

---

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik

**Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die  
Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben  
Abbau in Biogasreaktoren**

Felipe Luis Kaiser

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Dr.h.c. J. Bauer

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. H. Auernhammer (i.R.)
2. apl. Prof. Dr. F. J. Schwarz
3. Univ.-Prof. Dr. J. Meyer

Die Dissertation wurde am 26.10.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 21.11.2007 angenommen.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung.....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>Literaturübersicht und Ableitung der Aufgabenstellung.....</b>	<b>18</b>
3.1	Bestimmung der Verdaulichkeit pflanzlicher Inhaltsstoffe .....	18
3.1.1	Bedeutung des Impfmaterials (Inokulum).....	21
3.2	Biogasbildungspotential von Nawaro .....	21
3.2.1	Biogas- und Methanausbeute nach Literaturangaben .....	21
3.2.1.1	Mais.....	22
3.2.1.2	Grünland.....	23
3.2.1.3	Gräser .....	24
3.2.1.4	Andere nachwachsende Rohstoffe .....	24
3.2.2	Biogas- und Methanausbeute nach Berechnungsmodellen .....	26
3.2.2.1	Berechnungsmodell nach Inhaltsstoffen .....	26
3.2.2.2	Berechnungsmodell nach dem Methanenergiewertsystem (MEWS).....	30
<b>4</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>33</b>
4.1	Analyseverfahren zur Qualitätsbestimmung von Pflanzenteilen .....	33
4.1.1	Weender Rohnährstoffanalyse .....	33
4.1.1.1	Rohprotein.....	33
4.1.1.2	Rohfett.....	34
4.1.1.3	Rohfaser .....	34
4.1.1.4	N-freie Extraktstoffe .....	34
4.1.2	Erweiterte Weender-Analyse .....	34
4.1.2.1	NDF.....	35
4.1.2.2	ADF.....	35
4.1.2.3	ADL.....	36
4.1.2.4	Cellulose.....	37
4.1.2.5	Hemicellulose.....	37
4.1.2.6	Lignin .....	37
4.1.3	Physikalische Parameter.....	37
4.1.3.1	Trockensubstanz.....	37

---

4.1.3.2	Organische Trockensubstanz.....	38
4.2	Versuchstechnische Einrichtungen .....	38
4.2.1	Laborfermentieranlage (Weihenstephaner Batch System).....	38
4.2.2	Datenerfassung .....	41
4.2.2.1	Gasertrag .....	41
4.2.2.2	Temperatur- und Druckkorrektur .....	42
4.2.2.3	Gasanalyse.....	42
4.3	Versuchsablauf .....	43
4.3.1	Befüllung der Glasreaktoren .....	43
4.3.2	Berechnung des Biogas- und Methanertrages.....	44
4.4	Testsubstrate.....	47
4.4.1	Mais.....	47
4.4.2	Grünland.....	49
4.4.2.1	Versuchsort Spitalhof / Kempten .....	50
4.4.2.2	Versuchsort Kringell / Passau .....	52
4.4.2.3	Versuchsort Exlarn / Steinach .....	54
4.4.3	Gräser .....	55
4.4.4	Andere Nawaro .....	58
4.4.5	Konservierung der Substrate (Silage) .....	60
4.5	Statistische Auswertung .....	61
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>63</b>
5.1	Validierung der Methode .....	64
5.2	Überblick über die Biogas- und Methanerträge der verschiedenen Substrate .....	67
5.2.1	Mais.....	67
5.2.2	Grünland.....	68
5.2.2.1	Versuchsort Spitalhof / Kempten .....	68
5.2.2.2	Versuchsort Kringell / Passau .....	68
5.2.2.3	Versuchsort Exlarn / Steinach .....	68
5.2.2.4	Alle Standorte.....	69
5.2.3	Gräser .....	69
5.2.4	Andere Nawaro .....	70
5.3	Abhängigkeit der Gaserträge von dem Trockenmasse- und Rohproteingehalt.....	71
5.4	Relation zwischen Methanerträge und Verdaulichkeit der organische Masse.....	74
5.5	Biogas- und Methanerträge der einzelnen abgebauten Inhaltsstoffe .....	75

---

5.5.1	Biogas- und Methanerträge auf Basis der Weender-Analyse .....	75
5.5.2	Biogas- und Methanerträge auf Basis der erweiterten Weender-Analyse .....	78
5.6	Biogas- und Methanerträge des gesamten Inputs (Substrat + Inokulum) .....	80
5.6.1	Biogasertrag auf Basis der erweiterten Weender-Analyse.....	81
5.6.2	Methanertrag auf Basis der erweiterten Weender-Analyse.....	82
5.7	Biogas- und Methanerträge in bezug auf die Frischmasse.....	83
5.7.1	Biogaserträge auf Basis der erweiterten Weender-Analyse.....	83
5.7.2	Methanerträge auf Basis der erweiterten Weender-Analyse.....	84
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerung .....</b>	<b>86</b>
6.1	Wissenschaftliche Schlussfolgerungen .....	86
6.2	Praxisrelevante Schlussfolgerungen.....	87
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>88</b>
<b>8</b>	<b>Summary .....</b>	<b>91</b>
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>94</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>101</b>
10.1	Biogas- und Methanerträge aller Substrate .....	101
10.2	Charakterisierung aller Substrate .....	110
10.3	Normalverteilungstest .....	125
10.4	Statistische Auswertungen .....	127
10.4.1	Regressionen für Biogas- und Methanerträge der abgebauten Inhaltsstoffe..	127
10.4.1.1	Weender Analyse – Biogas .....	127
10.4.1.2	Weender Analyse - Methan.....	130
10.4.1.3	Erweiterte Weender Analyse - Biogas .....	133
10.4.1.4	Erweiterte Weender Analyse - Methan .....	136
10.4.2	Regressionen für Biogas- und Methanerträge des gesamten Inputs .....	139
10.4.2.1	Weender Analyse – Biogas .....	139
10.4.2.2	Weender Analyse – Methan .....	142
10.4.2.3	Erweiterte Weender Analyse – Biogas.....	145
10.4.2.4	Erweiterte Weender Analyse – Methan .....	148
10.4.3	Regressionen für Biogas- und Methanerträge in Bezug auf die Frischmasse	151
10.4.3.1	Weender Analyse – Biogas .....	151

---

10.4.3.2	Weender Analyse – Methan .....	157
10.4.3.3	Erweiterte Weender Analyse – Biogas.....	163
10.4.3.4	Erweiterte Weender Analyse – Methan .....	170