

Silierung von Rasenschnitt für die energetische Nutzung in einer Biogasanlage

Oldenburg, S., L.S. Cici und K. Kuchta

Einführung

In Anbetracht der wachsenden Weltbevölkerung und des daraus resultierenden Anstiegs des Bedarfs an Energie, müssen Alternativen zu den endlichen fossilen Energieträgern gefunden werden. Entscheidend dabei ist, dass die alternativen Lösungswege weder den Ausstoß an Treibhausgasen erhöhen, noch in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen. Eine Möglichkeit, welche sowohl den Klima- und Umweltschutz stärkt, als auch die Abfallverwertung optimiert, ist die Substitution der NaWaRos in Biogasanlagen durch organische Reststoffe. Diese ist auch im Hinblick darauf, dass die Substratkosten 40 bis 60 % der jährlichen Kosten für Biogasanlagen bestimmen, ein entscheidender Faktor (Schievano et al., 2009; Hartmann et al., 2011).

Nicht alle organischen Reststoffe fallen konstant über das ganze Jahr an, z.B. sind Gras- und Rasenschnitt nur in den Sommermonaten verfügbar. Da die Biogasanlage eine konstante Substratzufuhr benötigt, muss das Material über eine bestimmte Zeitspanne möglichst verlustarm, sowohl massen- als auch energiebezogen, gelagert werden. Abhängig von dem Lagerverfahren entstehen entweder energetische Verluste oder es können Voraufschlüsse in Form eines Zellaufschlusses, einer Hygienisierung oder eine Homogenisierung stattfinden (Raupp u. Oltmanns, 2006).

Es ergibt sich, dass die Substrate für die Biogasanlage kurz- und langfristig gelagert werden müssen. Entscheidend hierbei ist, dass die energetischen Verluste so gering wie möglich gehalten werden und eine Homogenisierung stattfindet. Da organische Reststoffe bisher nicht energetisch genutzt, sondern direkt verbrannt, abgelagert oder in der Landwirtschaft stofflich verwertet wurden, existieren in der Literatur keine Informationen über deren ideale verlustarme Lagerung. Daher muss die verlustarme Lagerung praktisch untersucht und bewertet werden.

Theoretischer Hintergrund

Aus der Landwirtschaft sind verschiedene Lagerverfahren bekannt, welche zur Überbrückung der Zeitspannen zwischen dem Anfall und der Nutzung dienen (Gallert, 2009; Kaltschmitt, 2009; Demmel et al., 2010; Sommer et al., 2013). Abgesehen von den gesetzlichen Anforderungen, weitere Ausführungen z.B. in KrWG (2012), muss die Lagertechnik einfach und wirtschaftlich durchführbar sein (Gerighausen, 2011). Die Lagerung hat Einfluss auf den Erfolg und die Qualität des Materials, da durch die biochemischen und mikrobiellen Umsetzungsprozesse Veränderungen der Konzentrationen der Inhalts- und Nährstoffe erfolgen (Rühlmann, 2000). Abhängig von der nachfolgenden Nutzung werden die Lagerarten entweder darauf ausgerichtet, Nährstoffe zu erhalten oder definierte Abbauprozesse zu beschleunigen (Klingler, 2010). Dabei wird zwischen aeroben und anaeroben Lagerverfahren unterschieden.

Die anaerobe Lagerung bzw. Silierung wird für die Konservierung von pflanzlichen Materialien in der Futterherstellung und bei der Biogasproduktion eingesetzt (Wilhelm u. Wurm, 1999). Bei diesem feuchten Konservierungsverfahren unter Luftabschluss wandeln Milchsäurebakterien (MSB) die pflanzlichen Kohlenhydrate in organische Säuren um (FNR, 2013). Bei der Lagerung müssen die Anforderungen der gesetzlichen Verordnungen beachtet werden, so dass Grund- und Oberflächengewässer nicht gefährdet werden. Weitere Ausführungen sind z.B. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, (2002); WHG, (2009); KrWG, (2012) zu entnehmen. Dabei steht die Schonung der natürlichen Ressourcen und die Minimierung der Umweltbelastungen und Emissionen an oberster Stelle (Rühlmann, 2000; Gallert, 2009). Die anaerobe Lagerung erfolgt, indem das Material zuerst verdichtet und danach luftdicht abgedeckt wird (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2005; Kaltschmitt, 2009; Gerighausen, 2011), da Mikroorganismen unter Luft-

abschluss pflanzliche Kohlenhydrate in organische Säuren umwandeln. Der Silierprozess verläuft in vier charakteristischen aufeinander folgenden Phasen (McDonald et al., 1991; Banemann, 2010; Kuoppala, 2012). Die Mikrobiologie gibt Aufschluss darüber, welche Sorte und in welcher Anzahl Mikroorganismen auf dem Substrat vorliegen. Dabei kommt den MSB bei der Silierung die wichtigste Bedeutung zu. Sie müssen sich für eine erfolgreiche Konservierung gegenüber den Gärschädlingen durchsetzen und die verfügbaren Pflanzenzucker zu Milchsäure fermentieren (McDonald et al., 1991). Die unerwünschten Mikroorganismen, vor allem Hefen und Schimmelpilze, führen in großen Mengen zum Verderb der Silage und werden durch die Milchsäureproduktion reduziert. Clostridien verstoffwechseln Kohlenhydrate zu Buttersäure und Essigsäure und wirken der Milchsäureproduktion entgegen. Sie können ebenfalls den vollständigen Verderb der Silage einleiten (Banemann, 2010). Häufig tritt als Nebenprodukt auch Essigsäure auf, die sich in geringen Mengen positiv auf die aerobe Stabilität auswirkt (Gerighausen, 2011). Essigsäurebakterien sind obligate und säuretolerante Bakterien und je nach Restsauerstoff im Silo aktiv. Bis zu einem bestimmten Grad ist die Essigsäure für die Hemmung der Hefen erwünscht (Banemann, 2010). Die aktiven Mikroorganismen in der Silage fermentieren die im Pflanzenmaterial vorhandenen Nährstoffe zu unterschiedlichsten Produkten. Als besonders kritisch gilt die Bildung von Buttersäure, da diese immer mit hohen energetischen Verlusten verbunden ist (McDonald et al., 1991). Als weitere Nebenprodukte des Zuckerabbaus treten Alkohole, vor allem Ethanol, und weitere organische Säuren auf. Um energetische Verluste zu vermeiden, sollte der Ethanolgehalt in der Silage geringer als 1,0%_{TS} sein. In Folge des Proteinabbaus wird Ammoniakstickstoff gebildet, dessen Gehalt 10 % des Gesamtstickstoffs nicht überschreiten sollte (Weiß, 2011), da sich ansonsten die Pufferkapazität stark erhöhen würde. Zudem sind hohe Ammoniakgehalte ein Hinweis auf fehlvergorene Silagen (Weiß, 2011).

Material und Methoden

Die langfristigen Lagerversuche dienen der Überprüfung, ob das Substrat an der Biogasanlage über die Wintermonate gelagert werden kann und damit ganzjährig zur Verfügung steht. Die Versuche im Labormaßstab dienen dabei zur Überprüfung, ob generell eine Lagerfähigkeit existiert. Die Praxisversuche zeigen auf, in welcher Höhe diese Verluste mit dem derzeitigen Stand der Technik tatsächlich auftreten.

Versuchsdurchführung

Ziel der Versuchsreihen ist die Untersuchung der energetischen Verluste von Rasenschnitt bei der Konservierung in Form von Silierung. Es handelt sich um Langzeitversuche, die der Deckung der Schwankungen im Substratanfall zwischen Sommer und Winter dienen. Hierfür werden zwei Versuchsreihen, einmal im Labor- und einmal im Praxismaßstab, durchgeführt.

Ziel der **Versuchsreihe V1** ist es, die Auswirkungen der Silierung und der Lagerung als Silage auf den Energiegehalt des Rasenschnitts zu untersuchen. Auf Basis der vorgestellten Grundlagen der Silierung und den aus der Literatur bekannten durchschnittlichen Werten für Rasenschnitt werden die Einflussfaktoren auf die Silierung sowie die mit ihnen verbundenen Verluste und die Ansätze zur Reduzierung der Verluste erstellt. Darauf aufbauend wird ein Konzept zur

verlustarmen Lagerung entworfen und im Labormaßstab durchgeführt. Die Silierversuche werden in Kooperation mit dem ISF durchgeführt. Das Substrat wird in jeweils einem 5 L Eimer mit einer Laborpresse verdichtet und luftdicht verschlossen. Zur Analyse des Silierprozesses werden vier verschiedene Öffnungen (Tag 5, 14, 30 und 90) mit anschließender aerober Lagerphase durchgeführt und die Proben auf ihr energetisches Potenzial untersucht.

Für die theoretische Verlustermittlung wurden die Einflussfaktoren auf die Silierung sowie die mit ihnen verbundenen Verluste und die ermittelten Ansätze zur Reduzierung der Verluste zusammengefasst (Tabelle 1). Zu erkennen war, dass der TS-Gehalt nicht ideal ist und daher ein Anwelken stattfinden muss. Zusätzlich mussten ein optimaler Luftabschluss sowie ein nicht zu hoher Anpressdruck beachtet werden. Es ergibt sich, dass eine Silierung von Rasenschnitt theoretisch möglich und bei optimaler Durchführung nur mit den nicht vermeidbaren Verlusten von ca. 5 % verbunden ist (Zimmer, 1969).

Für die Silierung wurde Rasenschnitt von einem Rugbyplatz in Hamburg im Stadtteil Bramfeld genutzt. Dieser wurde durch regelmäßige Mahdtermine auf einer geringen Schnittlänge gehalten und eine Woche vor der Mahd mit einem NPK-Dünger gedüngt. Die Mahd des Probematerials erfolgte mit einem Auffangrasenmäher. Der Rasenschnitt wurde über Nacht zwischengelagert

und angewelkt. Vom frisch gemähten und angewelkten Substrat wurden Rückstellproben entnommen. Das Substrat wurde in jeweils einem 5 L Eimer im Dreifachansatz mit Luftabschlussbeuteln gefüllt und mit einer Laborpresse verdichtet. Der Luftabschlussbeutel wurde mit Hilfe eines Kabelbinders luftdicht verschlossen und zusammen mit dem Eimer eingewogen. Anschließend wurde der Eimer mit einem Deckel verschlossen und in eine 20 °C warme Klimakammer gestellt. Zur Analyse des Silierprozesses wurden vier verschiedene Öffnungen (Tag 5, 14, 30 und 90) durchgeführt. An Tag 5 wurde über eine pH-Wert Messung lediglich überprüft, ob eine Ansäuerung stattgefunden hat. Nach 14 Tagen sollte die Hauptgärphase abgeschlossen, nach 30 und 90 Tagen die Silage stabil sein. Von jedem Öffnungstag wurden Proben entnommen. Nach 90 Tagen schloss sich eine aerobe Lagerphase an.

Ziel der **Versuchsreihe V2** ist es, die Auswirkungen der Silierung und der Lagerung als Silage auf den Energiegehalt des Rasenschnitts im Praxismaßstab zu untersuchen. Dafür werden ein Rasenschnitt siliert und die Eigenschaften des Rasens vor und nach der Silierung sowie die Folgen einer sechsmonatigen Lagerung in Form von Silageballen untersucht. Die Lagerung der Proben erfolgt dabei im Freien unter realen Versuchsbedingungen, um den Einfluss von Temperaturschwankungen, Luftdruckveränderungen und Witterung einzubeziehen.

Einflussfaktor	Verluste	Lösungsansatz
TS-Gehalt	Bis zu 8 % durch Sickersaft, bis zu 10 % durch Fehlgärungen	Anwelken, Wenden
Nitrat	–	–
Rohproteingehalt	–	pH-Absenkung
Z/PK-Quotient	–	–
Häcksellänge	–	–
Luftabschluss	Bis zu 10 % durch aeroben Verderb, 1 bis 2 % durch Restatmung	Optimaler Luftabschluss
Verdichtung	Bis zu 8 % durch Gärsaft	Hohen Anpressdruck vermeiden
Verschmutzung	–	–
Silierdauer	Bis zu 10 % durch Nacherwärmung	Hohe Verdichtung, optimaler Luftabschluss, ausreichender Vorschub
Silierhilfsmittel	4 bis 10 % durch Vergärung	Kombinationsprodukte einsetzen

Tab. 1: Einflussfaktoren, damit verbundene Verluste und Lösungsansätze zur Silierung von Rasenschnitt.

Für den Silierversuch wurde Rasen von einer öffentlichen Wiese und einem öffentlichen Friedhof in Bergedorf mit Auffangmähern gemäht und der Rasenschnitt in einem 15 m³ Container gesammelt. Drei Viertel der Fläche bestand aus gelbem, trockenem Rasen und ein Viertel aus grünem Rasen. Es wurden von beiden Rasen Proben genommen. Die Rasenmischung des verwendeten Substrats ist unbekannt. Die Mahd des Versuchsgebiets erfolgte ein bis drei Mal im Jahr, wobei das Material zum Mulchen auf der Fläche belassen wurde. Das Mähgut wurde in dem Container gemischt, abends mit einer Plane abgedeckt und am kommenden Tag mit einer Silierpresse bei einem Druck von 7 bar und einem Zylinder von 63 mm Durchmesser sowie einem Stempelhub von 320 mm zu Silageballen gepresst. Der gemähte Rasen war ausreichend für zwei Silageballen. Die Ballen wurden gewogen und so gelagert, dass diese im Tagesverlauf sowohl Sonne als auch Schatten erhielten. Während der Lagerung erfolgte eine Überwachung durch Temperaturmessungen über einen Zeitraum von fünf Monaten. In beiden Ballen wurden zwei kontinuierliche Temperaturmessungen durchgeführt und die Temperatur der Umgebung gemessen. Nach sechsmonatiger Lagerung wurden die Ballen erneut gewogen und Proben entnommen. Die Probenahme erfolgten jeweils direkt im Kern und außen am Ballen.

Bewertung

Für die Bewertung der Silierbarkeit sind die Parameter TS-Gehalt, der Ammoniak-N

am Gesamtstickstoff, der Z/PK-Quotient sowie der Vergärbarkeitskoeffizient (VK) entscheidend. Idealerweise sollte der **TS-Gehalt** zwischen 30 und 40 % liegen. Unter 30 % TS gibt die Silage Gärtsaft ab und es kommt zu einer Buttersäuregärung, die mit hohen Masse- und Energieverlusten verbunden ist. Bei über 40 % TS besteht, aufgrund der abnehmenden Verdichtbarkeit, die Gefahr von Nacherwärmung sowie zunehmende Atmungs- und Bröckelverluste (Thaysen, 2011). Der Anteil an **Ammoniak-N des Gesamtstickstoffs** sollte 8 % nicht überschreiten (Gerighausen, 2011). Grund hierfür ist, dass ein hoher Anteil an Nicht-Protein-Stickstoff-Verbindungen (NPN) die Pufferkapazität erhöht und den Eiweißgehalt der Silage senkt. Daher sollte der Proteinabbau bei der Silierung so gering wie möglich gehalten werden. Der sogenannte **Z/PK-Quotient** ist der Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten (WLK) im Verhältnis zur Pufferkapazität (PK). Er sollte größer gleich drei sein, mindestens jedoch zwei betragen. Siliergut mit einem Z/PK-Quotienten kleiner als zwei gilt als schwer silierbar. Ist der Z/PK-Quotient größer als acht, besteht die Gefahr hoher Restzuckergehalte und damit verbundener Nacherwärmung und alkoholischer Gärung (Gerighausen, 2011). Zusätzlich ist eine möglichst hohe Konzentration an WLK wichtig für den Erfolg der Silage, da durch ihre Umsetzung durch die MSB der pH-Wert schnell abgesenkt wird (McDonald et al., 1991). Die PK gibt an, welche Menge an Basen benötigt werden, um den pH-Wert von 1 kg_{TS} von pH 4 auf pH 6 anzuheben (McDonald

et al., 1991). Der **Vergärbarkeitskoeffizient (VK)** bezieht die drei chemischen Einflussfaktoren TS, Zuckergehalt (Z) und PK ein und sollte größer gleich 45 sein, damit eine erfolgreiche Silierung erfolgen kann (Gerighausen, 2011). **Verschmutzungen** in der Silage treten primär durch Sand oder Erde auf. Da Clostridien bodenbürtige Mikroorganismen sind, kommen sie somit vermehrt in verschmutzten Erntegütern vor. Fehlgärungen und damit verbundene üble Gerüche sind die Folgen. Als Indikator für die Verschmutzung einer Silage dient der Rohaschegehalt. Er sollte für eine gute Silagequalität geringer als 10 % sein (Gerighausen, 2011). Der Rohfasergehalt sollte idealerweise weniger als 25 % betragen und die Häcksellänge von 20 bis 40 mm nicht unterschritten werden (Thaysen, 2011).

Eine zusätzliche Bewertung der Gärqualität kann nach dem DLG-Schlüssel 2006 anhand der Gehalte der unerwünschten Stoffabbauprodukte erfolgen. Dieses Vorgehen hat sich gegenüber der Bewertung anhand der erwünschten Inhaltsstoffe in der Praxis bewährt und ist für die Beurteilung aller Grünfuttersilagen geeignet, unabhängig vom Silierverfahren oder dem Einsatz von Siliermitteln (Weiß, 2011). Es können nur erfolgreich konservierte Silagen bewertet werden. Für verschimmelte, verschmutzte oder verdorbene Silagen ist eine Bewertung nicht zulässig. Wesentlichen Einfluss auf die Gärqualität nehmen die Gehalte an Butter- und Essigsäure. Den Silagen werden anhand dieser und des pH-Werts Punktzahlen verliehen und sie werden anschließend

Parameter	Optimaler Wert (Zimmer, 1969)	Tatsächlicher Wert
Trockenrückstand [%]	30 – 40	21
pH-Wert	4,20	4,56
Rohasche [% _{TS}]	< 10	10
Rohfaser [% _{TS}]	23 – 25	18
Zucker [% _{TS}]	Je höher, desto besser	3
Pufferkapazität [g/kg _{TS}]	Je niedriger, desto besser	433
Vergärbarkeitskoeffizient	≥ 45	21,06
Z/PK-Quotient	mind. 2	0,07
NH ₃ -N am Gesamt-N [% NH ₃ -N]	< 10	7,2
Aerobe Stabilität [d]	> 3	7,75

Tab. 2: Zusammenfassende Silagebewertung von Rasen (V1).

durch eine Gesamtpunktzahl mit einer Note bewertet (Weiß, 2011). Es kann maximal eine Punktzahl von 100 erreicht werden. Für die Bewertung von Biogassilagen muss beachtet werden, dass höhere Essigsäuregehalte nicht als kritisch anzusehen sind (Gerighausen, 2011). Der Punktabzug infolge hoher Essigsäuregehalte kann daher außer Acht gelassen werden.

Zusätzlich zu dieser Bewertung erfolgt eine Biogaspotenzialbestimmung der Rasenproben nach der VDI-Norm 4630 (Verein Deutscher Ingenieure, 2006), mit welcher die tatsächlich entstehenden energetischen Verluste bestimmt werden.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Versuchsreihen bezüglich der Konservierung von Rasenschnitt ausgewertet und hinsichtlich der energetischen Verluste für die ganzjährige Nutzung in einer Biogasanlage bewertet.

Versuchsreihe 1

In Tabelle 2 ist eine Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsreihe V1 im Vergleich zu den optimalen Werten nach Zimmer dargestellt (Zimmer, 1969).

Der pH-Wert liegt oberhalb des kritischen pH-Wertes von 4,20 für einen TS-Gehalt von 20 %. Daher wird der pH-Wert für eine erfolgreiche Konservierung nicht unterschritten. Trotz Anwelken konnte der ideale TS-Gehalt nicht eingestellt werden. Der Rohaschegehalt liegt im idealen Bereich, so dass eine Verschmutzung ausgeschlossen werden kann und der Chlostridienbesatz daher gering blieb. Der Rohfasergehalt des Substrats beträgt 18 % TS und liegt damit unterhalb des idealen Bereichs, so dass keine Probleme bei der Verdichtung auftreten. Der Zuckergehalt ist mit 3 % TS sehr gering. Seine geringe Verfügbarkeit stellt einen Mangel an Nährstoffen für die MSB dar. Infolgedessen können weniger Gär-säuren produziert werden und der pH-Wert kann nicht stark genug abgesenkt werden. Der vollständige Zuckerabbau zeigt, dass die Mikroorganismen bei einer höheren Nährstoffverfügbarkeit mehr Gär-säuren produziert hätten. Der Z/PK-Quotient sollte größer gleich drei sein, mindestens jedoch zwei betragen. Die Pufferkapazität des Rasenschnittes betrug jedoch 433 g/kgTS infolge des hohen Proteingehaltes, weist daher einen Z/PK-Quotienten von 0,07 auf und gilt als schwer silierbar. Der Ver-

gärbarkeitskoeffizient betrug 21,06. Er unterschreitet damit den für gute Silagequalitäten erforderlichen Wert von 45 um 47 %. Es muss daher mit einer instabilen, buttersäurehaltigen Silage gerechnet werden. Dieser sehr geringe VK resultiert aus dem niedrigen TM- und Zuckergehalt. Der Gehalt an Ammoniakstickstoff am Gesamtstickstoff ist erhöht, liegt jedoch unterhalb des kritischen Gehaltes von 10 % und bildet daher kein Problem hinsichtlich der Silagequalität. Die Messung der aeroben Stabilität ergab, dass die

Silage mit fast acht Tagen eine lange aerobe Stabilität aufweist. Die lange Stabilität ist auf den minimalen Hefen- und Schimmelbesatz zurückzuführen. Diese Mikroorganismen sind verantwortlich für eine Nacherwärmung und konnten durch die Silierung auf ein Minimum herabgesenkt werden. Die hohen Essigsäuregehalte dieser Silage wirken sich hemmend auf die Hefen aus und können der Erwärmung dadurch länger entgegenwirken. Der Besatz an Milchsäurebakterien hat sich während der Silierung reduziert, war

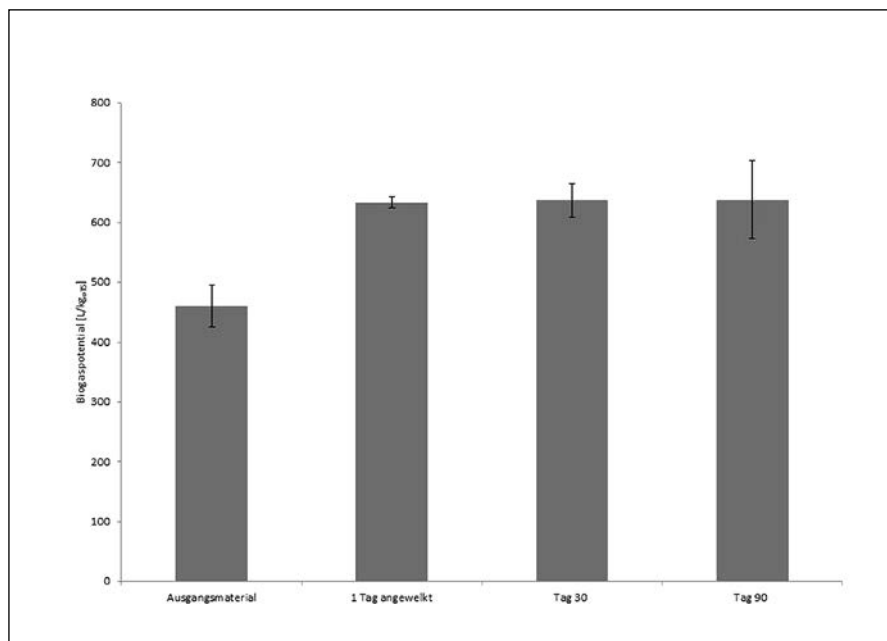


Abb. 1: Veränderung der Biogaspotenziale bei der Silierung von Rasen im Labormaßstab unter Einbeziehung der Massenverluste (V1).

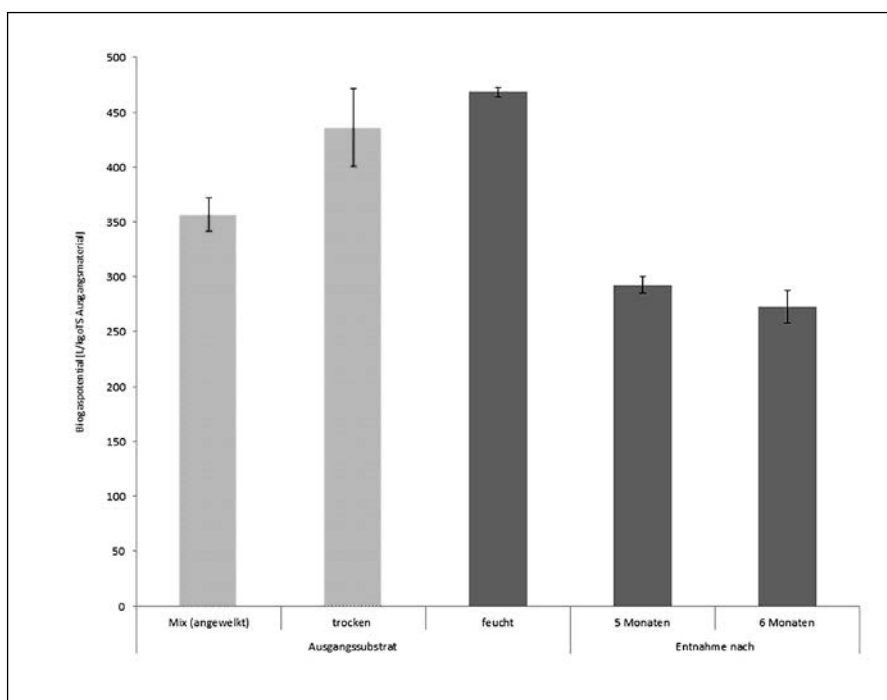


Abb. 2: Veränderung der Biogaspotenziale von Rasen im Praxissilierungsversuch unter Einbeziehung der Massenverluste (V2).

jedoch mit $5,1 \times 10^9$ KBE/g sehr hoch und weist nach der Silierung normale Werte auf. Der Besatz an Hefen wurde durch die Silierung unterhalb des kritischen Hefenbesatzes gesenkt. Die Schimmelpilze konnten durch die Silierung auf ein Minimum reduziert werden. Da ihr Besatz auf dem frischen Substrat sehr gering war, reicht hier auch ein pH-Wert oberhalb des kritischen pH-Werts zur Hemmung aus. Verluste in Form von Schimmelbildung können daher ausgeschlossen werden.

Die Silierung im Labormaßstab verlief mit Massenverlust von 5 % und einer Steigerung des Biogaspotenzials um 11 % erfolgreich (siehe Abbildung 1). Ein Siliermittelzusatz kann zum derzeitigen Forschungszeitpunkt nicht empfohlen werden, da dieser nicht an das Substrat Rasen angepasst wurde und daher geringere Biogasausbeuten erzielt.

Die nicht vermeidbaren Verluste nach dem theoretischen Konzept lagen bei 5 %, so dass die Steigerung des Biogaspotenzials ein sehr gutes Ergebnis ist.

Wird die Silagequalität mit Hilfe des DLG-Schlüssels 2006 bewertet, erhält diese 50 Punkte (verbesserungsbedürftig). Die Verringerung der Punkte resultiert aus den hohen Essigsäuregehalten, die hinsichtlich der Biogasproduktion als unkritisch angesehen werden können. Wird dieser Punktabzug vernachlässigt, steigt die Punktzahl auf 80, mit der Bewertung „sehr gut“.

Die Silierung erweist sich mit den Ergebnissen der Versuchsreihe V1 für den Rasenschnitt als geeignete technische Konservierungsform.

Versuchsreihe 2

In der Versuchsreihe V2 wurde ein großtechnischer Silierversuch mit Rasen durchgeführt und zwei Silageballen mit einer für Gras entwickelten Siliermaschine gepresst.

Die Temperaturmessungen in dem Ballen ergeben, dass wesentlich geringere Temperaturschwankungen als in der Umgebung stattgefunden haben und die Durchschnittstemperatur im Ballen dabei deutlich über der Umgebungstemperatur lag. Dies deutet auf eine erfolgreiche Silierung hin.

Der Massenverlust der Silageballen beträgt 16 %. In Abbildung 2 sind die Biogaspotenziale des Ausgangssubstrats sowie die Biogaspotenziale, unter Einbeziehung der Massenverluste, nach der Entnahme von 5 bzw. 6 Monaten dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass nach einer fünfmonatigen Lagerdauer ein energetischer Verlust von 20 % und nach einer sechsmonatigen Lagerdauer ein energetischer Verlust von 25 %, durch Verluste in der aeroben Lagerphase nach dem Anschnitt des Silageballens, auftreten. Daher konnte die Steigerung des Biogaspotenzials aus den Laborversuchen in der Praxis nicht erreicht werden. Grund hierfür ist, dass die Siliermaschinen nicht auf das feine Substrat Rasen angepasst waren und daher keine ideale Verdichtung erreicht haben.

Zusammenfassung

Die Silierung erweist sich für den Rasenschnitt als geeignete Konservierungsform. Das Biogaspotenzial konnte bei der Laborsilierung um 11 % gesteigert werden. Für die großtechnische Anwendung müssen allerdings die vorhandenen Siliermaschinen auf das Substrat Rasen angepasst werden, um die energetischen Verluste von 20 bis 25 % zu reduzieren.

Literatur

- Banemann, D., 2010: Einfluss der Silierung und des Verfahrensablaufs der Biomassebereitstellung auf den Methanertrag unter Berücksichtigung eines Milchsäurebakteriensilierungsmittels. Dissertation, Rostock.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2005: Stand der Kompostierung. Richtlinie des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. www.bmlfuw.gv.at/greentec/abfall-ressourcen/behandlung-verwertung/behandlung-biotechnisch/richtlinie_sdt.html (22.12.2014).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2002: Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. TA Luft.
- Demmel, M., S. Thurner und A. Fröhner, 2010: Mit neuer Technik Futter und Substratwirtschaft effizient gestalten. In: Bayrisches Landesamt für Landwirtschaft LfL (Hg.): Knappe Flächen optimal nutzen. Futter- und Substratwirtschaft optimieren. LfL-Jahrestagung in Triesdorf. ISSN 1611-4159, S. 35-44.
- FNR (Hrsg.), 2013: Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung, Gülzow-Prüzen.
- Gallert, J., 2009: Wirtschaftsdünger. Anfall, Lagerung, Verwertung, Umwelt. www.lko.at/media.php?id=2500,,,ZmlsZW5hb-WU9ZG93bmxvYWQIM0QIMkYyMDA5LjA1LjE5JTJGMtI0Mjc0NDEzMy5wZGYmcm49YmV1X2Jyb3NjaF93aXJ0c2NoX2R1ZW5n-ZXlucGRm. (13.03.2015).
- Gerighausen, H.-G., 2011: Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung. DLG-Verlag, Frankfurt, M.
- Hartmann, S., S. Wulf, U. Roth und H. Döhler, 2011: Batchtestmethoden und Über-

tragbarkeit auf Praxisanlagen. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Biogas. Energieträger der Zukunft: Fachtagung Braunschweig, 08. und 09. Juni 2011. VDI Verlag, Düsseldorf, S. 117-132.

Kaltschmitt, M., 2009: Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer, Berlin.

Klingler, R.W., 2010: Grundlagen der Getreidetechnologie. Behr, Hamburg.

KrWG, 2012: Kreislaufwirtschaftsgesetz – Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen.

Kuoppala, K., 2012: Proceedings of the XVth International Silage Conference, Hämeenlinna, Finland, 2-4 July 2012. MTT Agrifood Research Finland, Helsinki.

McDonald, P., N. Henderson and S. Heron, 1991: The biochemistry of silage. Chalcombe, Marlow.

Raupp, J. und M. Oltmanns, 2006: Reduzierung von Nährstoffverlusten während der Stallmistrotte durch Beeinflussung der Rottebedingungen. [http://orgprints.org/8098/\(03.02.2015\)](http://orgprints.org/8098/(03.02.2015)).

Rühlmann, O., 2000: Wirtschaftsdünger effektiv und umweltschonend lagern und einsetzen, Sachsen-Anhalt. www.humusnetzwerk.de/humuswirtschaft/detailansicht/article/1272.html (13.10.2014).

Schievano, A., G. D'Imporzano and F. Adani, 2009: Substituting energy crops with organic wastes and agro-industrial residues for biogas production. In: Journal of environmental management, 90 (8), S. 2537-2541.

Sommer, S.G., L.S. Jensen, M.L. Christensen and T. Schmidt, 2013: Animal manure. Recycling, treatment and management. John Wiley & Sons.

Thaysen, J., 2011: Qualitäts-Grassilage. aid, Bonn.

Verein Deutscher Ingenieure, 2006: Vergärung organischer Stoffe. Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuch, 13.030.30 (VDI 4630). Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf.

Weiß, K., 2011: Untersuchung und Qualitätsbewertung von Grobfutter und Silagen. In: Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierungen Gerighausen (Hg), 246-267.

WHG, 2009: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts.

Wilhelm, H. und K. Wurm, 1999: Futterkonservierung und -qualität. Silagebereitung, Heuwerbung, Getreide-, Maistrocknung. Storker, Graz, Stuttgart.

Zimmer, E., 1969: Biochemische Grundlagen der Einsäuerung. In: Tagungsband: Crop conservation and grassland, proceedings of the third general Meeting of the European Grassland Federation (Frankfurt, DLG), S. 113-125.

Autoren

Dipl.-Ing. Saskia Oldenburg, Laura Selin Cici, Prof. Dr. Kerstin Kuchta
 Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft
 Harburger Schloßstraße 36
 21079 Hamburg