

# Konservierung von Zuckerrüben zur Substratversorgung von Biogasanlagen – Verlauf der Silierung und Verluste bei 12 Sorten

Stefan Dirks, Dominik Schaiper, Wolfgang Büscher, Peter Schulze Lammers

Aufgrund der Kritik am dominanten Maisanbau in Deutschland sowie der Problematik von häufiger auftretenden Schädlingen in engen Fruchtfolgen wurden in den letzten Jahren vermehrt Zuckerrüben als Substrat in Biogasanlagen erfolgreich eingesetzt. Dabei erwiesen sich solche Sorten als besonders geeignet, die einen hohen Zuckerertrag liefern. Jedoch müssen Zuckerrüben konserviert und gelagert werden, um ganzjährig im Prozess der Biogaserzeugung verfügbar zu sein. Der Erfolg der Konservierung und die auftretenden Verluste über die Lagerdauer sind bisher nur unzureichend dokumentiert. In Batch-Versuchen wurden der Verlauf der Konservierung anhand des pH-Werts sowie die dabei auftretenden Verluste an zwölf verschiedenen Zuckerrübensorten untersucht. Die Zuckerrüben wurden in vierfacher Wiederholung als Mus in verschlossenen Gläsern für 90 Tage einsiliert. Es konnte bei allen Varianten eine annähernd parallele Entwicklung des pH-Werts festgestellt werden. Zwar traten zwischen den pH-Werten der Silagen verschiedener Varianten signifikante Unterschiede auf, jedoch waren alle pH-Werte ausreichend gering um eine sichere Konservierung zu gewährleisten.

Die Verluste an Methanbildungspotenzial bei der Auslagerung schwankten zwischen 10 und 20%. Als Ursache für den Verlust konnte vor allem die alkoholische Gärung identifiziert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Silierung unterschiedlicher Zuckerrübensorten schnell und sicher gelingt. Die im Anschluss an die Säuerung der Silage stattfindende alkoholische Gärung führt hingegen zu deutlich schwankenden Verlusten sowohl an Trockensubstanz als auch an Methanbildungspotenzial.

## Schlüsselwörter

Biogas, Zuckerrübenmus, Silierung, nachwachsender Rohstoff, Verluste, Substratlagerung

Aufgrund hoher Ertragsleistungen sowohl hinsichtlich der Trockenmasseerträge als auch der daraus resultierenden Methanerträge (z. B.  $4.163 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  bei einem Ertrag von 65 t Frischmasse (FM)  $\text{ha}^{-1}$ , KTBL 2012) und der gleichzeitig schnellen Abbaubarkeit im Fermenter wird die Zuckerrübe vor allem in klassischen Rübenanbaugebieten vermehrt in Biogasanlagen eingesetzt. Ein positiver Nebeneffekt ist die Möglichkeit, vor allem in Regionen mit hohen Maisanteilen, die Fruchtfolge durch den Anbau von Zuckerrüben aufzulockern (THAYSEN 2011). Auch wenn die Zuckerrübe im ökonomischen Vergleich nur unter optimalen Bedingungen mit Mais konkurrieren kann, haben die Optimierung der Verfahrenskette bei der Verarbeitung der Zuckerrüben sowie die Steigerung der Erträge durch züchterischen Fortschritt das Potenzial, die Bereitstellungskosten für die Zuckerrübe zu reduzieren und sie gegenüber Mais konkurrenzfähiger zu machen (HARTMANN und DÖHLER 2011).

Der Anbau der für die Biogaserzeugung vorgesehenen Rüben erfolgt grundsätzlich wie der von Rüben, welche für die Zuckergewinnung vorgesehen sind (FNR 2012a). Nur bei der Ernte unterscheiden sich die Verfahren dahingehend, dass es ausreicht, die zur Biogaserzeugung vorgesehenen Zuckerrüben zu entblättern anstatt zu köpfen (THAYSEN 2011). Dies ist möglich, da die für die Zuckerproduktion geltenden Qualitätsansprüche (Anteil der Melassebildner Kalium, Natrium und Aminostickstoff) bei der Biogaserzeugung nicht von Bedeutung sind. Gleichzeitig kann durch den Verzicht des Köpfens ein 3–4% höherer Ertrag erzielt werden (SCHULZE LAMMERS und ROLLER 2010). Für den Einsatz in der Biogasanlage müssen die Zuckerrüben zunächst trocken oder nass gereinigt und je nach Standort von Steinen befreit werden. Vor dem Eintrag in den Fermenter werden die Zuckerrüben zerkleinert. Dies geschieht je nach Verfahren vor oder nach der Silierung (SCHAFFER et al. 2011). Da der Vergärungsprozess in Biogasanlagen empfindlich gegenüber Störungen ist, sollte für den kontinuierlichen und problemlosen Betrieb einer Biogasanlage die Zufuhr einer gleichbleibenden Substratmischung gewährleistet sein (FNR 2012b). Daher wird angestrebt, Substrate ganzjährig in gleichbleibender Menge und Qualität einzusetzen. Aufgrund der geringen Trockenmassegehalte der Zuckerrübe von ca. 23% haben sich in der Praxis verschiedene Verfahren der Silierung etabliert (KTBL 2012). Die Silierung ganzer Rüben im Flachsilobehälter unter Folie, in gemuster Form im Erdbecken oder im Hochsilobehälter sind übliche Verfahren (BEECK et al. 2014).

Bei der Silierung unter Luftabschluss kommt es zur Umsetzung der leicht vergärbaren Zucker zu organischen Säuren. Dies geschieht hauptsächlich durch anaerobe Milch- und Essigsäurebakterien. Dadurch sinkt der pH-Wert von ca. 6,5 auf unter 4, wodurch die bei der Silierung unerwünschten Mikroorganismen wie (Buttersäure-)Bakterien, Hefen und Schimmelpilze unterdrückt werden. Starke Verschmutzungen des zu silierenden Gutes können prinzipiell zu einem vermehrten Eintrag von Buttersäurebakterien führen, welche Fehlgärungen zur Folge haben können. (KALTSCHMITT et al. 2009)

Zu Beginn der Silierung wird der vorhandene Restsauerstoff durch die auf dem Siliergut natürlich vorkommenden Mikroorganismen veratmet. Wird ein Nachschub von Sauerstoff durch Verschluss des Silos unterbunden, ersetzen diese Mikroorganismen den Sauerstoff innerhalb weniger Stunden durch Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ). Ab diesem Zeitpunkt setzt die Hauptgärphase ein, in der das Pflanzengewebe innerhalb weniger Tage abstirbt. Dadurch werden die Zellinhaltsstoffe frei und können von der Silagemikroflora (Milch- und Essigsäurebakterien) genutzt werden. Es kommt zur Ansäuerung der Silage. Bis eine Absenkung des pH-Werts erreicht ist, sind auch die unerwünschten Keimgruppen aktiv, die sich ohne Sauerstoff vermehren können. Dazu zählen Clostridien, Listerien, Bacillusarten sowie Hefepilze. (PAHLOW und HÜNTING 2011)

Nach der Absenkung des pH-Werts auf einen Wert unter 3,5 ist die Milchsäuregärung beendet. Ab diesem Niveau sind Bakterien nicht mehr stoffwechselaktiv. Hefen hingegen sind auch bei geringen pH-Werten noch aktiv und vergären den verbliebenen Zucker zu Ethanol (WEISSBACH et al. 2013).

## Problem und Aufgabenstellung

Über die bei der Silierung von Zuckerrüben auftretenden Verluste gibt es bis heute nur unzureichende Informationen. Weiterhin wurde bei bisherigen Untersuchungen der Fokus auf die Bestimmung von Verlusten in den jeweiligen Lagerungsverfahren gelegt. Dabei blieb die Frage nach einem Einfluss der Sorte und deren Zuckergehalt auf den Verlauf der Silierung und die auftretenden Verluste bisher unbeantwortet.

Da der Verlauf der von PAHLOW und HÜNTING (2011) für Mais- und Grassilagen beschriebenen Hauptgärphase bei Zuckerrüben bislang nicht beschrieben ist, sollte dies in einem ersten Versuch mit zwölf Zuckerrübensorten anhand des pH-Werts dokumentiert werden. Da Zuckerrüben aufgrund ihres hohen Zuckergehalts über günstige Siliereigenschaften verfügen (AUGUSTIN et al. 2010), wird davon ausgegangen, dass auch bei unterschiedlichen Zuckergehalten und epiphytischen Milchsäurebakterienbesätzen keine Unterschiede beim Verlauf der Silierung festzustellen sind. Dazu wurde folgende Hypothese aufgestellt: Bei der Silierung von Zuckerrüben verläuft die Säuerung des Materials trotz unterschiedlicher Anfangsgehalte an Zucker in ähnlicher Geschwindigkeit und Intensität.

Bisherige Versuche zur Verlustbestimmung haben gezeigt, dass es in der Silage hauptsächlich zur Umwandlung von Zucker in Milchsäure, Essigsäure und die Alkohole Methanol, Ethanol und Propanol kommt (WEISSBACH et al. 2013, BEECK et al. 2014). Wegen ihres unterschiedlichen Energiegehalts ist die Menge dieser Produkte für die Berechnung des Methanbildungspotenzials von Bedeutung (WEISSBACH 2009).

Wie groß die Schwankungen der Verluste innerhalb eines Lagerungsverfahrens, z.B. aufgrund unterschiedlicher Zuckerrübensorten mit unterschiedlichen Zuckergehalten ausfallen, wurde bei bisherigen Untersuchungen nicht berücksichtigt. Auch ob es dadurch zu unterschiedlich hohen Gehalten an Alkoholen und Säuren in der Silage kommt, wurde bisher nicht untersucht. Um dies zu überprüfen, wurde folgende Hypothese aufgestellt: Bei der Silierung gemuster Zuckerrüben unter Luftabschluss variieren die Verluste in Abhängigkeit von der Sorte, deren Zuckergehalt und den daraus entstehenden Fermentationsprodukten.

## Material und Methoden

### Verlauf der Silierung

Untersucht wurden zwölf Zuckerrübensorten der Pflanzenzüchter KWS SAAT SE, SES VanderHave, Strube GmbH & Co. KG und Syngenta. Die Untersuchungen fanden im Rahmen des Projekts „Aufbereitung und Konservierung von Zuckerrüben zur Verwendung in NawaRo-Biogasanlagen“ statt. Die Auswahl der Sorten erfolgte durch die beteiligten Züchter und umfasste solche Sorten, deren Einsatz für die Produktion von Biogas vorgesehen ist.

Im Versuchsjahr 2013 fanden zunächst Versuche zur Entwicklung des pH-Werts während der Silierung der einzelnen Sorten statt. In diesem Jahr wurden jeweils drei Sorten von jedem der beteiligten Züchter auf einem Standort angebaut. Daraus ergibt sich ein Umfang von 12 Varianten. Die Variation von Sorten, Standorten und Erntezeitpunkten wurde bewusst gewählt, um heterogene Ausgangsbedingungen zu schaffen (Tabelle 1). Der Anbau der Sorten erfolgte in Streifenversuchen in vierfacher Wiederholung. Aussaat, Düngung und Pflanzenschutz erfolgten nach guter fachlicher Praxis. Die Ernte wurde mit Parzellenrodern durchgeführt. Die Zuckerrüben wurden dabei lediglich entblattet.

Tabelle 1: Kennzeichnung der im Versuch eingesetzten Sorten, des Standorts und des Erntetermins im Jahr 2013

Züchter	Kennzeichnung Sorte	Standort	Bodenart	Ackerzahl	Ernte
Syngenta	Syngenta 1	Bad Salzflen	Löss	76–80	14.10.2013
	Syngenta 2				
	Syngenta 3				
SES VanderHave	SES 1	Euerfeld (Würzburg)	schluffiger Lehm	82	07.10.2013
	SES 2				
	SES 3				
KWS SAAT SE	KWS 1	Einbeck	Löss/ Lehm	82	01.11.2013
	KWS 2				
	KWS 3				
Strube GmbH & Co. KG	Strube 1	Söllingen	Lehm	85	25.10.2013
	Strube 2				
	Strube 3				

Die Zuckerrüben wurden nach der Ernte in Big Bags aufbewahrt und jeweils ca. zwei Wochen nach der Ernte verarbeitet, da dies dem in der Praxis üblichen Zeitraum zwischen Ernte und Silierung entspricht. Da alle Rüben nur mit geringen Mengen Erde behaftet waren (3–5%), wurde keine Reinigung durchgeführt.

Jeweils 100 Zuckerrüben je Sorte wurden mit einem für die Tierfütterung konzipierten Rübenmuser (BISO) zerkleinert. Um eine ausreichende Zerkleinerung zu erreichen und somit eine feine Struktur des Rübenmuses zu gewährleisten, wurde das Rübenmaterial jeweils dreimal dem Muser zugeführt. Nach dem Musen waren ca. 80% der Partikel kleiner als 5 mm und ca. 20% kleiner als 15 mm. Aus der Mischprobe der 100 gemusterten Rüben wurde eine Probe von ca. 1 kg entnommen, luftdicht verpackt und umgehend eingefroren, um beginnende Umsetzungsprozesse zu unterbinden. Die Messung des pH-Werts erfolgte umgehend im frischen Rübenmus mit einer pH-Einstabmesskette (BlueLine 21). Die Durchführung der Silierversuche erfolgte in Einmachgläsern (1,5 L) in Anlehnung an die DLG-Richtlinie für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit (DLG 2013). Die Gläser wurden dabei jeweils mit 1 kg Rübenmus gefüllt und mittels Gummidichtung und Metallklammern verschlossen. Der Füllstand betrug ca. 75% des Behältervolumens, um einen Verlust der entstehenden Silage durch Übersäumen zu vermeiden. Durch den Verschluss mit Gummidichtungen und Metallklammern konnte bei der Silierung entstehendes Gas per Überdruck entweichen. Die Lagerung der Silage erfolgte über einen Zeitraum von 90 Tagen in einem Klimaschrank (Binder GmbH) bei 15 °C. Eine Beeinflussung der Ergebnisse durch schwankende Umwelteinflüsse konnte somit ausgeschlossen werden. Für jede Variante erfolgte die Anlage des Versuchs in vierfacher Wiederholung (4 Gläser mit je 1 kg Zuckerrübenmus) aus dem Mus der 100 zerkleinerten Zuckerrüben.

Während der ersten sieben Tage nach Beginn des Versuchs wurden die Gläser einmal täglich geöffnet und der pH-Wert gemessen. Dabei wurden die Gläser nacheinander und nur für den Zeitraum der Messung geöffnet und anschließend wieder verschlossen. Da sich der pH-Wert nach ca. sieben Tagen auf einem relativ konstanten Niveau einpendelte, wurden die Gläser im Anschluss nicht erneut geöffnet, um eine weitere Beeinflussung der Silage durch eintretenden Sauerstoff zu verhindern.

Nach einer Lagerungszeit von 90 Tagen wurden die Gläser erneut geöffnet und der pH-Wert in dem, zu diesem Zeitpunkt vollständig silierten, Rübenmus erfasst. Zur Darstellung der Ergebnisse wurde der pH-Wert jeweils aus dem Mittel der vier Wiederholungen errechnet. Für die abschließende Analyse der Silagen im Labor wurde aus den vier Wiederholungen je Sorte eine Mischprobe gebildet, luftdicht verpackt und umgehend eingefroren, um eine Umsetzung der Silage durch Kontakt mit Sauerstoff zu verhindern.

Sowohl die Proben des frischen, noch nicht silierten Materials, als auch die Mischproben der fertigen Silagen wurden anschließend einem externen Labor zur Analyse übergeben. Bei dem Labor wurde auf das Analytiklabor für Landwirtschaft und Umwelt „Blgg Deutschland GmbH“ zurückgegriffen, da in diesem Labor bereits Erfahrungen mit der Analyse von Zuckerrübensilage aus anderen Projekten vorlagen. Die Analyse umfasste die Bestimmung des Zuckergehalts nach Luff-Schoorl in den frischen Zuckerrüben sowie die Bestimmung der Restzuckergehalte und der organischen Säuren mittels Photometrie und Gaschromatographie in der Silage. Die Versuche zum Verlauf des pH-Werts wurden wegen der hohen Ähnlichkeit in der zweiten Versuchsperiode nicht wiederholt.

### **Bestimmung von Verlusten**

Zur Bestimmung der während der Konservierung auftretenden Verluste wurde im Jahr 2015, anknüpfend an die Untersuchungen zum Verlauf der Silierung, eine Berechnung des Methanbildungspotenzials in frischem und siliertem Rübenmus in Kombination mit einer Massenbilanzierung bei der Ein- und Auslagerung des Materials durchgeführt. Dabei wurden die gleichen Sorten genutzt wie im Jahr 2013. Auch das Versuchsdesign entsprach dem aus dem Jahr 2013. Der Anbau der Sorten fand im Jahr 2015 jedoch auf einem gemeinsamen Standort (Bad Salzuflen) statt. Die Aussaat der Zuckerrüben erfolgte am 18.04.2015. Düngung und Pflanzenschutz erfolgten nach guter fachlicher Praxis. Die Ernte fand am 25.10.2015 statt und wurde mit einem Parzellenroder durchgeführt. Die Rüben wurden entblattet und nicht geköpft. Die Bodenart des Standorts war Löss mit einer Ackerzahl von 62. Bis zur Verarbeitung am 04.11.2015 wurden die Zuckerrüben wie im Jahr 2013 in Big Bags im Freiland gelagert. Alle Schritte der Aufbereitung und Silierung erfolgten analog zum Versuch aus dem Jahr 2013.

Das in den Einmachgläsern eingefüllte Material wurde mit einer Genauigkeit von einer Dezimalstelle (in g) verwogen. Nach dem Verschluss wurden die Gläser über den gesamten Versuchszeitraum nicht erneut geöffnet. Die Lagerung der Gläser fand unter konstanten Temperaturbedingungen von 15 °C im Klimaschrank statt. Bei der Öffnung der Gläser nach 90 Tagen wurde umgehend der pH-Wert ermittelt und das Material zurückgewogen. Aus dem silierten Material der vier Wiederholungen wurde eine Mischprobe gebildet, luftdicht verpackt und eingefroren. Da die Analyse der Proben mit hohen Kosten verbunden ist, konnte keine Analyse aller Wiederholungen durchgeführt werden. Aus diesem Grund erfolgten die Laboranalysen jeweils aus den Mischproben des frischen sowie des silierten Materials. Aus Tabelle 2 ist zu entnehmen, welche Bestandteile im frischen und silierten Rübenmus analysiert wurden.

Tabelle 2: Analytierte Parameter von frischem und siliertem Rübenmus im Jahr 2015

Analyseparameter	Mus, frisch	Mus, siliert
Trockensubstanz (TS/TS <sub>k</sub> <sup>1)</sup> )	x	x
Rohasche (XA)	x	x
Zucker nach VDLUFA (Luff Schoorl)	x	x
ADF <sub>org</sub> <sup>2)</sup>	x	x
G�rs�uren (MS, ES, PS, BS) <sup>3)</sup>		x
Alkohole (Methanol, Ethanol, Propanol, Butanol, 1,2-Propandiol, 2,3-Butandiol)		x

<sup>1)</sup> TS<sub>k</sub> = korrigierte Trockensubstanz.

<sup>2)</sup> ADF<sub>org</sub> = Organic acid detergent fiber.

<sup>3)</sup> MS = Milchsäure, ES = Essigsäure, PS = Propionsäure, BS = Buttersäure.

Anhand der Gewichtserfassung des frischen und des silierten Materials erfolgte eine Bestimmung der aufgetretenen Verluste nach WEISSBACH (2009). Dabei dient die fermentierbare organische Trockensubstanz (FoTS) als Grundlage der Berechnung. WEISSBACH (2009) geht von einer Verdaulichkeit der organischen Substanzen von über 90 % aus. Die FoTS wird nach Gleichung 1 berechnet:

$$\text{FoTS} = 991 - \text{XA} - 0,50 \text{ADF}_{\text{org}} \quad (\text{Gl. 1})$$

Als potenzielle Gasausbeute bei frischen Zuckerrüben können rund 375 Liter Methan, bzw. 750 Liter Biogas je kg FoTS angenommen werden (WEISSBACH 2009). Deswegen errechnet sich das spezifische Methanvolumen für frische Rüben nach Gleichung 2:

$$V_{\text{CH}_4} = 0,375 \text{FoTS} \quad (\text{Gl. 2})$$

Bei Silagen sind Zuschläge für den enthaltenen Alkohol anzusetzen. Ethanol liefert je Masseinheit ca. 86 % mehr Methan als Saccharose (WEISSBACH 2009). Darum gilt (nach Gleichung 3):

$$V_{\text{CH}_4} = 0,375 (\text{FoTS} + 0,86 \text{AL}) \quad (\text{Gl. 3})$$

Durch Auflösen der Klammern ergibt sich (nach Gleichung 4):

$$V_{\text{CH}_4} = 0,375 \text{FoTS} + 0,32 \text{AL} \quad (\text{Gl. 4})$$

$V_{\text{CH}_4}$  = spezifisches Methanvolumen unter Normbedingungen in l kg<sup>-1</sup> TS

l = Liter

AL = Summe der Gehalte aller Alkohole in g kg<sup>-1</sup> TS<sub>k</sub>

FoTS = fermentierbare organische Trockensubstanz in g kg<sup>-1</sup> TS

Zur Berechnung der Verluste musste die jeweilige Trockensubstanz der Gläser vor und nach der Silierung einbezogen werden. Dafür war es notwendig, die Trockensubstanz in der Silage zu korrigieren, um die in der Silage enthaltenen Alkohole und Säuren zu berücksichtigen. Diese Korrektur des Trockensubstanzgehaltes (TS<sub>k</sub>) erfolgte nach der Methode von WEISSBACH und STRUBELT (2008).

Bei der Bestimmung des TS-Gehaltes von Silagen sind flüchtige organische Substanzen wie Säuren und Alkohole zu berücksichtigen. Da die organische Trockensubstanz bei Silagen aus Zuckerrüben bis zur Hälfte aus flüchtigen Gärprodukten bestehen kann, muss der TS-Gehalt korrigiert werden. Die Flüchtigkeitsquote von niederen Fettsäuren liegt wie bei Maissilagen bei 95 %. Die für den Durchschnitt aller Silagearten ermittelte Wasserdampflichkeit der Milchsäure von 8 % kann auf Zuckerrübensilagen übertragen werden; die Flüchtigkeitsquote für einwertige Alkohole wird wie bei Mais- und Grassilagen mit 100 % veranschlagt. Zweiwertige Alkohole kommen nur in Spuren vor, daher wird das vollständige Verdampfen für die Summe aller Alkohole angenommen (WEISSBACH und STRUBELT 2008).

Alle Gehalte werden in g je kg FM in Gleichung 5 eingesetzt (WEISSBACH und STRUBELT 2008):

$$TS_k = TS_n + 0,95 NFS + 0,8 MS + 1,00 AL \quad (\text{Gl. 5})$$

NFS = Summe der Gehalte an niederen Fettsäuren

MS = Milchsäure

AL = Summe der Gehalte aller Alkohole

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Analysen konnte ein Vergleich zwischen den auftretenden Gärprodukten der einzelnen Sorten erstellt werden. Außerdem konnte mithilfe der Laborergebnisse und den bei der Ein- und Auslagerung bestimmten Gewichten eine massebezogene Bilanz der bei der Silierung auftretenden Verluste an Methanbildungspotenzial erstellt werden. Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte in Microsoft Excel und IBM SPSS Statistics 23.0.

## Ergebnisse

### Verlauf der Silierung

Die Messung der pH-Werte im Jahr 2013 zeigte bei allen zwölf untersuchten Varianten einen annähernd parallelen Verlauf (Abbildung 1). Beginnend mit einem pH-Wert zwischen 6,2 und 6,7 fiel dieser innerhalb der ersten 48 Stunden auf einen Wert unter 4,5. Die anfänglichen Differenzen der pH-Werte lassen sich dadurch erklären, dass die erste Messung aus praktischen Gründen zwischen einer halben und zwei Stunden nach dem Ansetzen der Silage erfolgte, sodass bereits teilweise eine Ansäuerung stattfand. Nach einer Phase der starken Reduzierung des pH-Werts flachte die Entwicklung nach ca. 48 Stunden deutlich ab und sank mit deutlich verminderter Intensität auf ein Niveau von leicht über 4,0. Nach ca. vier bis fünf Tagen sank der pH-Wert aller Silagen unter 4,0 und stellte sich ab dem siebten bis achten Tag auf einem Niveau zwischen 3,5 und 3,9 ein.

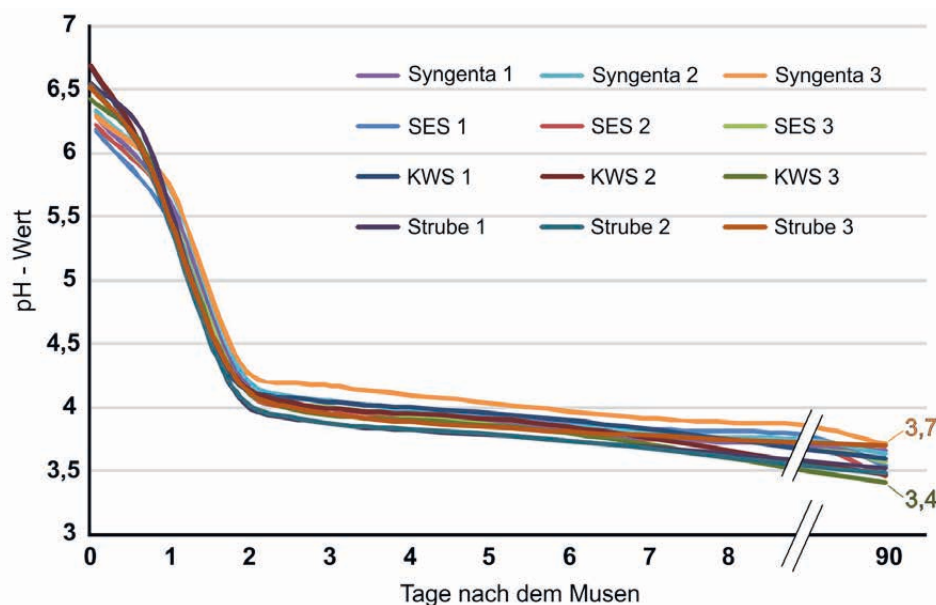


Abbildung 1: Verlauf des pH-Werts im Rübenmus der zwölf verschiedenen Zuckerrübensorten (Messung: 2013, Silierung über 90 Tage in geschlossenen Weckgläsern, n = 4)

Nach Ende der Versuchsperiode (90 Tage) lag der pH-Wert nur geringfügig unter dem Niveau, welches bereits nach 8 Tagen erreicht wurde. Bei der Auslagerung wurden pH-Werte zwischen 3,4 (KWS 3) und 3,7 (Syngenta 3) ermittelt. Nach 90 Tagen lagen die absoluten Unterschiede zwischen den Silagen der verschiedenen Sorten somit im Maximum bei 0,3. Nach einer Woche der Silierung war die Säuerung des Rübenmuses aller Sorten fast vollständig abgeschlossen.

Die statistische Auswertung der pH-Werte ergab jedoch signifikante Unterschiede zwischen den Varianten. Die Ausprägung der signifikanten Unterschiede nahm mit zunehmender Lagerungsdauer zu. Bei Auslagerung der Versuche nach 90 Tagen konnten bei 9 der 12 Varianten signifikante Unterschiede festgestellt werden. Die Standardabweichungen zwischen den vier Wiederholungen jeder Messung schwankten über alle Messtermine zwischen 0,00 und 0,08. Die mittlere Standardabweichung über alle Sorten an allen Messterminen betrug 0,02. Die in den frischen Zuckerrüben enthaltenen Zuckergehalte und die daraus entstandenen Säuren sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Zuckergehalt der frischen Rüben und die während der Silierung entstandenen Gehalte an Essigsäure (ES) und Milchsäure (MS) (Messung: 2013, Silierung in Weckgläsern über 90 Tage bei 15 °C im Klimaschrank)

Sorte	Zuckergehalt (frische Rüben) <sup>1)</sup>		ES	MS	∑ Säuren
	in g kg <sup>-1</sup> FM	in g kg <sup>-1</sup> TS	in g kg <sup>-1</sup> FM	in g kg <sup>-1</sup> FM	in g kg <sup>-1</sup> FM
SES 1	151	725	9,78	6,47	16,25
SES 2	161	754	12,60	7,52	20,12
SES 3	159	725	7,76	6,60	14,36
Syngenta 1	152	726	7,16	6,34	13,50
Syngenta 2	151	725	6,97	5,94	12,91
Syngenta 3	151	717	6,95	6,47	13,42
KWS 1	176	738	7,38	4,75	12,13



Sorte	Zuckergehalt (frische Rüben) <sup>1)</sup>		ES	MS	∑ Säuren
	in g kg <sup>-1</sup> FM	in g kg <sup>-1</sup> TS	in g kg <sup>-1</sup> FM	in g kg <sup>-1</sup> FM	in g kg <sup>-1</sup> FM
KWS 2	175	718	7,36	5,15	12,51
KWS 3	165	719	9,83	9,77	19,60
Strube 1	159	726	7,37	11,60	18,97
Strube 2	159	727	9,81	8,84	18,65
Strube 3	162	731	5,74	4,49	10,23

<sup>1)</sup> Zuckergehalt nach Luff-Schoorl.

Die Zuckergehalte in der Frischmasse (FM) des Ausgangsmaterials lagen zwischen 15,1% (Syngenta 2 & 3, SES 1) und 17,6% (KWS 1). Im Vergleich dazu lagen die pH-Werte dieser vier Sorten nach 90 Tagen bei 3,63 (Syngenta 2), 3,71 (Syngenta 3), 3,54 (SES 1) und 3,59 (KWS 1). Die Gehalte der Essigsäure schwankten zwischen 5,74 g kg<sup>-1</sup> FM (SES 2) und 12,6 g kg<sup>-1</sup> FM (Strube 3). Bei der Milchsäure lagen die Gehalte zwischen 4,49 g kg<sup>-1</sup> FM (Strube 3) und 11,60 g kg<sup>-1</sup> FM (Strube 1). Dabei ist zu beachten, dass mit Ausnahme der Sorte Strube 1 die Gehalte an Essigsäure in der Silage immer leicht über denen der Milchsäure lagen. Bei der Aufstellung der in der Silage vorhandenen Säuren in Tabelle 3 wurden sowohl Propionsäure (PS) als auch Buttersäure (BS) nicht berücksichtigt, da die Gehalte in der Silage jeweils im Bereich unter 0,1 g kg<sup>-1</sup> FM lagen.

Um zu überprüfen, ob ein Zusammenhang zwischen Zuckergehalt im Ausgangssubstrat und den daraus während der Silierung entstehenden Säuren besteht, wurden die Korrelationen berechnet (Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht über die Korrelationen zwischen Zuckergehalt in den frischen Rüben und den Gehalten von Essigsäure (ES) und Milchsäure (MS) in der Silage nach 90 Tagen im Jahr 2013

	ES in g kg <sup>-1</sup> FM	MS in g kg <sup>-1</sup> FM	∑ Säuren in g kg <sup>-1</sup> FM
Zuckergehalt in g kg <sup>-1</sup> FM	-0,01	-0,18	-0,12

Es zeigt sich, dass im Falle der Essigsäure mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,01 kein Zusammenhang mit dem Zuckergehalt im Ausgangssubstrat festgestellt werden konnte. Auch bei der Milchsäure und dem Gesamtgehalt der Säuren bestehen mit Korrelationskoeffizienten von -0,18 und -0,12 nur schwache negative Zusammenhänge.

Mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,0037$  konnte ebenfalls kein Zusammenhang zwischen dem Zuckergehalt im Ausgangsmaterial und dem pH-Wert bei Auslagerung der Silage nachgewiesen werden (Abbildung 2).

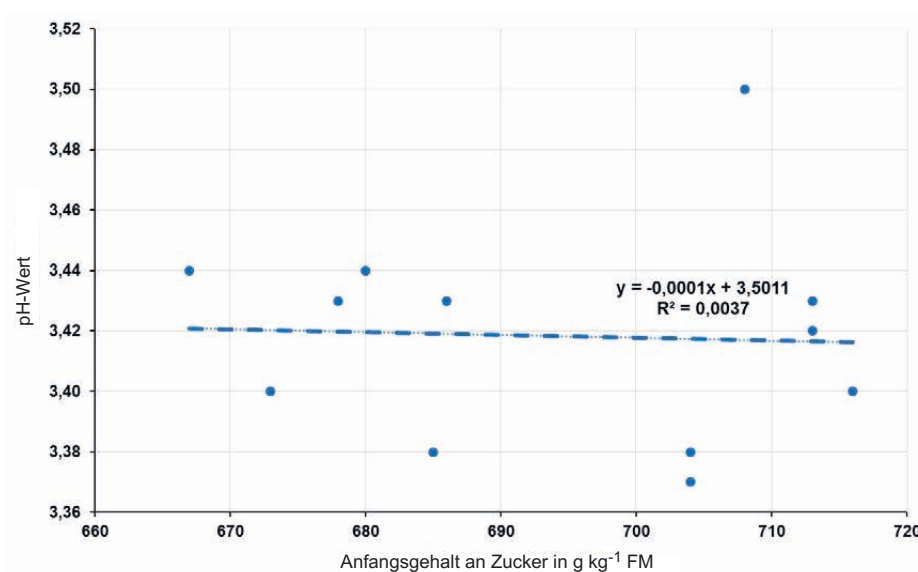


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Anfangsgehalt an Zucker im frischen Rübenmus und dem pH-Wert nach der Silierung über 90 Tage unter anaeroben Bedingungen in Einmachgläsern (Jahr: 2013, n = 12)

Somit konnte festgestellt werden, dass die Silierung verschiedener Zuckerrübensorten mit unterschiedlichen Anfangsgehalten an Zucker zwar innerhalb der ersten 48 Stunden annähernd parallel verläuft, die pH-Werte in der fertigen Silage unterscheiden sich jedoch signifikant voneinander. Eine Beeinflussung des pH-Werts in der fertigen Silage durch den Anfangsgehalt an Zucker konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

### Bestimmung von Verlusten

Die im Jahr 2015 mithilfe von Laboranalysen in Kombination mit einer Massebilanzierung errechneten Verluste, sowohl an Trockensubstanz (TS) als auch an Methanbildungspotenzial (MBP) unterschieden sich zum Teil deutlich zwischen den Sorten (Tabelle 5). Die Methanbildungspotenzialverluste ergaben sich als arithmetisches Mittel aus den vier Wiederholungen der Massebilanzierung in Verrechnung mit dem Laborergebnis aus der jeweiligen Mischprobe.

Tabelle 5: Trockensubstanzgehalte (TS) in frischen Zuckerrüben und korrigierte Trockensubstanzgehalte (TS<sub>k</sub>) nach WEISSBACH und STRUBELT (2008) in silierten Zuckerrüben nach 90 Tagen sowie daraus resultierende Verluste an Trockensubstanz und Methanbildungspotenzial (MBP) nach WEISSBACH (2009) (Messung: 2015, s = Standardabweichung, n = 4)

Sorte	TS	TS <sub>k</sub>	TS Verlust		MBP Verlust		pH
	(frische Rübe)	(Silage)	in g kg <sup>-1</sup>	in %	in %	s	
	in g kg <sup>-1</sup>	in g kg <sup>-1</sup>	in g kg <sup>-1</sup>				
SES 1	236	188	48	20,34	19,58	0,31	3,42
SES 2	246	207	39	15,85	14,93	0,07	3,44
SES 3	241	210	31	12,86	13,42	0,17	3,43
Syngenta 1	224	205	19	8,48	10,35	0,02	3,40
Syngenta 2	228	202	26	11,40	11,15	0,10	3,42
Syngenta 3	237	209	28	11,81	14,23	0,02	3,50

Sorte	TS	TS <sub>k</sub>	TS Verlust		MBP Verlust		pH
	(frische Rübe) in g kg <sup>-1</sup>	(Silage) in g kg <sup>-1</sup>	in g kg <sup>-1</sup>	in %	in %	s	
KWS 1	240	215	25	10,42	11,77	0,05	3,44
KWS 2	241	216	25	10,37	12,33	0,12	3,38
KWS 3	236	195	41	17,37	16,44	0,30	3,40
Strube 1	226	207	19	8,41	10,10	0,09	3,38
Strube 2	226	199	27	11,95	13,13	0,27	3,38
Strube 3	236	218	18	7,63	10,16	0,08	3,43

Die Trockensubstanzgehalte der frischen Rüben lagen zwischen 224 und 246 g kg<sup>-1</sup> FM. Durch die Silierung kam es bei allen Sorten innerhalb der 90 Tage zu einem Verlust an TS. So lagen die korrigierten Trockensubstanzgehalte in den Silagen zwischen 188 und 218 g kg<sup>-1</sup> FM. Dies entsprach relativen Verlusten von 7,63 % (Strube 3) bis zu 20,34 % (SES 1). Die Verluste an Methanbildungspotenzial, welches maßgeblich für die Beurteilung der Silage als Biogassubstrat ist, fielen bei vier der untersuchten Sorten geringer aus als die Verluste an Trockensubstanz. Der maximale Verlust betrug 19,58 % bei der Sorte SES 1. Der geringste Verlust konnte mit 10,10% bei der Sorte Strube 1 ermittelt werden. Beachtet man die Standardabweichung der MBP-Verluste, so ist zu erkennen, dass diese über alle Sorten zwischen 0,02 und 0,31 % liegen. Um die Höhe der auftretenden Verluste erklären zu können, gilt es die beeinflussenden Parameter zu berücksichtigen. Aus diesem Grund ist in Abbildung 3 der Zusammenhang zwischen den in den Silagen ermittelten Gehalten von Alkohol, sowie Essig- und Milchsäure und dem TS-Verlust aufgeführt.

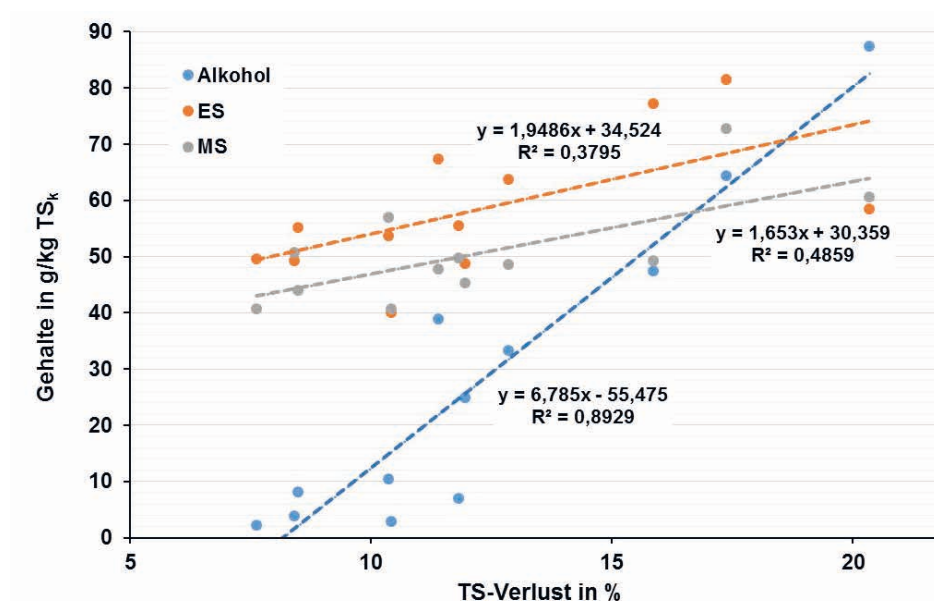


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen den bei der Silierung der zwölf Sorten über 90 Tage in Weckgläsern entstandenen Gehalten an Alkohol sowie Essigsäure (ES) und Milchsäure (MS) und den Trockensubstanzverlusten (TS) im Jahr 2015

Die Gesamtmenge des in den Silagen ermittelten Alkohols (Methanol, Ethanol, Propanol, Butanol) variierte stark zwischen den Sorten. So wurden zwischen 2,16 und 87,39 g kg<sup>-1</sup> TS<sub>k</sub> Alkohol ermittelt. Die Gehalte von Essig- und Milchsäure unterlagen einer geringeren Streuung. Es wurden zwischen 40,05 und 81,54 g kg<sup>-1</sup> TS<sub>k</sub> Essigsäure und zwischen 40,70 und 72,82 g kg<sup>-1</sup> TS<sub>k</sub> Milchsäure ermittelt. Um mögliche Zusammenhänge zu ermitteln, wurde das Bestimmtheitsmaß (R<sup>2</sup>) zwischen Alkoholgehalt sowie den Säuren und den bei der Silierung aufgetretenen TS-Verlusten berechnet. Zwischen dem Gehalt an Essigsäure und der Höhe der TS-Verluste konnte ein Bestimmtheitsmaß (R<sup>2</sup>) von 0,38 nachgewiesen werden. Dieses betrug bei der Milchsäure 0,49. Bei der Menge des Alkohols konnte hingegen mit einem Bestimmtheitsmaß (R<sup>2</sup>) von 0,89 ein enger Zusammenhang zur Höhe der TS-Verluste nachgewiesen werden. Da aufgrund des hohen finanziellen Aufwands nur eine Analyse der Mischprobe aus den vier Wiederholungen einer Sorte möglich war, wurde zusätzlich die Korrelation dieser Werte (TS-Verluste) mit den Mittelwerten der in vierfacher Wiederholung vorliegenden FM-Verluste ermittelt, um deren Verlässlichkeit zu überprüfen. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,96 lag hier ein starker linearer Zusammenhang vor. Aufgrund der geringen Standardabweichungen zwischen 0,02 und 0,22 bei den FM-Verlusten kann dies als Bestätigung für die Verwertbarkeit der Laborergebnisse interpretiert werden, die nur aus einer Mischprobe gewonnen wurden. Die Gehalte an ADF und Rohasche (XA) lagen sowohl bei den frischen Rüben als auch in der Silage über alle Sorten in einem engen Bereich und werden deswegen hier nicht explizit aufgeführt. Buttersäure konnte in keiner der Silagen nachgewiesen werden. Auch andere organische Säuren wurden nur in geringen Mengen von deutlich unter 1 g kg<sup>-1</sup> TS<sub>k</sub> nachgewiesen.

Als Indiz für die erfolgreiche Silierung aller Sorten kann der pH-Wert gewertet werden, welcher bei allen Sorten in einem sehr engen Bereich zwischen 3,38 und 3,5 lag und somit die Ergebnisse aus dem Jahr 2013 bestätigt. Die Ergebnisse zeigen, dass auch bei erfolgreicher Silierung unter gleichen Bedingungen deutliche Differenzen bei den auftretenden Verlusten zu verzeichnen sind.

## Diskussion

Die in den ersten 48 Stunden und in allen Versuchsbehältern annähernd parallel verlaufende Absenkung des pH-Werts lässt sich durch die im Zuckerrübenmus vorherrschenden Bedingungen begründen. Laut PAHLOW und HÜNTING (2011) läuft die Umwandlung von pflanzlichen Kohlenhydraten in organische Säuren spontan ab, „wenn siliertaugliche Milchsäurebakterien (MSB) bei einem ausreichenden Feuchtigkeitsgehalt eines Siliergutes mit genügend vergärbaren Zuckern auf eine sauerstofffreie Umgebung treffen“. Diese Bedingungen wurden in diesem Versuch erfüllt. Vor allem die große Menge des im frischen Rübenmus enthaltenen Zuckers bietet den vorhandenen Milchsäurebakterien eine günstige Grundlage zur Bildung organischer Säuren, welche zu einer Absenkung des pH-Werts führen. Da jedoch mit Ausnahme einer Variante mehr Essigsäure als Milchsäure festgestellt wurde, ist davon auszugehen, dass die Essigsäurebildung bei der Lagerung von Zuckerrüben unter anaeroben Verhältnissen eine bedeutende Rolle spielt. Dies deckt sich mit der Aussage von JEROCH et al. (1993), die festgestellt haben, dass es bei der Silierung von Zuckerrüben durch heterofermentative Bakterien zur Bildung von Milch- als auch Essigsäure kommt. Durch die Lagerung des Muses in geschlossenen Glasbehältern konnte der Zustand einer nahezu sauerstofffreien Umgebung nach Verbrauch des anfänglich in den Gläsern enthaltenen Sauerstoffs ebenfalls in kurzer Zeit erreicht werden. Um zu überprüfen, ob bei unterschiedlichen Voraussetzungen (Sorten, Standort, Erntezeitpunkt, Zuckergehalt) eine gleichmäßige und schnelle Silierung stattfindet, wurden die beschriebenen

heterogenen Bedingungen geschaffen. Die aufgestellte Hypothese, dass bei der Silierung verschiedener Zuckerrübensorten die Säuerung der Silage in ähnlicher Geschwindigkeit und Intensität verläuft, konnte aufgrund der statistischen Auswertung nicht uneingeschränkt bestätigt werden. Zwar lief die Säuerung der Silagen bei allen Sorten in annähernd gleicher Geschwindigkeit ab, jedoch kam es mit zunehmender Dauer der Lagerung zu signifikanten Unterschieden im pH-Wert. Da sich die pH-Werte trotz täglicher Öffnung der Gläser bei allen Sorten unter 3,7 befanden, kann davon ausgegangen werden, dass alle untersuchten Silagen vollständig konserviert waren. Sie erfüllten damit die von GALLER (2011) formulierte Anforderung an eine Nasssilage, die bei einem TS-Gehalt < 20 % (hier höher) einen pH-Wert < 4 aufweisen soll. Bei einer strikt anaeroben Lagerung ohne Öffnung der Gläser ist davon auszugehen, dass die pH-Werte der Silagen noch geringer ausgefallen wären. Diese Annahme bestätigte sich im Versuch aus dem Jahr 2015. Abgesehen von der Wahl des Lagerungsverfahrens bieten Zuckerrüben also im Hinblick auf den ausreichenden Feuchtigkeitsgehalt und die große Menge vorhandenen Zuckers gute Bedingungen für eine schnelle und sichere Silierung. Dabei nahm die Höhe des im Ausgangsmaterial enthaltenen Zuckers keinen Einfluss auf die Intensität der Absenkung des pH-Werts. Dies spricht dafür, dass die in Zuckerrüben zum regulären Erntezeitpunkt üblicherweise enthaltenen Zuckergehalte eine ausreichende Grundlage für eine effektive und schnelle Absenkung des pH-Werts bilden. Dass die Schwankungen im Bereich zwischen 15,1 % (z.B. Syngenta 1) und 17,6 % (KWS 1) Zuckergehalt (bedingt durch unterschiedliche Erntezeitpunkte) im Ausgangsmaterial keinen Einfluss auf die Absenkung des pH-Werts hatten, bestätigt dies. Auch der durch einen Anbau der Sorten auf verschiedenen Standorten zu vermutende unterschiedliche Anfangsbesatz mit Milchsäurebakterien hatte keinen Einfluss auf den Erfolg der Silierung.

Die Spanne der in den Versuchen im Jahr 2015 ermittelten Verluste an Methanbildungspotenzial erscheint relativ hoch und wich sowohl positiv als auch negativ von den Erwartungen aus vorherigen Untersuchungen ab. Ergebnisse von BEECK et al. (2014) ergaben eine Verringerung des Methanbildungspotenzials von 10,8 % über eine Lagerungsdauer von fast neun Monaten in luftdicht abgedeckten 1.000-Liter-Containern. Durch die hier gewählte Versuchsanordnung, welche ebenfalls eine Lagerung ohne den Einfluss von Sauerstoff sicherstellte, wären Verluste in ähnlicher Dimension zu erwarten gewesen. Jedoch bestätigte sich die in der Hypothese formulierte Annahme, dass es innerhalb des Lagerungsverfahrens zu unterschiedlich hohen Verlusten kommt. Ein expliziter Einfluss der Sorte konnte dabei nicht nachgewiesen werden. Dabei wurden die in vierfacher Wiederholung gravimetrisch bestimmten FM-Verluste durch die Höhe der im Labor ermittelten TS-Verluste bestätigt. Hier wurde eine hohe Korrelation nachgewiesen. Dies spricht für die Verwertbarkeit der Laboranalysen, auch wenn diese nur als Mischprobe der vier Wiederholungen erfolgen konnten. Diese TS-Verluste sind maßgeblich für die Verringerung des Methanbildungspotenzials verantwortlich.

Besonders auffällig waren die starken Schwankungen der Alkoholgehalte in den Silagen und die damit eng korrelierten TS-Verluste. Auch wenn der in der Silage enthaltene Alkohol bei der Berechnung des Methanbildungspotenzials berücksichtigt wird und eine hohe Energiedichte aufweist, stellt jede Form der mikrobiellen Umwandlung eine Verlustquelle dar. So zeigten alle Silagen mit hohen Alkoholgehalten einen erhöhten TS-Verlust und einen damit verbundenen MBP-Verlust.

Ein Zusammenhang zwischen den Zuckergehalten im Ausgangsmaterial und den Alkoholgehalten in der Silage konnte nicht nachgewiesen werden. Unterschiedliche Besätze an Hefen, welche für die Bildung von Alkohol in den Silagen verantwortlich sind, kommen als Ursache für die unterschiedlichen Alkoholgehalte in Betracht. Da an den frischen Zuckerrüben vor der Silierung keine Hefebesatz-

analysen durchgeführt wurden, kann dieser Parameter nicht abschließend beurteilt werden. Jedoch könnte dies eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Alkoholgehalte sein, da unter den in diesem Versuch gegebenen anaeroben Bedingungen das Wachstum von Hefen im Vergleich zu aeroben Bedingungen deutlich reduziert ist. Auch wurde mit einer Lagerungstemperatur von 15 °C das Temperaturoptimum, welches für das Wachstum von Hefen 20 bis 25 °C beträgt, unterschritten (FIEDLER 2009). Diese Voraussetzungen könnten dazu führen, dass bei stark variierenden Hefebesätzen entsprechende Gehalte an Alkohol gebildet wurden – ausgehend von der Annahme, dass sich in Silagen mit geringem Hefebesatz dieser nicht adäquat hat vermehren können. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass diese nur anhand einer Schätzformel ermittelt wurden und keine direkten Messungen des tatsächlichen Methanertrags nach VDI-Richtlinie 4630 zugrunde liegen.

Es bleibt festzuhalten, dass die Bildung von Alkoholen während der Silierung einen maßgeblichen Einfluss auf die Höhe der auftretenden Verluste nimmt. Dabei kann es im Verfahren der anaeroben Lagerung zu deutlichen Unterschieden zwischen verschiedenen Chargen kommen. Dies konnte jedoch nicht explizit auf die eingesetzte Sorte oder deren Zuckergehalt zurückgeführt werden.

### Schlussfolgerungen

Mit dieser Untersuchung wurde der Verlauf der Silierung von gemusterten Zuckerrüben unter anaeroben Bedingungen dargestellt. Bei der Silierung unterschiedlicher Sorten von unterschiedlichen Standorten kommt es zwar zu signifikanten Unterschieden bei der Höhe des pH-Werts; diese sind jedoch nicht von Bedeutung, da der pH-Wert immer ausreichend niedrig ausfällt.

Trotz der fehlenden Wiederholung der Laborergebnisse zeigten die im Versuchsjahr 2015 erzielten Ergebnisse, dass die bei der konservierenden Lagerung von Zuckerrüben auftretenden Verluste innerhalb des untersuchten anaeroben Lagerverfahrens deutlichen Schwankungen unterliegen können. Bei vollständig anaerober Lagerung wurde eine Verminderung des Methanbildungspotenzials zwischen 10,10% und 19,58% ermittelt. Eine Beeinflussung der Verlusthöhe durch eine langsame oder ungleichmäßige Silierung konnte anhand der Untersuchungen zur Entwicklung der pH-Werte ausgeschlossen werden. Auch konnte kein direkter Zusammenhang zur eingesetzten Sorte und dem jeweiligen Zuckergehalt ermittelt werden. Die Höhe der Verluste hing vielmehr stark von der Menge des gebildeten Alkohols ab. Hier gilt es in Zukunft zu untersuchen, ob die Höhe der Verluste durch den Einsatz von Siliermitteln zur Hemmung der alkoholischen Gärung reduziert werden können.

### Literatur

- Augustin, D.; Hartung, E.; Märländer, B. (2010): Aufbereitung, Lagerung, Konservierung. In: DLG- Merkblatt 363 Biomasse-Rüben, Hg. DLG e.V., Frankfurt am Main, S. 12–15
- Beeck, H.-T.; Kasten, P.; Gruber, W.; Dahlhoff, A. (2014): Projekt: Einsatz von Rüben in Biogasanlagen. Schlussbericht, Hg.: Rheinischer Rübenbauern-Verband e.V. (RRV), Bonn, S. 40–42
- DLG (2013): DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf die DLG-Gütezeichen-Fähigkeit. Frankfurt a. M.
- Fiedler, B. (2009): Pathogene Mikroorganismen-Hefen. Hamburg, B. Behr`s Verlag
- FNR (2012a): Energiepflanzen für Biogasanlagen – Sachsen. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), S. 28
- FNR (2012b): Biogas. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), S. 16
- Galler, J. (2011): Silagebereitung von A bis Z – Grundlagen – Siliersysteme – Kenngrößen. Landwirtschaftskammer Salzburg

- Hartmann, S.; Döhler, H. (2011): Vergärung von Zuckerrüben in Biogasanlagen – lohnt sich das?. Landtechnik 4, S. 250–253, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2011.404>
- Jeroch, H.; Flachowsky, G. Weißbach, F. (1993): Futtermittelkunde. Stuttgart, Gustav Fischer Verlag
- Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2009): Energie aus Biomasse. Berlin, Springer-Verlag, 2. Auflage
- KTBL (2012): Energiepflanzen Daten für die Planung des Energiepflanzenbaus. Darmstadt, S. 113–114
- Pahlow, G.; Hünting, K. (2011): Gärungsbiologische Grundlagen und biochemische Prozesse der Silagebereitung. In: Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung. Hg. DLG, Frankfurt am Main, 8. Auflage, S. 73–82
- Schaffer, S.; Wolf, G.; Kawasch, M. (2011): Rüben als Biogassubstrat – Überblick über Verfahrenswege zu Transport, Aufbereitung und Lagerung. Freising, Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V.
- Schulze Lammers, P.; Roller, O. (2010): Entblattung von Zuckerrüben – Bewertung der Arbeitsqualität und des Mehrertrages. Landtechnik 6, S. 464–467, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2010.550>
- Thaysen, J. (2011): Futter- und Zuckerrüben. In: Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung. Hg. DLG, Frankfurt am Main, 8. Auflage, S. 53–54
- Weißbach, F. (2009): Das Gasbildungspotenzial von frischen und silierten Zuckerrüben bei der Biogasgewinnung. Landtechnik 6, S. 394–397, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2009.701>
- Weißbach, F.; Parr, K.; Reinsdorf, U.; Warnke-Gurgel, C.; Losand, B. (2013): Verluste an Methanbildungspotenzial von Zuckerrübenmus in offenen Erdbecken. Landtechnik 68, S. 50–57, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2013.206>
- Weißbach, F.; Strubelt, C. (2008): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Zuckerrübensilagen als Substrat für Biogasanlagen. Landtechnik 6, S. 354–355, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2008.879>

## Autoren

**Stefan Dirks** und **Dominik Schaiper** sind wissenschaftliche Mitarbeiter, **Prof. Dr. agr. habil. Wolfgang Büscher** ist Leiter der Sektion Verfahrenstechnik in der Tierischen Erzeugung und **Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers** ist Leiter der Sektion Systemtechnik in der Pflanzenproduktion am Institut für Landtechnik der Universität Bonn, Nussallee 5, 53115 Bonn, E-Mail: [s.dirks@uni-bonn.de](mailto:s.dirks@uni-bonn.de)

## Hinweise und Danksagungen

Das Projekt wurde gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft über die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) und die Gemeinschaft zur Förderung von Pflanzeninnovation e.V. (GFPI). Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung. Weiterhin gilt der Dank den beteiligten Pflanzenzüchtern für den Anbau und die Bereitstellung der Zuckerrüben.