

Sickersaftbildung aus der Silage von Zuckerrübenschnitzeln

Elzbieta Kumanowska, Simon Zielonka, Hans Oechsner

Die Popularität der Nutzung von Zuckerrüben als Biogassubstrat hat zugenommen, da sie zahlreiche Vorteile bieten, wie den hohen Biomasseertrag und den guten Abbaugrad. Eines der Hauptprobleme ist dabei aber der hohe Lagerungsverlust durch die intensive Sickersaftbildung. Zur Weiterentwicklung der Lagerungsverfahren sind Informationen über die gebildeten Sickersaftmengen und die beeinflussenden Parameter notwendig. Deshalb wurde in dieser Untersuchung der Einfluss der beiden Parameter Stapelhöhe und Schnitzelgröße auf die Sickersaftbildung von silierten Zuckerrübenschnitzeln anhand von Massenbilanzen bestimmt. Über 50% Prozent der einsilierten Frischmasse fielen als Sickersaft an. Etwa die Hälfte des gesamten Sickersaftes entstand in den ersten drei Wochen der Silierung. Der Sickersaft wies über den gesamten Versuchsverlauf sehr hohe CSB-Werte von 250 g l^{-1} auf. Die höchste Sickersaft- und CO_2 -Produktion wurde bei der Variante mit 5 m Stapelhöhe und grob gehäckselten Zuckerrüben festgestellt. Die größte Menge an Silage, bezogen auf die eingelagerte Frischmasse, wurde mit der Variante mit 2 m Stapelhöhe und klein gehäckselten Rüben erreicht.

Schlüsselwörter

Zuckerrüben, Silage, Sickersaft, Massenbilanz, Konservierung, Biogas, Substrat

Aufgrund der Endlichkeit und der negativen Umweltauswirkungen fossiler Energieträger hat die deutsche Regierung das Ziel den Anteil der erneuerbaren Energien an der Gesamtenergieproduktion bis zum Jahr 2030 auf 30% anzuheben (BERLIN ENERGY TRANSITION DIALOGUE 2016). Die Biogasproduktion leistet dazu einen wichtigen Beitrag. Eines der Probleme der Biogasproduktion ist, dass diese hauptsächlich auf dem nachwachsenden Rohstoff Maissilage basiert und dadurch zu einseitigen Fruchtfolgen führen kann. Von den 2,55 Millionen Hektar Maisanbau in Deutschland im Jahr 2015 wurden 0,85 Millionen für den Anbau von Energiemais genutzt (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., 2016). Aus ökologischen Gründen werden daher ökonomisch gleichwertige Substrate für die Biogasproduktion gesucht.

In den letzten Jahren wurde die Zuckerrübe zunehmend als alternatives Biogassubstrat genutzt. Ihre wesentlichen Vorteile sind ihr hoher Biomasseertrag, der hohe Biogasertrag (MIODUSZEWSKA et al. 2009, WEISSBACH 2009) und der hohe Abbaugrad (KRAKAT et al. 2010). Laut JACOBS et al. (2017) sind Zuckerrüben eine ökologische und ökonomische Alternative für die Biogasproduktion, insbesondere in Gebieten in denen eine Veränderung der Fruchtfolge oder eine Reduzierung des Maisanteils wünschenswert ist. Die Qualität der Rüben wird durch viele Faktoren beeinflusst, wie z. B. Sorte, Umwelt, Pflanzenbau, Siliertechnik und Lagerung. Die Kultivierung und die Ernte der Zuckerrübe sind gut mechanisiert. Die Lagerung hingegen muss verbessert werden (BISCHOFF et al. 2017). In der Literatur werden verschiedene Arten der Zuckerrübenlagerung für die Biogasproduktion beschrieben (BISCHOFF

et al. 2017, DEININGER 1995, HEILMANN 2013, SCHATTSCHNEIDER et al. 2011). Die vorteilhafteste Konservierungsmethode könnte die Silierung sein, da die Rübe dadurch ganzjährig verfügbar ist und die Lagerungsperiode bis zur nächsten Ernte dauern kann.

Bei der Silierung der Zuckerrüben kommt es aber zu einer intensiven Sickersaftbildung, die einen großen Teil der Verluste ausmacht. Genaue Kenntnisse über den zeitlichen Verlauf der Sickersaftbildung und die zu erwartenden Mengen sind daher entscheidend für einen erfolgreichen Einsatz.

Der Silierprozess der Zuckerrübe

Die chemischen Änderungen, die während des Silierprozesses von Zuckerrüben auftreten, beschrieb OLSEN (1951). Die heterofermentative Bildung von Milchsäure dauert so lange an, bis die Saccharose verbraucht ist. Wenn keine Saccharose mehr verfügbar ist, beginnt die Säurefermentation und es werden Buttersäure, Essigsäure, Alkohol, CO₂ und Wasserstoff gebildet.

WEISSBACH (2009) kommt dagegen zu dem Schluss, dass während des Silierprozesses von Zuckerrüben hauptsächlich Milchsäure und Essigsäure gebildet werden. Andere kurzkettige Fettsäuren sind nur in sehr geringen Konzentrationen vertreten. VARGAS-RAMIREZ et al. (2013) bestätigen, dass unter sauren Bedingungen Saccharose zu Glucose und Fructose hydrolysiert wird. Laut WEISSBACH (2009) werden nach der Beendigung der Milchsäurebildung die verbleibenden Zucker durch Hefen zu Ethanol vergoren. Dabei entweichen etwa 50 Massenprozent der umgewandelten Zucker als Kohlenstoffdioxid. Laut LAUBE (1967) kann die alkoholische Gärung bei der Silierung die Größenordnung der Säuregärung sogar überschreiten. Niedrige Lagertemperaturen sind dabei günstig für die alkoholische Gärung.

In der Literatur variieren die in der Zuckerrübensilage gefundenen Alkohole. Die am häufigsten genannten Alkohole sind Ethanol, Methanol, Propanol und Butanol (DIRKS et al. 2017, WEISSBACH et al. 2013). ERDELJAN (1994) vermutet jedoch auch die Anwesenheit von Mannitol als zusätzliche, nicht zuvor analysierte Komponente der Zuckerrübensilage. Es gibt nicht viele Informationen in der Literatur zur Bildung von Mannitol während der Zuckerrübensilierung, möglicherweise aufgrund des schwierigen analytischen Nachweises. Dieser erfolgte durch Futteranalysen von DEININGER (1995). WOJTCZAK et al. (2013) bestätigen auch die Anwesenheit von Mannitol im Zuckerrübensickersaft.

Mannitol ist ein Polyol (Zuckeralkohol), der in großen Mengen von verschiedenen heterofermentativen Milchsäurebakterien produziert wird, die Fructose als Elektronenakzeptor verwenden (WISSELINK et al. 2002). Diese Bakterien sind in der Lage, aus einer Mischung von Glucose und Fructose (1:2), Fructose vollständig in Mannitol umzuwandeln (SAHA und RACINE 2011). Als Folge der Wirkung dieser Bakterien werden Glucose und Fructose schließlich in Milchsäure, Ethanol, Kohlenstoffdioxid, Essigsäure und Mannitol umgewandelt. Mannitol-Dehydrogenase ist ein Schlüsselenzym, das an der Mannitolproduktion beteiligt ist.

Es ist auch bekannt, dass eine Reihe von heterofermentativen Milchsäurebakterien, Hefen und filamentösen Pilzen Mannitol produzieren (LEE 1967, SAHA und RACINE 2011, SONG und VIEILLE 2009). Homofermentative Milchsäurebakterien dagegen fermentieren Laktose zu Milchsäure und bilden nur Spuren anderer Produkte (CARR et al. 2002, SONG und VIEILLE 2009).

Laut BUXTON et al. (2003) und HERRMANN (2010) kann der Silierprozess in vier Phasen unterteilt werden. Die erste Phase wird als anfängliche aerobe Phase bezeichnet und umfasst die Veratmung des zwischen dem einsilierten Material eingeschlossenen Restsauerstoffs. Als Folge der zweiten Phase des Silierprozesses, der Hauptgärphase entstehen Gase und Sickersaft. Die Länge dieser Phase

hängt von den Eigenschaften der Pflanze und den Bedingungen der Silierung ab und kann zwischen einer Woche und mehr als einem Monat dauern. Die dritte Phase, die sich durch eine Verlangsamung der Änderungsraten auszeichnet, wird Lagerphase genannt. Die letzte Phase, die Entnahmephase, beginnt nach der Siloöffnung. Hier kann das einsilierte Material, aufgrund des Eindringens von Sauerstoff und der dadurch verursachten Vermehrung von Hefen, Pilzen und Essigsäurebakterien, seine chemische Zusammensetzung verändern.

Nach WEISSBACH und PARR (2013) führt die Abwesenheit von Sauerstoff zum Absterben von Zellgewebe und damit zur Freisetzung von nährstoffreichem Sickersaft. MAURITZ (1992) beschreibt die Sickersaftproduktion als einen diskontinuierlichen Prozess, der kurz nach dem Füllen der Silos beginnt. Aufgrund seines hohen Säuregehalts ist der Sickersaft extrem korrosiv (GEBREHANNA et al. 2014). Nach WAGNER et al. (2010) ist der produzierte Sickersaft energetisch genauso wertvoll wie die restliche Zuckerrübensilage. Laut JONES und JONES (1995) kann die Menge an Sickersaft, die während der Silierung von Pflanzen mit hohem Wassergehalt wie zum Beispiel Rübenköpfen produziert wird, 500 l t⁻¹ Frischmasse erreichen. Nach MAURITZ (1992) wirkt sich ein niedriger Trockensubstanzgehalt bei Futterrüben positiv auf die Erhöhung der Sickersaftproduktion aus.

Kohlenstoffdioxid ist das Endprodukt der heterofermentativen Milchsäuregärung und Alkoholgärung (KÜNTZEL und ZIMMER 1972). Nach KREUGER et al. (2011) werden maximal 3,3% des eingelagerten Rübengewichtes während der Silierung als CO₂ freigesetzt.

Verfahren der Zuckerrübenlagerung

Der Anbau von Zuckerrüben zur Biogasproduktion unterscheidet sich nicht vom Anbau der Zuckerrüben zur Zuckergewinnung (BISCHOFF et al. 2017). Für alle Lagerungsmethoden empfehlen sich nach der Ernte die Prozessschritte Trockenreinigung beim Verladen, Entsteinen und Waschen. Daher wird von identischen Bereitstellungskosten ausgegangen. Die heute gängigsten Zuckerrübenlagerungsmethoden sind die Lagerung der ganzen Zuckerrüben in einer Feldrandmiete, die Silierung ganzer Zuckerrüben im Fahrsilo oder im Folienschlauchsilo sowie die Silierung von Zuckerrübenmus im Hochsilo oder in offenen Erdbecken bzw. Lagunen (BISCHOFF et al. 2017, SCHATTSCHNEIDER et al. 2011). Zur ebenso praktizierten Mischsilierung wurden ganze oder grob zerkleinerte Rüben mit einem Mischungspartner im Fahrsilo gelagert (BISCHOFF et al. 2017). Durch Mischsilagen sollen die Lagerungsverluste durch das Entstehen großer Mengen des energiereichen Sickersaftes reduziert werden (BUGDAHL 2013). Die Wahl des Mischungspartners hängt von der erforderlichen Konsistenz der Mischsilage ab. Dazu werden am häufigsten Silomais, Lieschkolbenschrot (LKS), Corn-Cob-Mix (CCM) und Stroh verwendet (BISCHOFF et al. 2017).

Die Vor- und Nachteile verschiedener Lagerungsmethoden für Zuckerrüben sowie die Höhe der dabei entstehenden Verluste beschrieb BISCHOFF et al. (2017). Nach dessen Angaben entstehen die höchsten oTS-Verluste bei der Lagerung von ganzen Zuckerrüben im Fahrsilo (16–40% bei 30% Sickersaftanfall) und die geringsten oTS-Verluste durch die Lagerung in einer Feldrandmiete (5–15%). Vergleichsweise betragen die oTS-Verluste bei Lagerung des Zuckerrübenmuses 10–18% in Hochsilos und 13,8–23% in Erdbecken. Dies entspricht den Ergebnissen von VAZIFEKHORAN et al. (2016), die während der Konservierung von Zuckerrübenmus in offenen Silos einen durchschnittlichen oTS-Verlust von 28,63% feststellten. Es sind aber keine Daten über die Lagerung von Silage aus gehäckselten Zuckerrüben verfügbar und es ist bisher kein Lagerungsverfahren bekannt, das eine günstige und verlustarme Lagerung ermöglicht (WAGNER et al. 2010).

Laut KRÖHL et al. (2013) kann der Sickersaftanfall etwa 30 bis 40% der Frischmasse betragen, laut DEININGER (1995) sogar über 50% . Da diese Werte stark voneinander abweichen, ist es wichtig, unter experimentellen Bedingungen zu untersuchen, wie viel Sickersaft tatsächlich gebildet wird und welches die Einflussparameter sind. Ziel dieser Studie ist es, die Vorgänge beim Silieren von Zuckerrübenschnitzeln zu untersuchen und eine Massenbilanz des Prozesses zu erstellen, um den Einfluss der Partikelgröße und der Stapelhöhe auf den Sickersaftanfall und die Lagerungsverluste zu bestimmen.

Material und Methoden

Versuchsaufbau

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden im Labor der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim, Stuttgart, durchgeführt. Für diese Studie wurden drei aufrechte Plexiglas-Säulen (2 m Höhe und 0,3 m Durchmesser) sowie sechs PVC-Säulen (5 m Höhe und 0,3 m Durchmesser) innerhalb des Institutsgebäudes aufgebaut (Abbildung 1). Am Boden jeder Säule war ein Kugelventil zur Sickersaftentnahme bzw. Probenentnahme angebracht. Ein Sieb aus Edelstahllochblech wurde über dem Boden der Säule installiert, um ein Verstopfen des Ventils durch Zuckerrübensilage zu verhindern. Am oberen Ende jeder Säule war der Gasauslass angebracht. Das produzierte Gas wurde in 500-l-Gassäcken (Tesseraux Spezialverpackungen GmbH Bürstadt, Deutschland) bis zur weiteren Analyse gesammelt, wobei die Häufigkeit der Analyse von der tatsächlichen Gasproduktion abhängig war. Die Qualität des getrockneten Gases wurde mit einem Gasanalysator (S710, Sick Vertriebs-GmbH, Düsseldorf, Deutschland) im Hinblick auf CO₂ und H₂ untersucht. Das Volumen wurde mit einem Trommelgaszähler (TG 20/5, Dr.-Ing. Ritter Apparatebau GmbH & Co. KG, Bochum, Deutschland) gemessen, der mit einem elektronischen Impulsgeber mit einer Auflösung von 0,04 l pro Impuls ausgestattet war. Das Gasvolumen wurde immer auf Standardbedingungen (1.013 hPa, 273,15 K) korrigiert.



Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Einflusses von Stapelhöhe und Partikelgröße auf die Sickersaftbildung von Silage aus gehäckselten Zuckerrüben (© Universität Hohenheim/S. Zielonka)

Varianten

Zur Bestimmung des Einflusses der Stapelhöhe auf den Silierprozess wurden zwei verschiedene Stapelhöhen getestet: 2 m und 5 m. Zur Untersuchung der Partikelgröße wurden zwei unterschiedliche Korngrößenklassen von gehäckselten Zuckerrüben verwendet. Drei verschiedene Varianten wurden jeweils in dreifacher Wiederholung untersucht. In der ersten Variante wurden die 2-m-Säulen mit klein gehäckselten Zuckerrüben gefüllt (Abkürzung: 2 k). In der zweiten Variante wurden die 5-m-Säulen mit klein gehäckselten Zuckerrüben gefüllt (5 k). Als dritte Variante wurden die 5-m-Säulen mit grob gehäckselten Zuckerrüben gefüllt (5 g). Zum Waschen und Zerkleinern der Zuckerrüben wurde die Rübenwäsche „Gazelle“ der Firma Günter Schmihing GmbH (Melle, Deutschland) verwendet. Die Zuckerrübenschnitzelgrößen wurden durch die Einstellung des Häckselwerks variiert. Es wurden Proben der unterschiedlich großen Zuckerrübenschnitzel von je ca. 15 kg genommen, um eine Größenverteilungsanalyse durchzuführen. Jedes Bruchstück wurde manuell mittels Schieblehre vermessen. Der Mittelwert aus Höhe, Breite und Länge diente als Maßzahl für dessen Größe. Zur einfacheren Darstellung wurden die Mittelwerte in Größenklassen mit Intervallen von je 0,5 cm zugeordnet (Abbildung 2).

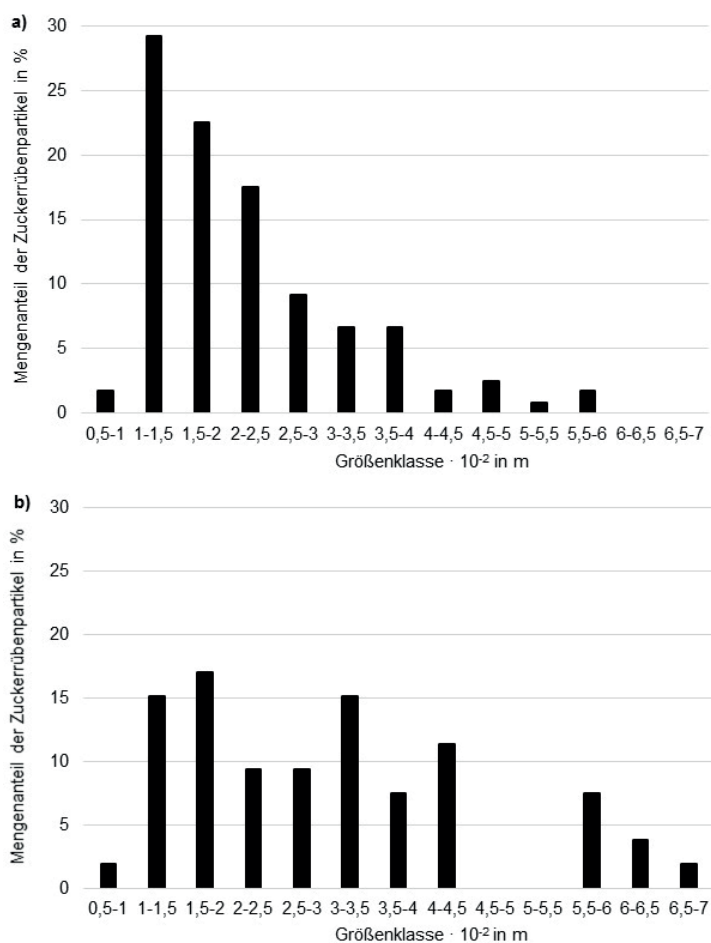


Abbildung 2: Die Größenverteilung der Partikel der a) fein gehäckselten Zuckerrüben (Variante k) und der b) grob gehäckselten Zuckerrüben (Variante g)

Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuchs wurden die Säulen mit ca. 70 kg (2 m) bzw. ca. 235 kg (5 m) Zuckerrübenschnitzel gefüllt. Für diese Versuche wurden Zuckerrüben der landwirtschaftlichen Versuchsstation Ihinger Hof (bei Renningen, 50 km südwestlich von Stuttgart) verwendet. Nach der Ernte wurden die Zuckerrüben etwa drei Monate in einer Miete auf einem betoniertem Untergrund bei der Forschungsstation zwischengelagert. Nach dem Füllen der Säulen wurde die Luft durch einen leichten Unterdruck aus dem Inneren entfernt. Das Experiment dauerte 364 Tage. Es wurde ohne Temperaturkontrolle durchgeführt. Die Umgebungstemperatur lag zwischen 13 und 26 °C. Der Sickersaft wurde anfangs täglich und später, abhängig vom Sickersaftanfall, weniger häufig entnommen. Jedes Mal wurde der in der Säule angesammelte Sickersaft vollständig entfernt und gewogen. Es wurden die Temperatur und der pH-Wert gemessen. Proben zur chemischen Analyse des Sickersaftes wurden einmal wöchentlich entnommen. Die Gasqualität und das Gasvolumen wurden ebenfalls erfasst. Zur Bestimmung der Stapelhöhenreduktion wurde einmal pro Woche die Höhe des Zuckerrübenstapels in den 2-m-Säulen (Plexiglas) gemessen. In der Variante 5 m wurde nur bei Beendigung des Versuches die Stapelhöhe nach dem Öffnen der Säulen bestimmt.

Laboranalysen

Gärprodukte

Während des gesamten Versuchszeitraums wurden fünf verschiedene Zeitpunkte ausgewählt, an denen der Sickersaft von jeder Säule analysiert wurde. Als nächstes wurden die Durchschnittswerte für jede getestete Variante berechnet. Für jede Probe wurde eine Doppelbestimmung durchgeführt. Es wurden eine Probe der gehäckselten Zuckerrüben vor der Silierung sowie Proben der Silage aus jeder Säule analysiert. Die Analysen erfolgten ebenfalls in Doppelbestimmung. Der Gehalt an Essig-, Propion-, Butter-, Valerian- und Capronsäure im Sickersaft wurde mit einem Gaschromatographen (GC, Typ CP3800 mit Flammenionisationsdetektor, Kapillarsäule WCOT Fused Silica, Agilent Technologies Germany GmbH, Böblingen, Deutschland) bestimmt.

Zur Analyse der flüchtigen Fettsäuren in Feststoffen wurden etwa 10 g des Probenmaterials mit 100 ml destilliertem Wasser gemischt und eine Stunde auf einem Probenschüttler geschüttelt (Bühler, Deutschland). In Abhängigkeit von dem erwarteten Fettsäuregehalt in den Proben von 2, 4 bzw. 8 ml wurde die resultierende Suspension mit 1 ml 17-prozentiger Orthophosphorsäure angesäuert, dann mit 1 ml N-Methylvaleriansäure (interner Standard) gemischt und, falls erforderlich, mit der entsprechenden Menge an destilliertem Wasser auf 10 ml aufgefüllt.

Milchsäure und Ethanol wurden per Hochdruckflüssigchromatographie (HPLC) nachgewiesen (HPLC-Typ mit RI-Detektor, BioRadAminex HPLC-Säule HPX-87H, BioRad-Vorsäule HPX-87H, Bischoff Analysetechnik und -geräte GmbH, Leonberg, Deutschland). Diese analytischen Methoden wurden von LINDNER et al. (2015) beschrieben. Für die HPLC-Analysen von Feststoffen wurden etwa 10 g Probenmaterial mit 100 ml bidestilliertem Wasser gemischt und eine Stunde auf einem Probenschüttler geschüttelt. Die erhaltene Suspension wurde – in Abhängigkeit von dem zu erwartenden Gehalt an Zucker, Alkoholen und Fettsäure in den Proben von 2, 4 bzw. 8 ml – mit 1 ml 0,2-N-Schwefelsäure angesäuert und die Lösung gegebenenfalls mit der entsprechenden Menge an doppelt destilliertem Wasser auf 10 ml aufgefüllt.

Die Zucker- und Mannitolgehalte wurden mit der HPLC-Ca-Methode bestimmt (HPLC-Typ mit RI-Detektor und Hyperchrome HPLC Säule Repro Gel Approach, Bischoff Analysetechnik und -geräte

GmbH, Leonberg, Deutschland). Um den Zucker- und Mannitolgehalt der Feststoffe zu bestimmen, mussten diese zunächst einer nichtretentiven Festphasenextraktion unterzogen werden. Auf diese Weise wurden die Säuren und andere störende Komponenten, die in den Proben enthalten waren, durch das Probenmaterial filtriert oder in diesem zurückgehalten, wobei die feste Phase des Sorptionsmittels als „Filter“ für die Probe verwendet wurde. Die Gesamtsäure muss, wie oben beschrieben, mittels GC und HPLC (Aminex-Methode) bestimmt werden, um die Kapazität des Anionenaustauschers theoretisch zu berechnen.

„Weender“-Analyse

In Übereinstimmung mit den europäischen Vorschriften für die Weender-Futtermittelanalyse (EUROPEAN COMMISSION 2009) wurden die Analysen für Rohasche (XA), Rohprotein (XP), Rohfett (XL) und Rohfaser (XF) durchgeführt.

Trockensubstanz (TS) und organische Trockensubstanz (oTS)

Die TS- und oTS-Gehalte der Zuckerrüben, der Zuckerrübensilage und des Sickersafts wurden durch Trocknen (Vortrocknen bei 60 °C für 48 h, abschließendes Trocknen bei 105 °C für 3 h) und Veraschen (550 °C für 8 h) in dreifacher Wiederholung bestimmt. Die TS-Gehalte der Zuckerrübensilage und des Sickersaftes wurden einer Gärproduktkorrektur unterzogen. Dazu wurden nicht die in der Literatur genannten Verfahren angewandt (WEISSBACH und STRUBELT 2008), da diese einige der bestimmten Gärprodukte nicht berücksichtigen. Um ein exakteres Ergebnis zu erhalten, wurden die Silagen stattdessen vor und nach der Trocknung auf ihren Gehalt an Gärprodukten untersucht. Der TS-Gehalt wurde anhand des Masseverlustes der flüchtigen Gärprodukte direkt korrigiert. Zur Korrektur des TS-Gehaltes des Sickersafts wurde dessen Gärproduktgehalt bestimmt. Aus den Gärproduktverlusten der zugehörigen Silage wurde ein Flüchtigkeitsquotient berechnet, da nach der Trocknung keine ausreichenden Rückstände des Sickersaftes für eine Analyse übrig waren. Der durch die Trocknung ermittelte TS-Gehalt wurde anhand der bestimmten Gärprodukte und ihrer Flüchtigkeitsquotienten korrigiert. Anhand des korrigierten TS-Gehaltes wurde der oTS-Gehalt bestimmt.

Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)

Die CSB-Konzentration im Zuckerrübensickersaft wurde mit dem Küvettentest von Hach Lange (Hach Lange Typ LCK 014) mit einem Hochtemperatur-Thermostat (Hach Lange Typ HT200 S) und einem Sensor-Array-Photometer (Hach Lange Typ LASA 20) analysiert. Zur Bestimmung des CSB in Zuckerrüben wurde die Suspensionsmethode verwendet, die in Anhang C der DIN 15936 (ANALYTIC JENA AG 2010) beschrieben ist. Zunächst wurden die Proben mit dem Thermomix (TM5, Vorwerk, Deutschland) fein zerkleinert. Schließlich wurden 200 mg des zerkleinerten Materials mit 200 ml 0,22-N-Salzsäure suspendiert und anschließend mithilfe eines Dispergierers (T25 Ultra-Turrax, Fa. IKA Labortechnik, Deutschland) homogenisiert. Als Ergebnis wurden die anorganischen Probenbestandteile zersetzt und abgesondert. Die hergestellte Suspension wurde, wie bei einer flüssigen Probe, durch die katalytische Hochtemperaturoxidation mit einem TOC/TN_b-Analysator analysiert (multi N/C 2100S; TOC: Total Organic Carbon, TN_b: Gesamtstickstoff).

Hohenheimer Biogasertragstest (HBT)

Um die Biogas- und Methanerträge zu bestimmen, wurden der Sickersaft und die produzierte Zuckerrübensilage aus jeder Säule im HBT untersucht. Es wurden zwei HBT-Durchgänge durchgeführt. Im ersten wurden die Proben der Zuckerrüben und aller Zuckerrübensilagen getestet. Im zweiten Durchgang wurden die Sickersaftproben geprüft. Der HBT ist ein Biogasertragstest mit einem hohen Durchsatz nach der VDI-Richtlinie 4630 (HELFFRICH und OECHSNER 2003, MITTWEG et al. 2012, VDI 2006). Die Reaktoren, in diesem Fall 100-ml-Glasspritzen, wurden mit 0,8 g Zuckerrüben oder Zuckerrübensilage oder 1,5 g Sickersaft und 30,0 g Inokulum gefüllt. Jede Variante wurde in dreifacher Wiederholung untersucht. Bei jedem Batch-Ansatz im HBT wurde als Nullvariante und zur Impfgüllekorrektur Impfgülle mitvergoren. Außerdem wurden auch die zwei Standardsubstrate Heu und Kraftfutter untersucht. Diese dienen zur Überprüfung des Gärverlaufs sowie dem Vergleich verschiedener Batch-Ansätze untereinander. Die Fermenter wurden mittels eines Rotors durchmischt, der in einem Brutschrank montiert war. Der Versuch wurde für 35 Tage bei $37 \pm 0,5$ °C durchgeführt. Das Gasvolumen in ml wurde durch Ablesen des Füllstands direkt an der Glasspritze mit einer Genauigkeit von 1 ml bestimmt, unter der Bedingung, dass mindestens 20 ml Gas erzeugt wurden. Wie oft die Messungen durchgeführt wurden, variierte zwischen einmal alle zwei Tage und viermal pro Tag, abhängig von der Menge an erzeugtem Gas. Der Gasanalysator AGM 10 (Pronova Analysetechnik, Berlin, Deutschland) wurde zur Bestimmung der Gasqualität verwendet. Das gemessene Gasvolumen wurde auf Standardbedingungen (0 °C und 1.013 hPa) korrigiert. Die Ergebnisse der Gas- und Methanerträge wurden auf den Gehalt an organischer Trockensubstanz im Substrat bezogen (HELFFRICH und OECHSNER 2003, MITTWEG et al. 2012, VDI 2006).

Berechnungen

Die Umrechnung des Normvolumens an erzeugtem Kohlenstoffdioxid in Kilogramm war notwendig, um die Massenbilanz erstellen zu können. Unter Berücksichtigung des molaren Volumens eines idealen Gases ($22,414 \text{ l mol}^{-1}$) konnte die Anzahl Mol des gebildeten Volumens an Kohlenstoffdioxid berechnet werden. Über die molare Masse von CO_2 ($44,01 \text{ g mol}^{-1}$) wurde die Masse an erzeugtem Kohlenstoffdioxid in kg berechnet.

Die statistische Analyse der Daten wurde mit der Statistiksoftware R-studio, Version 3.2.3, durchgeführt. Es wurden die statistischen Verfahren für die Agrarwissenschaften R-Paket „agricolae“, Version 1.2-4, angewendet. Um festzustellen, ob signifikante Unterschiede bestehen, wurde der parameterfreie Kruskal-Wallis-Test eingesetzt. Für den Post-hoc-Test kam der Tukey-Test zum Einsatz. Eine Varianzanalyse wurde durchgeführt, um den Einfluss der Partikelgröße und der Stapelhöhe auf die Sickersaft- und Kohlenstoffdioxidproduktion zu untersuchen.

Ergebnisse

Massen- und CSB-Bilanz des Silierversuchs

Nach Beendigung des Säulenversuches wurde eine Massenbilanz des Prozesses erstellt, um die Verluste zu ermitteln, die während der Lagerung aufgetreten waren (Tabelle 1). Um die Massenbilanz zu erstellen, wurden die Mengen aller Produkte aus dem Silierprozess in kg umgerechnet. Außerdem wurden die spezifischen Produktmengen des Silierprozesses zum direkten Vergleich und für die statistische Analyse berechnet. Dazu wurde die Masse an Produkt (Silage oder Sickersaft in kg) durch die Masse des Ausgangsmaterials (unsilierte Zuckerrübenschnitzel in kg) dividiert.

Basierend auf den durchgeführten Analysen wurde auch die CSB-Bilanz des Prozesses erstellt. Der CSB von Kohlenstoffdioxid wurde als Null angenommen, weil CO₂ nicht weiter oxidiert werden kann (DE LEMOS CHERNICHARO 2007). Die Menge an erzeugtem Wasserstoff war so gering, dass seine CSB-Masse bei den Berechnungen vernachlässigt wurde. Tabelle 1 zeigt die durchschnittlichen spezifischen Methanerträge (SME) von gehäckselten Zuckerrüben und der erhaltenen Zuckerrübensilage, die durch die Methanertragstests (HBT) ermittelt wurden.

Tabelle 1: Ergebnisse der Massenbilanzen, der CSB-Bilanz und der Methanertragstests aller untersuchten Varianten (2 k: 2 m Stapelhöhe klein gehäckselt, 5 g: 5 m Stapelhöhe grob gehäckselt, 5 k: 5 m Stapelhöhe klein gehäckselt; oTS-Werte sind um die Gärprodukte korrigiert)

	2 k (n = 3)	5 k (n = 3)	5 g (n = 3)
Massenbilanz (absolut)			
Zuckerrüben in kg	82,09 ± 1,77	237,10 ± 2,43	240,00 ± 1,69
Silage in kg	49,75 ± 6,73	118,08 ± 16,77	101,16 ± 7,46
Sickersaft in kg	34,59 ± 0,94	112,54 ± 17,06	130,81 ± 8,92
CO ₂ in kg	2,06 ± 0,31	5,34 ± 1,11	7,03 ± 1,16
Organische Trockensubstanzbilanz			
Zuckerrüben in kg oTS	20,50 ± 0,44	59,19 ± 0,61	59,92 ± 0,42
Silage in kg oTS	12,19 ± 1,65	33,89 ± 4,81	29,34 ± 2,16
Sickersaft in kg oTS	7,94 ± 0,22	25,45 ± 3,86	28,70 ± 1,96
Spezifische Massenbilanz			
Silage in kg kg ⁻¹ FM	0,61 ± 0,07 ^b	0,50 ± 0,07 ^{ab}	0,42 ± 0,03 ^a
Sickersaft in kg kg ⁻¹ FM	0,42 ± 0,01 ^b	0,48 ± 0,07 ^{ab}	0,55 ± 0,04 ^a
CO ₂ in kg kg ⁻¹ FM	0,03 ± 0,004 ^a	0,02 ± 0,005 ^a	0,03 ± 0,005 ^a
CSB-Bilanz			
CSB Zuckerrüben in kg	20,61 ± 0,44	59,39 ± 0,61	60,12 ± 0,42
CSB Silage in kg	17,41 ± 2,04	41,45 ± 3,98	36,63 ± 2,46
CSB Sickersaft in kg	8,81 ± 0,27	28,64 ± 4,73	33,62 ± 3,53
Methanertragstest in HBT			
SME Zuckerrüben in NI kg ⁻¹ oTS		257,88 ± 84,92	
SME Silage in NI kg ⁻¹ oTS	361,11 ± 18,84	333,12 ± 11,08	340,61 ± 31,54
SME Sickersaft in NI kg ⁻¹ oTS	334,16 ± 22,61	318,57 ± 18,63	300,92 ± 10,90

Unterschiedliche Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$), Mittelwert und Standardabweichung von n Wiederholungen.

Die statistische Analyse zeigte keine signifikanten Unterschiede in der spezifischen Sicker-saftproduktion zwischen Varianten gleicher Partikelgröße mit unterschiedlichen Stapelhöhen oder Varianten gleicher Stapelhöhe mit unterschiedlicher Partikelgröße. Nur im Vergleich der Varianten 2 k und 5 g zeigten sich signifikante Unterschiede, also bei der Kombination beider Merkmale. Es wurden jedoch keine signifikanten Unterschiede in der spezifischen Produktion von CO₂ festgestellt.

Die spezifischen Methanerträge der erhaltenen Zuckerrübensilage waren höher als die der unsilierten Zuckerrüben. Der höchste spezifische Methanertrag wurde in der Variante 2 k (361,11 ± 18,84 NI kg⁻¹ oTS) erzielt und der kleinste bei 5 k (333,12 ± 11,08 NI kg⁻¹ oTS). Der theoretische Methanertrag der unsilierten Zuckerrüben wurde nach WEISSBACH (2009) ermittelt. Er betrug 395,41 NI kg⁻¹ oTS und war damit höher als die spezifischen Methanausbeuten, die in Methanertrags-tests ermittelt wurden.

Zuckerrüben

Zur Beschreibung der Eigenschaften der Zuckerrüben wurden die Trockensubstanz, die organische Trockensubstanz, der chemische Sauerstoffbedarf, die Konzentration an flüchtigen Fettsäuren (FFS), Zuckern und Alkoholen bestimmt und pH-Analysen durchgeführt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Die Gehalte der Zuckerrüben an TS/oTS, CSB und Gärprodukten (FFS, Zucker, Alkohole) vor und nach der Silierung aller Varianten (2 k: 2 m Stapelhöhe klein gehäckselt, 5 g: 5 m Stapelhöhe grob gehäckselt, 5 k: 5 m Stapelhöhe klein gehäckselt; TS- und oTS-Werte sind um die Gärprodukte korrigiert)

	Zuckerrüben (n = 1)	2 k (n = 3)	5 k (n = 3)	5 g (n = 3)
TS in % FM*	25,46	25,47 ± 0,49 ^b	29,90 ± 1,42 ^a	30,39 ± 0,80 ^a
oTS in % TS*	98,06	96,22 ± 0,53 ^a	96,00 ± 0,51 ^a	95,45 ± 0,10 ^a
pH-Wert**	4,01	3,55 ± 0,03 ^a	3,55 ± 0,04 ^a	3,56 ± 0,02 ^a
CSB Feststoff in g l ⁻¹ **	251,00	351,17 ± 27,76 ^a	356,00 ± 12,82 ^a	363,33 ± 21,39 ^a
Essigsäure in g kg ⁻¹ TS**	12,07	40,97 ± 1,87 ^a	40,46 ± 1,54 ^a	36,05 ± 2,59 ^a
Propionsäure in g kg ⁻¹ TS**	1,00	0,00	0,00	0,00
n-Buttersäure in g kg ⁻¹ TS**	4,96	0,00	0,00	0,00
n-Valeriansäure in g kg ⁻¹ TS**	0,29	0,14 ± 0,12 ^a	0,12 ± 0,11 ^a	0,13 ± 0,11 ^a
Milchsäure in g kg ⁻¹ TS**	9,82	53,40 ± 4,64 ^a	43,03 ± 2,16 ^a	46,45 ± 6,29 ^a
Saccharose in g kg ⁻¹ TS**	55,36	1,19 ± 2,07 ^a	4,61 ± 0,09 ^a	1,96 ± 1,83 ^a
Glucose in g kg ⁻¹ TS**	28,38	37,56 ± 18,64 ^b	83,94 ± 5,88 ^a	67,74 ± 24,67 ^{ab}
Fructose in g kg ⁻¹ TS**	17,42	18,73 ± 11,60 ^a	13,40 ± 11,76 ^a	8,01 ± 4,05 ^a
Ethanol in g kg ⁻¹ TS**	51,45	205,34 ± 62,86 ^a	79,04 ± 9,61 ^b	115,39 ± 26,40 ^{ab}
Mannitol in g kg ⁻¹ TS**	15,54	109,41 ± 31,55 ^a	145,66 ± 22,21 ^a	118,02 ± 32,90 ^a

Unterschiedliche Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede (p ≤ 0,05),

Mittelwert und Standardabweichung von n Wiederholungen.

*Dreifachbestimmung.

**Doppelbestimmung.

Zuckerrübensilage

Die Ergebnisse des Trockensubstanz- / organischen Trockensubstanzgehalts, des chemischen Sauerstoffbedarfs und der pH-Wert-Analyse der erhaltenen Zuckerrübensilage sind in Tabelle 2 dargestellt. Signifikante Unterschiede wurden zwischen den beiden Varianten, die kleine Zuckerrübenschnitzel enthalten, nur bei den Gehalten an Glucose und Ethanol festgestellt. Ansonsten wurde auch ein signifikanter Unterschied zwischen dem TS-Gehalt der Variante 2 k und den Varianten 5 k und 5 g festgestellt.

Der Vergleich der Eigenschaften der Zuckerrübe vor und nach dem Silieren zeigt, dass sich der Essigsäuregehalt während des Silierens verdreifachte und der Milchsäuregehalt um mehr als das Sechsfache anstieg. Die Saccharose wurde während des Silierprozesses fast vollständig abgebaut. Der Gehalt an Glucose und Fructose in der Silage stieg im Vergleich zu den Zuckerrüben an. Der größte Unterschied zwischen der Zuckerrübensilage und den Zuckerrüben wurde beim Alkoholgehalt festgestellt. Der CSB-Gehalt stieg während des Silierens um etwa 30 % an.

Sickersaft

Zunächst wurde eine intensive Sickersaftproduktion beobachtet. Diese ließ nach etwa zwei bis drei Wochen nach. Eine Änderung der Rate der Sickersaftproduktion wurde bei allen Varianten zwischen dem 14. und 19. Tag des Tests festgestellt. Bis dahin wurden folgende Ergebnisse erzielt: 17 kg Sickersaft (49 % der Gesamtproduktion bei Variante 2 k), 55 kg Sickersaft (49 % der Gesamtproduktion bei Variante 5 k) und 53 kg Sickersaft (40,5 % der Gesamtproduktion bei Variante 5 g). In Abbildung 3 ist die durchschnittliche kumulative Produktion von Zuckerrübensickersaft in kg kg^{-1} eingelagerter Frischmasse dargestellt.

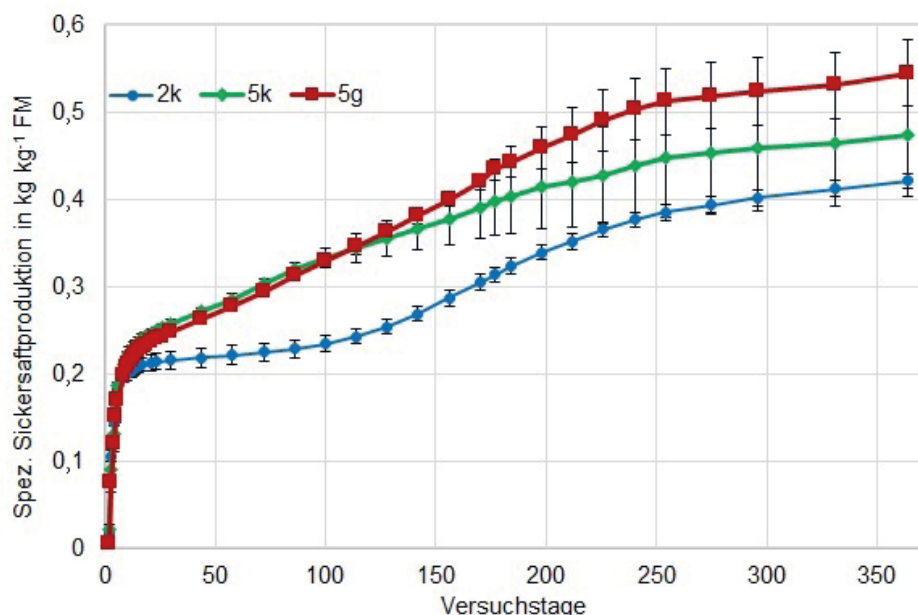


Abbildung 3: Die spezifische Sickersaftbildung aus Zuckerrübenschnitzelsilage aller untersuchten Varianten (2 k: 2 m Stapelhöhe klein gehäckselt, 5 g: 5 m Stapelhöhe grob gehäckselt, 5 k: 5 m Stapelhöhe klein gehäckselt)

Der Zuckerrübensickersaft zeichnete sich durch extrem hohe und gleichbleibende CSB-Gehalte von etwa 250 g l⁻¹ aus. Der pH-Wert des Sickersaftes lag etwa bei 3,9 und nahm mit der Lagerzeit weiter ab. Nach etwa 2,5 Monaten verlangsamte sich die Geschwindigkeit der pH-Wert-Abnahme. Der endgültige erreichte pH-Wert betrug etwa 3,38. Die Änderungen des pH-Wertes gingen mit Änderungen der Zusammensetzung des Sickersaftes einher. Abbildung 4 zeigt die Veränderungen der pH-Werte und die Gehalte an Essigsäure, Milchsäure, Saccharose, Glucose und Alkoholen im Sickersaft für alle untersuchten Varianten.

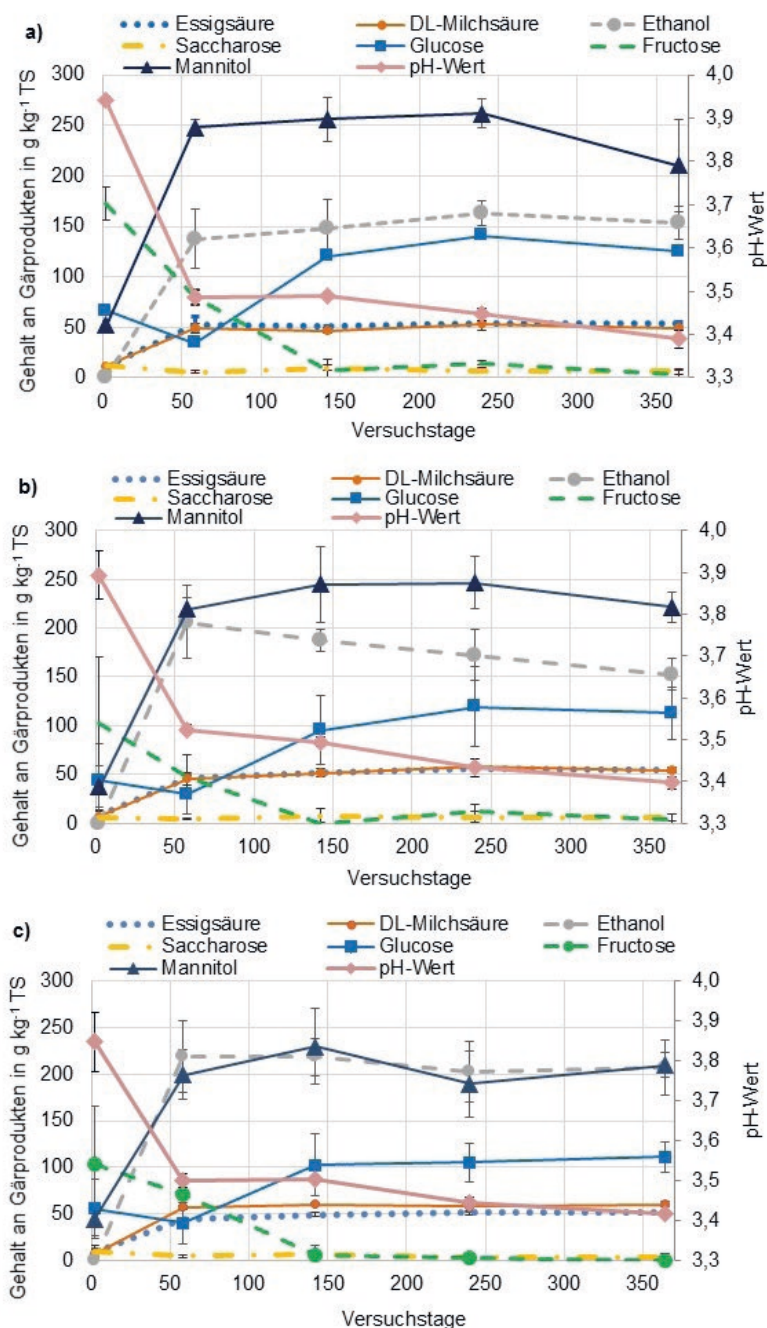


Abbildung 4: Der Gehalt an Gärprodukten und der pH-Wert des Zuckerrübensilagesickersaftes bei a) 2 k: 2 m Stapelhöhe, klein gehäckselt, b) 5 k: 5 m Stapelhöhe, klein gehäckselt, c) 5 g: 5 m Stapelhöhe, grob gehäckselt

Zu Beginn der Sickersaftproduktion (Versuchstag 2) enthielt der erzeugte Sickersaft vorrangig Glucose und Fructose. Der Prozess des Saccharose-Abbaus zu Fructose und Glucose war praktisch abgeschlossen und Saccharose war nur noch in kleinen Mengen vorhanden. Im Laufe des Versuches, bis etwa zum 58. Tag, fiel der Gehalt an Fructose und Glucose aufgrund der Umwandlung der Zucker in Alkohole und Säuren, insbesondere in Mannitol und Ethanol, stark ab. Der Gehalt an Mannitol im Sickersaft der Varianten 2 k und 5 k überschritt sogar den Gehalt an Ethanol. Die Alkoholproduktion verlangsamte sich später. Um den 58. Versuchstag stoppte auch die Säureproduktion und die Konzentration blieb anschließend nahezu unverändert.

Die Veränderungen in der Zusammensetzung des Sickersaftes waren für alle untersuchten Varianten ähnlich, obwohl unterschiedliche absolute Werte der Konzentration von Zuckern und Alkoholen gemessen wurden. Die größten Unterschiede wurden in der Ethanolkonzentration festgestellt, die bei den 5-m-Säulen fast doppelt so hoch waren wie bei den 2-m-Säulen.

Reduktion der Höhe des Zuckerrübenstapels

Der Verlauf der Abnahme der Zuckerrübenstapelhöhe folgte im Wesentlichen umgekehrt proportional dem Verlauf der Sickersaftproduktion. Die Abnahme der Zuckerrübenstapelhöhe im Zeitverlauf der Variante 2 k ist in Abbildung 5 dargestellt.

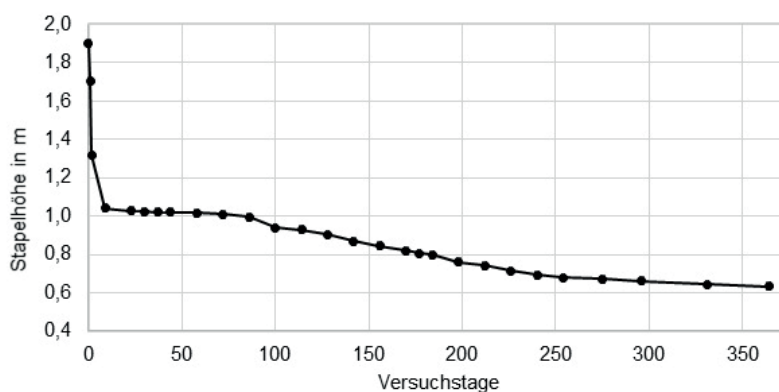


Abbildung 5: Abnahme der Stapelhöhe in den 2 m Säulen mit Silage aus kleinen Zuckerrübenschnitzeln (Variante 2 k)

Nach dem Füllen der Säulen maß der Stapel $1,90 \pm 0,00$ m. Bis zum 9. Tag reduzierte sich die Stapelhöhe auf 55 % ($1,04 \pm 0,003$ m). Danach nahm die Stapelhöhe langsamer ab und sie verringerte sich bis zum 106. Tag auf 50 % ($0,94 \pm 0,003$ m). Nach Abschluss des Experiments, nach 364 Tagen, hatte sich die Stapelhöhe auf etwa 33 % ($0,63 \pm 0,002$ m) der anfänglichen Höhe reduziert.

Bei den 5-m-Säulen konnte die Reduktion der Zuckerrübenstapelhöhe nur nach Beendigung des Versuches bestimmt werden. Nach dem Füllen der Säulen maß der Stapel $4,90 \pm 0,05$ m. Die durchschnittliche Stapelhöhe reduzierte sich bei Variante 5 k auf 31,67 % ($1,55 \pm 0,21$ m) und bei Variante 5 g auf 26,50 % ($1,34 \pm 0,1$ m).

Die Schüttdichte der Stapel, berechnet aus dem Innendurchmesser der Säulen und der Stapelhöhe im Verhältnis zur Masse, betrug nach dem Befüllen der Säulen für die Variante 2 k $611 \pm 13 \text{ kg m}^{-3}$, für 5 k $714 \pm 7 \text{ kg m}^{-3}$ und für 5 g $707 \pm 5 \text{ kg m}^{-3}$. Nach Beendigung des Versuchs konnte eine starke Verdichtung der Stapel beobachtet werden. Die Dichte der Silagestapel bei Beendigung des Versuches betrug für die Variante 2 k $896 \pm 14 \text{ kg m}^{-3}$, für 5 k $1.080 \pm 17 \text{ kg m}^{-3}$ und für 5 g $1.065 \pm 13 \text{ kg m}^{-3}$. Damit erreichen die Stapel in etwa die Dichte von Zuckerrüben (KROMER et al. 2004). Dies kann durch die eigenen Beobachtungen bestätigt werden. Die Stapel waren nach dem Entleeren nahezu formstabil und enthielten nur noch ein sehr geringes Porenvolumen.

Gasproduktion

Der überwiegende Anteil des produzierten Gases war Kohlenstoffdioxid mit Spuren von Wasserstoff. Die durchschnittliche kumulative Kohlenstoffdioxidproduktion während der Silierung von Zuckerrübenschnitzeln, ausgedrückt in kg kg^{-1} Frischmasse, ist in Abbildung 6 dargestellt.

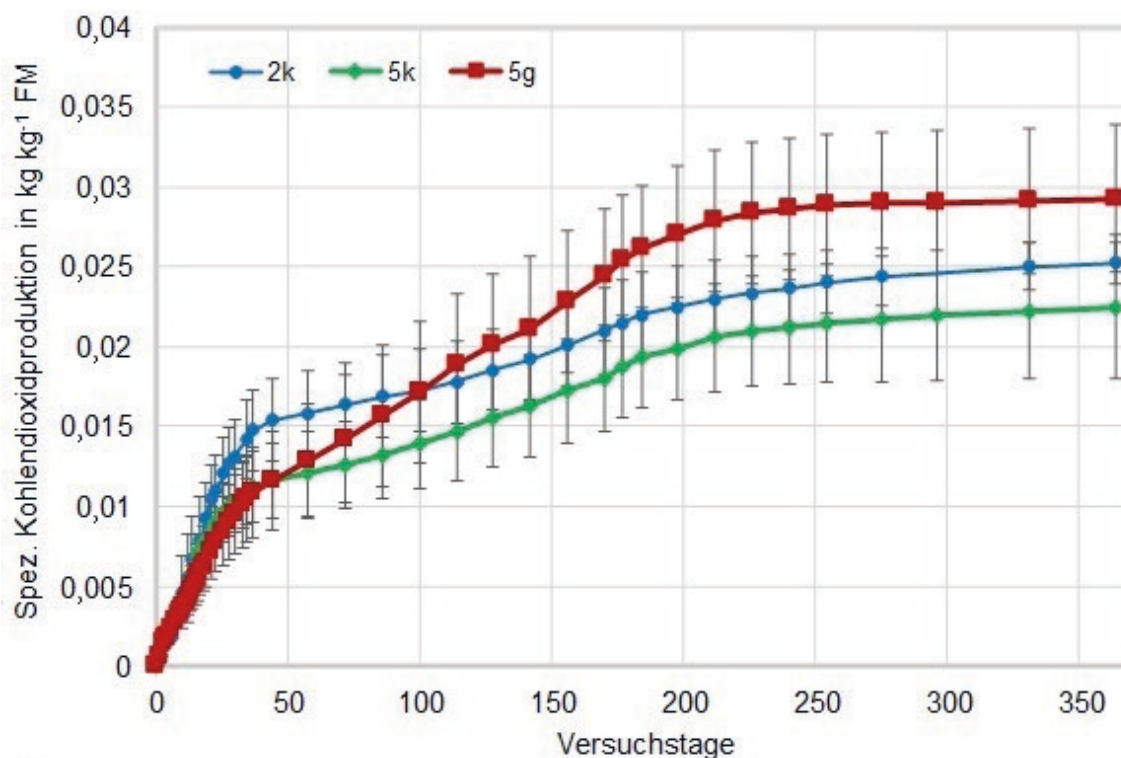


Abbildung 6: Spezifische Kohlenstoffdioxidproduktion von Silage aus gehäckselten Zuckerrüben aller Varianten (2 k: 2 m Stapelhöhe, klein gehäckselt, 5 g: 5 m Stapelhöhe, grob gehäckselt, 5 k: 5 m Stapelhöhe, klein gehäckselt)

Zu Beginn des Prozesses wurde eine intensive Kohlenstoffdioxidproduktion festgestellt. Um den 44. Versuchstag verringerte sich die Kohlenstoffdioxidproduktion bei allen Varianten. Zu Beginn des Versuchs wurde die höchste spezifische Kohlenstoffdioxidproduktion bei der Variante 2 k festgestellt. Am 100. Tag des Experiments übertraf jedoch das Volumen an Kohlenstoffdioxid der Variante 5 g das der Variante 2 k. Ab dem 100. Tag hatte die Variante 5 g die höchste durchschnittliche spezifische Kohlenstoffdioxidproduktion. Die geringste spezifische Kohlenstoffdioxidproduktion wurde durchgängig bei der Variante 5 k beobachtet.

Diskussion

Die durchschnittliche Masse an erzeugtem Zuckerrübensickersaft betrug $42,13 \pm 1,00\%$ (2 k), $47,50 \pm 7,00\%$ (5 k) und $54,50 \pm 4,00\%$ (5 g) der eingelagerten Masse. Dieses stimmt mit der Literatur überein (DEININGER 1995, KRÖHL et al. 2013). Die in dieser Untersuchung erreichten Durchschnittswerte von $0,03 \pm 0,004$ (2 k), $0,02 \pm 0,005$ (5 k) und $0,03 \pm 0,005$ (5 g) kg CO₂ pro kg ähneln denen von KREUGER et al. (2011) zur Silierung von Rüben (maximal 3,3% des eingelagerten Rübengewichtes).

Es wurde kein Einfluss der Parameter Stapelhöhe oder Häckselgröße auf die Sickersaftproduktion festgestellt. Nur die Kombination beider Parameter zeigte eine Wirkung auf die Sickersaftproduktion. Auf die CO₂-Produktion wurde dagegen weder durch die einzelnen noch durch die Kombination beider Parameter ein Einfluss festgestellt.

Die hohen CSB-Werte des Sickersaftes von ca. 250 g l⁻¹, die zu den hohen Konzentrationen an löslichen organischen Verbindungen und den niedrigen pH-Werten passen, bekräftigen die Aussage von WAGNER et al. (2010), dass der produzierte Sickersaft genauso wertvoll ist wie die restliche Zuckerrübensilage.

Die höchsten Lagerungsverluste wurden bei der Variante 5 g festgestellt. Dieses stimmt mit MAURITZ (1992) überein. Dieser fand heraus, dass der Trockensubstanzgehalt des Materials, dessen Dichte und die Stapelhöhe die Verluste während des Silierens beeinflussen. Die in der vorliegenden Untersuchung durchgeführte statistische Analyse zeigte jedoch keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der Verluste zwischen den untersuchten Varianten. Es wurde lediglich ein geringer Gehalt an Saccharose in den eingelagerten Zuckerrüben von nur $55,36 \pm 0,41$ g kg⁻¹ TS (Tabelle 2) nachgewiesen. Daraus wurde gefolgert, dass es bei der Mietenlagerung der Zuckerrüben am Feldrand zu einer Verringerung des Zuckergehaltes gekommen sein musste. Laut Literaturangaben (BISCHOFF et al. 2017) beträgt der Gehalt an Zucker (in frischen Rüben hauptsächlich Saccharose) 658,6 g kg⁻¹ TS. Laut SCHMITZ und KROMER (2004) hängt die Höhe der Zuckerverluste von der Lagerzeit, der Abdeckung der Zuckerrüben und den Wetterbedingungen in der Region ab. Da eine gewisse Zeitspanne zwischen Ernte und Lagerungsversuchsbeginn nicht vermieden werden kann, ist es für den eigentlichen Lagerungsversuch vorteilhaft, die erste Probe bei der Einlagerung zu nehmen, da ansonsten die Verluste zwischen Ernte und Einlagerungsbeginn mit in die Bilanz eingehen. Nach Herrmann (2010) verbessert die Reduktion der Partikelgröße des Pflanzenmaterials die Fermentationsbedingungen, verbunden mit der schnellen Bildung von Säuren und der schnellen Reduktion des pH-Wertes. Der pH-Wert des Sickersaftes der Silage aus kleinen Zuckerrübenschnitzeln nahm auch in unserem Versuch stärker ab. Die größten Unterschiede in der Silage der untersuchten Varianten wurden bei den Gehalten an Trockensubstanz, Glucose und Ethanol gefunden.

Die im Laufe der Zeit beobachteten Veränderungen in der Sickersaft- und Kohlenstoffdioxidproduktion können mit logarithmischen Funktionen beschrieben werden. Die Veränderung der Intensität der Sickersaftproduktion, die innerhalb der ersten 20 Versuchstage beobachtet wurde, ähnelte den Beobachtungen bei anderen Untersuchungen, nach denen der Höhepunkt der Sickersaftproduktion typischerweise innerhalb von zehn Tagen nach der Silierung erreicht wurde (GEBREHANNA et al. 2014). KÜNTZEL und ZIMMER (1972) zeichneten ebenso eine Veränderung der Gasbildung nach dem 14. Tag der Silierung auf. Die in der Literatur beschriebenen Veränderungen in der Gasproduktion fanden unter den Bedingungen dieser Studie fast nach einer doppelt so langen Zeitspanne statt. Diese Tatsache könnte durch die Untersuchungen von GEBREHANNA et al. (2014) erklärt werden, nach denen mehrere Faktoren, wie beispielsweise der Feuchtigkeitsgehalt der Pflanzen, Wetterbedingun-

gen, mechanische oder chemische Erntebehandlungen, die Sickersaftproduktionsraten beeinflussen. Auch HERRMANN (2010) bestätigte die Auswirkung des Trockensubstanzgehaltes der Pflanze und des Ausmaßes ihrer Zerkleinerung auf die Sickersaftproduktion.

Die Ergebnisse der Lagerungsversuche wurden teilweise von MAURITZ (1992) bestätigt, der aus sagt, dass die Verringerung der Partikelgröße die Zerstörung von Pflanzengewebe verursacht und je größer diese Verringerung ist, desto schneller der Sickersaft gebildet wird. Zu Beginn des Versuchs wurde die schnellste Sickersaftproduktion in Variante 5 k festgestellt. Diese wurde jedoch nach 114 Tagen von der Variante 5 g übertroffen. Dies bedeutet, dass über die gesamte Lagerungsdauer die spezifische Sickersaftproduktion bei größeren Stapelhöhen und auch bei größeren Partikeln höher war. Die Silage aus kleinen Zuckerrübenschnitzeln erschwerte es dem Sickersaft, durch deren höhere Oberfläche und Lagerungsdichte, durch den Stapel zu sickern. Die durchgeführte Analyse des Gehalts an TS/oTS der erhaltenen Zuckerrübenschnitzelsilage bestätigte dies: Der Trockensubstanzgehalt war bei der Silage großer Zuckerrübenschnitzel höher (Tabelle 2).

Laut SCHULDT et al. (2011) hat der Sickersaft dank sehr hoher Gehalte an Ethanol und Gär säuren einen Methanertrag auf dem Niveau von nicht silierten, frischen Zuckerrüben. Die Ergebnisse des HBT-Tests haben sogar bewiesen, dass der Sickersaft einen höheren spezifischen Methanertrag als die unsilierten Zuckerrüben hat (Tabelle 1). Laut BUXTON et al. (2003) führt die Mischung von Milchsäure- und Alkoholgärung während der Zuckerrübensilierung zu erheblichen Verlusten in der Trockensubstanz, aber nur zu einer geringen Minderung des Methanertragspotenzials durch die Produktion von energiereichem Ethanol. Laut WEISSBACH (2009) ist der Methanertrag von Ethanol (693 l kg^{-1}) fast doppelt so hoch wie der von Milchsäure (355 l kg^{-1}). Im eigenen Versuch wurde während des Silierprozesses immerhin eine Verdopplung der Ethanolkonzentration beobachtet.

HERRMANN (2010) behauptete, dass die Verluste während des Silierprozesses durch die Fermentationsprozesse verursacht werden. Allerdings stellten DIRKS et al. (2017) fest, dass die Alkoholproduktion während des Silierens einen signifikanten Effekt auf die Verluste hat. Diese Aussage wurde durch unsere Analysen des Ethanolgehalts im Sickersaft bestätigt. Der höchste Ethanolgehalt wurde bei der Variante 5 g gemessen und diese wies ebenfalls die höchste Kohlenstoffdioxidproduktion auf. Die geringste CO_2 -Produktion wurde dagegen bei der Variante 5 k beobachtet, dessen Sickersaft auch den geringsten Gehalt an Ethanol hatte. Das Gegenteil wurde zum Gehalt an Mannitol im Sickersaft beobachtet. Der niedrigste Mannitolgehalt im Sickersaft wurde bei der Variante 5 g nachgewiesen. Die beobachtete Stapelhöhenreduktion auf 33 % (2 k), 31,67 % (5 k) und 26,50 % (5 g) verhielt sich analog zu der Masse an produziertem Sickersaft.

Schlussfolgerungen

Das schnelle Einsetzen der Sickersaftproduktion und die großen Mengen müssen bei der Zuckerrübensilierung beachtet werden. Der hohe CSB-Gehalt und die leichte Abbaubarkeit machen den Sickersaft interessant für die Verwendung als flüssiges Substrat, z. B. zur bedarfsgerechten Biogasproduktion.

Die Stapelhöhe wie auch die Partikelgröße hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Massenbilanz. Nur die Kombination beider Parameter zeigte einen Effekt auf die Sickersaftproduktion. Die Variante 2 k wies den höchsten Ertrag an Silage auf (Silage: $60,50 \pm 6,73\%$ FM, Sickersaft: $42,13 \pm 1,00\%$ FM, CO_2 : $2,51 \pm 0,38\%$ FM). Während die Variante 5 g den meisten Sickersaft produzierte (Silage: $42,15 \pm 3,00\%$ FM, Sickersaft: $54,50 \pm 4,00\%$ FM, CO_2 : $2,93 \pm 0,50\%$ FM).

Literatur

- Analytic Jena AG (2010): Bestimmung des TOC in Feststoffen: Vergleich der TOC-Suspensionsmethode mit der herkömmlichen trockenen Verbrennung SP_TOC_02_10-d. Analytic Jena AG
- Berlin Energy Transition Dialogue (2016): Press Fact Sheet: The German Energy Transition. https://www.energiewende2016.com/wp-content/uploads/2016/03/BETD2016_Press_Factsheet_Layout_1603.pdf, Zugriff am 22.11.2017
- Bischoff, M.; Gruber, W.; Heilmann, H.; Hermus, S.; Lemmer, A.; Schaiper, D.; Strobl, M.; Thaysen, J. (2017): Zuckerrüben in Biogasanlagen: Verfahren – Lagerungsverluste – Kosten. KTBL-Heft 120, S. 1–48
- Bugdahl, B. (2013): Zuckerrüben und Stroh gemeinsam silieren. Bauernblatt, S. 52–54
- Buxton, D.R.; Muck, R. E.; Harrison, J. H. (2003): Silage science and technology. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc.
- Carr, F. J.; Chill, D.; Maida, N. (2002): The lactic acid bacteria: a literature survey. *Critical Reviews in Microbiology* 28(4), pp. 281–370
- Deiningner, A. (1995): Flüssig konservierte Beta-Rüben in der Rinderfütterung – Verfahrenstechniken und Leistungsfähigkeit. Dissertation, Universität Hohenheim, Stuttgart
- De Lemos Chernicharo, C.A. (2007): Biological Wastewater Treatment – Anaerobic Reactors. Vol. 4, IWA Publishing
- Dirks, S.; Schaiper, D.; Büscher, W.; Schulze Lammers, P. (2017): Conservation of sugar beet for substrate supply of biogas plants – Procedure of ensiling and losses in 12 varieties. *Landtechnik* 72, pp. 61–75
- Erdeljan, H. (1994): Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Flüssigkonservierung von Beta-Rüben für die Schweinemast. Dissertation, Universität Hohenheim, Stuttgart
- European Commission (2009): Commission regulation (EC) No 152/2009 of 27 January 2009 laying down the methods of sampling and analysis for the official control of feed. *Off J Eur Union*, L54: pp. 1–130
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) e.V. (2016): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2016. http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_20162.pdf, Zugriff am 22.11.2017
- Gebrehanna, M.M.; Gordon, R.J.; Madani, A.; VanderZaag, A.C.; Wood, J.D. (2014): Silage effluent management: a review. *Journal of Environmental Management* 143, pp. 113–122
- Heilmann, H. (2013): Silierung von ZR in offenen Folienbecken. *Zuckerrübe* 1, S. 48–51
- Helffrich, D.; Oechsner, H. (2003): The Hohenheim Biogas Yield Test comparison of different laboratory techniques for the digestion of biomass. *Landtechnik* 3, pp. 148–149
- Herrmann, Ch. (2010): Ernte und Silierung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung – Prozessgrundlagen und Bewertung. Dissertation, Universität Berlin
- Jacobs, A.; Auburger, S.; Bahrs, E.; Brauer-Siebrecht; Christen, O.; Götze, P.; Koch, H.-J.; Mußhoff, O.; Rücknagel, J.; Märkländer, B. (2017). Replacing silage maize for biogas production by sugar beet – A system analysis with ecological and economical approaches. *Agricultural systems* 157, pp. 270–278
- Jones, D.I.; Jones, R. (1995): The effect of crop characteristics and ensiling methodology on grass silage effluent production. *Journal of Agricultural Engineering Research* 60, pp. 73–81
- Krakat, N.; Westphal, A.; Satke, K.; Schmidt, S.; Scherer, P. (2010): The microcosm of a biogas fermenter: Comparison of moderate hyperthermophilic (60 °C) with thermophilic (55 °C) conditions. *Eng. Life Sci.* 10(6), S. 520–527
- Kreuger, E.; Nges, I.A.; Björnsson, L. (2011): Ensiling of crops for biogas production: effects on methane yield and total solid determination. *Biotechnology for Biofuels* 4, pp. 1–8
- Kromer, K.-H.; Bertram, H.H.; Beckmann, A.; Heier, L.; Heintges, M.; Jakubowski, H.; Stretz, J. (2004): Test Procedures for Measuring the Quality of Sugar Beet-Seed, Drillability, Precision Seeders, Harvesters, Cleaner Loaders. IIRB, Brüssel, Belgien
- Kröhl, M.; Jourdan, H.; Schaffner, S. (2013): Silage aus ganzen Zuckerrüben im Fahrsilo: Zuckerrüben als Substrat in Biogasanlagen. *Biogas* 132, S. 38–43

- Küntzel, U.; Zimmer, E. (1972): Untersuchungen über Vorkommen, Veränderung und Verbrauch von Kohlenhydraten bei der Silierung. Braunschweig, Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 13, S. 1–89
- Laube, W. (1967): Zur Problematik der Silierung zuckerreicher Futterstoffe unter besonderer Berücksichtigung der Alkoholbildung. In: Die naturwissenschaftlichen Grundlagen der Silierung. Vorträge und Diskussionen eines internationalen Symposiums des Oskar-Kellner-Instituts für Tierernährung Rostock der Deutschen Akademie der Landwirtschaften zu Berlin vom 26.-28. Sept. 1966. Band 92 von Tagungsbericht, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, S. 169–176
- Lee, W.H. (1967): Carbon balance of a mannitol fermentation and the biosynthetic pathway. *Applied Microbiology* 15, pp. 1206–1210
- Lindner, J.; Zielonka, S.; Oechsner, H.; Lemmer, A. (2015): Effect of different pH-values on process parameters in two-phase anaerobic digestion of high-solid substrates. *Environmental Technology* 36(2), pp. 198–207
- Mauritz, S. (1992): Der Einfluß verfahrenstechnischer Maßnahmen zur Minderung der Silierverluste von Fütterrüben. Dissertation, Technische Universität München, Freising
- Mioduszewska, N.; Pilarski, K.; Przybył, J.; Dach, J.; Zhou, M. (2009): Sugar beet production as a substrate for biogas plants in aspect of polish sugar industry revitalization. *Innovation and technology transfer*. https://ramiran.uvlf.sk/ramiran2010/docs/Ramiran2010_0151_final.pdf, Zugriff am 22.11.2017
- Mittweg, G.; Oechsner, H.; Hahn, V.; Lemmer, A.; Reinhardt-Hanisch, A. (2012). Repeatability of a laboratory batch method to determine the specific biogas and methane yields. *Eng. Life Sci.* 12, pp. 270–278
- Olsen, E. (1951): The fermentation of sugar beet silage. *J. gen. Microbiol.* 5, pp. 817–829
- Saha, B.C.; Racine, F.M. (2011): Biotechnological production of mannitol and its applications. *Appl Microbiol Biotechnol* 89, pp. 879–891
- Schattschneider, P.; Braun, J.; Schäfer, B.C.; Schaffner, S.; Stibbe, C. (2011): Energierüben kostengünstig gelagert. *top agrar* 3, S. 94–97
- Schmitz, S.; Kromer, K.-H. (2004): Verluste bei der Kurzlagerung von Zuckerrüben in Feldrandmieten. *Landtechnik* 59(2), S. 84–85
- Schuldt, A.; Dinse, R.; Wendt, S. (2011): Zucker- und Energierüben ganzjährig als Gärsubstrat in Biogasanlagen einsetzen – wie hoch sind die Verluste an Biogasertragspotential durch die Lagerung und Konservierung in Mieten und Silos? https://www.hs-nb.de/fileadmin/hs-neubrandenburg/ppages/Schuldt/Forschung/Ermittlung_der_Ertragswuerdigkeit/Biogaspotenzial_von_Zucker_20-12-12_01.pdf, Zugriff am 22.11.2017
- Song, S.H.; Vieille, C. (2009): Recent advances in the biological production of mannitol. *Appl Microbiol Biotechnol* 84, pp. 55–62
- Vargas-Ramirez, J.M.; Haagenson, D.M.; Pryor, S.W.; Wiesenborn, D.P. (2013): Determination of suitable storage conditions to preserve fermentable sugars in raw thick beet juice for ethanol production. *Biomass and Bioenergy* 59, pp. 362–369
- Vazifekhoran, A.H.; Triolo, J.M.; Larsen, S. U.; Stefanek, K.; Sommer, S.G. (2016): Assessment of the variability of biogas production from sugar beet silage as affected by movement and loss of the produced alcohols and organic acids. *Energies* 9(368), pp. 1–11
- VDI (2006): VDI 4630: Fermentation of organic materials characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. pp. 1–92
- Wagner, A.; Scholtissek, M.; Auerbach, H.; Herbes, C.; Weißbach, F. (2010): Eine Frage der Konservierung. *Biogas Journal* 3, S. 58–61
- Weißbach, F. (2009): Gas production potential of fresh and ensiled sugar beets in biogas production. *Landtechnik* 64(6), pp. 394–397
- Weißbach, F.; Parr, K. (2013): Füllstandshöhe mindert Verluste. Silierung von Zuckerrübenbrei in Lagunen. *Biogas* 132, S. 38–43
- Weißbach, F.; Parr, K.; Reinsdorf, U.; Warnke-Gurgel, Ch.; Losand, B. (2013): Verluste an Methanbildungspotenzial von Zuckerrübenmus in offenen Erdbecken. *Landtechnik* 68(1), S. 50–57

- Weißbach, F.; Strubelt, C. (2008): Correction of dry matter content in sugar beet silages as a substrate for biogas production. *Landtechnik* 63, pp. 354–356
- Wisselink, H.W.; Weusthuis, R.A.; Eggink, G.; Hugenholtz, J.; Grobden, G.J. (2002): Mannitol production by lactic acid bacteria: a review. *International Dairy Journal* 12, pp. 151–161
- Wojtczak, M.; Antczak-Chrobot, A.; Chmal-Fudali, E.; Papiewska, A. (2013): Determination of microbiological activity during the processing of frost damaged sugar beets. *Sugar industry* 138(12), pp. 1–4

Autoren

Elzbieta Kumanowska ist Doktorandin, **Dr. Simon Zielonka** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Dr. Hans Oechsner** ist Leiter der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim, Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart, E-Mail: elzbieta.kumanowska@uni-hohenheim.de

Hinweise und Danksagungen

Diese Forschung wurde gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages.

Die Autoren bedanken sich bei dem Projektpartner Novatech GmbH für die gute Zusammenarbeit.

Die Autoren danken Annette Buschmann (Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie) für die Analyse zahlreicher Proben und die Entwicklung der Methode zur Bestimmung des Mannitolgehaltes.

Dank gilt auch allen Mitarbeitern der landwirtschaftlichen Forschungsstation Ihinger Hof, die bei der Bereitstellung der Zuckerrübensilage geholfen haben.