

Friedrich Weißbach

Das Gasbildungspotenzial von frischen und silierten Zuckerrüben bei der Biogasgewinnung

Das Gasbildungspotenzial von pflanzlicher Biomasse kann anhand des Parameters „Gehalt an fermentierbarer organischer Trockensubstanz“ (FoTS) bewerten werden. In dieser Studie wird untersucht, welche potenzielle Gasausbeute bei frischen und silierten Zuckerrüben je kg FoTS zu erwarten ist. Im Unterschied zu Halm- und Körnerfrüchten kann hier nicht mit einer praktisch konstanten Gasausbeute je kg FoTS gerechnet werden. Die Gasausbeute von silierten Zuckerrüben hängt vielmehr stark davon ab, in welchem Umfang während der Lagerung der Rüben im Silo Saccharose zu Ethanol umgesetzt worden ist.

Schlüsselwörter

Biogas, Methan, Biogasausbeute, Gasbildungspotenzial, fermentierbare organische Trockensubstanz (FoTS), Zuckerrüben

Keywords

Biogas, methane, biogas yield, gas production potential, fermentable organic matter (FOM), sugar beets, silages

Abstract

Weissbach, Friedrich

Gas production potential of fresh and ensiled sugar beets in biogas production

Landtechnik 64 (2009), no.6, pp. 394-397, 3 tables, 9 references

The biogas production potential of plant biomass can be evaluated by the parameter "content of fermentable organic matter"(FOM). In this study, the potential gas yield will be investigated, which can be expected per kg of FOM from fresh and ensiled sugar beets. In contrast to other plant biomass, like such from forage and cereal crops, the gas yield is variable here. It strongly depends on the proportion of sucrose which is transferred into ethanol during storage of sugar beets in the silo.

■ Zuckerrüben werden in zunehmendem Maße als Substrat für die Biogasgewinnung in Betracht gezogen [4]. Ihre Vorteile sind hoher Biomassertrag und gute Fermentierbarkeit. Nachteilig sind ihre begrenzte Lagerfähigkeit und das daraus resultierende Erfordernis, sie als Silage zu konservieren, wenn sie ganzjährige genutzt werden sollen.

Die chemische Zusammensetzung von Zuckerrüben und ihr Abbauverhalten im Biogasfermenter unterscheiden sich wesentlich von denen anderer Ernteprodukte des Pflanzenbaus. Außerdem ist hier mit größeren Veränderungen durch die Silierung zu rechnen als bei anderen Fruchtarten. Deshalb erscheint eine gesonderte Bewertung von Zuckerrüben und Zuckerrübensilagen als Biogassubstrate notwendig.

In einer vorausgegangenen Studie wurde gezeigt, wie der Gehalt an fermentierbarer organischer Trockensubstanz (FoTS) von pflanzlicher Biomasse mithilfe einfacher Routinemethoden der Futtermittelanalyse geschätzt werden kann [5]. Außerdem konnte nachgewiesen werden, dass es möglich ist, die potenzielle Gasausbeute je kg FoTS durch stöchiometrische Berechnungen abzuleiten [7; 8]. Bei den bisher als Substrate zur Biogasgewinnung genutzten Halm- und Körnerfrüchten hat sich dabei ein weitgehend einheitliches Gasbildungspotenzial von rund 420 Litern Methan in 800 Litern Biogas je kg FoTS ergeben.

Ziel dieser Studie ist es, Vorschläge zur Schätzung des Gehaltes an FoTS und zur Berechnung der potenziellen Gasausbeute von frischen und silierten Zuckerrüben zu unterbreiten. Dafür wurden vorhandene Daten aus der Futtermittelkunde über Zusammensetzung und biologische Abbaubarkeit von Zuckerrüben [2; 3] sowie eigene chemische Untersuchungen an Zuckerrübensilagen genutzt.

Schätzung von FoTS

Bei der Silierung von Zuckerrüben ist – wie bei der Silierung anderer Arten pflanzlicher Biomasse – mit Verlusten an organischer Substanz zu rechnen. Die Ursachen dieser Verluste sind die Freisetzung von Kohlendioxid durch Gärungsvorgänge, die Absonderung von Sickersaft und die aerobe Umsetzung organischer Substanz nach Luftkontakt der Silagen während der Entleerung des Silos. Alle diese Prozesse führen dazu, dass die Konzentration an nicht verwertbaren Stoffen in der Silage, nämlich die Gehalte an Rohasche (XA) und an nicht-fermentierbarer organischer Substanz, zunehmen.

Als Ergebnis zahlreicher Versuche mit Schafen wird für Zuckerrüben eine sehr hohe Verdaulichkeit der organischen Substanz von durchschnittlich 89 % [2] bzw. 90 % [3] angegeben. Dabei handelt es sich um die scheinbare Verdaulichkeit; die wahre Verdaulichkeit und damit die biologische Abbaubarkeit liegen noch höher. Um zum Gehalt an wahr verdaulichen und damit fermentierbaren Nährstoffen zu gelangen, muss die metabolische Nährstoffausscheidung der Versuchstiere, an denen die Verdaulichkeit gemessen worden ist, berücksichtigt werden. In Analogie zu den anderen Substratarten [5], ließen sich so die folgenden Schätzgleichungen für die Berechnung des Gehaltes an FoTS in Zuckerrüben und Zuckerrübensilage ableiten:

$$\text{FoTS} = 991 - \text{XA} - 0,70 \text{XF} \text{ [g/kg TS]} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\text{FoTS} = 991 - \text{XA} - 0,50 \text{ADF}_{\text{org}} \text{ [g/kg TS]} \quad (\text{Gl. 2})$$

Bei der ersten Gleichung wird der Rohfasergehalt (XF), bei der zweiten der Gehalt an ADF_{org} (organischer Anteil der *Acid Detergent Fiber*) zur Schätzung der nicht nutzbaren Kohlenhydrate verwendet. Beide Gleichungen können wahlweise angewandt werden. Ein Genauigkeitsunterschied zwischen beiden besteht nicht. Sowohl die Zielgröße (FoTS) als auch alle Analysenparameter haben die Dimension g/kg TS (frische Zuckerrüben) bzw. g/kg TS_k (Silagen und Sickersaft), wobei TS_k die auf flüchtige Substanzen korrigierte Trockensubstanz bedeutet [9].

Gasbildung aus Kohlenhydraten

Die Ableitung von Erwartungswerten für die potenzielle Gasbildung erfolgte durch stöchiometrische Berechnungen auf die gleiche Weise, wie sie für Halm- und Körnerfrüchte beschrieben worden ist [7; 8]. Dazu wurde die Gleichung von Buswell und Mueller [1] auf die einzelnen chemischen Verbindungen angewandt, aus denen die FoTS besteht. Außerdem sind generell 5 % von der sich nach der Gleichung ergebenden Gasbildung abgezogen worden, um die bakterielle Inkorporation von Substrat in die Bakterienbiomasse auszugleichen [6]. **Tabelle 1** enthält Angaben über das so berechnete stöchiometrische Gasbildungspotenzial für Kohlenhydrate und für die durch die Gärung im Silo daraus potenziell entstehenden Gärprodukte.

Bei den Kohlenhydraten steigt die Gasbildung je kg Substrat von den monomeren über die dimeren zu den polymeren Hexosen um jeweils 5 % an. Das Disaccharid Saccharose liefert

Tab. 1

Stöchiometrisches Gasbildungspotenzial N-freier organischer Verbindungen

Table 1: Stoichiometric gas production potential of nitrogen-free organic compounds

Verbindung	Liter/kg		Methan gehalt
	Methan	Biogas	%
Kohlenhydrate			
Hexosen-Monomere	355	709	50,0
Hexosen-Dimere	373	746	50,0
Hexosen-Polymere	394	788	50,0
Pentosen-Polymere	403	806	50,0
Galacturonsäure*-Polymere	364	784	46,4
Gärsäuren			
Milchsäure	355	709	50,0
Essigsäure	355	709	50,0
Propionsäure	503	862	58,3
Buttersäuren	604	967	62,5
Alkohole			
Methanol	498	664	75,0
Ethanol	693	924	75,0
Propanole	797	1063	75,0
Butanole	862	1149	75,0
Propandiole	559	839	66,7
Butandiole	650	945	68,8

* vollständig methyliert

folglich 5 % mehr Gas als die Monosaccharide Glucose oder Fructose, aber rund 5 % weniger als die aus Hexose-Einheiten bestehenden Polysaccharide (Cellulose, Galactane u. a.). Dabei beträgt der Methangehalt des entstehenden Gases stets 50 %. Milchsäure und Essigsäure liefern im Fermenter die gleiche Gasmenge mit dem gleichen Methangehalt wie Glucose oder Fructose. Dagegen wird von Alkoholen je kg Substrat erheblich mehr Methan als aus den Zuckerarten produziert. Der Methangehalt des aus einwertigen Alkoholen gebildeten Biogases beträgt stets 75 %.

Mithilfe dieser stöchiometrischen Gasausbeuten und typischer Gehalte an den einzelnen chemischen Verbindungen in frischen und silierten Zuckerrüben sind die potenziellen Gasausbeuten für die jeweilige Gesamtfraktion der fermentierbaren Kohlenhydrate (zuzüglich der im Silo daraus entstandenen Gärprodukte) berechnet worden. Die Ergebnisse finden sich in **Tabelle 2**.

Hauptbestandteil der Kohlenhydrate von Zuckerrüben ist bekanntlich Saccharose. Die Zellwandsubstanzen bestehen neben Cellulose und Hemicellulosen zum größeren Teil aus Pektinstoffen. Bei der Silierung führt der Abbau der Saccharose, über die Freisetzung von Glucose und Fructose, zunächst zur Bildung von Milch- und Essigsäure. Infolge der nur gerin-

Tab. 2

Gasbildungspotenzial von fermentierbaren Kohlenhydraten und Produkten der Silagegärung aus Zuckerrüben
 Table 2: Gas production potential of fermentable carbohydrates and of silage fermentation products from sugar beets

	Anteil an den fermentierbaren Kohlenhydraten in %	Methan		Biogas		Methangehalt
		Liter/kg der Fraktion	Liter/kg der fermentierbaren Kohlenhydrate	Liter/kg der Fraktion	Liter/kg der fermentierbaren Kohlenhydrate	%
Zuckerrüben, frisch						
Saccharose	78	373	291	746	582	50,0
Hexosen-Polymere (Cellulose, Galactane u. a.)	5	394	20	788	39	50,0
Pentosen-Polymere (Arabane, Xylane u. a.)	5	403	20	806	40	50,0
Galacturonsäure-Methylester-Polymere (Pektinstoffe)	12	364	44	784	94	46,4
insgesamt	100		374		756	49,5
Zuckerrübensilage, Lagerdauer bis 6 Monate						
Saccharose	50	373	187	746	373	50,0
Glucose, Fructose, Milchsäure, Essigsäure	6	355	21	709	43	50,0
Ethanol und andere Alkohole	10	693	69	924	92	75,0
Hexosen-Polymere (Cellulose, Galactane u. a.)	7	394	28	788	55	50,0
Pentosen-Polymere (Arabane, Xylane u. a.)	7	403	28	806	56	50,0
Galacturonsäure-Methylester-Polymere (Pektinstoffe)	20	364	73	784	157	46,4
insgesamt	100		406		776	52,3
Zuckerrübensilage, Lagerdauer mehr als 6 Monate						
Saccharose	30	373	112	746	224	50,0
Glucose, Fructose, Milchsäure, Essigsäure	8	355	28	709	57	50,0
Ethanol und andere Alkohole	20	693	139	924	185	75,0
Hexosen-Polymere (Cellulose, Galactane u. a.)	9	394	35	788	71	50,0
Pentosen-Polymere (Arabane, Xylane u. a.)	9	403	36	806	73	50,0
Galacturonsäure-Methylester-Polymere (Pektinstoffe)	24	364	87	784	188	46,1
insgesamt	100		438		797	55,0

gen Pufferkapazität des Rüben Gewebes genügen relativ kleine Säuremengen, um den pH-Wert auf unter 4,0 abzusenken und dadurch die Milchsäuregärung zum Erliegen zu bringen. Andere niedere Fettsäuren (Propionsäure, Buttersäure u. a.) treten bei Zuckerrübensilagen nur in sehr geringen Mengen auf und sind zu vernachlässigen. Neben der Milchsäuregärung – und besonders nach ihrem Abschluss – wird ein zunehmender Anteil des übrigen Zuckers von Hefen zu Ethanol vergoren, wobei nahezu die Hälfte des Gewichtes des dabei umgesetzten Zuckers in Form von CO₂ entweicht. Die im Silo zurückbleibende Menge an organischer Substanz nimmt durch die Gärungsvorgänge ab und ihr Gehalt an Zellwandsubstanzen folglich zu. In die gleiche Richtung wirkt der Abfluss des reichlich entstehenden und viel Zucker enthaltenden Sickersaftes. Neben großen Mengen an Ethanol wird in Zuckerrübensilagen stets auch etwas Methanol gebildet, und zwar bei der Zersetzung von Pektinstoffen.

Als Folge dieser Gärungsvorgänge steigt das spezifische Gasbildungspotenzial von den frischen zu den silierten Rüben ganz wesentlich an. Für die Silage sind zwei Beispiele mit unterschiedlich weit fortgeschrittener Vergärung der Saccharose

dargestellt. Die Angaben zur Lagerdauer im Silo sind nicht als allgemeingültig zu verstehen, sondern sie sollen lediglich den Effekt der fortschreitenden Vergärung von Saccharose mit zunehmender Lagerdauer, bis in den Sommer hinein, demonstrieren.

Gasbildungspotenzial der FoTS

Die gleichen Aussagen ergeben sich auch für die gesamte FoTS der frischen und silierten Zuckerrüben. In **Tabelle 3** ist das Gasbildungspotenzial je kg FoTS dargestellt, was man durch Einbeziehung der beiden anderen Nährstoffgruppen erhält. Für die nur geringen Gehalte an fermentierbarem Fett und Protein in Zuckerrüben wurden die an vegetativer Biomasse (Grassilage) ermittelten Durchschnittswerte der Gasbildung, nämlich 945 Liter Methan in 1340 Litern Biogas je kg fermentierbares Fett und 365 Liter Methan in 714 Liter Biogas je kg fermentierbares Protein übernommen [7; 8]. Für die FoTS von frischen Zuckerrüben errechnet sich eine spezifische Gasbildung, die deutlich unter derjenigen liegt, die für die FoTS von Halm- und Körnerfrüchten gefunden wurde [7; 8]. Ursache dafür ist, dass

hier die Hauptmenge an fermentierbarem Substrat aus einem Disaccharid, dort aus Polysacchariden besteht. Durch zunehmende Ethanolbildung in der Silage wird diese Differenz jedoch ausgeglichen. Vor allem in der Methanbildung kann Zuckerrübensilage andere Substrate übertreffen.

Als potenzielle Gasausbeute bei frischen Zuckerrüben können rund 375 Liter Methan in 750 Litern Biogas je kg FoTS angesetzt werden. Die Gleichungen für die Berechnung des Gasbildungspotenzials von frischen oder in Mieten gelagerten Zuckerrüben lauten folglich:

$$\text{Biogas [Normliter/kg TS]} = 0,750 \text{ FoTS [g/kg TS]} \quad (\text{Gl. 3})$$

$$\text{Methan [Normliter/kg TS]} = 0,375 \text{ FoTS [g/kg TS]} \quad (\text{Gl. 4})$$

Bei den Silagen sind Zuschläge in Abhängigkeit vom Alkoholgehalt zu machen. Deshalb müssen die Alkoholgehalte von Zuckerrübensilagen bekannt sein, um das Gasbildungspotenzial berechnen zu können. Ethanol liefert je Masseinheit stöchiometrisch rund 24 % mehr Biogas und 86 % mehr Methan als Saccharose (924/746 Liter je kg = 1,24 bzw. 693/373 Liter je kg = 1,86; **Tabelle 1**). Wenn die gemessenen Alkoholgehalte (Summe aller Alkohole = AL) in g je kg korrigierter TS (TS_k) ausgedrückt werden, ergeben sich folgende Zuschläge:

$$\text{Biogas [Normliter/kg } TS_k] = 0,750 (\text{FoTS} + 0,24 \text{ AL}) \text{ [g/kg } TS_k] \quad (\text{Gl. 5})$$

$$\text{Methan [Normliter/kg } TS_k] = 0,375 (\text{FoTS} + 0,86 \text{ AL}) \text{ [g/kg } TS_k] \quad (\text{Gl. 6})$$

Durch Auflösen der Klammern erhält man Gleichungen zur Berechnung des Gasbildungspotenzials, die zur Anwendung bei Zuckerrübensilagen und daraus freigesetztem Sickersaft empfohlen werden:

$$\text{Biogas [Normliter/kg } TS_k] = 0,750 \text{ FoTS} + 0,18 \text{ AL [g/kg } TS_k] \quad (\text{Gl. 7})$$

$$\text{Methan [Normliter/kg } TS_k] = 0,375 \text{ FoTS} + 0,32 \text{ AL [g/kg } TS_k] \quad (\text{Gl. 8})$$

Schlussfolgerungen

Die oTS von Zuckerrüben ist generell sehr gut fermentierbar. Je kg FoTS haben frische oder in Mieten gelagerte Zuckerrüben jedoch mit 375 Litern Methan in 750 Litern Biogas ein niedrigeres Gasbildungspotenzial als Halm- und Körnerfrüchte. Bei der Silierung steigt das Gasbildungspotenzial infolge der Vergärung von Zucker zu Alkohol deutlich an. Von silierten Rüben sind deshalb größere Gasmengen je kg FoTS als von frischen Zuckerrüben zu erwarten. Die Methangehalte des Gases können höher als bei anderen Biogassubstraten ausfallen. Da das Ausmaß der Vergärung von Zucker im Silo großen Schwankungen unterliegt, ist

Tab. 3

Gasbildungspotenzial der fermentierbaren organischen Trockensubstanz (FoTS) von frischen und silierten Zuckerrüben

Table 3: Gas production potential of fermentable organic matter (FOM) from fresh and ensiled sugar beets

Fermentierbare Nährstoffe	Gehalt	Liter/kg Nährstoff		Methangehalt
	g/kg TS	Methan	Biogas	%
Zuckerrüben, frisch				
Kohlenhydrate	835	374	756	49,5
Fett	5	945	1340	70,5
Protein	50	365	714	51,1
insgesamt (FoTS)	890	377	757	49,8
Zuckerrübensilage, Lagerdauer bis 6 Monate				
Kohlenhydrate	835	406	776	52,3
Fett	5	945	1340	70,5
Protein	50	365	714	51,1
insgesamt (FoTS)	890	407	776	52,4
Zuckerrübensilage, Lagerdauer mehr als 6 Monate				
Kohlenhydrate	835	438	797	55,0
Fett	5	945	1340	70,5
Protein	50	365	714	51,1
insgesamt (FoTS)	890	437	795	54,9

für die Bewertung von Zuckerrübensilagen (und daraus freigesetztem Sickersaft) die Bestimmung ihres Gehaltes an Alkohol und anderen bei der Probentrocknung flüchtigen Substanzen unerlässlich.

Literatur Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Buswell, A. M. and H. F. Mueller: Mechanism of methane fermentation. *Industrial and Engineering Chemistry* 44 (1952), no. 3, pp. 550-552
- [2] ● DLG-Futterwerttabellen – Wiederkäuer. DLG-Verlag, Frankfurt/Main, 7. Auflage, 1994
- [3] ● Kling, M. und W. Wöhlbier (Hrsg.): *Handelsfuttermittel. Teil A. Futtermittel pflanzlicher Herkunft*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1983
- [4] Wagner, A.; U. Weber, G. Weber, M. Scholtissek, H. Auerbach and F. Weissbach: Preservation of sugar beets in plastic bags for biogas production. *Proceedings XVth International Silage Conference*. Madison, Wisconsin, USA, 2009, pp. 471-472
- [5] Weißbach, F.: Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. *Landtechnik* 63 (2008), H. 6, S. 356-358
- [6] Weißbach, F.: Ausnutzungsgrad von Nawaros bei der Biogasgewinnung. *Landtechnik* 64 (2009), H. 1, S. 18-21
- [7] Weißbach, F.: Das Gasbildungspotenzial von Halm- und Körnerfrüchten bei der Biogasgewinnung. *Landtechnik* 64 (2009), H. 5, S. 317-321
- [8] Weißbach, F.: Die Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen für die Biogasgewinnung. *Pflanzenbauwissenschaften* 13 (2009) – zur Veröffentlichung eingereicht
- [9] Weißbach, F. und C. Strubelt: Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Zuckerrübensilagen als Substrat für Biogasanlagen. *Landtechnik* 63 (2008), H. 6, S. 354-355

Autor

Prof. Dr. agr. habil. Friedrich Weißbach war bis 1999 Leiter des Instituts für Grünland- und Futterpflanzenforschung der damaligen Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig (FAL) und ist jetzt als freischaffender Firmenberater tätig, E-Mail: prof.f.weissbach@web.de

Danksagung

Der Autor dankt der NAWARO® BioEnergie AG für die finanzielle Förderung des Projektes, dessen Ergebnisse hier dargestellt sind.