

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik

**Weiterentwicklung des
„Anaerobic Digestion Model (ADM1)“ zur
Anwendung auf landwirtschaftliche Substrate**

Markus Schlattmann

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

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr. J. Meyer

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. H. Auernhammer (i.R.)
2. Univ.-Prof. Dr. H. Horn
3. Univ.-Prof. Dr. H. Bernhardt

Die Dissertation wurde am 17.03.2011 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum
Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 30.06.2011
angenommen.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 2 | Problemstellung | 3 |
| 3 | Theoretische Überlegungen zu einer Weiterentwicklung des ADM1 zum „agriADM1“ | 5 |
| 3.1 | Anaerober Abbauprozess | 5 |
| 3.1.1 | Desintegration und Hydrolyse..... | 8 |
| 3.1.2 | Acidogenese | 9 |
| 3.1.3 | Acetogenese | 11 |
| 3.1.4 | Methanogenese..... | 12 |
| 3.2 | Mikrobiologische Aspekte | 13 |
| 3.3 | Grundlagen dynamischer Prozessmodellierung..... | 15 |
| 3.3.1 | Das dynamische Modell ADM1..... | 15 |
| 3.3.2 | Desintegration, Hydrolyse und Zerfall von Mikroorganismen im ADM1..... | 16 |
| 3.3.3 | Substrataufnahme durch Mikroorganismen im ADM1..... | 17 |
| 3.3.4 | Inhibition von Prozessen im ADM1..... | 17 |
| 3.3.5 | Temperaturabhängigkeit im ADM1..... | 19 |
| 3.3.6 | Säure-Basen-Reaktionen im ADM1..... | 20 |
| 3.3.7 | Gastransfer und Gasfluss im ADM1..... | 20 |
| 3.4 | Einsatz dynamischer Simulationen | 21 |
| 4 | Zielsetzung..... | 22 |
| 5 | Material und Methoden | 23 |
| 5.1 | Versuchsfermenter | 23 |
| 5.1.1 | Pilotanlage zur Herstellung von Basissubstrat..... | 23 |
| 5.1.2 | Technikum-Versuchsanlage | 24 |
| 5.1.3 | Labor-Batch-Fermenter | 26 |
| 5.2 | Messtechnik..... | 28 |
| 5.3 | Analytik..... | 28 |
| 5.4 | Versuchsansätze | 29 |
| 5.4.1 | Versuchsreihe V00 zur Herstellung von Basissubstrat | 31 |
| 5.4.2 | Versuchsreihen V01-V06 mit Basissubstrat und Co-Substraten..... | 32 |
| 5.4.3 | Versuchsreihen V07-V09 zur Monovergärung..... | 34 |
| 5.4.4 | V10a-c Batchansätze | 35 |
| 5.5 | Datenerfassung und Datenverarbeitung | 36 |
| 5.6 | ADM1-Implementierung..... | 37 |
| 5.7 | Erweiterungen des „ADM1“ zum „agriADM1“ | 38 |
| 5.7.1 | Umrechnungen im „agriADM1“ | 38 |
| 5.7.2 | Acetatoxidierende Bakterien | 39 |
| 5.7.3 | Zerfall der Mikroorganismen | 40 |
| 5.7.4 | Einführung der „Weender Analyse“ in das Modell..... | 41 |
| 5.7.5 | Zulaufcharakterisierung | 45 |
| 5.7.6 | Hydrolyse in Abhängigkeit der Bakterienmasse..... | 46 |

| | | |
|-----------|-----------------------------------------------------------|------------|
| 6 | Ergebnisse..... | 48 |
| 6.1 | Basissubstrat aus der Vergärung von Gülle und TMR..... | 48 |
| 6.1.1 | Zulaufcharakterisierung | 48 |
| 6.1.2 | Simulationsergebnisse | 49 |
| 6.2 | Basissubstrat+Wasser (V01, V03, V05) | 52 |
| 6.2.1 | Zulaufcharakterisierung | 53 |
| 6.2.2 | Simulationsergebnisse | 54 |
| 6.3 | Basissubstrat+Co-Substrate (V02, V04, V06) | 56 |
| 6.3.1 | Zulaufcharakterisierung | 56 |
| 6.3.2 | Simulationsergebnisse | 57 |
| 6.4 | Monovergärung von Rapsöl (V07) | 61 |
| 6.4.1 | Zulaufcharakterisierung | 61 |
| 6.4.2 | Simulationsergebnisse | 62 |
| 6.5 | Monovergärung von Maissilage (V08) | 64 |
| 6.5.1 | Zulaufcharakterisierung | 64 |
| 6.5.2 | Simulationsergebnisse | 65 |
| 6.6 | Monovergärung von Zucker (V09) | 67 |
| 6.6.1 | Zulaufcharakterisierung | 67 |
| 6.6.2 | Simulationsergebnisse | 68 |
| 6.7 | Batch-Ansätze (V10a, V10b, V10c) | 71 |
| 6.7.1 | Zulaufcharakterisierung | 71 |
| 6.7.2 | Simulationsergebnisse | 72 |
| 6.8 | Zusammenfassung Gasausbeuten..... | 75 |
| 6.9 | Zusammenfassung der „agriADM1“-Modell-Parameter | 76 |
| 7 | Diskussion und Schlussfolgerungen..... | 79 |
| 7.1 | Zusammensetzung der mikrobiellen Biomasse | 79 |
| 7.2 | Zerfall von Biomasse und C/N-Kreislauf..... | 79 |
| 7.3 | Mikrobielle Biomasse und acetatoxidierende Bakterien..... | 82 |
| 7.4 | N-Inhibition | 83 |
| 7.5 | Desintegration und Verdaulichkeiten | 84 |
| 7.6 | Letalität..... | 87 |
| 7.7 | CSB, OTS und Weender Analysen | 89 |
| 7.8 | Parameter, Kalibrierung und Validierung | 91 |
| 7.9 | Gasausbeuten..... | 92 |
| 7.10 | 2-seitige pH-Inhibition | 94 |
| 8 | Weiterführende Arbeiten..... | 96 |
| 9 | Zusammenfassung | 99 |
| 10 | Summary | 102 |
| 11 | Literaturverzeichnis | 105 |
| 12 | Anhang A..... | 111 |
| 13 | Anhang V..... | 119 |