

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik

**Bedarfsgerechte Rohbiogasproduktion durch eine
modellunterstützte Anpassung der Fütterungsstrategie**

Thilo Martens

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Hartmut Spliethoff

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Andreas Kremling

Die Dissertation wurde am 25.06.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 05.12.2018 angenommen.

Thilo Martens

**Bedarfsgerechte Rohbiogasproduktion
durch eine modellunterstützte Anpassung
der Fütterungsstrategie**



Forschungsberichte IWB

Band 349

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2018

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

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH · 2019

ISBN 978-3-8316-4815-3

Printed in Germany
utzverlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Formelzeichenverzeichnis.....	VII
1 Einleitung	1
1.1 Begriffe und Definitionen.....	1
1.2 Ausgangssituation.....	1
1.3 Motivation der Arbeit	5
1.4 Hypothese und Zielsetzung	7
1.5 Aufbau und Abgrenzung der Arbeit	8
2 Beschreibung und Analyse des Systems	11
2.1 Substrat	11
2.2 Biologischer Prozess im Fermenter.....	14
2.2.1 Beteiligte Mikroorganismen.....	14
2.2.2 Beschreibung der Reaktionen.....	15
2.3 Einflussgrößen auf den biologischen Prozess	21
2.4 Zusammensetzung und Arten von Biogas	26
2.5 Systembiologie	28
2.6 Anlagentechnik der Biogasproduktion	32
2.6.1 Anlagenkonzepte	32
2.6.2 Bilanzierung und Kenngrößen eines Fermenters	33
2.7 Regelungstechnik.....	37
2.7.1 Begriffsdefinition	37
2.7.2 Regelungstechnische Größen im Biogasprozess.....	38
3 Stand der Wissenschaft und Technik	41
3.1 Biogasprozessmodell	41
3.1.1 Standardmodell ADM1	43
3.1.2 Vereinfachungen und Herausforderungen des ADM1	56

3.2	Erweiterungen des ADM1	57
3.3	Simulation von Biogasprozessen mit dem ADM1	64
3.3.1	Simulationsumgebungen für Biogasanlagen	64
3.3.2	Parameterbestimmung	65
3.4	Regelungskonzepte für Biogasprozesse.....	66
3.5	Zusammenfassung und Ableitung des Handlungsbedarfs	71
3.5.1	Zusammenfassung und Handlungsbedarf.....	71
3.5.2	Zielanforderungen.....	72
3.5.3	Vorgehensübersicht	73
4	Vorgehen zur bedarfsgerechten Rohbiogasproduktion.....	75
4.1	Modellierung	75
4.1.1	Quellenauswahl der Erweiterungen des ADM1	75
4.1.2	Modellerweiterung.....	78
4.2	Verfahren zur Optimierung der Fütterungsstrategie	93
4.2.1	Bedarfsgerechte Produktion von Rohbiogas	94
4.2.2	Kopplung zwischen Gasbedarf und Gasproduktion	101
5	Diskussion der Ergebnisse	105
5.1	Datengrundlage für Diskussion der Ergebnisse	105
5.1.1	Daten für die Substratcharakterisierung	106
5.1.2	Daten des Prozesses und Rohbiogasproduktion	108
5.2	Bewertung der Modellierung	110
5.2.1	Anpassung der Parameter	110
5.2.2	Kalibrierung des Modells.....	115
5.2.3	Vergleich zwischen Messwerten und Simulation.....	116
5.3	Bewertung des Verfahrens zur Optimierung der Fütterungsstrategie	121
5.4	Wissenschaftliche Gültigkeit	125
6	Wirtschaftlicher Nutzen.....	127
6.1	Annahmen und Vereinfachungen für die Berechnung	128

6.2	Gesetzliche Rahmenbedingungen.....	128
6.3	Betriebsszenarien.....	130
6.4	Betrachtung des wirtschaftlichen Nutzens	132
7	Schlussbetrachtung.....	147
7.1	Zusammenfassung	147
7.2	Ausblick.....	148
8	Literaturverzeichnis	151
	Anhang	177
A1	Verzeichnis betreuter Studenten.....	177
A2	Wachstumsgeschwindigkeiten von Mikroorganismen.....	178
A3	Vergleich von Trocken- und Nassfermentation	179
A4	Übersicht Regelungskonzepte	180
A5	Ergebnisse der Quellenbewertung	182
A6	Rechenbeispiel für die Petersen-Matrix	183
A7	Petersen-Matrix für die Flüssigphase (erweitertes ADM1).....	184
A8	Petersen-Matrix für das Säure-Base-Gleichgewicht (erweitertes ADM1)	187
A9	Petersen-Matrix für die Gasphase (erweitertes ADM1).....	188
A10	Detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	189