | 14,30 | 0,3837 | -5,21 | 33,81 | |
| | | 90 d | 6,8 mm | 11 mm | 13,73 | 0,4489 | -5,78 | 33,25 | |
| | | | 6,8 mm | 11 mm | 16,77 | 0,1644 | -2,75 | 36,28 | |
| | Chem. A | 0 d | 6,8 mm | 6,8 mm | 11 mm | 13,00 | 0,5395 | -6,51 | 32,51 |
| | | | | 6,8 mm | 11 mm | 3,47 | 1,0000 | -16,05 | 22,98 |
| | | 10 d | 6,8 mm | 6,8 mm | 11 mm | 3,47 | 1,0000 | -16,05 | 22,98 |
| | | | | 6,8 mm | 11 mm | 0,47 | 1,0000 | -19,05 | 19,98 |
| | | 90 d | 6,8 mm | 6,8 mm | 11 mm | 0,47 | 1,0000 | -19,05 | 19,98 |
| | | | | 6,8 mm | 11 mm | 0,47 | 1,0000 | -19,05 | 19,98 |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A55: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) des Methangehaltes im Biogas bei der Biomethanisierung von Grünschnittroggen unter Variation von Häcksel-länge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | |
|------------------------------|-----------|-------------|---------------|---------------|----------------------------|-----------|------------------------|------------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze |
| Methan- gehalt [Vol-%] | 6,8 mm | 0 d | ohne | Chem. B | -2,5 | 0,2781 | -5,6 | 0,7 |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | -3,2 | 0,0455 * | -6,3 | -0,0 |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | -0,1 | 1,0000 | -3,2 | 3,0 |
| | | 10 d | ohne | MSB-komb. A | -0,3 | 1,0000 | -3,4 | 2,8 |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | -2,1 | 0,5418 | -5,2 | 1,0 |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | -3,7 | 0,0078 * | -6,9 | -0,6 |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,7 | 1,0000 | -3,8 | 2,4 |
| | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,2 | 1,0000 | -3,3 | 2,9 |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -1,6 | 0,8781 | -4,8 | 1,5 |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -2,1 | 0,5693 | -5,2 | 1,1 |
| | 11 mm | 0 d | ohne | Chem. B | -1,0 | 0,9982 | -4,1 | 2,1 |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | -1,0 | 0,9987 | -4,1 | 2,2 |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | -0,3 | 1,0000 | -3,5 | 2,8 |
| | | 10 d | ohne | MSB-komb. A | -0,2 | 1,0000 | -3,4 | 2,9 |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | 0,0 | 1,0000 | -3,1 | 3,1 |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | -2,1 | 0,5693 | -5,2 | 1,1 |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,0 | 1,0000 | -3,1 | 3,2 |
| | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,1 | 1,0000 | -3,0 | 3,2 |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -2,1 | 0,5693 | -5,2 | 1,1 |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -2,1 | 0,5693 | -5,2 | 1,1 |
| | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | | |
| 6,8 mm | | ohne | 0 d | 10 d | -2,9 | 0,0912 | -6,1 | 0,2 |
| | | ohne | 0 d | 90 d | -1,8 | 0,7985 | -4,9 | 1,4 |
| | | ohne | 10 d | 90 d | 1,2 | 0,9933 | -2,0 | 4,3 |
| | | Chem. B | 0 d | 10 d | -0,6 | 1,0000 | -3,7 | 2,6 |
| | | Chem. B | 0 d | 90 d | -1,4 | 0,9603 | -4,5 | 1,7 |
| | | Chem. B | 10 d | 90 d | -0,8 | 0,9997 | -4,0 | 2,3 |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | -0,1 | 1,0000 | -3,2 | 3,1 |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | -2,3 | 0,3674 | -5,5 | 0,8 |
| | | MSB-komb. A | 10 d | 90 d | -2,3 | 0,4158 | -5,4 | 0,9 |
| | 11 mm | | ohne | 0 d | 10 d | -2,2 | 0,4382 | -5,4 |
| | | ohne | 0 d | 90 d | -2,5 | 0,2589 | -5,6 | 0,6 |
| | | ohne | 10 d | 90 d | -0,3 | 1,0000 | -3,4 | 2,9 |
| | | Chem. B | 0 d | 10 d | -1,6 | 0,9074 | -4,7 | 1,6 |
| | | Chem. B | 0 d | 90 d | -1,5 | 0,9321 | -4,6 | 1,6 |
| | | Chem. B | 10 d | 90 d | 0,1 | 1,0000 | -3,1 | 3,2 |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | -1,5 | 0,9321 | -4,6 | 1,6 |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | -3,6 | 0,0113 * | -6,7 | -0,5 |
| | | MSB-komb. A | 10 d | 90 d | -2,1 | 0,5418 | -5,2 | 1,0 |
| | | | | | | | | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | |
| ohne | | 0 d | 6,8 mm | 11 mm | 0,5 | 1,0000 | -2,6 | 3,6 |
| | | 10 d | 6,8 mm | 11 mm | 1,2 | 0,9916 | -1,9 | 4,3 |
| | | 90 d | 6,8 mm | 11 mm | -0,2 | 1,0000 | -3,4 | 2,9 |
| Chem. A | | 0 d | 6,8 mm | 11 mm | 2,0 | 0,6451 | -1,2 | 5,1 |
| | | 10 d | 6,8 mm | 11 mm | 1,0 | 0,9991 | -2,2 | 4,1 |
| | | 90 d | 6,8 mm | 11 mm | 1,9 | 0,7284 | -1,3 | 5,0 |
| MSB- komb. A | | 0 d | 6,8 mm | 11 mm | 2,7 | 0,1646 | -0,4 | 5,8 |
| | | 10 d | 6,8 mm | 11 mm | 1,3 | 0,9863 | -1,9 | 4,4 |
| | | 90 d | 6,8 mm | 11 mm | 1,4 | 0,9555 | -1,7 | 4,6 |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A56: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Geschwindigkeitskonstante k bei der Biomethanisierung von Grünschnitttrogen unter Variation von Lagerdauer, Häcksellänge und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | | |
|--|-------------|-------------|---------------|---------------|----------------------------|----------------|------------------------|------------|-------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze | |
| Geschwindigkeitskonstante [d ⁻¹] | 6,8 mm | 0 d | ohne | Chem. B | -0,037 | 0,4257 | -0,089 | 0,015 | |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | -0,054 | 0,0382 * | -0,106 | -0,002 | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | 0,002 | 1,0000 | -0,050 | 0,054 | |
| | | 10 d | ohne | MSB-komb. A | -0,007 | 1,0000 | -0,059 | 0,045 | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | -0,020 | 0,9922 | -0,072 | 0,032 | |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | -0,022 | 0,9770 | -0,074 | 0,030 | |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,016 | 0,9992 | -0,068 | 0,036 | |
| | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,009 | 1,0000 | -0,061 | 0,043 | |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,002 | 1,0000 | -0,054 | 0,050 | |
| | | 11 mm | 0 d | ohne | Chem. B | -0,020 | 0,9894 | -0,072 | 0,032 |
| | 0 d | ohne | MSB-komb. A | -0,017 | 0,9992 | -0,069 | 0,035 | | |
| | 10 d | ohne | Chem. B | 0,006 | 1,0000 | -0,046 | 0,058 | | |
| | 10 d | ohne | MSB-komb. A | 0,015 | 0,9997 | -0,037 | 0,067 | | |
| | 90 d | ohne | Chem. B | -0,015 | 0,9996 | -0,067 | 0,037 | | |
| | 90 d | ohne | MSB-komb. A | -0,004 | 1,0000 | -0,057 | 0,048 | | |
| | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,004 | 1,0000 | -0,048 | 0,056 | | |
| | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,009 | 1,0000 | -0,043 | 0,061 | | |
| | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,011 | 1,0000 | -0,041 | 0,063 | | |
| | | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | | |
| | | 6,8 mm | ohne | 0 d | 10 d | -0,032 | 0,6926 | -0,084 | 0,020 |
| | ohne | | 0 d | 90 d | -0,010 | 1,0000 | -0,062 | 0,042 | |
| | ohne | | 10 d | 90 d | 0,021 | 0,9833 | -0,031 | 0,073 | |
| | Chem. B | | 0 d | 10 d | 0,008 | 1,0000 | -0,044 | 0,060 | |
| | Chem. B | | 0 d | 90 d | 0,007 | 1,0000 | -0,045 | 0,059 | |
| | Chem. B | | 10 d | 90 d | -0,001 | 1,0000 | -0,053 | 0,052 | |
| | MSB-komb. A | | 0 d | 10 d | 0,015 | 0,9997 | -0,037 | 0,067 | |
| | MSB-komb. A | | 0 d | 90 d | 0,021 | 0,9841 | -0,031 | 0,073 | |
| | MSB-komb. A | | 10 d | 90 d | 0,007 | 1,0000 | -0,045 | 0,059 | |
| | 11 mm | ohne | 0 d | 10 d | -0,038 | 0,3829 | -0,090 | 0,014 | |
| | | ohne | 0 d | 90 d | -0,021 | 0,9855 | -0,073 | 0,031 | |
| | | ohne | 10 d | 90 d | 0,017 | 0,9983 | -0,035 | 0,069 | |
| | | Chem. B | 0 d | 10 d | -0,012 | 1,0000 | -0,064 | 0,040 | |
| | | Chem. B | 0 d | 90 d | -0,016 | 0,9994 | -0,068 | 0,036 | |
| | | Chem. B | 10 d | 90 d | -0,004 | 1,0000 | -0,056 | 0,048 | |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | -0,007 | 1,0000 | -0,059 | 0,045 | |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | -0,009 | 1,0000 | -0,061 | 0,043 | |
| | | MSB-komb. A | 10 d | 90 d | -0,002 | 1,0000 | -0,054 | 0,050 | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | | |
| | ohne | 0 d | 6,8 mm | 11 mm | -0,000 | 1,0000 | -0,052 | 0,052 | |
| | | 10 d | 6,8 mm | 11 mm | -0,007 | 1,0000 | -0,059 | 0,045 | |
| | | 90 d | 6,8 mm | 11 mm | -0,011 | 1,0000 | -0,063 | 0,041 | |
| | Chem. A | 0 d | 6,8 mm | 11 mm | 0,017 | 0,9990 | -0,035 | 0,069 | |
| | | 10 d | 6,8 mm | 11 mm | -0,003 | 1,0000 | -0,055 | 0,049 | |
| | | 90 d | 6,8 mm | 11 mm | -0,006 | 1,0000 | -0,058 | 0,046 | |
| | MSB-komb. A | 0 d | 6,8 mm | 11 mm | 0,037 | 0,4532 | -0,015 | 0,089 | |
| | | 10 d | 6,8 mm | 11 mm | 0,015 | 0,9994 | -0,037 | 0,067 | |
| | | 90 d | 6,8 mm | 11 mm | 0,007 | 1,0000 | -0,045 | 0,059 | |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A57: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{zu}) von Sudangras unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | | | | |
|--|-------------|------|---------------|-------------|----------------------------|-----------|------------------------|------------|--------|--------|-------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze | | | |
| Methanausbeute [$\text{I}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ oTM_{zu}] | 4 mm | 0 d | ohne | Chem. B | 11,44 | 0,9769 | -16,01 | 38,90 | | | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 29,47 | 0,0252 * | 2,01 | 56,93 | | | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | 6,58 | 0,9999 | -20,88 | 34,03 | | | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | -3,36 | 1,0000 | -30,82 | 24,09 | | | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | 6,49 | 0,9999 | -20,96 | 33,95 | | | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 1,87 | 1,0000 | -25,59 | 29,32 | | | |
| | | 7 mm | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | 18,03 | 0,5779 | -9,43 | 45,48 | | |
| | | | | Chem. B | MSB-komb. A | -9,94 | 0,9940 | -37,40 | 17,52 | | |
| | | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | -4,63 | 1,0000 | -32,08 | 22,83 | | |
| | | | | ohne | Chem. B | 7,16 | 0,9998 | -20,30 | 34,61 | | |
| | | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | 0,78 | 1,0000 | -26,67 | 28,24 | | |
| | | | | ohne | Chem. B | -2,94 | 1,0000 | -30,40 | 24,52 | | |
| | 7 mm | 10 d | ohne | MSB-komb. A | 18,60 | 0,5242 | -8,86 | 46,06 | | | |
| | | | ohne | Chem. B | 0,94 | 1,0000 | -26,51 | 28,40 | | | |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | -3,70 | 1,0000 | -31,16 | 23,75 | | | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | -6,37 | 0,9999 | -33,83 | 21,08 | | | |
| | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | 21,54 | 0,2821 | -5,92 | 49,00 | | | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | -4,65 | 1,0000 | -32,10 | 22,81 | | | |
| | | HL | 4 mm | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | | | |
| | | | | | | 0 d | 10 d | -0,73 | 1,0000 | -28,18 | 26,73 |
| | | | | 0 d | ohne | 0 d | 90 d | -10,36 | 0,9915 | -37,82 | 17,10 |
| | | | | | ohne | 10 d | 90 d | -9,63 | 0,9958 | -37,09 | 17,83 |
| | | | | Chem. B | 0 d | 10 d | -5,59 | 1,0000 | -33,05 | 21,86 | |
| | | | | | 0 d | 90 d | -15,31 | 0,8063 | -42,76 | 12,15 | |
| Chem. B | 10 d | | | 90 d | -9,71 | 0,9952 | -37,17 | 17,74 | | | |
| | MSB-komb. A | | | 0 d | 10 d | -33,56 | 0,0059 * | -61,02 | -6,10 | | |
| MSB-komb. A | 0 d | | | 90 d | -37,96 | 0,0009 * | -65,42 | -10,51 | | | |
| | 10 d | | | 90 d | -4,40 | 1,0000 | -31,86 | 23,06 | | | |
| 7 mm | ohne | | | 0 d | 10 d | -16,81 | 0,6814 | -44,27 | 10,65 | | |
| | | | | 0 d | 90 d | -8,04 | 0,9990 | -35,50 | 19,41 | | |
| | 10 d | | ohne | 90 d | 8,77 | 0,9984 | -18,69 | 36,22 | | | |
| | | | Chem. B | 0 d | 10 d | -26,90 | 0,0595 | -54,36 | 0,55 | | |
| | Chem. B | | 0 d | 90 d | -14,25 | 0,8773 | -41,71 | 13,20 | | | |
| | | | 10 d | 90 d | 12,65 | 0,9469 | -14,81 | 40,11 | | | |
| | MSB-komb. A | | 0 d | 10 d | 1,01 | 1,0000 | -26,45 | 28,47 | | | |
| | | | 0 d | 90 d | -12,53 | 0,9507 | -39,98 | 14,93 | | | |
| | MSB-komb. A | | 10 d | 90 d | -13,54 | 0,9129 | -40,99 | 13,92 | | | |
| | | | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | | |
| | 4 mm | | | | | 7 mm | 26,63 | 0,0655 | -0,83 | 54,08 | |
| | ohne | | | 10 d | 4 mm | 7 mm | 10,55 | 0,9897 | -16,91 | 38,00 | |
| 90 d | | | | 4 mm | 7 mm | 28,94 | 0,0306 * | 1,49 | 56,40 | | |
| Chem. A | 0 d | | | 4 mm | 7 mm | 22,34 | 0,2271 | -5,12 | 49,80 | | |
| | 10 d | 4 mm | | 7 mm | 1,03 | 1,0000 | -26,43 | 28,48 | | | |
| MSB- | 90 d | 4 mm | | 7 mm | 23,39 | 0,1693 | -4,06 | 50,85 | | | |
| | 0 d | 4 mm | | 7 mm | -2,06 | 1,0000 | -29,52 | 25,40 | | | |
| komb. A | 10 d | 4 mm | | 7 mm | 32,51 | 0,0086 * | 5,05 | 59,96 | | | |
| | 90 d | 4 mm | | 7 mm | 23,37 | 0,1701 | -4,08 | 50,83 | | | |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A58: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{orig}) von Sudangras unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | | |
|---|-------------|-----------|---------------|---------------|----------------------------|---------------|------------------------|------------|-------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze | |
| Methanausbeute [$\text{I}_N \cdot \text{kg}^{-1}$ oTM_{orig}] | 4 mm | 0 d | ohne | Chem. B | 11,44 | 0,9936 | -19,45 | 42,33 | |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | 29,47 | 0,0767 | -1,42 | 60,36 | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | -1,63 | 1,0000 | -32,52 | 29,26 | |
| | | 10 d | ohne | MSB-komb. A | -9,45 | 0,9992 | -40,34 | 21,44 | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | -5,09 | 1,0000 | -35,98 | 25,80 | |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | 2,15 | 1,0000 | -28,74 | 33,04 | |
| | 7 mm | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | 18,03 | 0,7540 | -12,86 | 48,92 | |
| | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | -7,81 | 0,9999 | -38,70 | 23,08 | |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | 7,24 | 1,0000 | -23,65 | 38,13 | |
| | | 0 d | ohne | Chem. B | 7,16 | 1,0000 | -23,74 | 38,05 | |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | 0,78 | 1,0000 | -30,11 | 31,67 | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | -29,41 | 0,0780 | -60,30 | 1,48 | |
| | | 10 d | ohne | MSB-komb. A | -0,90 | 1,0000 | -31,79 | 29,99 | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | 0,83 | 1,0000 | -30,06 | 31,72 | |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | 5,04 | 1,0000 | -25,85 | 35,93 | |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | -6,37 | 1,0000 | -37,26 | 24,52 | |
| | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | 28,51 | 0,0985 | -2,38 | 59,40 | |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | 4,21 | 1,0000 | -26,68 | 35,10 | |
| | | | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | |
| | | 4 mm | ohne | 0 d | 10 d | 13,72 | 0,9626 | -17,17 | 44,61 |
| | | | ohne | 0 d | 90 d | 15,24 | 0,9131 | -15,65 | 46,13 |
| | | | ohne | 10 d | 90 d | 1,52 | 1,0000 | -29,37 | 32,41 |
| | | | Chem. B | 0 d | 10 d | 0,64 | 1,0000 | -30,25 | 31,53 |
| | | | Chem. B | 0 d | 90 d | -1,30 | 1,0000 | -32,19 | 29,59 |
| Chem. B | 10 d | | 90 d | -1,94 | 1,0000 | -32,83 | 28,95 | | |
| MSB-komb. A | 0 d | | 10 d | -25,20 | 0,2303 | -56,09 | 5,69 | | |
| MSB-komb. A | 0 d | | 90 d | -12,08 | 0,9883 | -42,97 | 18,81 | | |
| MSB-komb. A | 10 d | | 90 d | 13,11 | 0,9746 | -17,78 | 44,00 | | |
| 7 mm | ohne | | 0 d | 10 d | 20,72 | 0,5408 | -10,17 | 51,61 | |
| | ohne | | 0 d | 90 d | 9,05 | 0,9996 | -21,84 | 39,94 | |
| | ohne | | 10 d | 90 d | -11,67 | 0,9918 | -42,56 | 19,22 | |
| | Chem. B | 0 d | 10 d | -15,85 | 0,8860 | -46,74 | 15,04 | | |
| | Chem. B | 0 d | 90 d | 2,73 | 1,0000 | -28,16 | 33,62 | | |
| | Chem. B | 10 d | 90 d | 18,57 | 0,7142 | -12,32 | 49,46 | | |
| | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | 19,04 | 0,6789 | -11,85 | 49,93 | | |
| | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | 13,31 | 0,9706 | -17,58 | 44,20 | | |
| | MSB-komb. A | 10 d | 90 d | -5,73 | 1,0000 | -36,62 | 25,16 | | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | | |
| ohne | 0 d | 4 mm | 7 mm | 26,63 | 0,1619 | -4,26 | 57,52 | | |
| | 10 d | 4 mm | 7 mm | 33,63 | 0,0216 * | 2,74 | 64,52 | | |
| | 90 d | 4 mm | 7 mm | 20,44 | 0,5635 | -10,45 | 51,33 | | |
| | Chem. A | 0 d | 4 mm | 7 mm | 22,34 | 0,4129 | -8,55 | 53,23 | |
| | | 10 d | 4 mm | 7 mm | 5,85 | 1,0000 | -25,04 | 36,74 | |
| | | 90 d | 4 mm | 7 mm | 26,36 | 0,1741 | -4,53 | 57,25 | |
| MSB-komb. A | 0 d | 4 mm | 7 mm | -2,06 | 1,0000 | -32,95 | 28,83 | | |
| | 10 d | 4 mm | 7 mm | 42,17 | 0,0013 * | 11,28 | 73,06 | | |
| | 90 d | 4 mm | 7 mm | 23,33 | 0,3451 | -7,56 | 54,22 | | |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A59: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) des Methangehaltes im Biogas bei der Biomethanisierung von Sudangras unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | | | |
|------------------------------|-------------|-----------|---------------|---------------|----------------------------|---------------|------------------------|----------------|------|-----|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze | | |
| Methan- gehalt [Vol-%] | 4 mm | 0 d | ohne | Chem. B | 0,5 | 1,0000 | -4,0 | 4,9 | | |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | 0,8 | 1,0000 | -3,7 | 5,3 | | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | 2,6 | 0,7241 | -1,8 | 7,1 | | |
| | | 10 d | ohne | MSB-komb. A | -0,4 | 1,0000 | -4,8 | 4,1 | | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | 1,1 | 1,0000 | -3,4 | 5,6 | | |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | -0,8 | 1,0000 | -5,3 | 3,7 | | |
| | 7 mm | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,3 | 1,0000 | -4,2 | 4,8 | | |
| | | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | -3,0 | 0,5219 | -7,5 | 1,5 | |
| | | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -1,9 | 0,9707 | -6,4 | 2,5 | |
| | | | 0 d | ohne | Chem. B | -1,4 | 0,9987 | -5,9 | 3,0 | |
| | | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | 0,0 | 1,0000 | -4,4 | 4,5 | |
| | | | 10 d | ohne | Chem. B | -1,7 | 0,9944 | -6,1 | 2,8 | |
| | | 10 d | ohne | MSB-komb. A | 2,2 | 0,9133 | -2,3 | 6,7 | | |
| | | | ohne | Chem. B | 5,3 | 0,0089 * | 0,8 | 9,8 | | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 4,8 | 0,0280 * | 0,3 | 9,2 | | |
| | | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | 1,5 | 0,9980 | -3,0 | 5,9 | |
| | | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | 3,9 | 0,1596 | -0,6 | 8,3 | |
| | | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,5 | 1,0000 | -5,0 | 3,9 | |
| | | | HL | | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | |
| | | | 4 mm | ohne | 0 d | 10 d | -1,9 | 0,9806 | -6,3 | 2,6 |
| ohne | 0 d | 90 d | | -1,5 | 0,9976 | -6,0 | 3,0 | | | |
| ohne | 10 d | 90 d | | 0,3 | 1,0000 | -4,1 | 4,8 | | | |
| Chem. B | 0 d | 10 d | | 0,3 | 1,0000 | -4,2 | 4,8 | | | |
| Chem. B | 0 d | 90 d | | -0,9 | 1,0000 | -5,3 | 3,6 | | | |
| Chem. B | 10 d | 90 d | | -1,2 | 1,0000 | -5,7 | 3,3 | | | |
| MSB-komb. A | 0 d | 10 d | | -3,0 | 0,5243 | -7,5 | 1,5 | | | |
| MSB-komb. A | 0 d | 90 d | | -3,1 | 0,4701 | -7,6 | 1,4 | | | |
| MSB-komb. A | 10 d | 90 d | | -0,1 | 1,0000 | -4,6 | 4,4 | | | |
| 7 mm | ohne | 0 d | | 10 d | -3,7 | 0,2006 | -8,2 | 0,8 | | |
| | ohne | 0 d | | 90 d | -7,0 | <0,0001 * | -11,5 | -2,5 | | |
| | ohne | 10 d | | 90 d | -3,3 | 0,3825 | -7,7 | 1,2 | | |
| | Chem. B | 0 d | | 10 d | -3,9 | 0,1384 | -8,4 | 0,5 | | |
| | Chem. B | 0 d | | 90 d | -0,3 | 1,0000 | -4,7 | 4,2 | | |
| | Chem. B | 10 d | 90 d | 3,7 | 0,2133 | -0,8 | 8,1 | | | |
| | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | -1,6 | 0,9966 | -6,0 | 2,9 | | | |
| | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | -2,3 | 0,8873 | -6,8 | 2,2 | | | |
| MSB-komb. A | 10 d | 90 d | -0,7 | 1,0000 | -5,2 | 3,8 | | | | |
| SZ | | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | | | |
| ohne | 0 d | 4 mm | 7 mm | 0,7 | 1,0000 | -3,8 | 5,2 | | | |
| | 10 d | 4 mm | 7 mm | -1,2 | 1,0000 | -5,6 | 3,3 | | | |
| | 90 d | 4 mm | 7 mm | -4,8 | 0,0271 * | -9,3 | -0,3 | | | |
| | Chem. A | 0 d | 4 mm | 7 mm | -1,2 | 0,9999 | -5,7 | 3,3 | | |
| | | 10 d | 4 mm | 7 mm | -5,5 | 0,0066 * | -9,9 | -1,0 | | |
| | | 90 d | 4 mm | 7 mm | -0,6 | 1,0000 | -5,1 | 3,9 | | |
| MSB- komb. A | 0 d | 4 mm | 7 mm | 0,0 | 1,0000 | -4,5 | 4,4 | | | |
| | 10 d | 4 mm | 7 mm | 1,4 | 0,9988 | -3,1 | 5,9 | | | |
| | 90 d | 4 mm | 7 mm | 0,8 | 1,0000 | -3,7 | 5,3 | | | |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A60: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Geschwindigkeitskonstante k bei der Biomethanisierung von Sudangras unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | | |
|--|-------------|-----------|---------------|---------------|----------------------------|-----------|------------------------|------------|------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze | |
| Geschwindigkeitskonstante [d ⁻¹] | 4 mm | 0 d | ohne | Chem. B | 0,01 | 0,9999 | -0,03 | 0,05 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 0,02 | 0,9914 | -0,03 | 0,06 | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | -0,01 | 1,0000 | -0,05 | 0,04 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 0,00 | 1,0000 | -0,04 | 0,04 | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | -0,01 | 1,0000 | -0,05 | 0,03 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 0,03 | 0,4411 | -0,01 | 0,07 | |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,01 | 1,0000 | -0,04 | 0,05 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | 0,00 | 1,0000 | -0,04 | 0,05 | |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,04 | 0,0845 | 0,00 | 0,08 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | 0,04 | 0,0845 | 0,00 | 0,08 | |
| | 7 mm | 0 d | ohne | Chem. B | 0,00 | 1,0000 | -0,04 | 0,04 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | -0,01 | 0,9998 | -0,05 | 0,03 | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | -0,01 | 0,9998 | -0,05 | 0,03 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | -0,04 | 0,1473 | -0,08 | 0,01 | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | -0,06 | 0,0002 * | -0,10 | -0,02 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | -0,04 | 0,0965 | -0,08 | 0,00 | |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,01 | 0,9987 | -0,05 | 0,03 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | -0,03 | 0,6923 | -0,07 | 0,02 | |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,02 | 0,9202 | -0,02 | 0,06 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | 0,02 | 0,9202 | -0,02 | 0,06 | |
| | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | | | |
| 4 mm | ohne | 0 d | 0 d | 10 d | 0,02 | 0,9274 | -0,02 | 0,06 | |
| | | | 0 d | 90 d | 0,02 | 0,8708 | -0,02 | 0,06 | |
| | | | 10 d | 90 d | 0,00 | 1,0000 | -0,04 | 0,04 | |
| | Chem. B | 0 d | 10 d | 10 d | 0,00 | 1,0000 | -0,04 | 0,05 | |
| | | | 0 d | 90 d | 0,00 | 1,0000 | -0,04 | 0,04 | |
| | | | 10 d | 90 d | 0,00 | 1,0000 | -0,04 | 0,04 | |
| | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | 10 d | 0,00 | 1,0000 | -0,04 | 0,04 | |
| | | | 0 d | 90 d | 0,04 | 0,1715 | -0,01 | 0,08 | |
| | | | 10 d | 90 d | 0,03 | 0,2716 | -0,01 | 0,07 | |
| | 7 mm | ohne | 0 d | 10 d | 10 d | 0,02 | 0,9910 | -0,03 | 0,06 |
| | | | | 0 d | 90 d | 0,03 | 0,6532 | -0,02 | 0,07 |
| | | | | 10 d | 90 d | 0,01 | 0,9999 | -0,03 | 0,05 |
| | | Chem. B | 0 d | 10 d | 10 d | 0,00 | 1,0000 | -0,04 | 0,05 |
| | | | | 0 d | 90 d | -0,03 | 0,2252 | -0,08 | 0,01 |
| | | | | 10 d | 90 d | -0,04 | 0,1197 | -0,08 | 0,00 |
| MSB-komb. A | 0 d | 10 d | 10 d | -0,01 | 1,0000 | -0,05 | 0,03 | | |
| | | 0 d | 90 d | 0,00 | 1,0000 | -0,04 | 0,04 | | |
| MSB-komb. A | 10 d | 90 d | 0,01 | 1,0000 | -0,03 | 0,05 | | | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | | |
| ohne | 0 d | 4 mm | 7 mm | 7 mm | 0,03 | 0,3131 | -0,01 | 0,07 | |
| | | | 7 mm | 7 mm | 0,03 | 0,5464 | -0,01 | 0,07 | |
| | | | 7 mm | 7 mm | 0,04 | 0,1499 | -0,01 | 0,08 | |
| | Chem. A | 0 d | 4 mm | 7 mm | 7 mm | 0,02 | 0,8054 | -0,02 | 0,06 |
| | | | | 7 mm | 7 mm | 0,02 | 0,8495 | -0,02 | 0,06 |
| | | | | 7 mm | 7 mm | -0,01 | 0,9992 | -0,05 | 0,03 |
| | MSB-komb. A | 0 d | 4 mm | 7 mm | 7 mm | 0,00 | 1,0000 | -0,04 | 0,05 |
| | | | | 7 mm | 7 mm | -0,01 | 1,0000 | -0,05 | 0,03 |
| | | | | 7 mm | 7 mm | -0,03 | 0,3241 | -0,07 | 0,01 |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A61: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{zu}) von Triticale unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | | | |
|---|-------------|-------------|---------------|---------------|----------------------------|---------------|------------------------|------------|--------|-------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze | | |
| Methanausbeute [$\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ oTM_{zu}] | 4 mm | 0 d | ohne | Chem. B | 10,31 | 0,9818 | -15,12 | 35,74 | | |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | 15,65 | 0,6724 | -9,78 | 41,08 | | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | 13,19 | 0,8722 | -12,24 | 38,61 | | |
| | | 10 d | ohne | MSB-komb. A | 3,63 | 1,0000 | -21,80 | 29,05 | | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | 8,61 | 0,9978 | -16,82 | 34,04 | | |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | -1,34 | 1,0000 | -26,76 | 24,09 | | |
| | 8 mm | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | 5,34 | 1,0000 | -20,09 | 30,77 | | |
| | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | -9,56 | 0,9917 | -34,99 | 15,87 | | |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -9,95 | 0,9875 | -35,37 | 15,48 | | |
| | | 0 d | ohne | Chem. B | 8,37 | 0,9983 | -17,06 | 33,80 | | |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | 2,94 | 1,0000 | -22,49 | 28,37 | | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | 8,03 | 0,9987 | -17,39 | 33,46 | | |
| | | 10 d | ohne | MSB-komb. A | -6,86 | 0,9997 | -32,29 | 18,56 | | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | 25,28 | 0,0529 | -0,15 | 50,71 | | |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | -9,99 | 0,9870 | -35,42 | 15,44 | | |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | -5,43 | 1,0000 | -30,86 | 20,00 | | |
| | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | -14,90 | 0,7426 | -40,33 | 10,53 | | |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -35,27 | 0,0005 * | -60,70 | -9,84 | | |
| | | | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | | |
| | | | 4 mm | ohne | 0 d | 10 d | -7,23 | 0,9994 | -32,65 | 18,20 |
| | | | | ohne | 0 d | 90 d | -13,89 | 0,8251 | -39,32 | 11,54 |
| | | | | ohne | 10 d | 90 d | -6,66 | 0,9998 | -32,09 | 18,77 |
| | | | | Chem. B | 0 d | 10 d | -4,35 | 1,0000 | -29,78 | 21,08 |
| | | | | Chem. B | 0 d | 90 d | -15,59 | 0,6774 | -41,02 | 9,84 |
| | Chem. B | 10 d | | 90 d | -11,24 | 0,9620 | -36,67 | 14,19 | | |
| | 8 mm | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | -19,25 | 0,3303 | -44,68 | 6,18 | | |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | -30,87 | 0,0060 * | -56,30 | -5,45 | | |
| | | MSB-komb. A | 10 d | 90 d | -11,62 | 0,9503 | -37,05 | 13,81 | | |
| | | ohne | 0 d | 10 d | -2,92 | 1,0000 | -28,35 | 22,51 | | |
| | | ohne | 0 d | 90 d | -24,69 | 0,0656 | -50,12 | 0,73 | | |
| | | ohne | 10 d | 90 d | -21,77 | 0,1677 | -47,20 | 3,66 | | |
| | | Chem. B | 0 d | 10 d | -3,26 | 1,0000 | -28,69 | 22,17 | | |
| | | Chem. B | 0 d | 90 d | -7,78 | 0,9990 | -33,21 | 17,65 | | |
| | | Chem. B | 10 d | 90 d | -4,52 | 1,0000 | -29,95 | 20,90 | | |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | -12,73 | 0,8995 | -38,15 | 12,70 | | |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 90 d | -37,62 | 0,0002 * | -63,05 | -12,20 | | |
| | | MSB-komb. A | 10 d | 90 d | -24,90 | 0,0613 | -50,33 | 0,53 | | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | | | |
| | ohne | 0 d | 4 mm | 8 mm | 12,65 | 0,9034 | -12,78 | 38,08 | | |
| | | 10 d | 4 mm | 8 mm | 16,95 | 0,5476 | -8,48 | 42,38 | | |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | 1,84 | 1,0000 | -23,59 | 27,27 | | |
| | Chem. A | 0 d | 4 mm | 8 mm | 10,71 | 0,9754 | -14,72 | 36,14 | | |
| | | 10 d | 4 mm | 8 mm | 11,80 | 0,9430 | -13,63 | 37,23 | | |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | 18,51 | 0,3977 | -6,91 | 43,94 | | |
| | MSB-komb. A | 0 d | 4 mm | 8 mm | -0,06 | 1,0000 | -25,49 | 25,37 | | |
| | | 10 d | 4 mm | 8 mm | 6,46 | 0,9998 | -18,97 | 31,89 | | |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | -6,81 | 0,9997 | -32,24 | 18,62 | | |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A62: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Methanausbeuten (oTM_{orig}) von Triticale unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | | |
|---|-----------|-------------|---------------|---------------|----------------------------|----------------|------------------------|------------|-------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze | |
| Methanausbeute [$\text{I}_N \cdot \text{kg}^{-1}$ oTM_{orig}] | 4 mm | 0 d | ohne | Chem. B | 10,31 | 0,9879 | -16,44 | 37,07 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 15,65 | 0,7434 | -11,10 | 42,41 | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | 9,31 | 0,9956 | -17,45 | 36,06 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 9,25 | 0,9959 | -17,51 | 36,00 | |
| | | | ohne | Chem. B | 9,38 | 0,9954 | -17,38 | 36,13 | |
| | | 8 mm | 0 d | ohne | MSB-komb. A | 8,68 | 0,9979 | -18,08 | 35,44 |
| | | | | Chem. B | MSB-komb. A | 5,34 | 1,0000 | -21,42 | 32,10 |
| | | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,06 | 1,0000 | -26,82 | 26,70 |
| | | | | Chem. B | MSB-komb. A | -0,70 | 1,0000 | -27,45 | 26,06 |
| | ohne | | | Chem. B | 8,37 | 0,9989 | -18,39 | 35,12 | |
| | 90 d | | ohne | MSB-komb. A | 2,94 | 1,0000 | -23,82 | 29,69 | |
| | | | ohne | Chem. B | -8,78 | 0,9975 | -35,53 | 17,98 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | -17,00 | 0,6213 | -43,75 | 9,76 | |
| | | | ohne | Chem. B | 6,06 | 1,0000 | -20,70 | 32,81 | |
| | | ohne | MSB-komb. A | -7,27 | 0,9998 | -34,03 | 19,48 | | |
| | | Chem. B | MSB-komb. A | -5,43 | 1,0000 | -32,19 | 21,33 | | |
| | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -8,22 | 0,9990 | -34,97 | 18,54 | | |
| | | Chem. B | MSB-komb. A | -13,33 | 0,8993 | -40,09 | 13,42 | | |
| | | Chem. B | MSB-komb. A | -13,33 | 0,8993 | -40,09 | 13,42 | | |
| | | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | | |
| | 4 mm | ohne | 0 d | 0 d | 10 d | 3,32 | 1,0000 | -23,43 | 30,08 |
| | | | | 0 d | 90 d | 1,35 | 1,0000 | -25,41 | 28,10 |
| | | | | 10 d | 90 d | -1,98 | 1,0000 | -28,73 | 24,78 |
| | | | Chem. B | 0 d | 10 d | 2,32 | 1,0000 | -24,44 | 29,07 |
| | | | | 0 d | 90 d | 0,41 | 1,0000 | -26,34 | 27,17 |
| | | | | 10 d | 90 d | -1,90 | 1,0000 | -28,66 | 24,85 |
| | | | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | -3,09 | 1,0000 | -29,84 | 23,67 |
| 0 d | | | | 90 d | -5,63 | 1,0000 | -32,38 | 21,13 | |
| 10 d | | | | 90 d | -2,54 | 1,0000 | -29,30 | 24,21 | |
| 8 mm | | ohne | 0 d | 10 d | 19,54 | 0,3869 | -7,21 | 46,30 | |
| | | | 0 d | 90 d | 4,16 | 1,0000 | -22,60 | 30,92 | |
| | | | 10 d | 90 d | -15,38 | 0,7652 | -42,14 | 11,37 | |
| | | Chem. B | 0 d | 10 d | 2,40 | 1,0000 | -24,36 | 29,15 | |
| | | | 0 d | 90 d | 1,85 | 1,0000 | -24,91 | 28,61 | |
| | | | 10 d | 90 d | -0,55 | 1,0000 | -27,30 | 26,21 | |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | -0,39 | 1,0000 | -27,15 | 26,36 | |
| | | | 0 d | 90 d | -6,05 | 1,0000 | -32,81 | 20,70 | |
| | | | 10 d | 90 d | -5,66 | 1,0000 | -32,42 | 21,09 | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | | |
| ohne | 0 d | 4 mm | 8 mm | 8 mm | 12,65 | 0,9313 | -14,11 | 39,41 | |
| | | | 8 mm | 8 mm | 28,87 | 0,0235 * | 2,12 | 55,63 | |
| | | 10 d | 4 mm | 8 mm | 15,46 | 0,7591 | -11,29 | 42,22 | |
| | | | 4 mm | 8 mm | 10,71 | 0,9825 | -16,05 | 37,46 | |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | 10,79 | 0,9816 | -15,97 | 37,54 | |
| | | | 4 mm | 8 mm | 12,15 | 0,9503 | -14,61 | 38,90 | |
| | Chem. A | 0 d | 4 mm | 8 mm | -0,06 | 1,0000 | -26,82 | 26,69 | |
| | | | 4 mm | 8 mm | 2,63 | 1,0000 | -24,12 | 29,39 | |
| | | 10 d | 4 mm | 8 mm | -0,49 | 1,0000 | -27,24 | 26,27 | |
| | | | 4 mm | 8 mm | -0,49 | 1,0000 | -27,24 | 26,27 | |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | -0,49 | 1,0000 | -27,24 | 26,27 | |
| | | | 4 mm | 8 mm | -0,49 | 1,0000 | -27,24 | 26,27 | |
| MSB-komb. A | 0 d | 4 mm | 8 mm | -0,06 | 1,0000 | -26,82 | 26,69 | | |
| | | 4 mm | 8 mm | 2,63 | 1,0000 | -24,12 | 29,39 | | |
| | 10 d | 4 mm | 8 mm | -0,49 | 1,0000 | -27,24 | 26,27 | | |
| | | 4 mm | 8 mm | -0,49 | 1,0000 | -27,24 | 26,27 | | |
| | 90 d | 4 mm | 8 mm | -0,49 | 1,0000 | -27,24 | 26,27 | | |
| | | 4 mm | 8 mm | -0,49 | 1,0000 | -27,24 | 26,27 | | |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A63: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) des Methangehaltes im Biogas bei der Biomethanisierung von Triticale unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | | |
|------------------------------|-----------------|-----------|---------------|---------------|----------------------------|---------------|------------------------|------------|-----|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze | |
| Methan- gehalt [Vol-%] | 4 mm | 0 d | ohne | Chem. B | -0,4 | 1,0000 | -4,4 | 3,6 | |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | 0,4 | 1,0000 | -3,6 | 4,4 | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | 0,1 | 1,0000 | -3,8 | 4,1 | |
| | | 10 d | ohne | MSB-komb. A | -0,3 | 1,0000 | -4,3 | 3,7 | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | 0,9 | 1,0000 | -3,1 | 4,9 | |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | -0,3 | 1,0000 | -4,3 | 3,6 | |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,7 | 1,0000 | -3,3 | 4,7 | |
| | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,4 | 1,0000 | -4,4 | 3,6 | |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -1,2 | 0,9990 | -5,2 | 2,8 | |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,5 | 1,0000 | -4,5 | 3,5 | |
| | 8 mm | 0 d | ohne | Chem. B | 0,1 | 1,0000 | -3,9 | 4,1 | |
| | | 0 d | ohne | MSB-komb. A | 0,0 | 1,0000 | -4,0 | 4,0 | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | 0,3 | 1,0000 | -3,7 | 4,3 | |
| | | 10 d | ohne | MSB-komb. A | 1,1 | 0,9996 | -2,8 | 5,1 | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | 1,4 | 0,9950 | -2,6 | 5,4 | |
| | | 90 d | ohne | MSB-komb. A | 0,9 | 1,0000 | -3,1 | 4,9 | |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,1 | 1,0000 | -4,1 | 3,9 | |
| | | 10 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,8 | 1,0000 | -3,2 | 4,8 | |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,5 | 1,0000 | -4,5 | 3,5 | |
| | | | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | |
| 4 mm | ohne | 0 d | 0 d | 10 d | -0,5 | 1,0000 | -4,5 | 3,5 | |
| | ohne | 0 d | 0 d | 90 d | -0,7 | 1,0000 | -4,7 | 3,3 | |
| | ohne | 10 d | 10 d | 90 d | -0,2 | 1,0000 | -4,2 | 3,8 | |
| | Chem. B | 0 d | 0 d | 10 d | 0,0 | 1,0000 | -4,0 | 4,0 | |
| | Chem. B | 0 d | 0 d | 90 d | 0,5 | 1,0000 | -3,5 | 4,5 | |
| | Chem. B | 10 d | 10 d | 90 d | 0,5 | 1,0000 | -3,4 | 4,5 | |
| | MSB-komb. A | 0 d | 0 d | 10 d | -1,2 | 0,9996 | -5,2 | 2,8 | |
| | MSB-komb. A | 0 d | 0 d | 90 d | -1,4 | 0,9942 | -5,4 | 2,6 | |
| | MSB-komb. A | 10 d | 10 d | 90 d | -0,3 | 1,0000 | -4,3 | 3,7 | |
| | 8 mm | ohne | 0 d | 0 d | 10 d | 0,1 | 1,0000 | -3,9 | 4,1 |
| | | ohne | 0 d | 0 d | 90 d | -0,8 | 1,0000 | -4,8 | 3,2 |
| | | ohne | 10 d | 10 d | 90 d | -0,9 | 1,0000 | -4,9 | 3,1 |
| | | Chem. B | 0 d | 0 d | 10 d | 0,3 | 1,0000 | -3,6 | 4,3 |
| | | Chem. B | 0 d | 0 d | 90 d | 0,5 | 1,0000 | -3,5 | 4,5 |
| | | Chem. B | 10 d | 10 d | 90 d | 0,2 | 1,0000 | -3,8 | 4,2 |
| MSB-komb. A | | 0 d | 0 d | 10 d | 1,3 | 0,9985 | -2,7 | 5,3 | |
| MSB-komb. A | | 0 d | 0 d | 90 d | 0,1 | 1,0000 | -3,9 | 4,1 | |
| MSB-komb. A | | 10 d | 10 d | 90 d | -1,2 | 0,9996 | -5,1 | 2,8 | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | | |
| ohne | 0 d | 0 d | 4 mm | 8 mm | -0,9 | 1,0000 | -4,9 | 3,1 | |
| | 10 d | 10 d | 4 mm | 8 mm | -0,2 | 1,0000 | -4,2 | 3,8 | |
| | 90 d | 90 d | 4 mm | 8 mm | -1,0 | 1,0000 | -5,0 | 3,0 | |
| | Chem. A | 0 d | 0 d | 4 mm | 8 mm | -0,4 | 1,0000 | -4,4 | 3,6 |
| | | 10 d | 10 d | 4 mm | 8 mm | -0,1 | 1,0000 | -4,1 | 3,9 |
| | | 90 d | 90 d | 4 mm | 8 mm | -0,4 | 1,0000 | -4,4 | 3,6 |
| | MSB- komb. A | 0 d | 0 d | 4 mm | 8 mm | -1,3 | 0,9987 | -5,2 | 2,7 |
| | | 10 d | 10 d | 4 mm | 8 mm | 1,2 | 0,9994 | -2,8 | 5,2 |
| | | 90 d | 90 d | 4 mm | 8 mm | 0,3 | 1,0000 | -3,7 | 4,3 |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A64: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte (Adjust=SIMULATE) der Geschwindigkeitskonstante k bei der Biomethanisierung von Triticale unter Variation von Häcksellänge, Lagerdauer und Silierzusatz; Versuchsschwerpunkt III

| Abhängige Variable | HL | LD | Vergleich von | | mittlere Differenz (I - J) | Adjust. p | 95% Konfidenzintervall | | |
|--|-----------|-------------|---------------|---------------|----------------------------|-----------|------------------------|------------|------|
| | | | (I) SZ | (J) SZ | | | Untergrenze | Obergrenze | |
| Geschwindigkeitskonstante [d ⁻¹] | 4 mm | 0 d | ohne | Chem. B | 0,01 | 1,0000 | -0,07 | 0,09 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 0,01 | 1,0000 | -0,07 | 0,09 | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | 0,00 | 1,0000 | -0,08 | 0,08 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 0,02 | 1,0000 | -0,06 | 0,10 | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | -0,03 | 0,9906 | -0,11 | 0,05 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 0,00 | 1,0000 | -0,08 | 0,08 | |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,01 | 1,0000 | -0,09 | 0,07 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | 0,02 | 1,0000 | -0,06 | 0,10 | |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,03 | 0,9778 | -0,05 | 0,11 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | 0,03 | 0,9778 | -0,05 | 0,11 | |
| | 8 mm | 0 d | ohne | Chem. B | 0,02 | 0,9998 | -0,06 | 0,10 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 0,00 | 1,0000 | -0,08 | 0,08 | |
| | | 10 d | ohne | Chem. B | 0,01 | 1,0000 | -0,07 | 0,09 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 0,03 | 0,9985 | -0,05 | 0,10 | |
| | | 90 d | ohne | Chem. B | -0,01 | 1,0000 | -0,09 | 0,07 | |
| | | | ohne | MSB-komb. A | 0,02 | 1,0000 | -0,06 | 0,10 | |
| | | 0 d | Chem. B | MSB-komb. A | -0,02 | 0,9996 | -0,10 | 0,06 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | 0,01 | 1,0000 | -0,07 | 0,09 | |
| | | 90 d | Chem. B | MSB-komb. A | 0,03 | 0,9982 | -0,05 | 0,10 | |
| | | | Chem. B | MSB-komb. A | 0,03 | 0,9982 | -0,05 | 0,10 | |
| | HL | SZ | (I) LD | (J) LD | (I - J) | | | | |
| 4 mm | ohne | 0 d | 0 d | 10 d | -0,01 | 1,0000 | -0,09 | 0,07 | |
| | | | 0 d | 90 d | -0,01 | 1,0000 | -0,09 | 0,07 | |
| | | | 10 d | 90 d | 0,00 | 1,0000 | -0,08 | 0,08 | |
| | | Chem. B | 0 d | 10 d | -0,02 | 0,9992 | -0,10 | 0,05 | |
| | | | 0 d | 90 d | -0,05 | 0,6133 | -0,13 | 0,03 | |
| | | | 10 d | 90 d | -0,03 | 0,9977 | -0,11 | 0,05 | |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | 0,00 | 1,0000 | -0,08 | 0,08 | |
| | | | 0 d | 90 d | -0,01 | 1,0000 | -0,09 | 0,07 | |
| | | | 10 d | 90 d | -0,01 | 1,0000 | -0,09 | 0,07 | |
| | 8 mm | ohne | 0 d | 10 d | -0,04 | 0,9326 | -0,12 | 0,04 | |
| | | | 0 d | 90 d | -0,03 | 0,9666 | -0,11 | 0,04 | |
| | | | 10 d | 90 d | 0,00 | 1,0000 | -0,08 | 0,08 | |
| | | Chem. B | 0 d | 10 d | -0,05 | 0,7313 | -0,13 | 0,03 | |
| | | | 0 d | 90 d | -0,06 | 0,2731 | -0,14 | 0,02 | |
| | | | 10 d | 90 d | -0,02 | 1,0000 | -0,09 | 0,06 | |
| | | MSB-komb. A | 0 d | 10 d | -0,01 | 1,0000 | -0,09 | 0,07 | |
| | | | 0 d | 90 d | -0,01 | 1,0000 | -0,09 | 0,07 | |
| | | | 10 d | 90 d | 0,00 | 1,0000 | -0,08 | 0,08 | |
| | SZ | LD | (I) HL | (J) HL | (I - J) | | | | |
| ohne | 0 d | 4 mm | 4 mm | 8 mm | 0,03 | 0,9925 | -0,05 | 0,11 | |
| | | | 4 mm | 8 mm | 0,00 | 1,0000 | -0,08 | 0,08 | |
| | | 10 d | 4 mm | 8 mm | 0,00 | 1,0000 | -0,08 | 0,08 | |
| | | | 4 mm | 8 mm | 0,04 | 0,9388 | -0,04 | 0,12 | |
| | | 90 d | 4 mm | 8 mm | 0,01 | 1,0000 | -0,06 | 0,09 | |
| | | | 4 mm | 8 mm | 0,03 | 0,9982 | -0,05 | 0,10 | |
| | Chem. A | 0 d | 4 mm | 4 mm | 8 mm | 0,02 | 0,9997 | -0,06 | 0,10 |
| | | | | 4 mm | 8 mm | 0,01 | 1,0000 | -0,07 | 0,09 |
| | | 10 d | 4 mm | 4 mm | 8 mm | 0,02 | 0,9997 | -0,06 | 0,10 |
| | | | | 4 mm | 8 mm | 0,01 | 1,0000 | -0,07 | 0,09 |
| | | 90 d | 4 mm | 4 mm | 8 mm | 0,02 | 0,9997 | -0,06 | 0,10 |
| | | | | 4 mm | 8 mm | 0,02 | 1,0000 | -0,06 | 0,10 |

HL... Häcksellänge; LD... Lagerdauer; SZ... Silierzusatz; * ... die mittlere Differenz ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ signifikant

Tab. A65: Pearsonsche Korrelationskoeffizienten zwischen der Änderung der Substratzusammensetzung durch die Silierung und den Methanausbeuten bzw. dem Methangehalt im Biogas der Silagen des Versuchsschwerpunktes III

| Differenz: Gehalt der Silagen – Gehalt der Frischmassen | | Mais; n=14 | | | Grünschnittroggen; n=16 | | |
|---|--------|--|--|-----------------------|--|--|-----------------------|
| | | $Y_{CH_4_zu}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{zu}] | $Y_{CH_4_orig}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{orig}] | C_{CH_4} [Vol-%] | $Y_{CH_4_zu}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{zu}] | $Y_{CH_4_orig}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{orig}] | C_{CH_4} [Vol-%] |
| Δ Zucker | [% TM] | -0,31 | -0,33 | 0,01 | -0,66 ** | -0,17 | -0,76 ** |
| Δ NfE | [% TM] | -0,09 | 0,60 * | -0,65 * | -0,69 ** | -0,32 | -0,18 |
| Δ Rohfett | [% TM] | -0,09 | 0,27 | 0,21 | 0,29 | 0,04 | 0,67 ** |
| Δ Rohprotein | [% TM] | -0,41 | -0,48 | -0,16 | -0,11 | 0,17 | -0,63 ** |
| Δ Rohfaser | [% TM] | 0,27 | -0,55 * | 0,59 * | 0,68 ** | 0,27 | 0,23 |
| Δ NDF | [% TM] | 0,03 | -0,15 | 0,36 | 0,22 | 0,05 | 0,41 |
| Δ ADF | [% TM] | 0,24 | -0,35 | 0,48 | 0,23 | 0,61 * | 0,57 * |
| Δ ADL | [% TM] | 0,22 | 0,37 | -0,56 * | 0,50 | 0,12 | 0,15 |
| Δ Hemicellulose | [% TM] | -0,20 | 0,11 | 0,08 | 0,03 | -0,43 | -0,05 |
| Δ Cellulose | [% TM] | 0,12 | -0,48 | 0,68 ** | 0,01 | 0,55 * | 0,49 |
| Δ Kohlenstoff | [% TM] | -0,57 * | -0,32 | -0,22 | -0,26 | 0,20 | -0,21 |
| | | Sudangras; n=16 | | | Triticale; n=16 | | |
| | | $Y_{CH_4_zu}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{zu}] | $Y_{CH_4_orig}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{orig}] | C_{CH_4} [Vol-%] | $Y_{CH_4_zu}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{zu}] | $Y_{CH_4_orig}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{orig}] | C_{CH_4} [Vol-%] |
| Δ Zucker | [% TM] | -0,26 | 0,10 | -0,21 | -0,30 | -0,15 | -0,09 |
| Δ NfE | [% TM] | 0,11 | 0,64 * | -0,35 | -0,47 | -0,04 | 0,25 |
| Δ Rohfett | [% TM] | -0,61 * | -0,29 | -0,41 | 0,11 | -0,46 | -0,23 |
| Δ Rohprotein | [% TM] | -0,01 | 0,27 | -0,50 | 0,27 | -0,07 | -0,02 |
| Δ Rohfaser | [% TM] | -0,04 | -0,03 | 0,33 | 0,36 | 0,16 | -0,32 |
| Δ NDF | [% TM] | -0,41 | 0,00 | -0,20 | 0,06 | -0,11 | -0,05 |
| Δ ADF | [% TM] | 0,22 | 0,11 | 0,21 | 0,49 | 0,52 * | -0,07 |
| Δ ADL | [% TM] | -0,22 | -0,37 | 0,28 | -0,21 | 0,12 | -0,32 |
| Δ Hemicellulose | [% TM] | -0,45 | -0,19 | -0,16 | -0,52 * | -0,72 ** | 0,04 |
| Δ Cellulose | [% TM] | 0,23 | 0,21 | 0,06 | 0,56 * | 0,51 * | -0,04 |
| Δ Kohlenstoff | [% TM] | -0,37 | 0,26 | -0,52 * | -0,42 | -0,42 | -0,69 ** |

Tab. A66: Pearsonsche Korrelationskoeffizienten zwischen den Parametern des Gär säuremusters und den Methanausbeuten bzw. dem Methangehalt im Biogas der Silagen des Versuchsschwerpunktes III

| | | Mais; n=14 | | | Grünschnittroggen; n=16 | | |
|-------------------------------|-----------------------|--|--|-----------------------|--|--|-----------------------|
| | | $Y_{CH_4_zu}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{zu}] | $Y_{CH_4_orig}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{orig}] | C_{CH_4} [Vol-%] | $Y_{CH_4_zu}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{zu}] | $Y_{CH_4_orig}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{orig}] | C_{CH_4} [Vol-%] |
| pH-Wert | [-] | 0,57 * | -0,18 | 0,48 | 0,28 | -0,29 | 0,61 * |
| NH ₃ -N | [% N _{ges}] | 0,70 ** | 0,16 | 0,29 | 0,52 * | -0,07 | 0,61 * |
| Milchsäure | [% TM] | -0,57 * | 0,06 | -0,36 | -0,29 | 0,31 | -0,65 ** |
| Essigsäure | [% TM] | 0,69 ** | -0,06 | 0,32 | 0,63 ** | -0,08 | 0,67 ** |
| Buttersäure | [% TM] | -0,26 | -0,35 | 0,07 | 0,28 | -0,18 | 0,23 |
| einw. Alkohole | [% TM] | 0,55 * | -0,07 | 0,71 ** | 0,60 * | 0,08 | 0,83 *** |
| Summe organ. Säuren | [% TM] | -0,05 | -0,01 | -0,13 | 0,40 | 0,45 | -0,26 |
| ES+BS+Alkohole | [% TM] | 0,69 ** | -0,08 | 0,30 | 0,64 ** | -0,06 | 0,72 ** |
| Homoferm.-Index ¹⁾ | [-] | -0,55 * | 0,24 | -0,51 | -0,69 ** | -0,01 | -0,66 ** |

Tab. A66: (Fortsetzung)

| | | Sudangras; n=16 | | | Triticale; n=16 | | |
|-------------------------------|-----------------------|--|--|-----------------------|--|--|-----------------------|
| | | $Y_{CH_4_zu}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{zu}] | $Y_{CH_4_orig}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{orig}] | C_{CH_4} [Vol-%] | $Y_{CH_4_zu}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{zu}] | $Y_{CH_4_orig}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{orig}] | C_{CH_4} [Vol-%] |
| pH-Wert | [-] | -0,32 | 0,06 | -0,31 | -0,54 * | -0,13 | -0,11 |
| NH ₃ -N | [% N _{ges}] | -0,10 | 0,05 | -0,08 | 0,17 | 0,17 | -0,23 |
| Milchsäure | [% TM] | 0,62 * | 0,34 | 0,38 | 0,54 * | 0,20 | 0,36 |
| Essigsäure | [% TM] | 0,29 | 0,01 | 0,08 | 0,60 * | 0,23 | -0,01 |
| Buttersäure | [% TM] | -0,21 | 0,09 | -0,44 | 0,12 | -0,05 | -0,28 |
| einw. Alkohole | [% TM] | 0,40 | -0,01 | 0,55 * | 0,56 * | 0,34 | 0,17 |
| Summe organ. Säuren | [% TM] | 0,60 * | 0,30 | 0,32 | 0,73 ** | 0,27 | 0,28 |
| ES+BS+Alkohole | [% TM] | 0,39 | 0,00 | 0,37 | 0,73 ** | 0,38 | 0,12 |
| Homoferm.-Index ¹⁾ | [-] | 0,23 | 0,44 | -0,22 | -0,68 ** | -0,43 | -0,07 |

¹⁾ Gehalt an Milchsäure/(Gehalt an Essigsäure + einw. Alkohole)

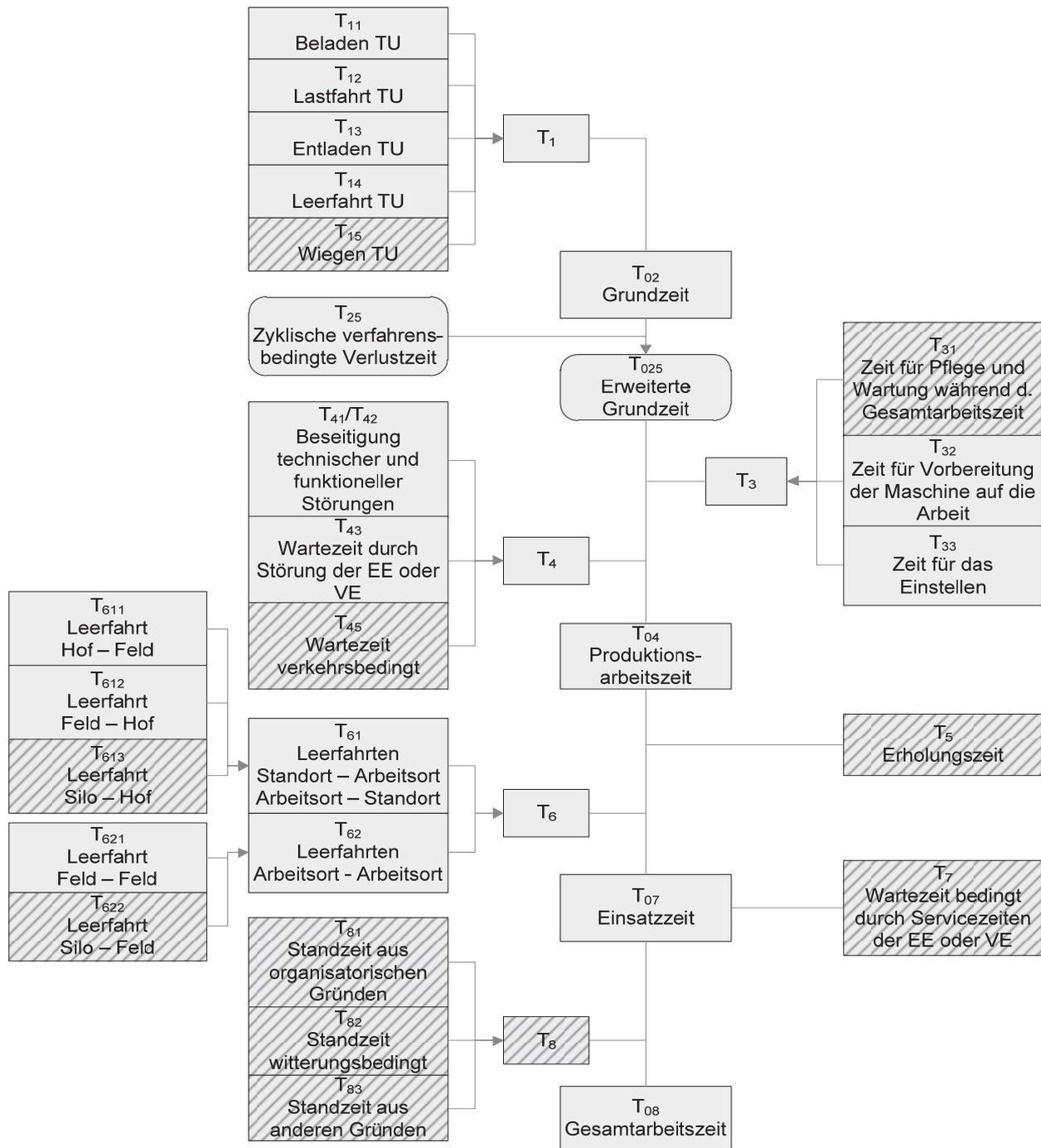
Tab. A67: Pearsonsche Korrelationskoeffizienten zwischen der Änderung der Substratzusammensetzung durch die Silierung und der Geschwindigkeit der Methanbildung im Batch-Gärtest der Silagen des Versuchsschwerpunktes III

| Differenz: | | Mais; n=14 | | | Grünschnittroggen; n=16 | | |
|---|--------|-----------------|--|---------------------------|-------------------------|--|---------------------------|
| | | k [d] | $r_{CH_4_max}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{zu} *d ⁻¹] | $t(r_{CH_4_max})$ [d] | k [d] | $r_{CH_4_max}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{zu} *d ⁻¹] | $t(r_{CH_4_max})$ [d] |
| Gehalt der Silagen – Gehalt der Frischmassen | | | | | | | |
| Δ Zucker | [% TM] | -0,25 | -0,35 | 0,04 | 0,26 | -0,13 | -0,34 |
| Δ NfE | [% TM] | -0,15 | -0,16 | 0,50 | 0,04 | -0,22 | -0,25 |
| Δ Rohfett | [% TM] | 0,37 | 0,34 | -0,35 | 0,12 | 0,26 | -0,07 |
| Δ Rohprotein | [% TM] | -0,25 | -0,32 | 0,34 | 0,07 | 0,02 | -0,07 |
| Δ Rohfaser | [% TM] | 0,02 | 0,08 | -0,44 | -0,07 | 0,18 | 0,26 |
| Δ NDF | [% TM] | 0,24 | 0,24 | -0,48 | 0,26 | 0,17 | -0,35 |
| Δ ADF | [% TM] | 0,18 | 0,24 | -0,43 | 0,14 | 0,30 | -0,31 |
| Δ ADL | [% TM] | -0,24 | -0,14 | 0,54 * | -0,43 | -0,17 | 0,68 ** |
| Δ Hemicellulose | [% TM] | 0,20 | 0,14 | -0,32 | 0,14 | -0,07 | -0,09 |
| Δ Cellulose | [% TM] | 0,27 | 0,27 | -0,63 * | 0,33 | 0,37 | -0,60 * |
| Δ Kohlenstoff | [% TM] | -0,06 | -0,17 | 0,25 | 0,17 | -0,03 | -0,39 |
| | | Sudangras; n=16 | | | Triticale; n=16 | | |
| | | k [d] | $r_{CH_4_max}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{zu} *d ⁻¹] | $t(r_{CH_4_max})$ [d] | k [d] | $r_{CH_4_max}$ [l _N *kg ⁻¹ oTM _{zu} *d ⁻¹] | $t(r_{CH_4_max})$ [d] |
| Δ Zucker | [% TM] | 0,39 | 0,18 | -0,44 | 0,69 ** | 0,69 ** | -0,60 * |
| Δ NfE | [% TM] | 0,40 | 0,46 | -0,20 | 0,34 | 0,26 | -0,33 |
| Δ Rohfett | [% TM] | 0,52 * | 0,24 | -0,67 ** | -0,50 * | -0,53 * | 0,32 |
| Δ Rohprotein | [% TM] | 0,28 | 0,35 | -0,25 | 0,02 | 0,04 | -0,05 |
| Δ Rohfaser | [% TM] | -0,32 | -0,19 | 0,05 | -0,34 | -0,25 | 0,34 |
| Δ NDF | [% TM] | 0,23 | 0,21 | -0,57 * | -0,61 * | -0,66 ** | 0,47 |
| Δ ADF | [% TM] | -0,30 | -0,16 | 0,41 | -0,45 | -0,43 | 0,73 ** |
| Δ ADL | [% TM] | -0,07 | -0,36 | -0,04 | -0,42 | -0,40 | 0,60 * |
| Δ Hemicellulose | [% TM] | 0,20 | 0,10 | -0,56 * | -0,04 | -0,11 | -0,43 |
| Δ Cellulose | [% TM] | -0,21 | -0,01 | 0,35 | -0,43 | -0,42 | 0,69 ** |
| Δ Kohlenstoff | [% TM] | 0,54 * | 0,42 | -0,49 | 0,04 | 0,04 | -0,00 |

Tab. A68: Pearsonsche Korrelationskoeffizienten zwischen den Parametern des Gärsäuremusters und der Geschwindigkeit der Methanbildung im Batch-Gärtetest der Silagen des Versuchsschwerpunktes III

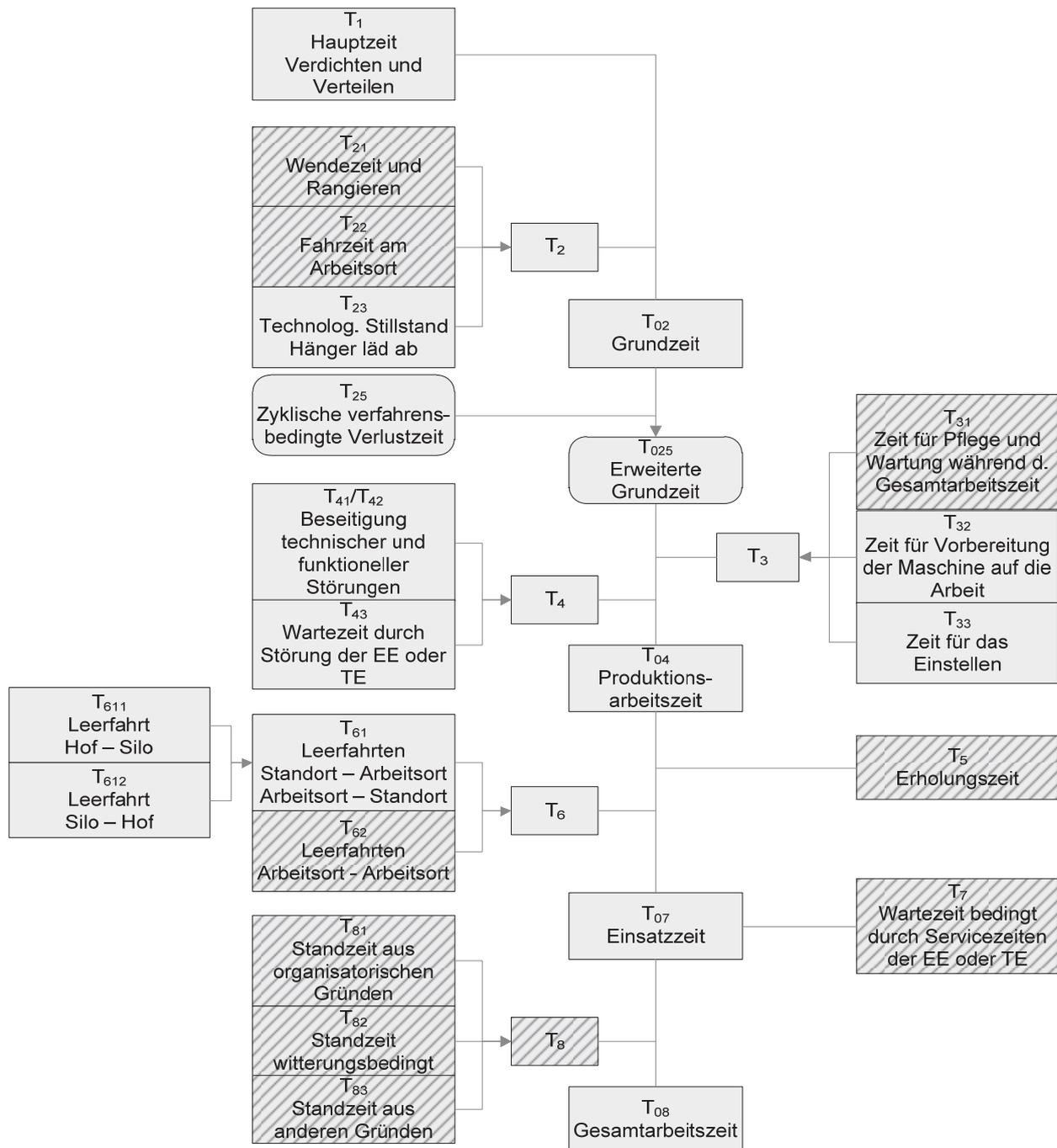
| | | Mais; n=14 | | | Grünschnittroggen; n=16 | | |
|-------------------------------|-----------------------|------------------------|---|--------------------|--------------------------------|---|--------------------|
| | | k | $r_{CH_4_max}$ | $t(r_{CH_4_max})$ | k | $r_{CH_4_max}$ | $t(r_{CH_4_max})$ |
| | | [d] | $[l_N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu} \cdot d^{-1}]$ | [d] | [d] | $[l_N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu} \cdot d^{-1}]$ | [d] |
| pH-Wert | [-] | -0,45 | -0,34 | -0,02 | 0,01 | 0,08 | 0,16 |
| NH ₃ -N | [% N _{ges}] | 0,20 | 0,38 | -0,18 | -0,30 | 0,01 | 0,51 * |
| Milchsäure | [% TM] | 0,45 | 0,33 | -0,04 | -0,10 | -0,16 | -0,08 |
| Essigsäure | [% TM] | 0,05 | 0,24 | -0,15 | -0,09 | 0,12 | 0,33 |
| Buttersäure | [% TM] | -0,10 | -0,10 | 0,20 | -0,37 | -0,15 | 0,57 * |
| einw. Alkohole | [% TM] | -0,39 | -0,27 | 0,06 | -0,07 | 0,23 | 0,21 |
| Summe organ. Säuren | [% TM] | 0,31 | 0,45 | -0,13 | -0,37 | -0,01 | 0,59 * |
| ES+BS+Alkohole | [% TM] | -0,18 | 0,00 | -0,03 | -0,14 | 0,13 | 0,40 |
| Homoferm.-Index | [-] | 0,21 | 0,09 | 0,23 | 0,16 | -0,13 | -0,38 |
| | | Sudangras; n=16 | | | Triticale; n=16 | | |
| | | k | $r_{CH_4_max}$ | $t(r_{CH_4_max})$ | k | $r_{CH_4_max}$ | $t(r_{CH_4_max})$ |
| | | [d] | $[l_N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu} \cdot d^{-1}]$ | [d] | [d] | $[l_N \cdot kg^{-1} \cdot oTM_{zu} \cdot d^{-1}]$ | [d] |
| pH-Wert | [-] | 0,28 | 0,12 | -0,23 | 0,41 | 0,49 | -0,54 * |
| NH ₃ -N | [% N _{ges}] | 0,23 | 0,03 | -0,07 | 0,02 | 0,08 | 0,27 |
| Milchsäure | [% TM] | -0,25 | -0,09 | 0,38 | -0,17 | -0,28 | 0,36 |
| Essigsäure | [% TM] | -0,13 | 0,01 | 0,13 | -0,20 | -0,11 | 0,22 |
| Buttersäure | [% TM] | 0,48 | 0,31 | -0,22 | 0,33 | 0,37 | -0,00 |
| einw. Alkohole | [% TM] | -0,57 * | -0,40 | 0,51 | -0,48 | -0,45 | 0,69 ** |
| Summe organ. Säuren | [% TM] | -0,22 | -0,05 | 0,33 | -0,21 | -0,21 | 0,38 |
| ES+BS+Alkohole | [% TM] | -0,41 | -0,24 | 0,39 | -0,46 | -0,40 | 0,69 ** |
| Homoferm.-Index ¹⁾ | [-] | 0,36 | 0,33 | -0,09 | 0,34 | 0,20 | -0,49 |

¹⁾ Gehalt an Milchsäure/(Gehalt an Essigsäure + einw. Alkohole)



TU... Transportumlauf; EE... Ernteeinheit; VE... Verdichtereinheit

Abb. A16: Zeitgliederungsauszug für Transporteinheiten (TE) nach SONNEN (2006)



EE... Ernteeinheit; TE... Transporteinheit

Abb. A17: Zeitgliederungsauszug für Verdichtereinheiten (VE) nach SONNEN (2006)

Tab. A69: Berechnung des Durchsatzes des Feldhäckslers in der Gesamtarbeitszeit nach HERRMANN (1999)

| Bemerkung / Gleichung | Gl. |
|--|--------|
| Berechnung des Durchsatzes des Feldhäckslers in der Gesamtarbeitszeit über die tägliche Erntemasse und die tägliche Gesamtarbeitszeit (Gl. A1) | Gl. A1 |
| $\dot{m}_{T08EE} = \frac{m_d}{T_{08}}$ | |
| Berücksichtigung relevanter Teilzeiten des Feldhäckslers in der Gesamtarbeitszeit | Gl. A2 |
| $T_{08} = T_1 + T_{21} + T_{23} + T_3 + T_4 + T_{61} + T_{62}$ | |
| Beschreibung der Teilzeiten durch Ausdrücke unter Einbeziehung der täglichen Erntemasse, wenn sie davon abhängig sind (Gl. A3 bis A8) | |
| $T_1 = \frac{m_d}{\dot{m}_{T1EE}}$ | Gl. A3 |
| $T_{21} = n_W \cdot t_{21} = \frac{m_d \cdot t_{21}}{0,1 \cdot l \cdot E \cdot b_{eff}}$ | Gl. A4 |
| $T_{23} = (n_{HW} - n_A) \cdot t_{23} = \left(\frac{m_d}{m_L} - \frac{m_d}{l \cdot b \cdot E \cdot 100} \right) \cdot t_{23}$ | Gl. A5 |
| $T_4 = k_4 \cdot T_{02} = k_4 \cdot (T_1 + T_{21} + T_{23})$ | Gl. A6 |
| $T_{61} = \frac{(s_{611} + s_{612})}{v_{T_EE}}$ | Gl. A7 |
| $T_{62} = \frac{(n_A - 1) \cdot s_{62}}{v_{T_EE}} = \frac{\left(\frac{m_d}{l \cdot b \cdot E \cdot 100} - 1 \right) \cdot s_{62}}{v_{T_EE}}$ | Gl. A8 |
| Einsetzen der Gl. A3 bis A8 in Gl. A2, Umstellen nach m_d und Einsetzen in Gl. A1 ergibt Gl. 16 (Abschnitt 5.2.4) | |
| <p>Erklärung der Formelzeichen</p> <p>\dot{m}_{T08EE}... Durchsatz der Ernteeinheit (Feldhäckslers) in der Gesamtarbeitszeit [$t \cdot h^{-1}$]</p> <p>m_d... tägliche Erntemasse [t]</p> <p>T_{08}... Gesamtarbeitszeit pro Tag [h]</p> <p>T_1... Hauptzeit des Feldhäckslers [h]</p> <p>T_{21}... Zeit für die Wendungen auf dem Feld [h]</p> <p>T_{23}... Zeit für die Wechsel der Transporteinheiten [h]</p> <p>T_3... Rüstzeit des Feldhäckslers [h]</p> <p>T_4... Störzeit des Feldhäckslers [h]</p> <p>T_{61}... Zeit für die Fahrten Hof – Feld [h]</p> <p>T_{62}... Zeit für die Fahrten Feld – Feld [h]</p> <p>\dot{m}_{T1EE}... Durchsatz der Ernteeinheit (Feldhäckslers) in der Hauptzeit [$t \cdot h^{-1}$]</p> <p>n_W... Anzahl der Wendungen pro Tag [-]</p> <p>t_{21}... Zeit je Wendung am Feld [h]</p> <p>l... Länge des Schlages [km]</p> | |

Tab. A69: Fortsetzung

| | |
|---------------|--|
| E... | Ertrag [$t \cdot ha^{-1}$] |
| $b_{eff}...$ | effektive Arbeitsbreite [m] |
| $n_{HW}...$ | Anzahl Wechsel der Transporteinheiten am Feldhäcksler pro Tag [-] |
| $n_A...$ | Anzahl der geernteten Schläge pro Tag [-] |
| $t_{23}...$ | Zeit je Wechsel der Transporteinheit [h] |
| $m_L...$ | mittlere Lademasse einer Transporteinheit [t] |
| $b...$ | Breite des Schlages [km] |
| $k_4...$ | Anteil der Störzeit an der (erweiterten) Grundzeit [%] |
| $s_{611}...$ | Weg Hof – Feld [km] |
| $s_{612}...$ | Weg Feld – Hof [km] |
| $s_{62}...$ | Weg Feld – Feld [km] |
| $v_{T EE}...$ | mittlere Geschwindigkeit der Ernteeinheit (Feldhäcksler) auf Wegen [$km \cdot h^{-1}$] |

Tab. A70: Berechnung der notwendigen Anzahl an Transporteinheiten

| Bemerkung / Gleichung | Gl. |
|--|---|
| Berechnung der notwendigen Anzahl an Transporteinheiten aus dem Durchsatz des Feldhäckslers und der Transportkapazität in der Grundzeit (Gl. A9) | Gl. A9 |
| $n_{TE} = \frac{\dot{m}_{T02EE}}{\dot{m}_{T02TE}}$ | |
| Berechnung der Transportkapazität in der Grundzeit über die mittlere Lademasse und die Zeit des Transportumlaufes bestehend aus der Beladezeit, der Zeit für die Lastfahrt zum Silo, der Entladezeit und der Zeit für die Leerfahrt zum Feldhäcksler (Gl. A10) | Gl. A10 |
| $\dot{m}_{T02TE} = \frac{m_L}{T_{U02}} = \frac{m_L}{T_{11} + T_{12} + T_{13} + T_{14}} = \frac{m_L}{\frac{m_L}{\dot{m}_{T02EE}} + \frac{s_{12TE}}{v_{T12_TE}} + t_{13} + \frac{s_{14TE}}{v_{T14_TE}}}$ | |
| Erklärung der Formelzeichen | |
| $n_{TE}...$ | notwendige Anzahl an Transporteinheiten [-] |
| $\dot{m}_{T02EE}...$ | Durchsatz der Ernteeinheit (Feldhäcksler) in der Grundzeit [$t \cdot h^{-1}$] |
| $\dot{m}_{T02TE}...$ | Transportkapazität in der Grundzeit [$t \cdot h^{-1}$] |
| $m_L...$ | mittlere Lademasse einer Transporteinheit [t] |
| $T_{U02}...$ | Zeit des Transportumlaufes in der Grundzeit [h] |
| $T_{11}...$ | Beladezeit [h] |
| $T_{12}...$ | Zeit für die Lastfahrt zum Silo [h] |
| $T_{13}...$ | Entladezeit [h] |
| $T_{14}...$ | Zeit für die Leerfahrt zum Feldhäcksler [h] |
| $s_{12TE}...$ | Weg Feld – Silo [km] |
| $v_{T12_TE}...$ | mittlere Geschwindigkeit der Transporteinheit bei der Lastfahrt [$km \cdot h^{-1}$] |
| $t_{13}...$ | mittlere Entladezeit einer Transporteinheit [h] |
| $s_{14TE}...$ | Weg Silo – Feld [km] |
| $v_{T14_TE}...$ | mittlere Geschwindigkeit der Transporteinheit bei der Leerfahrt [$km \cdot h^{-1}$] |

Tab. A71: Berechnung der notwendigen Anzahl an Verdichtereinheiten

| Bemerkung / Gleichung | Gl. |
|---|---------|
| <p>Berechnung der notwendigen Anzahl an Verdichtereinheiten aus dem Verdichtungszeitbedarf und dem Verdichtungsaufwand in der Grundzeit, der sich aus der für die Verdichtung zur Verfügung stehenden Zeit des Transportumlaufes, die der erweiterten Umlaufzeit T_{U025} abzüglich der Wartezeit beim Entladen der Anhänger entspricht, und der in dieser Zeit entladenen Masse ergibt (Gl. A11)</p> $n_{VE} = \frac{VB}{t_{1VE}} = \frac{VB}{\frac{(T_{U025} - n_{TE} \cdot t_{23})}{n_{TE} \cdot m_L}}$ | Gl. A11 |
| <p>Erklärung der Formelzeichen</p> <p>n_{VE}... notwendige Anzahl an Verdichtereinheiten [-] VB... Verdichtungszeitbedarf [$h \cdot t^{-1}$] t_{1VE}... Verdichtungszeitaufwand [$h \cdot t^{-1}$] T_{U025}... Zeit des Transportumlaufes in der erweiterten Grundzeit [h] n_{TE}... notwendige Anzahl an Transporteinheiten [-] t_{13}... mittlere Entladezeit einer Transporteinheit [h] m_L... mittlere Lademasse einer Transporteinheit [t]</p> | |

Tab. A72: Berechnung der Transportkapazität in der Gesamtarbeitszeit

| Bemerkung / Gleichung | Gl. |
|--|---------|
| <p>Berechnung der Transportkapazität in der Gesamtarbeitszeit aus der Anzahl der Transportumläufe pro Tag n_L, der mittleren Lademasse m_L und der täglichen Gesamtarbeitszeit (Gl. A12)</p> $\dot{m}_{T08TE} = \frac{n_L \cdot m_L}{T_{08}}$ | Gl. A12 |
| <p>Berücksichtigung relevanter Teilzeiten der Transporteinheiten in der Gesamtarbeitszeit:</p> $T_{08} = T_{025} + T_3 + T_4 + T_{61}$ | Gl. A13 |
| <p>Für die Berechnung zyklischer verfahrensbedingter Verlustzeiten in der erweiterten Grundzeit T_{025} gilt Gl. A14</p> $n_{EE} \cdot \dot{m}_{T02EE} = n_{TE} \cdot \dot{m}_{T025TE}$ | Gl. A14 |
| <p>Die erweiterte Umlaufzeit einer Transporteinheit T_{U025} lässt sich demnach folgendermaßen darstellen (Gl. A15):</p> $T_{U025} = T_{11} + T_{12} + T_{13} + T_{14} + T_{25}$ $= \frac{m_L}{\dot{m}_{T02EE}} + \frac{S_{12TE}}{v_{T12_TE}} + t_{13} + \frac{S_{14TE}}{v_{T14_TE}} + \frac{m_L \cdot n_{TE}}{\dot{m}_{T02EE} \cdot n_{EE} - \dot{m}_{T025TE} \cdot n_{TE}}$ | Gl. A15 |

Tab. A72: Fortsetzung

| | |
|--|--|
| Beschreibung der Teilzeiten T_{025} und T_4 durch Ausdrücke unter Einbeziehung der Anzahl der Anhängerladungen pro Tag n_L (Gl. A16 und A17) | |
| $T_{025} = n_L \cdot T_{U025}$ | Gl. A16 |
| $T_4 = k_4 \cdot n_L \cdot T_{U025}$ | Gl. A17 |
| Einsetzen der Gl. A16 und A17 in Gl. A13, Umstellen nach n_L und Einsetzen in Gl. A12 ergibt Gl. 20 (Abschnitt 5.2.4) | |
| Erklärung der Formelzeichen | |
| $\dot{m}_{T08TE\dots}$ | Transportkapazität in der Gesamtarbeitszeit [t^*h^{-1}] |
| $n_{L\dots}$ | Anzahl der Anhängerladungen pro Tag [-] |
| $m_{L\dots}$ | mittlere Lademasse einer Transporteinheit [t] |
| $T_{08\dots}$ | Gesamtarbeitszeit pro Tag [h] |
| $T_{025\dots}$ | erweiterte Grundzeit [h] |
| $T_{3\dots}$ | Rüstzeit der Transporteinheit [h] |
| $T_{4\dots}$ | Störzeit des Transporteinheit [h] |
| $T_{61\dots}$ | Zeit für die Fahrten Hof – Feld [h] |
| $n_{EE\dots}$ | Anzahl der Feldhäcksler [-] |
| $\dot{m}_{T02EE\dots}$ | Durchsatz der Ernteeinheit (Feldhäcksler) in der Grundzeit [t^*h^{-1}] |
| $n_{TE\dots}$ | notwendige Anzahl an Transporteinheiten [-] |
| $\dot{m}_{T025TE\dots}$ | Transportkapazität in der erweiterten Grundzeit [t^*h^{-1}] |
| $T_{U025\dots}$ | Zeit des Transportumlaufes in der erweiterten Grundzeit [h] |
| $T_{11\dots}$ | Beladezeit [h] |
| $T_{12\dots}$ | Zeit für die Lastfahrt zum Silo [h] |
| $T_{13\dots}$ | Entladezeit [h] |
| $T_{14\dots}$ | Zeit für die Leerfahrt zum Feldhäcksler [h] |
| $S_{12TE\dots}$ | Weg Feld – Silo [km] |
| $v_{T12_TE\dots}$ | mittlere Geschwindigkeit der Transporteinheit bei der Lastfahrt [km^*h^{-1}] |
| $t_{13\dots}$ | mittlere Entladezeit einer Transporteinheit [h] |
| $S_{14TE\dots}$ | Weg Silo – Feld [km] |
| $v_{T14_TE\dots}$ | mittlere Geschwindigkeit der Transporteinheit bei der Leerfahrt [km^*h^{-1}] |
| $\dot{m}_{T02TE\dots}$ | Transportkapazität in der Grundzeit [t^*h^{-1}] |
| $k_{4\dots}$ | Anteil der Störzeit an der (erweiterten) Grundzeit [%] |

Tab. A73: Berechnung der Kapazität der Verdichtereinheiten in der Gesamtarbeitszeit

| Bemerkung / Gleichung | Gl. |
|--|--|
| Berechnung der Kapazität der Verdichter in der Gesamtarbeitszeit über die in das Silo eingelagerte Masse und die Gesamtarbeitszeit pro Tag (Gl. A18) | Gl. A18 |
| $\dot{m}_{T08VE} = \frac{n_L \cdot m_L}{T_{08}}$ | |
| Berücksichtigung relevanter Teilzeiten der Verdichtereinheiten in der Gesamtarbeitszeit: | Gl. A19 |
| $T_{08} = T_1 + T_{23} + T_{25} + T_3 + T_4 + T_{61}$ | |
| Für die Berechnung zyklischer verfahrensbedingter Verlustzeiten in der erweiterten Grundzeit T_{025} gilt Gl. A20 | Gl. A20 |
| $n_{TE} \cdot \dot{m}_{T025TE} = n_{VE} \cdot \dot{m}_{T025VE}$ | |
| Beschreibung der Teilzeiten durch Ausdrücke unter Einbeziehung der Anzahl der Anhängerladungen pro Tag n_L (Gl. A21 und A17) | |
| $T_1 = n_L \cdot VB \cdot m_L$ | Gl. A21 |
| $T_{23} = n_L \cdot t_{13}$ | Gl. A22 |
| $T_{25} = n_L \cdot \frac{m_L \cdot n_{VE}}{\dot{m}_{T025TE} \cdot n_{TE} - \dot{m}_{T02VE} \cdot n_{VE}}$ | Gl. A23 |
| $T_4 = k_4 \cdot T_{025}$ | Gl. A24 |
| Einsetzen der Gl. A21 und A24 in Gl. A19, Umstellen nach n_L und Einsetzen in Gl. A18 ergibt Gl. 21 (Abschnitt 5.2.4) | |
| Erklärung der Formelzeichen | |
| $\dot{m}_{T08VE} \dots$ | Kapazität der Verdichtereinheit in der Gesamtarbeitszeit [t^*h^{-1}] |
| $n_L \dots$ | Anzahl der Anhängerladungen pro Tag [-] |
| $m_L \dots$ | mittlere Lademasse einer Transporteinheit [t] |
| $T_{08} \dots$ | Gesamtarbeitszeit pro Tag [h] |
| $T_1 \dots$ | Hauptzeit der Verdichter [h] |
| $T_{23} \dots$ | Zeit für das Entladen der Transporteinheiten [h] |
| $T_{25} \dots$ | zyklische verfahrensbedingte Verlustzeit der Verdichtereinheit [h] |
| $T_3 \dots$ | Rüstzeit der Verdichtereinheit [h] |
| $T_4 \dots$ | Störzeit des Verdichtereinheit [h] |
| $T_{61} \dots$ | Zeit für die Fahrten Hof – Silo [h] |
| $n_{TE} \dots$ | notwendige Anzahl an Transporteinheiten [-] |
| $\dot{m}_{T025TE} \dots$ | Transportkapazität in der erweiterten Grundzeit [t^*h^{-1}] |
| $n_{VE} \dots$ | notwendige Anzahl an Verdichtereinheiten [-] |
| $\dot{m}_{T025VE} \dots$ | Kapazität der Verdichtereinheit in der erweiterten Grundzeit [t^*h^{-1}] |
| $VB \dots$ | Verdichtungszeitbedarf [h^*t^{-1}] |
| $t_{13} \dots$ | mittlere Entladezeit einer Transporteinheit [h] |
| $\dot{m}_{T02VE} \dots$ | Kapazität der Verdichtereinheit in der Grundzeit [t^*h^{-1}] |
| $k_4 \dots$ | Anteil der Störzeit an der erweiterten Grundzeit [%] |
| $T_{025} \dots$ | erweiterte Grundzeit der Verdichtereinheit [h] |

Tab. A74: Grunddaten der Leistungsbewertung

| Parameter | Wert | Herkunft |
|--|---|--|
| Gesamtarbeitszeit T_{08} | 10 h | Annahme |
| Schlaggröße | 5 ha | Annahme |
| Entfernung Hof – Feld s_{611}, s_{612} (EE und TE) | <u>3 km</u> ; variiert: 0,5 – 10 km | <u>Standardvariante</u> ; Annahme |
| Entfernung Feld – Silo | entspricht der Entfernung Hof – Feld | Annahme |
| Entfernung Silo – Biogasanlage | 25 m | Annahme (KTBL 2008) |
| Entfernung Feld – Feld | 1 km | Annahme |
| Ertrag | unterschiedlich je Messvariante (Abschnitt 5.3.1) | Messergebnisse |
| TM-Gehalt, oTM-Gehalt | unterschiedlich je Messvariante (Abschnitt 5.3.1) | Messergebnisse |
| effektive Arbeitsbreite der EE b_{eff} | unterschiedlich je Messvariante (Abschnitt 5.3.1) | Messergebnisse |
| Arbeitsgeschwindigkeit der EE v_{EE} | unterschiedlich je Messvariante und Häcksellänge (Abschnitt 5.3.1) | Messergebnisse |
| mittlere Zeit am Feld je Wen- dung t_{21} | 0,46 min/Wendung Feldhäcksler | mittlerer gemessener Wert aller Messvarianten |
| mittlere Zeit am Feld je Wechsel der TE t_{23} | 0,25 min/Wechsel | mittlerer gemessener Wert aller Messvarianten |
| Rüstzeit T_3 | 60 min/d EE 30 min/d TE 20 min/d VE | Erfahrungswerte der Land- wirte |
| Anteil der Sörzeit an der Grund- zeit k_4 (EE, TE und VE) | 5 % | Annahme |
| Geschwindigkeit der EE auf Wegen v_{T_EE} | 20 km/h | Annahme |
| Geschwindigkeit der TE auf Wegen / Lastfahrt v_{T12_TE} | 22 km/h | mittlerer gemessener Wert aller Messvarianten |
| Geschwindigkeit der TE auf Wegen / Leerfahrt v_{T14_TE} | 24 km/h | mittlerer gemessener Wert aller Messvarianten |
| Geschwindigkeit der VE auf Wegen v_{T_VE} | 20 km/h | Annahme |
| mittlere Lademasse einer TE m_L | unterschiedlich je Messvariante und Häcksellänge (Abschnitt 5.3.1) | Messergebnisse |
| mittlere Entladezeit einer TE t_{13} | 0,93 min/Vorgang | mittlerer gemessener Wert aller Messvarianten |

EE ... Ernteeinheit, TE ... Transporteinheit, VE ... Verdichtereinheit

Tab. A75: Kenndaten der für die Bilanzierung zugrunde gelegten Maschinen (HANFF ET AL. 2008, KTBL 2008)

| Arbeitsgang | Maschine | Beschreibung | Nutzungs- dauer [a] | Nutzungs- dauer [h] | Anschaffungs- preis [€] | Reparatur- kosten | Treibstoff- verbrauch [l*h ⁻¹] | Gewicht [kg] |
|--|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|-----------------|
| Häckseln (Mais_2, Gsr_2, Gsr_3, Trit_2, Wro) | Feldhäcksler | Motornennleistung 232 kW | 10 | 3 000 h | 177 000 | 24,00 €*h ⁻¹ | Messwert ¹⁾ | 10 000 |
| Häckseln (Mais_1, Sugr, Gsr_1) | Feldhäcksler | Motornennleistung 265 kW | 10 | 3 000 h | 177 000 | 24,00 €*h ⁻¹ | Messwert ¹⁾ | 10 000 |
| Häckseln (Mais_4, Trit_1) | Feldhäcksler | Motornennleistung 333 kW | 10 | 3 000 h | 215 000 | 30,00 €*h ⁻¹ | Messwert ¹⁾ | 10 000 |
| Häckseln (Mais_3) | Feldhäcksler | Motornennleistung 445 kW | 10 | 3 000 h | 255 000 | 34,00 €*h ⁻¹ | Messwert ¹⁾ | 10 000 |
| Häckseln (Mais_2) | Maisgebiss | Arbeitsbreite 3 m | 8 | 1 250 ha | 23 500 | 10,00 €*ha ⁻¹ | - | 1 500 |
| Häckseln (Mais_1) | Maisgebiss | Arbeitsbreite 4,5 m | 8 | 1 900 ha | 40 500 | 10,00 €*ha ⁻¹ | - | 2 000 |
| Häckseln (Mais_4) | Maisgebiss | Arbeitsbreite 6 m | 8 | 2 500 ha | 59 000 | 10,00 €*ha ⁻¹ | - | 2 700 |
| Häckseln (Mais_3) | Maisgebiss | Arbeitsbreite 7,5 m | 8 | 3 100 ha | 78 000 | 10,00 €*ha ⁻¹ | - | 3 250 |
| Häckseln (Sugr, Gsr_1, Trit_1) | Pick-Up | Arbeitsbreite 3 m | 8 | 2 000 h | 14 500 | 2,00 €*h ⁻¹ | - | 2 000 |
| Häckseln (Gsr_2, Gsr_3, Trit_2, Wro) | GP-Schneidwerk | Arbeitsbreite 3,6 m | 8 | 2 500 ha | 18 000 | 5,00 €*ha ⁻¹ | - | 1 000 |
| Transport zum Silo | Standardtraktor | Motornennleistung 120 kW | 12 | 10 000 h | 92 000 | 7,80 €*h ⁻¹ | 14,0 | 6 500 |
| Verdichten im Silo | Kippanhänger | Ladevolumen 2 x 20 m ³ | 15 | 31 000 t | 14 600 | 0,20 €*t ⁻¹ | - | 7 000 |
| Entnahme der Silage | Radlader | Motornennleistung 102 kW | 12 | 10 000 h | 116 000 | 5,75 €*h ⁻¹ | 12,2 | 10 000 |
| | Standardtraktor | Motornennleistung 67 kW | 12 | 10 000 h | 46 500 | 6,50 €*h ⁻¹ | 7,8 | 4 000 |
| | Frontlader | | 12 | 2 500 h | 5 000 | 0,90 €*h ⁻¹ | - | 500 |
| | Silozange | Nennvolumen 2 m ³ | 10 | 24 000 m ³ | 5 700 | 0,10 €*m ⁻³ | - | 1 000 |
| Gärrestaubsbringung | Standardtraktor | Motornennleistung 120 kW | 12 | 10 000 h | 92 000 | 7,80 €*h ⁻¹ | 14,0 | 6 500 |
| | Pumptankwagen | Nennvolumen 15 m ³ | 10 | 150 000 m ³ | 31 500 | 0,60 €*m ⁻³ | - | 4 800 |
| | Schleppschlauch-verteiler | Arbeitsbreite 15 m | 10 | 62 500 m ³ | 13 000 | 0,10 €*m ⁻³ | - | 1 000 |

1) Messwerte entsprechend Tab. 35 (Abschnitt 5.3.1)

Tab. A76: Schema zur Berechnung von Verfahrenskosten

| Parameter | Einheit | Formel |
|--|---------------------|---|
| Ausgangsdaten | | |
| Nutzungsdauer normativ = Nutzungsdauer real | a | $ND_n = ND_r$ |
| Nutzungsdauer normativ = Nutzungsdauer real | h | $ND_n = ND_r$ |
| jährlicher Einsatz normativ = jährlicher Einsatz real | h/a | $u_n [h/a] = ND_n [h] / ND_n [a] = u_r [h/a] = ND_r [h] / ND_n [a]$ |
| Anschaffungspreis | € | AP |
| Feste Maschinenkosten | | |
| Abschreibung | €/a | $A [€/a] = (AP - RW) / ND_r [a]$ |
| Restwert | € | $RW = AP / 2 * (1 - ND_r [a] / ND_n [a])$ |
| Zinsanspruch | €/a | $Z = (AP - RW) / 2 * 0,06$ |
| Steuern / Versicherungen | €/a | $SV = AP * 0,01$ |
| Unterbringung | €/a | $U = AP * 0,01$ |
| Variable Maschinenkosten | | |
| Reparaturkosten | €/h | R |
| Korrekturfaktor | | k_R |
| Reparaturkosten | €/a | $R [€/a] = R [€/h] * k_R * u_r [h/a]$ |
| Treibstoffpreis | €/l | TP |
| Treibstoffverbrauch | l/h | V |
| Treibstoff | €/a | $TK = TP [€/l] * V [l/h] * u_r [h/a]$ |
| Schmierstoffpreis | €/l | SP |
| Schmierstoff | €/a | $SK = SP [€/l] * V [l/h] * 0,01 * u_r [h/a]$ |
| Maschinenkosten gesamt | | |
| Maschinenkosten | €/a | $MK = A + Z + SV + U + R + TK + SK$ |
| Maschinenkosten | €/h | $MK [€/h] = MK [€/a] / u_r [h/a]$ |
| Verfahrenskosten | | |
| Flächenleistung | ha/h _{T08} | K_{T08} |
| Maschinenkosten | €/ha | $MK [€/ha] = MK [€/h] / K_{T08} [ha/h]$ |
| Lohnkosten | €/h | LK |
| Lohnkosten | €/ha | $LK [€/ha] = LK [€/h] / K_{T08} [ha/h]$ |
| Verfahrenskosten | €/ha | $VK [€/ha] = MK [€/ha] + LK [€/ha]$ |

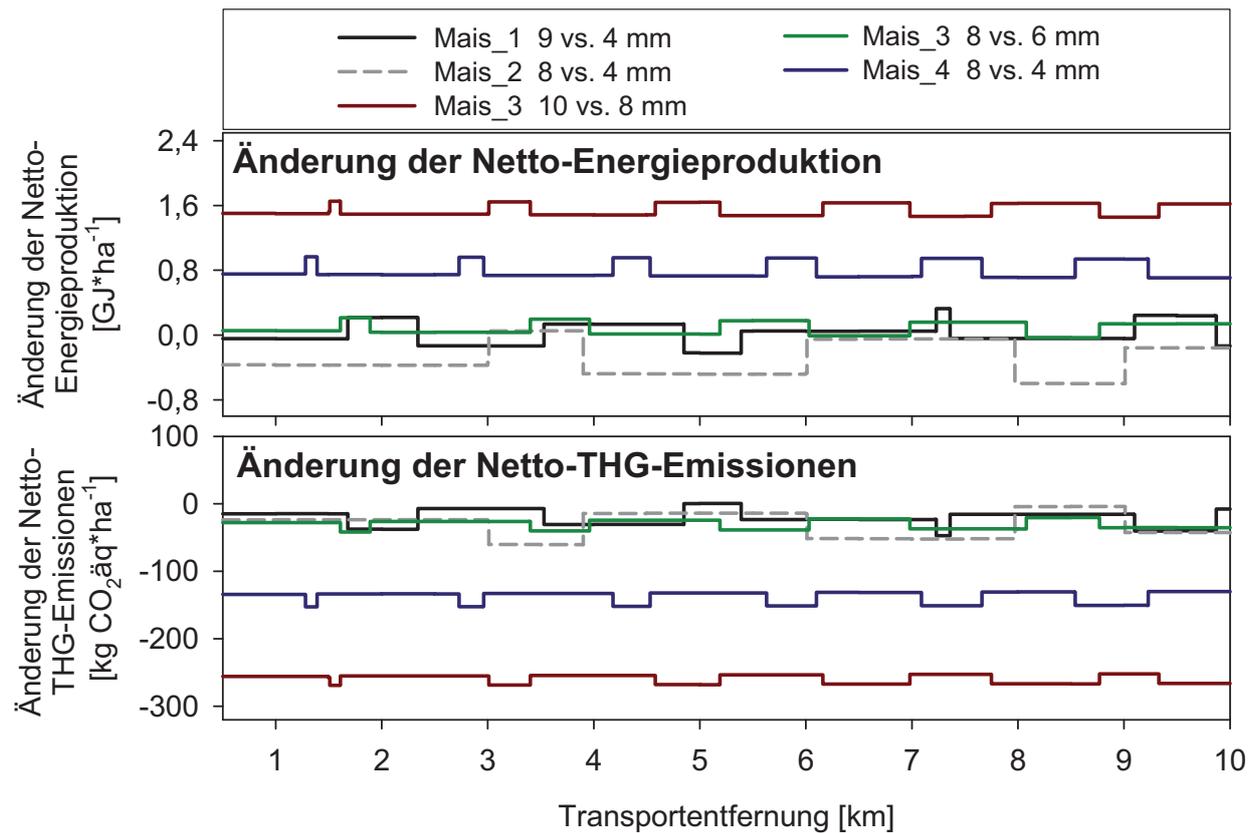


Abb. A18: Änderung der Netto-Energieproduktion und der Netto-THG-Emissionen durch eine verringerte Häcksellängeneinstellung am Feldhäcksler in Abhängigkeit von der Transportentfernung am Beispiel der Messvarianten mit Mais

