

Friedrich Weißbach

# Das Gasbildungspotenzial von Halm- und Körnerfrüchten bei der Biogasgewinnung

Die Gasausbeute bei der Biogasgewinnung ist das Produkt aus dem Gasbildungspotenzial der eingesetzten Substrate und dem Ausnutzungsgrad dieses Potenzials durch die Gestaltung des Fermentationsprozesses. Das Gasbildungspotenzial von pflanzlicher Biomasse kann anhand des Parameters „Gehalt an fermentierbarer organischer Trockensubstanz“ (FoTS) bewertet werden. In dieser Studie wird untersucht, mit welcher potenziellen Gasausbeute je kg FoTS bei Halm- und Körnerfrüchten zu rechnen ist.

## Schlüsselwörter

Biogas, Methan, Biogasausbeute, Gasbildungspotenzial, Ausnutzungsgrad, fermentierbare organische Trockensubstanz (FoTS), nachwachsende Rohstoffe

## Keywords

Biogas, methane, biogas yield, gas production potential, degree of utilization, fermentable organic matter (FOM), renewable primary products

## Abstract

Weissbach, Friedrich

## Gas production potential of forage and cereal crops in biogas production

Landtechnik 64 (2009), no. 5, pp. 317 - 321, 6 tables, 12 references

Gas yield in biogas production is the result of the biogas production potential of substrates and the degree of utilization of this potential during the fermentation process. The biogas production potential of crop 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 forage and cereal crops.

■ Um nachwachsende Rohstoffe als Substrate für die Biogasgewinnung bewerten zu können, wird eine Methode benötigt, die schnell und kostengünstig zuverlässige Aussagen über deren stoffliches Gasbildungspotenzial liefert. Für diesen Zweck

ist die Ermittlung der „fermentierbaren organischen Trockensubstanz“ (FoTS) vorgeschlagen worden [10]. Unter der FoTS soll derjenige Anteil der oTS verstanden werden, der unter anaeroben Bedingungen biologisch abgebaut werden kann und der sich deshalb potenziell in Biogasanlagen nutzen lässt.

Berechnungen zeigten, dass bei den wichtigsten bisher zur Biogasgewinnung genutzten Halm- und Körnerfrüchten, und zwar unabhängig von ihrem Gehalt an den drei Nährstofffraktionen: Kohlenhydrate, Fett und Protein, die Bildung von etwa 800 Litern Biogas mit etwa 420 Litern Methan je kg FoTS erwartet werden kann. Diese potenzielle Gasausbeute wurde zunächst mit Hilfe von Angaben über den spezifischen Beitrag der einzelnen Nährstofffraktionen zur Biogasbildung berechnet, die auf eine Arbeit von Baserga [1] zurückgehen. Danach sollen 790, 1 250 und 700 Liter Biogas je kg Kohlenhydrate, Fett bzw. Protein gebildet werden, wobei das Gas zu 50, 68 bzw. 71 % aus Methan besteht. Das Zustandekommen dieser Angaben ist jedoch nirgends offen gelegt und erklärt worden. Außerdem wird die Allgemeingültigkeit solcher Angaben von anderen Autoren bezweifelt [7]. Ziel dieser Studie ist es, substratspezifische Biogasausbeuten für pflanzliche Biomasse auf stöchiometrischem Wege abzuleiten.

## Material und Methode

Der biochemische Prozess der Biogasbildung besteht bekanntlich darin, dass organische Verbindungen anaerob bis zu den beiden C<sub>1</sub>-Verbindungen CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> abgebaut werden. In welcher Menge und welchem Verhältnis dabei CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> entstehen, hängt vom Oxidationszustand des Kohlenstoffs ab und lässt sich aus der Summenformel der jeweiligen Verbindung, soweit diese Verbindung vollständig abgebaut wird, berechnen. Gleichungen, die das ermöglichen, sind für N-freie Verbindungen von Buswell und Mueller [3] sowie für N-haltige Verbindungen von Boyle [2] schon vor längerer Zeit formuliert worden.

Von diesen Gleichungen können brauchbare Ergebnisse jedoch nur dann erwartet werden, wenn

1. die Anwendung der Gleichungen auf denjenigen Anteil der organischen Verbindungen beschränkt bleibt, der unter anaeroben Bedingungen tatsächlich biologisch abbaubar (d. h. fermentierbar) ist, und wenn
2. die auf diese Weise zu errechnenden theoretischen Gasausbeuten je Gewichtseinheit der jeweiligen Verbindung um den Anteil reduziert werden, zu dem die biologisch abbaubare organische Substanz in die bakterielle Biomasse inkorporiert wird und deshalb für die Gasbildung nicht zur Verfügung steht.

Die Ergebnisse vorausgegangener Studien ermöglichen es, diese beiden Voraussetzungen zu erfüllen. Die in standardisierten Verdauungsversuchen an Schafen als wahr verdaulich gemessenen Nährstoffanteile dürften mit denjenigen, die im Fermenter potenziell nutzbar sind, identisch sein. Schätzgleichungen zur Berechnung des Gehaltes an FoTS wurden für die

bisher gebräuchlichsten Fruchtarten vorgelegt [10]. Ihre Gültigkeit ist an die exakte Korrektur der Trockensubstanz von Silagen auf die bei der Probentrocknung flüchtigen Stoffe gebunden [8; 9]. Als wahrscheinliches Ausmaß der bakteriellen Inkorporation wurden 5 % der umgesetzten organischen Substanz ermittelt [11]. Unter Nutzung dieses Wissensstandes und des vorliegenden Datenfundus der Futtermittelkunde zur chemischen Zusammensetzung von pflanzlicher Biomasse [4; 5; 6] werden im Folgenden stöchiometrische Gasausbeuten für die einzelnen Nährstofffraktionen und Substrate abgeleitet. Das kann hier jedoch nur auszugsweise dargestellt werden. Für Einzelheiten wird auf eine ausführliche Publikation verwiesen [12].

### N-freie organische Verbindungen

In **Tabelle 1** sind für die wichtigsten, in pflanzlicher Biomasse enthaltenen, N-freien organischen Verbindungen (z. T. etwas vereinfachte) Summenformeln angegeben. Weiter sind die daraus mit der Gleichung nach Buswell und Mueller [3] und an-

Tab. 1

Stöchiometrisches Gasbildungspotenzial N-freier organischer Verbindungen

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

Verbindung	Summenformel	Liter/kg		Methangehalt %
		Methan	Biogas	
<b>Kohlenhydrate</b>				
Hexosen-Monomere (z.B. Glucose, Fructose)	$C_6H_{12}O_6$	355	709	50,0
Hexosen-Dimere (z.B. Saccharose)	$C_{12}H_{22}O_{11}$	373	746	50,0
Hexosen-Polymere (z.B. Stärke, Cellulose)	$(C_6H_{10}O_5)_n$	394	788	50,0
Pentosen-Polymere (z.B. Xylan, Araban)	$(C_5H_8O_4)_n$	403	806	50,0
Galacturonsäure-Polymere (Pektinstoffe)	$(C_7H_{11}O_6)_n$	364	784	46,4
<b>Gärsäuren</b>				
Milchsäure	$C_3H_6O_3$	355	709	50,0
Essigsäure	$C_2H_4O_2$	355	709	50,0
Propionsäure	$C_3H_6O_2$	503	862	58,3
Buttersäuren	$C_4H_8O_2$	604	967	62,5
<b>Alkohole</b>				
Ethanol	$C_2H_6O$	693	924	75,0
Propanole	$C_3H_8O$	797	1063	75,0
Butanole	$C_4H_{10}O$	862	1149	75,0
Propandiole	$C_3H_8O_2$	559	839	66,7
Butandiole	$C_4H_{10}O_2$	650	945	68,8
<b>Höhere Fettsäuren und Triglyceride</b>				
Laurinsäure	$C_{12}H_{24}O_2$	903	1275	70,8
Palmitinsäure	$C_{16}H_{32}O_2$	955	1328	71,9
Stearinsäure	$C_{18}H_{36}O_2$	973	1347	72,2
Ölsäure	$C_{18}H_{34}O_2$	961	1357	70,8
Linolsäure	$C_{18}H_{32}O_2$	949	1366	69,4
Linolensäure	$C_{18}H_{30}O_2$	937	1376	68,1
Palmitinsäuretriglycerid	$C_{51}H_{98}O_6$	956	1345	71,1
Stearinsäuretriglycerid	$C_{57}H_{110}O_6$	973	1361	71,5

schließender Reduktion um 5 % berechneten Gasmengen dargestellt. Von den Kohlenhydraten kommen die monomeren und dimeren Hexosen (Glucose, Fructose bzw. Saccharose) nur in geringem Umfang vor. In den Halmfruchtsilagen (Silagen aus Mais- und Getreideganzpflanzen, Grüngetreide, Gräsern und Leguminosen) sind sie größtenteils bereits im Silo zu Gärsäuren und Alkoholen vergoren, in den Körnerfrüchten (trockenes Getreidekorn) während der Reife in Speicherkohlenhydrate (vor allem Stärke) umgesetzt worden. Die Hauptmenge an Kohlenhydraten besteht aus Polysacchariden, die überwiegend aus Hexose-Einheiten (aus Glucose bei Stärke und Cellulose, aus Fructose bei den Fructanen) oder zum kleineren Teil aus Pentose-Einheiten (aus Xylose und Arabinose bei den Pentosanen) aufgebaut sind. Von geringerer Bedeutung sind die aus Galacturonsäure-Einheiten (hier als vollständig methyliert angenommen) aufgebauten Pektinstoffe.

Den Kohlenhydraten gemeinsam ist, dass sie (mit Ausnahme der Pektinstoffe) stets ein Biogas liefern, das zu 50 % aus Methan besteht. Die auf das Substratgewicht bezogene Gasbildung nimmt von den Monomeren über die Dimeren bis zu den Polymeren zu. Dabei ist es gleichgültig, ob es sich z. B. um Hexosen-Polymere aus dem Zellinhalt oder aus der Zellwand handelt. 1 kg biologisch umgesetzte Cellulose liefert die gleiche Gasmenge wie 1 kg umgesetzte Stärke. Von den Produkten der Silagegärung, die nach der üblichen Einteilung der Nährstofffraktionen in der Futtermittelanalyse zu der Gesamtfraktion der Kohlenhydrate (Rohfaser plus N-freie Extraktstoffe) gerechnet werden, liefern Milchsäure und Essigsäure die gleichen Gasmengen wie Glucose und Fructose. Bei den niederen Fettsäuren steigen mit zunehmender Länge der Kohlenstoffkette die spezifischen Gasmengen und der Methangehalt des Gases an. Das gilt auch für die Alkohole, die infolge ihres geringeren Kohlenstoff-Oxidationszustandes erheblich größere Gasausbeuten und Methangehalte ergeben. Das setzt sich bei den höheren Fettsäuren fort.

Aus typischen Gehaltswerten für die einzelnen Kohlenhydrate in den verschiedenen Fruchtarten und Pflanzenorganen sind dann durch detaillierte Berechnungen die im Durchschnitt zu erwartenden stöchiometrischen Gasausbeuten der fermentierbaren Kohlenhydrate kalkuliert worden. Sie sind in **Tabelle 2** zusammengefasst.

Tab. 2

Gasbildungspotenzial der fermentierbaren Kohlenhydrate aus Halm- und Körnerfrüchten  
*Table 2: Gas production potential of fermentable carbohydrates from forage and cereal crops*

Substrat	Liter/kg		Methan- gehalt %
	Methan	Biogas	
Maissilage	402	791	50,8
Getreideganzpflanzensilage	406	794	51,1
Grassilage	407	796	51,1
Getreidekorn	394	787	50,0

Die höheren Fettsäuren liefern etwa das 2½-fache an Methan im Vergleich zu Stärke und Cellulose. Sie kommen in den Samen der Körnerfrüchte als Triglyceride, in der vegetativen Biomasse dagegen hauptsächlich verknüpft mit Zuckern als Glykolipide vor [4]. Bei Letzteren ist hier nur der Fettsäurenanteil zu bewerten. Die Unterschiede in der stöchiometrischen Gasausbeute zwischen den einzelnen höheren Fettsäuren und in Anhängigkeit von ihren Bindungsformen sind nur gering. Im Durchschnitt kann unabhängig von der Pflanzenart für die fermentierbaren Fette aus Körnern und Samen mit 970 Litern Methan und 1360 Litern Biogas je kg gerechnet werden. Für die Fettsäuren aus den Lipiden der vegetativen Biomasse betragen die vergleichbaren Zahlen 945 und 1350 Liter/kg.

### N-haltige organische Verbindungen

Bei den organischen N-Verbindungen in pflanzlicher Biomasse handelt es sich im Wesentlichen um freie oder in Proteinen gebundene Aminosäuren. Andere organische N-Verbindungen können hier mengenmäßig vernachlässigt werden.

**Tabelle 3** enthält Angaben über die stöchiometrisch zu er-

Tab. 3

Stöchiometrisches Gasbildungspotenzial von Aminosäuren  
*Table 3: Stoichiometric gas production potential of amino acids*

Verbindung	Liter/kg				Methan- gehalt %
	freie Aminosäuren Methan	Biogas	im Protein gebunden Methan	Biogas	
Alanin	358	717	449	899	50,0
Asparaginsäure	240	639	277	740	37,5
Arginin	336	733	375	818	45,8
Cystin	200	532	216	575	37,5
Glutaminsäure	326	724	371	825	45,0
Glycin	213	567	280	747	37,5
Histidin	343	824	389	931	41,7
Isoleucin	609	974	706	1129	62,5
Leucin	609	974	706	1129	62,5
Lysin	510	874	581	997	58,3
Methionin	392	713	447	811	55,0
Phenylalanin	644	1160	723	1302	55,6
Threonin	357	715	421	843	50,0
Serin	254	608	306	733	41,7
Tryptophan	599	1147	657	1258	52,3
Tyrosin	558	1057	619	1174	52,8
Prolin	508	924	603	1096	55,0
Valin	545	908	644	1074	60,0

wartende Gasbildung aus den 18 wichtigsten Aminosäuren, wie sie entweder im Protein gebunden oder, nach Hydrolyse des Proteins während der Silierung, als freie Aminosäuren vorliegen [6]. Auch die nach der Gleichung von Boyle [2] berechneten Gasmengen wurden zum Ausgleich der bakteriellen Inkorporation generell um 5 % reduziert. Die bei der Fermentation entstehenden Gasvolumina an Ammoniak und Schwefelwasserstoff blieben unberücksichtigt. Auswahl und Reihenfolge der Aminosäuren entsprechen der in den Handbüchern der Futtermittelkunde üblichen Darstellungsweise [5].

Zwischen den einzelnen Aminosäuren sind erhebliche Unterschiede im Gasbildungspotenzial festzustellen. Auch ob es sich um freie oder gebundene Aminosäuren handelt, macht für die Gasbildung je kg Substrat sehr viel aus. Eine zutreffende Abschätzung des Gasbildungspotenzials ist deshalb nur möglich, wenn die jeweiligen Gehalte an den einzelnen Aminosäuren und der Anteil der freien und der gebundenen Aminosäuren bekannt sind. Die Auswertung einer großen Zahl von Datensätzen über den Aminosäuregehalt von pflanzlicher Biomasse [4; 5; 6] hat zu den in **Tabelle 4** zusammengefassten Ergebnissen geführt.

Hiernach ist es sinnvoll, zwischen den Samen und der vegetativen Biomasse, und weiter zwischen Mais- und anderem Getreidekorn bzw. vegetativer Biomasse von Gramineen und Leguminosen zu unterscheiden. Unter Verwendung dieser Zahlen, der Annahme typischer Mengenanteile von generativen und vegetativen Pflanzenorganen in Mais- und Getreideganzpflanzensilagen sowie der Abschätzung typischer Prozentsätze von Reinprotein und freien Aminosäuren am Rohprotein sind dann mittlere Erwartungswerte für das stöchiometrische Gasbildungspotenzial des fermentierbaren Rohproteins berechnet worden.

Tab. 4

Gasbildungspotenzial der Gesamtheit von Aminosäuren in pflanzlicher Biomasse unterschiedlicher Arten  
*Table 4: Gas production potential of the total of amino acids in herbage from different species*

Substrat	Liter/kg		Methangehalt %
	Methan	Biogas	
<b>Freie Aminosäuren</b>			
aus Maiskorn	385	745	51,6
aus Getreidekorn	394	778	50,7
aus vegetativer Biomasse			
von Gramineen	339	656	51,7
von Leguminosen	342	667	51,3
<b>Proteine</b>			
im Maiskorn	447	866	51,6
im Getreidekorn	457	901	50,7
in vegetativer Biomasse			
von Gramineen	395	765	51,6
von Leguminosen	398	777	51,2

## Nährstofffraktionen und Substrate

Anhand der hier untersuchten Substratarten und der für diese berechneten artenspezifischen Gasausbeuten der Nährstofffraktionen kann nun überprüft werden, ob der Gehalt an FoTS tatsächlich für die Bewertung von pflanzlicher Biomasse ausreicht, und mit welcher potenziellen Gasausbeute je kg FoTS zu rechnen ist. Die Zahlen in **Tabelle 5** bestätigen, dass zumindest bei den hier untersuchten Arten eine Berücksichtigung der einzelnen Nährstoffgehalte nicht erforderlich ist und dass, ohne größere Fehler in Kauf nehmen zu müssen, bei den Halm- und Körnerfrüchten mit einer potenziellen Gasausbeute von einheitlich 420 Litern Methan in 800 Litern Biogas je kg FoTS gerechnet werden kann.

Eine Überprüfung dieser Werte ist anhand der Ergebnisse eines Praxisversuchs möglich, bei dem 3 parallel betriebene, hauptsächlich mit Maissilage neben etwas Getreideschrot und sehr wenig Gülle beschickte große Fermenter 3 Monate lang bilanziert worden sind [11]. In **Tabelle 6** sind die hier abgeleiteten stöchiometrischen Gasbildungspotenziale den Resultaten dieses Praxisversuchs gegenübergestellt. Dabei ist die Methanausbeute auf zwei unterschiedlichen Wegen ermittelt

Tab. 5

Gasbildungspotenzial der fermentierbaren organischen Trocken-substanz (FoTS) aus Halm- und Körnerfrüchten

*Table 5: Gas production potential of the fermentable organic matter (FOM) from forage and cereal crops*

	Fermentierbare Nährstoffe	Gehalt g/kg TS	Liter/kg Nährstoff		Methangehalt %
			Methan	Biogas	
Mais-silagen	Kohlenhydrate	700	402	791	50,8
	Fett	30	960	1350	71,1
	Protein	70	390	759	51,4
	insgesamt (FoTS)	800	422	809	52,1
Getreide-ganz-pflanzen-silagen	Kohlenhydrate	600	406	794	51,1
	Fett	25	960	1350	71,1
	Protein	75	400	784	51,0
	insgesamt (FoTS)	700	425	813	52,3
Gras-silagen	Kohlenhydrate	550	407	796	51,1
	Fett	25	945	1340	70,5
	Protein	125	365	714	51,1
	insgesamt (FoTS)	700	419	801	52,3
Getreide-korn	Kohlenhydrate	770	394	787	50,0
	Fett	20	970	1360	71,3
	Protein	120	449	883	50,8
	insgesamt (FoTS)	910	414	812	51,0
Mittel für alle hier untersuchten Arten			420	809	51,9

Tab. 6

Vergleich des stöchiometrisch berechneten Gasbildungspotenzials von Halm- und Körnerfrüchten mit der Gasausbeute nach Fermenterbilanzen

Table 6: Comparison of gas production potential from forage and cereal crops obtained by stoichiometric calculations versus gas yields by balancing fermenters

Methode der Ermittlung	Liter/kg FoTS		Methan-gehalt %
	Methan	Biogas	
Stöchiometrische Berechnung	420	809	51,9
	(414-425)	(801-813)	(51,0-52,3)
Messung von Gasvolumen und Methangehalt	418	802	51,7
	(402-434)	(789-819)	(48,9-53,2)
Berechnung aus der elektrischen Arbeit (kWh)	414		51,6
	(405-421)		(50,6-52,8)
Bisheriger Vorschlag zur Substratbewertung [10]	420	800	52,5

worden (Messung von Biogasmenge und Methangehalt bzw. Berechnung des Methanvolumens aus der erzeugten Strommenge). Die angegebenen Spannweiten betreffen beim stöchiometrischen Gasbildungspotenzial die untersuchten Substratarten, beim Praxisversuch betreffen sie die realisierte Gasausbeute in den einzelnen Fermentern. Die angegebenen Gasmengen sind auf Normbedingungen berechnet. Die Gasausbeuten sind, wenn sie das Potenzial betreffen, auf die gesamte FoTS bezogen, und wenn sie das Ergebnis des Praxisversuchs betreffen, auf die tatsächlich umgesetzte FoTS.

### Schlussfolgerungen

Die in einer vorausgegangenen Untersuchung abgeleiteten Erwartungswerte für die potenzielle Gasausbeute bei Halm- und Körnerfrüchten [10] von 420 Litern Methan in 800 Litern Biogas je kg FoTS wird sowohl durch die stöchiometrischen Berechnungen als auch durch einen Praxisversuch bestätigt. Es erscheint deshalb möglich und sinnvoll, nachwachsende Rohstoffe für die Biogaserzeugung durch einfache Laboranalysen,

die Anwendung von Schätzgleichungen zur Ermittlung des Gehaltes an FoTS und schließlich die Umrechnung der FoTS in Gasmengen zu bewerten. Diese Bewertungsmethode ist schnell und kostengünstig. Sie führt – im Unterschied zu Batchtests – zu sehr gut reproduzierbaren Ergebnissen, weil die so ermittelten potenziellen Gasausbeuten frei sind von Effizienzunterschieden des Gärprozesses in den Laborfermentern.

### Literatur

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Baserga, U.: Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen – Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras. FAT-Berichte Nr. 512, 1998, S.1-11
- [2] Boyle, W. C.: Energy recovery from sanitary landfills – a review. A seminar held in Göttingen 1976, pp. 119-138. Published in: Schlegel, H. G. and S. Barnea (Hrsg.): Microbial Energy Conversion. Oxford Pergamon Press, 1976
- [3] Buswell, A. M. and H. F. Mueller: Mechanism of methane fermentation. Industriell and Engineering Chemistry 44 (1952), No. 3, pp. 550-552
- [4] ● Butler, G. W. and R. W. Bailey (Edit.): Chemistry and biochemistry of herbage. Vol. 1., Academic Press, London and New York, 1973
- [5] ● Kling, M. und W. Wöhlbier (Hrsg.): Handelsfuttermittel. Teil A. Futtermittel pflanzlicher Herkunft. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, 1983
- [6] ● Reuter, B.: Untersuchungen zum Eiweiß- und Aminosäurenabbau bei der Grünfuttersilierung. Diss. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften Berlin, 1982
- [7] Weiland, P.: Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate. In: Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven. VDI-Berichte Nr. 1620, 2001, S. 19-32
- [8] Weißbach, F. und C. Strubelt: Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Maissilagen als Substrat für Biogasanlagen. Landtechnik 63 (2008), H. 2. S. 82-83
- [9] Weißbach, F. und C. Strubelt: Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Grassilagen als Substrat für Biogasanlagen. Landtechnik 63 (2008), H. 4. S. 210-211
- [10] Weißbach, F.: Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. Landtechnik 63 (2008), H. 6, S. 356-358
- [11] Weißbach, F.: Ausnutzungsgrad von Nawaros bei der Biogasgewinnung. Landtechnik 64 (2009), H. 1, S. 18-21
- [12] Weißbach, F.: Die Bewertung von nachwachsenden Rohstoffen für die Biogasgewinnung. Pflanzenbauwissenschaften – zur Veröffentlichung eingereicht

### 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 und die versuchstechnische Unterstützung des Projektes, dessen Ergebnisse hier dargestellt sind.