

Helge Zacharias

**Untersuchung des Einflusses einer Auswahl  
von biologischen und chemischen  
Siliermitteln auf die Biogasbildung als  
Grundlage zur ökonomischen Bewertung**

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2008 Diplomica Verlag GmbH  
ISBN: 9783836623469

**Helge Zacharias**

**Untersuchung des Einflusses einer Auswahl von biologischen und chemischen Siliermitteln auf die Biogasbildung als Grundlage zur ökonomischen Bewertung**



Helge Zacharias

## **Untersuchung des Einflusses einer Auswahl von biologischen und chemischen Siliernmitteln auf die Biogasbildung als Grundlage zur ökonomischen Bewertung**

Helge Zacharias

**Untersuchung des Einflusses einer Auswahl von biologischen und chemischen Siliermitteln auf die Biogasbildung als Grundlage zur ökonomischen Bewertung**

ISBN: 978-3-8366-2346-9

Herstellung: Diplomica® Verlag GmbH, Hamburg, 2009

Zugl. Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, Deutschland, MA-Thesis / Master, 2008

---

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und der Verlag, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

© Diplomica Verlag GmbH

<http://www.diplomica.de>, Hamburg 2009

## **Danksagung**

Ich möchte mich bei allen Leuten bedanken, die mich während der entbehnungsreichen Zeit unterstützt haben, in der diese Arbeit entstanden ist.

Herrn Dr. Matthias Plöchl für die Bereitstellung des Themas und die Betreuung.

Frau Dr. Anette Prochnow insbesondere für die Herstellung wichtiger Kontakte und die Einführung ins ATB.

Herrn Dr. Horst Auerbach für die sehr fruchtbaren fachlichen Gespräche und das außerordentliche Engagement

Frau Dr. in spe Christiane Herrmann für das Zurverfügungstellen einiger unveröffentlichter Untersuchungsergebnisse.

Meiner Oma und Jana Bosse für das Korrekturlesen des kaum verständlichen und deshalb wohl wenig amüsanten Fachtextes.

**Inhaltsverzeichnis**

SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN.....	V
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2 GRUNDLAGEN.....</b>	<b>3</b>
2.1 GRUNDLAGEN DER SILIERUNG .....	3
2.1.1 <i>Bedeutung</i> .....	3
2.1.2 <i>Siliereignung von Pflanzen</i> .....	5
2.1.3 <i>Gärverlauf</i> .....	7
2.1.4 <i>Milchsäurebakterien</i> .....	8
2.1.4.1 <i>Homofermentative Milchsäurebakterien</i> .....	9
2.1.4.2 <i>Heterofermentative Milchsäurebakterien</i> .....	10
2.1.5 <i>Gärschädlinge</i> .....	12
2.1.5.1 <i>Clostridien</i> .....	13
2.1.5.2 <i>Hefen</i> .....	16
2.1.5.3 <i>Schimmelpilze</i> .....	19
2.1.5.4 <i>Enterobakterien</i> .....	20
2.1.5.5 <i>Bacillusarten</i> .....	21
2.1.5.6 <i>Essigsäurebakterien</i> .....	21
2.1.5.7 <i>Listerien</i> .....	22
2.1.6 <i>Silbertechnik</i> .....	23
2.1.7 <i>DLG-Bewertungsschlüssel zur Beurteilung der Gärqualität</i> .....	26
2.2 SILIERMITTEL .....	27
2.2.1 <i>Biologische Siliermittel</i> .....	27
2.2.1.1 <i>Milchsäurebakterien</i> .....	27
2.2.1.2 <i>Propionsäurebakterien</i> .....	30
2.2.1.3 <i>Effektive Mikroorganismen (EM)</i> .....	30
2.2.1.4 <i>Killerhefen</i> .....	31
2.2.2 <i>Chemische Siliermittel</i> .....	31
2.2.3 <i>Kombinationsmittel</i> .....	33
2.2.4 <i>Zuckerfreisetzende Siliermittel</i> .....	34
2.2.5 <i>Sonstige Zusätze (Enzyme)</i> .....	34
2.3 GRUNDLAGEN DER VERGÄRUNG ZU BIOGAS .....	36
2.3.1 <i>Laborverfahren zur Untersuchung der Methanisierungsprozesse</i> .....	40
2.3.2 <i>Ökonomische Betrachtung</i> .....	41
<b>3 MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>43</b>
3.1 SILIERUNG .....	43
3.1.1 <i>Versuchsaufbau</i> .....	43
3.1.1.1 <i>Inputstoffe</i> .....	43
3.1.1.2 <i>Behandlung der Inputstoffe</i> .....	44
3.1.2 <i>Beschreibung der Behandlungsmittel</i> .....	46
3.1.2.1 <i>KOFASIL LIQUID®</i> .....	47
3.1.2.2 <i>KOFASIL LIFE®</i> .....	47
3.1.2.3 <i>KOFASIL LIFE M®</i> .....	48
3.1.2.4 <i>KOFASIL LAC®</i> .....	48
3.1.2.5 <i>MAIS KOFASIL LIQUID®</i> .....	48
3.1.2.6 <i>Entwicklungsprodukt (EP)</i> .....	49
3.1.2.7 <i>Milchsäurebakterien 1 und 2 (MSB 1 und 2)</i> .....	49
3.1.3 <i>Analysemethoden</i> .....	50
3.1.4 <i>Korrekturmethode</i> .....	51
3.2 <i>METHODIK ZUR UNTERSUCHUNG DER AEROBEN STABILITÄT</i> .....	52
3.3 <i>METHANISIERUNG</i> .....	53
3.3.1 <i>Versuchsaufbau</i> .....	53
3.3.1.1 <i>Verfahren zur Untersuchung der Biogasbildung</i> .....	53



---

3.3.1.2	Vergleichbarkeitsversuch Wasserbad/Klimaschrank .....	58
3.3.2	Korrekturmethode .....	59
3.3.3	Methodik der Batchversuchs-Auswertung .....	60
3.4	ÖKONOMISCHE BETRACHTUNG DES SILIERMITTELEINSATZES .....	61
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION .....</b>	<b>63</b>
4.1	AUSWERTUNG DER SILIERVERSUCHE .....	63
4.1.1	Luzerne .....	63
4.1.2	Gras .....	65
4.1.3	Mais .....	68
4.2	AUSWERTUNG DER VERSUCHE ZUR AEROBEN STABILITÄT .....	70
4.2.1	Luzerne .....	70
4.2.2	Mais .....	70
4.3	AUSWERTUNG DER BATCHVERSUCHE .....	74
4.3.1	Inputstoffunabhängige Beobachtungen .....	74
4.3.2	Luzerne .....	76
4.3.3	Gras .....	77
4.3.4	Mais .....	80
4.4	ÖKONOMISCHE BETRACHTUNG DES SILIERMITTELEINSATZES .....	83
4.4.1	Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen .....	83
4.4.1.1	Luzernesilagen .....	83
4.4.1.2	Grassilagen .....	84
4.4.1.3	Maissilagen .....	85
4.4.2	Anwendungsstrategien zur Kostenreduzierung .....	87
4.5	FEHLERDISKUSSION .....	88
4.5.1	Versuchsaufbau .....	88
4.5.2	Gasvolumenmessung .....	89
4.5.3	Probenbehandlung .....	89
4.5.4	Vergleichbarkeitsversuch Wasserbad/Klimaschrank .....	90
4.5.5	Vergleich der Ergebnisse mit Werten aus der Literatur .....	90
<b>5</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>93</b>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>95</b>
<b>7</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>97</b>
7.1	LITERATURVERZEICHNIS .....	97
7.2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	111
7.3	TABELLENVERZEICHNIS .....	113
<b>8</b>	<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....</b>	<b>115</b>
<b>9</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>117</b>

---

**SYMBOLS UND ABKÜRZUNGEN**

ADF	saure Detergensfaser (acid detergent fibre)	LWK	Landwirtschaftskammer
ADL	Saures Detergenslignin (acid detergent lignin)	MSB	Milchsäurebakterien
ADP	Adenosindiphosphat	ME	Umsetzbare Energie
ATB	Leibnizinstitut für Agrartechnik Potsdam-Bornim	n	Stichprobenumfang
ATP	Adenosintriphosphat	n.b.	nicht bestimmt
BHKW	Blockheizkraftwerk	NO <sub>3</sub>	Nitrat
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	NH <sub>3</sub>	Ammoniak
DLG	Deutsche Landwirtschafts- gesellschaft e.V.	NH <sub>3</sub> -N	Ammoniakstickstoff
DSM	bei der DSMZ hinterlegter Mikro- organismen-Stamm	n.n.	nicht nachweisbar
DSMZ	Deutsche Sammlung von Mikro- organismen und Zellkulturen	NDF	Neutrale Detergensfaser (neutral detergent fibre)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz	NEL	Nettoenergie-Laktation
FAL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft	Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
FM	Frischmasse	nRP	nutzbares Rohprotein
H <sub>2</sub> O	Wasser	oTM	organische Trockenmasse
HU	Humboldt-Universität zu Berlin	oTM <sub>korrr</sub>	organische Trockenmasse, korrigiert
KBE	koloniebildende Einheit	r	Anzahl der Wiederholungen
kW <sub>elektr</sub>	Kilowattstunde elektrische Energie	RA	Rohasche
kW <sub>therm</sub>	Kilowattstunde thermische Energie	Rfa	Rohfaser
L.	<i>Lactobacillus</i>	RP	Rohprotein
ℓ	Liter	PK	Pufferkapazität
LUFA	Landwirtschaftliche Untersu- chungs- und Forschungsanstalt	Rev.	Revision
		TM	Trockenmasse
		TM <sub>korrr</sub>	Trockenmasse, korrigiert
		VarK	Variationskoeffizient
		Vk	Vergärbarkeitskoeffizient
		Z	Zucker

## 1 EINLEITUNG

Der im EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) ausgedrückte gesellschaftliche und politische Wille, den allgemeinen Energiebedarf vermehrt durch alternative Quellen zu decken, hat in Deutschland zu einer rapide wachsenden Verbreitung der Biogasverstromung geführt.

Insbesondere die Verwendung von Energiepflanzen ist durch die im Erneuerbare-Energien-Gesetz festgeschriebene Einspeisevergütung (Stromerzeugungssubventionierung) rentabel und attraktiv geworden (REINHOLD 2005).

Die Pflanzenmassen, die in Biogasanlagen umgesetzt und verstromt werden, sollten für einen effektiven Betrieb in gleichmäßigen Mengen und Qualitäten zugeführt werden. Da die Verfügbarkeit der Nutzpflanzenmassen von der Vegetationsperiode abhängt, muss eine Konservierung erfolgen. Die Silierung ist eine dafür seit langem in die landwirtschaftliche Praxis eingeführte Methode. Bisher wurde dieses Verfahren genutzt, um möglichst gut verdauliche Futtermittel für Wiederkäuer zu bereiten. Pflanzenmassen sollen dazu möglichst ohne Verluste an Masse und Energie konserviert werden.

Letzteres ist auch für das Anwendungsgebiet der Biogaserzeugung ein gültiges Ziel. Darüber hinaus ergeben sich jedoch teilweise veränderte Ansprüche an den Siliervorgang (NEUREITER 2005); da die während des Siliervorgangs stattfindenden Aufschluss- und Umwandlungsprozesse das Potenzial bieten, die anschließende Vergärung zu Biogas effizienter zu gestalten. Diese Potenziale gilt es durch Steuerung der Prozesse nutzbar zu machen.

Alle Silagen unterliegen früher oder später einem aeroben Verderb als Resultat mikrobieller Aktivität (ARCHUNDIA & BOLSEN 2001).

Trockenmasseverluste von circa drei Prozent pro Tag können durch aerobe Umsetzung nach Öffnen eines Silos entstehen (PAHLOW & WEISSBACH 1999a). Sauerstoff gelangt dabei, in Abhängigkeit von der Verdichtung, ein bis zwei Meter tief hinter die Anschnittsfläche (WEINBERG & MUCK 1996) und ermöglicht eine starke Vermehrung von Hefen, Schimmelpilzen und Enterobakterien. Diese Mikroorganismen stellen die Hauptverderbniserreger dar, die durch ihren Stoffwechsel Trockenmasse abbauen und Energie verbrauchen. Die Verluste, die dadurch jährlich in Deutschland entstehen, werden von WEINBERG & MUCK (1996) auf 50 Millionen Euro geschätzt.

Durch die Anwendung von Siliermitteln besteht die Möglichkeit, Einflüsse auf den Silierprozess auszuüben und so die aerobe Stabilität zu verbessern, beziehungsweise den Voraufschluss der Futterpflanze zur Biogasausbeutesteigerung zu bewirken (AMON et al. 2003; HERRMANN et al. 2008, IDLER et al. 2008, MUKENGELE und OECHSNER 2007; NEUREITER 2004).

Zu der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene biologische und chemische Siliermittel hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Silierprozess einerseits und auf die Methanisierung der Silage andererseits getestet. Die Siliermittel wurden durch den Hersteller ADDCON AGRAR GmbH zur Verfügung gestellt. Die Überprüfung erfolgte anhand unterschiedlich schwer silierbarer Kulturpflanzenproben (Luzerne, Gras und Mais), die in Laborsilos (Weckgläser) konserviert wurden. Die während der Silierung aufgetretenen Trockenmasseverluste, Veränderungen der Gärsäuremuster sowie die Veränderungen anderer relevanter Parameter wurden gemessen beziehungsweise analysiert.

Anschließend wurden die Silagen in diskontinuierlichen Batchfermentern (2 l Fassungsvermögen) bei 35°C methanisiert. Die dabei gebildete Biogasmenge wurde aufgefangen, gemessen und deren Zusammensetzung (Methan-, Kohlendioxid-, Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffgehalt) analysiert.

Zusätzlich wurden die Luzerne- und Maissilageproben hinsichtlich ihrer aeroben Stabilität mit dem Verfahren von HONIG (1986 zit. nach PAHLOW & WEISSBACH 1999a) untersucht.

Mittels der ermittelten Daten aus den Phasen: Silierung, aerobe Exposition und Methanisierung konnte eine Gesamtbetrachtung und Bilanzierung der Siliermitteleffekte erfolgen.

Die gemessenen Effekte wurden den Kosten des Siliermitteleinsatzes gegenübergestellt.

Die Silierversuche wurden als Vorarbeit an der Landwirtschaftskammer Niedersachsen (Standort Oldenburg) durchgeführt. Die aus diesen Versuchen gewonnenen Daten wurden zur Auswertung zur Verfügung gestellt und die Proben zur Methanisierung, am Leibnizinstitut für Agrartechnik Potsdam-Bornim, übergeben.

## 2 GRUNDLAGEN

### 2.1 GRUNDLAGEN DER SILIERUNG

#### 2.1.1 Bedeutung

Geerntete Pflanzenteile werden natürlicherweise von ubiquitär vorkommenden Mikroorganismen zersetzt und zu mineralischen Bestandteilen abgebaut. Dieser Abbau ist im Allgemeinen für den Kreislauf der Nährstoffe essentiell und wünschenswert.

Soll die Nutzung der Pflanzenteile allerdings zu einem späteren Zeitpunkt als kurz nach der Ernte erfolgen, so wird es notwendig, diesen Abbauprozess zu unterbinden. Eine Möglichkeit, die relativ zeitgleich im großen Umfang anfallenden landwirtschaftlichen Kulturpflanzenmassen zu konservieren, ist die Silierung.

Dieses Verfahren weist gegenüber anderen Konservierungsmethoden die Vorteile des vergleichsweise geringen Arbeitsaufwandes, größerer Witterungsunabhängigkeit und des geringen möglichen Nährstoffverlustes auf (JEROCH et al. 1993).

Zur Silierung werden die Pflanzenteile in ein anaerobes Milieu verbracht, wodurch bestimmte, gewünschte Mikroorganismen, im Wesentlichen Milchsäurebakterien, gefördert und andere unterdrückt werden. Der Abbau der Pflanzenmasse erfolgt durch diese Mikroorganismen nicht vollständig, sondern es werden durch sie hauptsächlich wasserlösliche Kohlenhydrate zu Milchsäure umgewandelt. Die gebildete Milchsäure bewirkt eine starke pH-Wert-Absenkung und hemmt das Wachstum einiger unerwünschter Gärschädlinge (z.B. Clostridien und Enterobakterien; *siehe 2.1.3*). Ab einem pH-Wert von 3,0-3,6 (JEROCH et al. 1999) stellen die Milchsäurebakterien ihren Stoffwechsel ein; die Silage ist stabil und über Monate bis Jahre haltbar.

Die Bedeutung des Silage-Konservierverfahrens hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Heute wird in Europa, bezogen auf Trockenmasse, schon mehr Silage produziert als Heu (KRAMER 2002). Die Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens sind dabei vielfältig. Von Bedeutung ist vor allem die Silierung von Gras, Mais, Leguminosen, Rübenblättern und -schnitzel, aber auch die von industriellen Abprodukten wie Biertreber und Apfeltrester.

Hauptziel war es bisher, eine möglichst verlustarme Erzeugung eines Konservates zur Fütterung von Tieren herzustellen (KRAMER 2002). Außerdem sollte das fertige Produkt die in Tabelle 1 (unter Tierfutter) aufgeführten Eigenschaften besitzen.