

Untersuchung der anaeroben Vergärbarkeit von Zuckerrübenschnitzeln in Russland

Irina Miroshnichenko, Jonas Lindner, Andreas Lemmer, Hans Oechsner, Ivan Vasilenko

In der russischen Landwirtschaft entstehen jährlich ca. 250 Mio. t Trockenmasse an organischen Abfällen, die derzeit nicht sinnvoll verwertet werden. In manchen Regionen gehören auch Zuckerrübenschnitzel zu diesen Abfallstoffen. Durch eine Nutzung dieser Reststoffe zur Biogasproduktion könnten negative Umweltwirkungen reduziert und ein wichtiger Beitrag zum Erreichen der russischen Klimaschutzziele geleistet werden. Daher soll in diesem Projekt untersucht werden, ob eine Substitution von Maissilage durch Zuckerrübenschnitzel möglich ist. Dazu wurde ein einfacher Batch-Test aufgebaut und anschließend der Abbau der Inhaltsstoffe nach Weender, der Biogasertrag sowie die Abbaukinetik bestimmt. Der Gesamtabbau der Inhaltsstoffe nach Weender betrug circa 40 % bei beiden Substraten. Jedoch wurde bei den Zuckerrübenschnitzeln ein 35,5 % geringerer Biogasertrag ermittelt, da es zu einem Abfall des pH-Wertes im Reaktor kam und damit zu einer Hemmung der Biogasbildung. Eine Substitution von Maissilage ist möglich, jedoch sollten Zuckerrübenschnitzel nur in Kofermentation mit anderen Substraten eingesetzt werden.

Schlüsselwörter

Biogas, Zuckerrübenschnitzel, Maissilage, Batch-Test, Russland

In der russischen Landwirtschaft und in ihrer weiterverarbeitenden Industrie fallen jährlich ca. 250 Mio. t Trockenmasse an organischen Abfällen an, die ein großes Problem für die dortige Landwirtschaft darstellen (DELEGATION DER DEUTSCHEN WIRTSCHAFT IN DER RUSSISCHEN FÖRDERATION 2010). Ein Beispiel hierfür sind Zuckerrübenschnitzel, die als Nebenprodukt der Zuckerindustrie vor allem in den Regionen Tatarstan, Krasnodar, Woronesch, Tambow, Kursk, Lipezk, Pensa sowie Belgorod anfallen (MAITAH und SMUTKA 2016). In der Region Belgorod werden jährlich 0,3 Mio. t Zucker aus ca. 2 Mio. t Zuckerrüben produziert. Dabei entsteht ein Anfall von ca. 1,6 Mio. t Zuckerrübenschnitzel (ROGLER 2006, DEGA MARKET 2014, SKRIPKA 2014, OSETROV 2016). Diese Zuckerrübenschnitzel werden häufig in der Rinder- und Schweinefütterung eingesetzt. Durch ihre leichte Verderblichkeit ist häufig eine Konservierung durch Silierung oder durch Trocknung und Pelletierung erforderlich (FORSCHUNGSINSTITUT FÜR ZUCKERRÜBEN UND ZUCKER IM NORDKAUKASUS 2001). Außerdem können Zuckerrübenschnitzel für die Herstellung von Präbiotika in der Tierernährung und von Fungiziden eingesetzt werden (FORSCHUNGSINSTITUT FÜR ZUCKERRÜBEN UND ZUCKER IM NORDKAUKASUS et al. 2001, HOLOPKIN 2013). Die anfallenden Rübenschnitzel können jedoch nicht vollständig in der Tierernährung verwertet werden, da ein vermehrter Einsatz z. B. bei Wiederkäuern zu einer Versäuerung der Milch, zu Diarrhoe sowie zu einer Pansenübersäuerung führen kann (OSETROV 2016). Daher werden Rübenschnitzel häufig direkt auf den Ackerflächen ausgebracht, z. B. auf Paraschwarzerdeböden mit einer maximalen Ausbringungsmenge von 60 t/ha (HOLOPKIN 2013). Höhere Mengen führen zu einer starken Versäuerung des Bodens (DONTSCHENKO et al. 2006). Diese Versäuerung ist vor allem auf den schwach sauren Böden im

Schwarzerdegürtel Russlands (42 % der Ackerfläche in der Region Belgorod) unerwünscht (TSCHEKMAREV und LUKIN 2013).

Die Biogasproduktion stellt daher für Russland eine gute Möglichkeit für die Verwertung dieser Abfall- und Nebenprodukte dar und bietet neben der energetischen Nutzung noch weitere ökologisch positive Synergieeffekte für die Landwirtschaft wie die Substitution von mineralischen Düngemitteln (GEIST 2013). Außerdem kann Biogas einen wichtigen Beitrag zum Beschluss der Russischen Föderation leisten, nach dem bis zum Jahr 2020 4,5 % der russischen Stromproduktion aus erneuerbaren Energiequellen erfolgen soll (MINISTRY OF THE RUSSIAN FEDERATION 2010). Aktuell liegt der Anteil bei ca. 1 % (MAKHOVSKI 2013). Um dieses Ziel zu erreichen, spielt die Strom- und Wärmeproduktion aus Biogas durch seine Grundlastfähigkeit, aber auch durch die Fähigkeit zur Produktion von Regelenergie, um witterungsbedingte Schwankungen im Stromnetz durch andere erneuerbare Energiequellen wie Photovoltaik und Windkraft auszugleichen, eine wichtige Rolle. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Möglichkeit der dezentralen Energieversorgung von Regionen ohne permanente Gas- und Stromversorgung. Im Jahre 2012 wurden 63 % der russischen Haushalte mit Gas versorgt. In den Städten verfügten ca. 70 % und in den ländlichen Regionen nur 47 % der potenziellen Verbraucher über einen Gasanschluss (MAKHOVSK 2013).

Vor diesem Hintergrund wurden in den letzten Jahren einige landwirtschaftliche Biogasanlagen von deutschen Herstellern wie der „Farmatic Anlagenbau GmbH“ oder „Big Dutchman Agro“ gebaut. Für die Anlagenplanung und die Wirtschaftlichkeitsberechnung dieser Anlagen wurden bisher häufig Kennzahlen aus Deutschland verwendet (KTBL 2009). Jedoch wurden bei diesen Auslegungen die regionalen Unterschiede der Substratzusammensetzung, die vor allem bei landwirtschaftlichen Reststoffen auftreten, nicht berücksichtigt. Dies hatte zur Folge, dass die vorhergesagte Leistung häufig nicht erreicht wurde.

Ziel der Untersuchung an der Gorin Staatliche Agraruniversität Belgorod (Russland) war es daher, einen einfachen Batch-Gärtest (BT) aufzubauen, um den Biogasertrag der Substrate direkt in Russland zu bestimmen. Anschließend sollte damit untersucht werden, ob eine Substitution von Maissilage mit Zuckerrübenschnitzeln in der Region Belgorod möglich ist. Bei den bereits bestehenden landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden häufig nachwachsende Rohstoffe wie Maissilage als Substrat eingesetzt, das große Potenzial an Abfallstoffen wird jedoch bisher nicht berücksichtigt (FFE SOLUTIONS 2015, AD AGRO SYSTEMS 2013). Außerdem ist die Substitution von Maissilage durch kostengünstige Substrate wie Zuckerrübenschnitzel für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb erforderlich, da es in Russland keine staatliche Förderung der Biogasproduktion gibt. In den durchgeführten Versuchen wurde daher der Einfluss auf den pH-Wert, auf den Abbau der Inhaltsstoffe nach Weender sowie auf den Biogasertrag und auf die Abbaukinetik ermittelt. Abschließend wurde der Biogasertrag ebenfalls mit dem Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) zur Validierung der Versuchsergebnisse ermittelt.

Material und Methoden

Der Aufbau und die anschließende Erprobung der Versuchsanlage wurde an der Gorin Staatliche Agraruniversität Belgorod (Russland) durchgeführt.

Aufbau der Versuchsanlage

Die aufgebaute Versuchsanlage bestand aus vier Batch-Reaktoren aus Edelstahl mit einem Gesamtvolumen von 30 l und einem Arbeitsvolumen von 28 l (Abbildung 1).

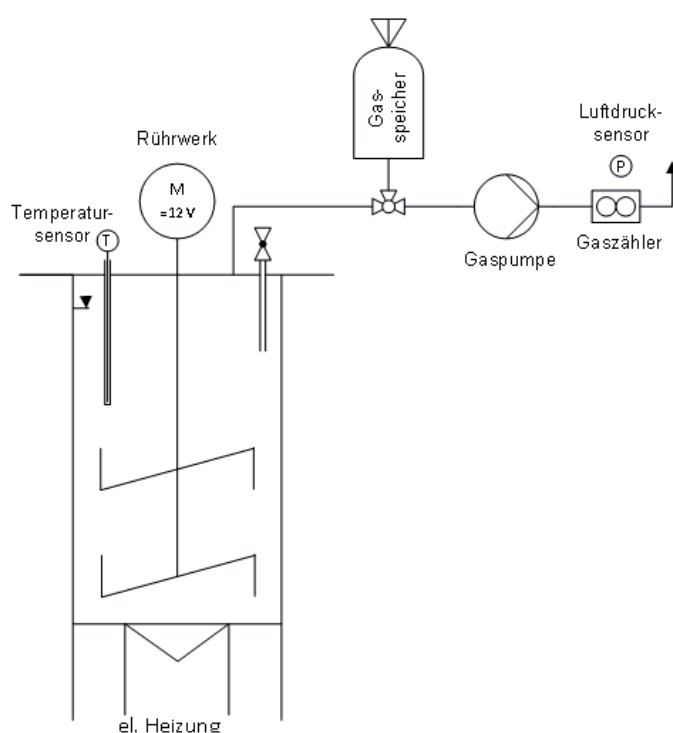


Abbildung 1: Rohrleitungs- und Instrumentenplan der Versuchsanlage mit Batch-Reaktor sowie der Gasspeicherung und Gasmengenerfassung

Jeder Reaktor wurde mit einem vertikalen Paddelwerk (vier Paddel) durchmischt. Die Arbeitszeit des Rührwerks betrug 2 min und die Pausenzeit 14 min. Für die Beheizung wurde eine elektrische Heizplatte unter jedem Reaktor angebracht, welche über eine Zweipunktregelung angesteuert wurde. Die Temperatur im Substrat wurde mit einem Temperatursensor (Pt 100) in einem Tauchrohr erfasst. Zur Isolierung wurde eine Aluminium-Isolierfolie außen an die Reaktoren angebracht. Zur Probenahme wurde ein weiteres Tauchrohr in den Deckel des Reaktors eingebaut. Das gebildete Gas wurde in 230-Liter-Säcken gespeichert, die aus Polyethylenfolie hergestellt wurden. Die Säcke waren an den Rändern verschweißt und wurden anschließend auf Dichtheit überprüft. Die Gasmenge wurde dreimal während der Versuchsphase mit einem Gaszähler (ГРАНД 1,6, НПО «ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ДОН», Russland) erfasst. Zur Korrektur der Gasmenge auf Normbedingungen (1.013 hPa, 273,15 K) wurde die Gastemperatur mit einem Pt-100-Temperatursensor und der Luftdruck mit einem Manometer erfasst (Abbildung 1).

Versuchsdurchführung

Anschließend wurde die Funktionsfähigkeit der Versuchsanlage und die Vergärbarkeit von Maissilage (Zugabe 1,5 kg FM; 33,0 % Trockensubstanz TS; 95,1 % organische Trockensubstanz oTS) und Zuckerrübenschnitzel (Zugabe 1,75 kg FM; 29,3 % TS; 94,9 % oTS) untersucht. Die Substrate wurden jeweils in zwei Wiederholungen untersucht. Als Impfschlamm (Reaktor Maissilage 19,5 kg FM, Reaktor Zuckerrübenschnitzel 20 kg FM) wurde Gärrest (4,7 % TS, 82,2 % oTS) von der Biogasanlage Lutschki (Region Belgorod, Russland) eingesetzt. Das Verhältnis von oTS-Inokulum zu oTS-Substrat betrug ca. 1,6 : 1.

Zur optimalen Durchmischung der zugegebenen Substrate wurden die Versuche mit einer dreitägigen Startphase bei einer Temperatur von 19,6 bis 20,6 °C begonnen. Anschließend wurden die Reaktoren für eine Dauer von 41 Tagen bei einem mesophilen Temperaturbereich von 37 ± 2 °C betrieben. Da am dritten Versuchstag eine starke Schaumbildung in den Reaktoren mit Zuckerrübenschnitzeln einsetzte, wurden pro Reaktor 549,5 g Sonnenblumenöl als Entschäumer zugegeben. Die gebildete Gasmenge wurde jeweils am 10., 24. und 45. Tag erfasst und auf die abgebaute organische Trockenmasse bezogen. Die Durchführung des Batch-Gärtests erfolgte anhand der VDI-Richtlinie 4630 (VDI 2006).

Hohenheimer Biogasertragstest

Zur Überprüfung des entwickelten Batch-Tests wurde der Biogasertrag der Substrate, die bei 60 °C getrocknet worden waren, zusätzlich im Hohenheimer Biogasertragstest an der Universität Hohenheim, Deutschland, bestimmt. Dies ist ein hochreproduzierbarer Batch-Test, welcher nach der VDI-Richtlinie 4630 durchgeführt wird (MITTWEG et al. 2012, VDI 2006, HELFFRICH und OECHSNER 2003). Als Fermenter wurden Glasspritzen (Volumen 100 ml) eingesetzt, welche mit 30,0 g Impfschlamm und 0,4 g Probenmaterial befüllt wurden. Jedes Substrat wurde mit drei Wiederholungen untersucht. Die Spritzen wurden mittels eines Rotors durchmischt, der in einen Klimaschrank eingebaut war. Der Test wurde bei einer Temperatur von $37 \pm 0,5$ °C und einer Versuchsdauer von 35 Tagen durchgeführt. Die Gasmenge wurde direkt von den Glasspritzen mit einer Genauigkeit von 1 ml abgelesen, wenn mindestens 20 ml Gas gebildet wurde. Außerdem wurde die Gasqualität mit dem Gasmessgerät (AGM 10, Pronova Analysetechnik, Berlin, Deutschland) bestimmt. Das Gasvolumen wurde auf Standardbedingungen korrigiert (1.013 hPa, 273,15 K). Die Biogaserträge wurden auf die abgebaute organische Trockenmasse bezogen (MITTWEG et al. 2012, VDI 2006, HELFFRICH und OECHSNER 2003).

Durchgeführte Laboranalysen

Von den Ausgangsubstraten sowie von dem Gärrest wurde jeweils der Trockensubstanz-, der organische Trockensubstanz-, der Rohasche-, der Rohfett-, der Rohfaser- und der Rohproteingehalt sowie der Gehalt an stickstofffreien Extraktstoffen (NfE) bestimmt. Außerdem wurden einmal pro Woche Proben aus den Reaktoren entnommen und der TS-/oTS-Gehalt sowie der pH-Wert ermittelt.

Die TS-/oTS-Gehalte der Substrate und des Gärrestes wurden durch Trocknung (105 °C, 24 h) und Veraschung (550 °C, 8 h) ermittelt (VDI 2006). Der pH-Wert wurde mit einem Hand-pH-Meter gemessen. Die Nährstoffe wurden nach folgenden Methoden bestimmt:

- Rohprotein - nach Kjeldahl (russische Standardnorm ГOCT 13496.4-93),
- Rohfett - mittels Soxhlet-Extraktion (russische Standardnorm ГOCT 13979.2-94) und
- Rohfaser - nach Henneberg und Stohmann (russische Standardnorm ГOCT 13496.2-91).

Der NfE-Gehalt wurde anschließend nach Gleichung 1 berechnet.

$$\text{NfE} = 100 \% - \text{Wasser} - \text{Rohasche} - \text{Rohfett} - \text{Rohfaser} - \text{Rohprotein} \quad (\text{Gl. 1})$$

Bestimmung der Abbaukinetik

Für die Bestimmung der Abbaukinetik wurden die kumulativen Biogasertragskurven mit der modifizierten Gompertz-Funktion (Gleichung 2) ermittelt (MÖNCH-TEGEDER et al. 2013, NOPHARATANA et al. 2007). Bei dieser Funktion wird angenommen, dass die Biogasproduktion in einem Batch-Test einem bakteriellen Wachstum entspricht:

$$M = P \times \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_m \times e}{P} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (\text{Gl. 2})$$

Dabei entspricht M der kumulativen Biogasproduktion ($l \text{ kg}^{-1}$), P dem Biogasproduktionspotenzial ($l \text{ kg}^{-1}$), R_m der maximalen täglichen Biogasproduktion ($l \text{ d}^{-1}$), λ der Dauer der Lag-Phase (d) und t der Versuchsdauer (d). Die Konstanten P , R_m und λ wurden mittels linearer Regression ermittelt. Zur Bestimmung des Zeitpunktes und des Volumens der maximalen täglichen Methanproduktion wurde die erste Ableitung dieser Funktion gebildet.

Ergebnisse und Diskussion

Einfluss des Substrates auf den pH-Wert im Fermenter

In Abbildung 2 ist der Verlauf des pH-Wertes in den Reaktoren für die Substrate Maissilage und Zuckerrübenschnitzel dargestellt. Der pH-Wert betrug in allen Reaktoren zum Zeitpunkt des Versuchsstarts pH 8,13. Bis zum vierten Tag des Experimentes kam es bei beiden Substraten zu einem kontinuierlichen Absinken des pH-Wertes (Maissilage pH 7,4; Zuckerrübenschnitzel pH 7,2). In den Reaktoren der Maissilage stieg am sechsten Tag der pH-Wert um 3,5 % auf pH 7,6 an. Über den weiteren Versuchsverlauf schwankte der pH-Wert zwischen pH 7,6 und 7,9. Im Gegensatz dazu fiel der pH-Wert im Reaktor mit der Zuckerrübensilage bis zum zehnten Versuchstag auf pH 7,1 ab. Am zehnten Versuchstag kam es zu einem Anstieg des pH-Wertes um 4,6 % auf pH 7,4. Anschließend fiel der pH-Wert kontinuierlich ab (pH 6,5) und erreichte am 32. Versuchstag das Minimum. Während des weiteren Versuchsverlaufes schwankte der pH-Wert zwischen pH 6,5 und 6,7 (Abbildung 2).

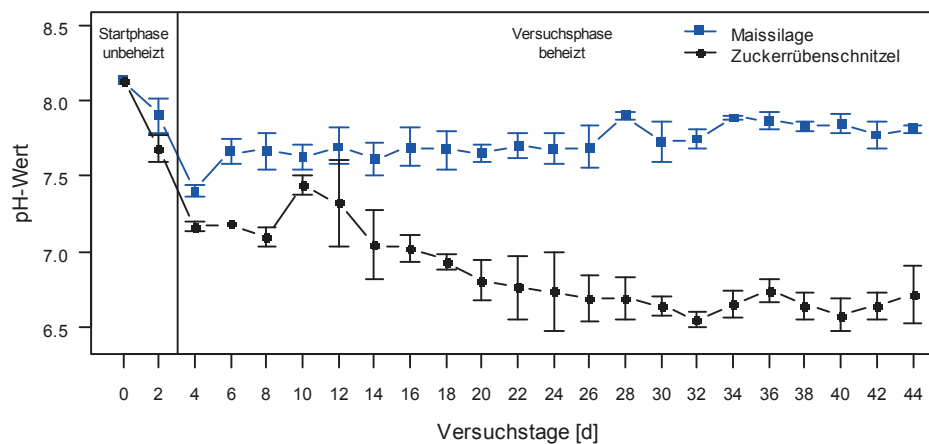


Abbildung 2: Verlauf des pH-Wertes im Reaktor bei der Vergärung von Maissilage und Zuckerrübenschnitzel im entwickelten Batch-System

Einfluss des Substrates auf den Abbau der Inhaltsstoffe nach Weender

Der Abbaugrad der Inhaltsstoffe nach Weender ist in Tabelle 1 dargestellt. In die Reaktoren mit Maissilage wurden 93,2 g Rohfett zugeführt. Über den gesamten Versuchszeitraum wurden 21,9 % (20,4 g) des Rohfettes abgebaut. Bei den Versuchen mit den Zuckerrübenschnitzeln war die zugeführte Rohfettmenge durch die Zugabe von Sonnenblumenöl als Entschäumer mit 639,7 g deutlich höher. Der Abbaugrad des Rohfettes der Zuckerrübenschnitzel betrug 34,8 % und war damit um 58,8 % höher als der Abbaugrad der Maissilage. Die zugeführte Rohproteinmenge betrug 324,6 g in den Reaktoren mit Maissilage und 350,4 g in den Reaktoren mit den Zuckerrübenschnitzeln. Der Rohproteinabbau war bei der Maissilage (75,5 g) um 27,4 % höher als bei den Zuckerrübenschnitzeln (59,9 g). Die Rohfasermenge war bei der Maissilage um 62,1 % und bei den Zuckerrübenschnitzeln um 65,6 % geringer als die Rohproteinmenge. Beim Substrat Maissilage (44,2 g) war der Rohfaserabbau um circa 20 g höher als bei den Zuckerrübenschnitzeln (25,0 g). Bei beiden Substraten betrug die zugeführte Menge an NfE circa 638 g. Der Abbaugrad von NfE war bei den Zuckerrübenschnitzeln (64 %) um circa 10 % höher als bei der Maissilage (54 %) (Tabelle 1). Der Abbaugrad der gesamten Inhaltsstoffe nach Weender betrug bei beiden Substraten circa 40 %.

Tabelle 1: Abbau der Inhaltsstoffe Rohfett, Rohprotein, Rohfaser und stickstofffreie Extraktstoffe (NfE) bezogen auf die organische Trockenmasse der Substrate Maissilage und Zuckerrübenschnitzel

		Rohfett	Rohprotein	Rohfaser	NfE	Gesamte Inhaltsstoffe
Input pro Reaktor in g						
Maissilage	Impf Schlamm	72,15	278,85	25,35	302,25	678,60
	Substrat	21,00	45,75	97,80	335,85	500,40
	Summe	93,15	324,60	123,15	638,10	1.179,00
Zuckerrübenschnitzel	Impf Schlamm	74,00	286,00	26,00	310,00	696,00
	Rübenschnitzel	16,28	64,40	94,50	328,83	504,00
	Sonnenblumenöl ¹⁾	549,45	-	-	-	549,45
	Summe	639,73	350,40	120,50	638,83	1.749,45
Output pro Reaktor in g						
Maissilage		72,78	249,08	78,93	293,15	693,93
Zuckerrübenschnitzel		417,30	290,55	95,55	230,10	1.033,50
Abbau in g						
Maissilage		20,38	75,53	44,23	344,95	485,08
Zuckerrübenschnitzel		222,43	59,85	24,95	408,73	715,95
Abbaugrad in %						
Maissilage		21,87	23,27	35,91	54,06	41,14
Zuckerrübenschnitzel		34,77	17,08	20,71	63,98	40,92

¹⁾ Sonnenblumenöl wurde als Entschäumer eingesetzt.

Einfluss des Substrates auf den spezifischen Biogasertag und auf die Abbaukinetik

In Abbildung 3 ist der spezifische Biogasertag der Substrate Maissilage und Zuckerrübenschnitzel dargestellt sowie die mittels Gompertz-Funktion ermittelte Abbaukinetik. Der maximal berechnete Biogasertag der Maissilage (mit Gompertz-Funktion) betrug nach 45 Tagen im Hohenheimer Biogasertagstest $770,6 \text{ l kg}^{-1}$ und war im Batch-Test um 9,3 % ($699,0 \text{ l kg}^{-1}$) geringer. Jedoch betrug die Differenz zwischen dem letzten Messwert im Batch-Test und dem berechneten Wert im Hohenheimer Biogasertagstest nach 45 Tagen nur circa 40 l kg^{-1} .

Bei den Zuckerrübenschnitzeln konnten deutlich größere Unterschiede zwischen den beiden Verfahren ermittelt werden. Der im Hohenheimer Biogasertagstest errechnete Biogasertag betrug nach 45 Tagen $757,0 \text{ l kg}^{-1}$. Der im Batch-Test ermittelte Wert war um 36,4 % ($481,6 \text{ l kg}^{-1}$) geringer. Diese deutliche Differenz kann durch das Absinken des pH-Wertes erklärt werden. DEMIREL und YENİGÜN (2002) beschreiben für einphasige Systeme einen optimalen pH-Wert zwischen pH 6,8 und 8,0, da pH-Werte unter 6,8 zu einer Hemmung der Methanbildung führen und daraus eine Akkumulation an flüchtigen Fettsäuren im Reaktor resultiert (Abbildung 3).

Der im HBT bestimmte spezifische Methanertrag bezogen auf die zugeführte oTS betrug bei der Maissilage 331 l kg⁻¹ und bei den Zuckerrübenschnitzeln 342 l kg⁻¹. Im Vergleich dazu werden in der Literatur durchschnittliche spezifische Methanerträge von 340 l kg⁻¹ bei Maissilage und 350 l kg⁻¹ bei Zuckerrüben beschrieben (FNR 2013).

Die maximale tägliche Biogasproduktion betrug bei der Maissilage im Batch-Test 94,1 l kg⁻¹ d⁻¹ (HBT 60,9 l kg⁻¹ d⁻¹) und wurde nach 4,7 Tagen (HBT 5,01 d) erreicht. Bei den Zuckerrübenschnitzeln kam es durch die Hemmung des Prozesses zu einer deutlich geringeren maximalen täglichen Biogasproduktion mit 32,1 l kg⁻¹ d⁻¹. Dieses Maximum wurde 1,6 Tage später als bei der Maissilage erreicht. Im HBT zeigte sich bei der Zuckerrübe eine um 20 l kg⁻¹ d⁻¹ geringere maximale tägliche Biogasproduktion (Zeitpunkt nach 4,8 d) im Vergleich zu der Maissilage (Abbildung 3).

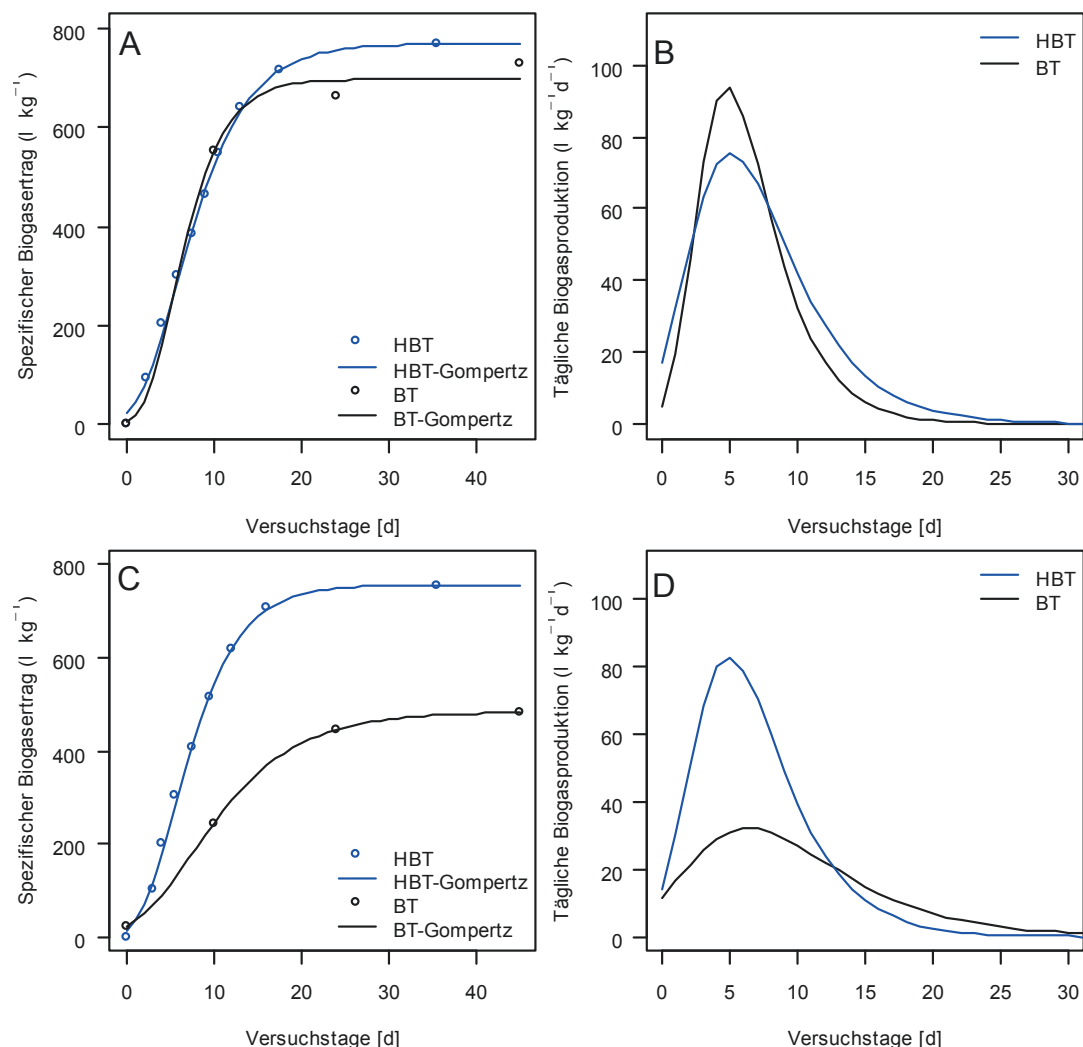


Abbildung 3: Summenkurve des spezifischen Biogasertrags bezogen auf die abgebaute organische Trockenmasse der Maissilage (A) und der Zuckerrübenschnitzel (C) sowie der Verlauf der täglichen Biogasproduktion der Maissilage (B) und der Zuckerrübenschnitzel (D) ermittelt im entwickelten Batch-Test (BT) im Vergleich zum Hohenheimer Biogasertragstest (HBT)

Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass mit dem neu entwickelten Batch-Test wichtige Parameter für die Prozessstabilität sowie der Abbaugrad, der Biogasertrag und die Abbaukinetik der Substrate bestimmt werden können, da beim Substrat Maissilage nur eine geringe Differenz des spezifischen Biogasertrages (40 l kg^{-1}) zwischen dem Batch-Test und dem Hohenheimer Biogasertrag ermittelt wurde. Jedoch muss die Methodik der Versuchsdurchführung weiter optimiert werden, um die Qualität der Ergebnisse zu verbessern. In weiteren Versuchen sollte daher das in VDI 4630 beschriebene Verhältnis von oTS-Inokulum zu oTS-Substrat von mindestens 2 : 1 eingehalten werden, damit eine Überlastung des Prozesses ausgeschlossen werden kann. Außerdem sollte der Biogasertrag des Inokulums bestimmt und bei der Berechnung des spezifischen Biogasertrages berücksichtigt werden. Zur weiteren Optimierung des Systems sollte ein Gasqualitätsmessgerät verwendet werden, um in weiteren Untersuchungen auch den spezifischen Methanertrag der Substrate bestimmen zu können. Außerdem sollte zur Vergleichbarkeit der Versuche ein Standardsubstrat eingesetzt werden.

Die Versuche zeigten bei der Maissilage und bei den Zuckerrübenschnitzeln einen Abbaugrad von ca. 40 %. Der NfE-Abbau war bei den Zuckerrübenschnitzeln höher als bei der Maissilage. Im Gegensatz dazu wurden die Rohfaser und das Rohprotein bei der Maissilage besser abgebaut. Im Batch-Test konnte bei den Zuckerrübenschnitzeln ein deutlich geringerer Biogasertrag als bei der Maissilage erzielt werden, da es zu einem Absinken des pH-Wertes und damit zu einer Hemmung der Methanbildung kam. Daher ist beim Einsatz von Zuckerrübenschnitzeln darauf zu achten, dass die Raumbelastung angepasst wird oder andere Substrate in Kofermentation eingesetzt werden. Die Schaumbildung beim Substrat Zuckerrübenschnitzel konnte durch die Zugabe von Sonnenblumenöl unterdrückt werden, jedoch sollte in weiteren Versuchen im BT ein nicht biologisch abbaubares Öl eingesetzt werden. Um die Gefahr einer Hemmung des Prozesses durch eine Anreicherung an organischen Säuren zu reduzieren, könnte ein zweistufiges Verfahren, wie von LINDNER et al. (2016) beschrieben, eingesetzt werden. Diese Untersuchung zeigte, dass eine Substitution von Maissilage durch Zuckerrübenschnitzel möglich ist und dadurch die negativen Umweltauswirkungen durch die bisherigen Verwertungsverfahren reduziert werden können.

Literatur

- AD AGRO systems (2013): AD AGRO baut Russlands größte Biogasanlage - Strom für 10.000 Haushalte. <http://www.ad-agro.de/de/unternehmen/news/92-ad-agro-baut-russlands-groesste-biogasanlage-strom-fuer-10-000-haushalte>, Zugriff am 05.05.2016
- Dega Market (2014): Развитие сельского хозяйства и программы импортозамещения в Белгородской области. [Die Entwicklung der Landwirtschaft und des Importersatzprogrammes in der Region Belgorod] http://russiaindustrialpark.ru/razvitie_selskogo_hozyaystva_programmy_importozameshcheniya, Zugriff am 05.05.2016
- Delegation der Deutschen Wirtschaft in der Russischen Föderation (2010): Zielgruppenanalyse Russland; Schwerpunkte: Biomasse und Biogas, http://russland.ahk.de/fileadmin/ahk_russland/EE2010/Zielgruppenanalyse_final_2010.pdf, Zugriff am 05.05.2016
- Dontschenko, L.; Kovaleva, S.; Demina, N. (2006): Возможность использования вторичных сырьевых ресурсов свеклосахарного производства для дальнейшей переработки. [Die Möglichkeiten für die Verwertung von Reststoffen aus der Zuckerproduktion], <http://ej.kubagro.ru/2006/05/pdf/40.pdf>, Zugriff am 05.05.2016
- Demirel, B.; Yenigün, O. (2002): Two-phase anaerobic digestion processes: a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 77(7), pp. 743–755

- ffe solutions (2015): Referenzliste. <http://www.ffe-solutions.com/referenzen/detail/biogasanlage-belgorod-russland>, Zugriff am 05.05.2016
- FNR (2013): Leitfaden Biogas Von der Gewinnung zur Nutzung. Gülzow, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
- Geist, W. (2013): Belgorod: Das Tor zum russischen Biogasmarkt. Konferenz Biogas in Russland, Deutsche Energie-Agentur GmbH, 28.05.2013, Berlin, https://www.export-erneuerbare.de/EEE/Redaktion/DE/Downloads/Publikationen/Veranstaltungsdokumentationen/130528_iv_russland.html, Zugriff am 05.05.2016
- Helffrich, D.; Oechsner, H. (2003): Hohenheimer Biogasertragstest. Vergleich verschiedener Laborverfahren zur Vergärung von Biomasse. *Landtechnik*. 58(3), S. 148–149, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2003.1461>
- KTBL (Hg.) (2009): Faustzahlen Biogas. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
- Lindner, J.; Zielonka, S.; Oechsner, H.; Lemmer, A. (2016): Is the continuous two-stage anaerobic digestion process well suited for all substrates? *Bioresource Technology* 200, pp. 470–476
- Makhovski, V. (2013): Status Quo und Ausblick auf den russischen Biogasmarkt. Der Nationale Verband für Bioenergie, erneuerbare Energien und Umwelt Konferenz Biogas in Russland. Deutsche Energie-Agentur GmbH, 28.05.2013, Berlin, https://www.export-erneuerbare.de/EEE/Redaktion/DE/Downloads/Publikationen/Veranstaltungsdokumentationen/130528_iv_russland.html, Zugriff am 05.05.2016
- Maitah M.; Smutka L. (2016): Restoration and Growth of the Russian Sugar Market. *Sugar Tech* 18(2), pp. 115–123
- Ministry of the Russian federation (2010): Energy strategy of Russia for the period up to 2030. Moscow, Institute of Energy Strategy, [www.energystrategy.ru/projects/docs/ES-2030_\(Eng\).pdf](http://www.energystrategy.ru/projects/docs/ES-2030_(Eng).pdf), Zugriff am 05.05.2016
- 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. *Engineering in Life Science* 12(3), pp. 270–278
- Mönch-Tegeeder, M.; Lemmer, A.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2013): Investigation of the methane potential of horse manure. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 15(2), pp. 161–172
- Nopharatana, A.; Pullammanappallil, P.C.; Clarke, W.P. (2007): Kinetics and dynamic modelling of batch anaerobic digestion of municipal solid waste in a stirred reactor. *Waste Management* 27(5), pp. 595–603
- Osetrov, S. (2016): Свекловичный жом. [Zuckerrübenschnitzel.] http://www.sergey-osetrov.narod.ru/Raw_material/beet_pulp.htm, Zugriff am 12.08.2015
- Rogler, H. (2006): Сахарная свекла. Ситуация на мировом рынке и технология возделывания в Германии. [Die Zuckerrübe. Die Weltmarktsituation und Anbautechnologie in Deutschland.] <http://roglernet.de/belgorod/Zuckerrueben.pdf>, Zugriff am 05.05.2016
- Forschungsinstitut für Zuckerrüben und Zucker im Nordkaukasus (2001): RU 2175844, Kolesnikov, V.; Molotilin, J.; Artemjev, A; Ljusji, N.; Pavlov, P.; Gorodezkij, V.; Silvanjuk, I.; Lukjanenko, M.
- Skripka, A. (2014): Корни противоречий. В Черноземье рассматривают перспективы производства сахарной свеклы. [Die Ursache des Konflikts. Die Herausforderungen der Zuckerrübenproduktion im Schwarzerdegebiet], <http://www.rg.ru/2014/11/25/reg-cfo/svekla.html>, Zugriff am 05.05.2016
- Holopkin, I. (2013): Влияние ячменной соломы, свекловичного жома, целлюлозолитического микромицета в зернопаропропашном севообороте на плодородие чернозема выщелоченного. [Die Auswirkung der Rückführung von Gerstenstroh, Zuckerrübenschnitzel und zelluloseabbauende Micromyceten auf der Fruchtbarkeit von Schwarzerdeböden bei einer gemischten Fruchtfolge] http://dibase.ru/article/22112013_150027_holopkin/2, Zugriff am 05.05.2016
- Tschekmarjov, P.; Lukin, S. (2013): Мониторинг плодородия пахотных почв центрально-черноземных областей России. [Monitoring der Fruchtbarkeit von Ackerböden im Schwarzerdegebiet Russlands.] *Агрохимия* 4, С. 11–22
- VDI (2006): VDI 4630: Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Berlin, Beuth Verlag

Autoren

Dr. Irina Miroshnichenko ist Leiterin der Abteilung für wissenschaftliche Information, Gorin Staatliche Agraruniversität Belgorod, Wawilowa 1, 308503 Majskij, Region Belgorod, Russland, E-Mail: imiroshnichenko_@mail.ru.

Dr. Jonas Lindner ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, **Dr. Andreas Lemmer** ist Arbeitsgruppenleiter und **Dr. Hans Oechsner** ist Leiter der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie, Universität Hohenheim, Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart, Deutschland.

Prof. Dr. Ivan Vasilenko ist Professor am Lehrstuhl für Mathematik, Physik und Chemie, Gorin Staatliche Agraruniversität Belgorod, Studentscheskaja 1, 308503 Majskij, Region Belgorod, Russland.

Danksagung

Die Forschungsarbeit wurde durch die Gorin Staatliche Agraruniversität Belgorod finanziell unterstützt.