

**Tobias Tautz**

Entwicklung und praktische Realisierung  
eines mikrocontroller-basierten  
CI-Regelungssystems für Biogasanlagen

**Diplomarbeit**

# BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei [www.GRIN.com](http://www.GRIN.com) hochladen  
und kostenlos publizieren



Hochschule Harz  
Fachbereich Automatisierung/Informatik

## **Diplomarbeit**

im Studiengang Elektrotechnik  
Studienrichtung Automatisierungstechnik

### **Thema:**

*Entwicklung und praktische Realisierung eines mikrocontroller-basierten  
CI-Regelungssystems für Biogasanlagen*

vorgelegt von:

**Tautz, Tobias**

ausgegeben am : 08.01.2001

eingereicht am : 12.03.2001

## **Thema und Aufgabenstellung der Diplomarbeit DA AI 34/00**

**für Herrn Tobias Tautz**

### **Thema der Diplomarbeit:**

*Entwicklung und praktische Realisierung eines mikrocontroller-basierten CI-Regelungssystems für Biogasanlagen*

Aufgabenstellung:

1. Realisierung der Datenerfassung und Datenaufbereitung (Merkmalsfindung) für den Prozeß der Methangaserzeugung
2. Entwicklung eines Regelungsmodelles (Fuzzy Controller) zur optimalen Fahrweise der Biogasanlage
3. Umsetzung der Lösung auf ein 16 Bit-Mikrocontrollersystem (80C167)
4. Entwicklung einer Windows-basierten Bedienoberfläche zur Strukturierung des Fuzzy-Control-Systems (Fuzzy-Shell)

Bearbeitungszeitraum: 08. 01. 2001 – 02. 04. 2001

Betreuer der Arbeit: Prof. Dr. Kramer

Dekan des Fachbereichs  
Automatisierung und Informatik

Vorsitzender des Prüfungsaus-  
schusses des Fachbereichs  
Automatisierung und Informatik

Prof. Dr. Zimmermann

Prof. Dr. Finke

# Kurzreferat

Tautz, Tobias

## Entwicklung und praktische Realisierung eines mikrocontroller-basierten CI-Regelungssystems für Biogasanlagen

Diplomarbeit, Hochschule Harz, Fachbereich Automatisierung / Informatik, 2001

63 Textseiten, 16 Anlagen, 31 Bilder, 1 Tafel, 32 Literaturstellen

Zur Lösung der Aufgabenstellung, „Entwicklung und praktische Realisierung eines mikrocontroller-basierten CI-Regelungssystems für Biogasanlagen“, war es zunächst notwendig eine Datenbasis des Prozesses als Grundlage des Prozeßmodells zu erzeugen. Dazu wurde für eine Pilotanlage ein geeignetes PC-gestütztes online Meßsystem konzipiert und zur Datenaquirierung angewendet. Aus der generierten Datenbasis wurden, nach einer Datenaufbereitung mittels mathematischer Algorithmen, prozeßbeschreibende Merkmale extrahiert. Die nach einer Vorauswahl als prozeßrelevant eingestuften Merkmale bildeten in Form eines Eingangsdatenvektors die Grundlage für die durchgeführte PC-gestützte Fuzzy-Modellbildung. Das Fuzzy-Modell ermittelt in Abhängigkeit der Werte der prozeßrelevanten Eingangsmerkmale eine optimale Zudosierate an Input-Substrat für den Biogasprozeß. Nach einer Optimierung des Modells wurde der Fuzzy-Algorithmus auf den Mikrocontroller 80C167 implementiert. Das entwickelte Controller-Programm enthält neben dem Fuzzy-Algorithmus auch Routinen zur Datenerfassung, zum DataMining, zur Meßwertanzeige und zur Signalausgabe. Das portierte Fuzzy-Modell, in Form eines Fuzzy-Control-Systems, kann direkt zur Prozeßregelung eingesetzt werden und bildet dadurch eine preiswerte und robuste Steuereinheit.

Zur Umsetzung des Fuzzy-Algorithmus auf den  $\mu$ C 80C167 entstand im Rahmen dieser Diplomarbeit das leistungsfähige Softwaretool „**Fuzzy Systems on Controller Applications**“. **FuzzySysOnConApp** ist eine grafische Benutzeroberfläche für Microsoft Windows®-Betriebssysteme und dient dem Erstellen und Testen von Fuzzysystemen. Das Softwaretool bietet die Möglichkeit einen Runtime-C-Code des entwickelten Fuzzysystems zu generieren, der in beliebigen Controller Anwendungen PC-unabhängig eingesetzt werden kann.

Diese Diplomarbeit stellt einen vollständigen Gesamtalgorithmus zur Regelung von Biogasanlagen vor, welcher ausgehend von online erfaßten Datensätzen über eine Datenaufbereitung mit Merkmalsfindung, ein Fuzzysystem strukturiert, testet und PC-unabhängig auf dem Mikrocontroller 80C167 implementiert.

# Abstract

Tautz, Tobias

Development and practical realization of a microcontroller -based CI regulation system for biological gas facility.

Thesis, Hochschule Harz, Department of Automation / computer science, 2001

63 pages, 16 appendices, 31 figures, 1 table, 32 references

To the solution of the task "development and practical realization of a microcontroller -based CI regulation system for biological gas facility", it was to be produced first necessarily a database of the process as basis of the processing concept. Do to it a suitable PC -supported online measuring system was conceived and applied to the data acquisition of a pilot plant. From the generated database, after a data preparation by means of mathematical algorithms, process-describing features were extracted. The after a preselection as process -relevantly classified features formed as an input data vector the basis for the executed PC -supported fuzzy concept. The fuzzy-model determines an optimal metering rate at input substrate for the fermentation gas process in dependency of the values of the process -relevant input features. After an optimization of the model the fuzzy -algorithm was implemented on the micro -controller 80C167. The developed controller program contains routines apart from the fuzzy -algorithm also for data acquisition, to the DataMining, to the measured value display and to the signal output. The imported fuzzy -model, in form of a fuzzy -control-system, can be used directly for process feedback control and forms thereby an inexpensive and durable control unit.

For the conversion of the fuzzy -algorithm on the  $\mu$ C 80C167 the softwaretool "**Fuzzy Systems on Controller Applications**" developed in the context of this diploma. **FuzzySysOnConApp** is a graphic user surface for Microsoft Windows<sup>®</sup>-operating systems and serves for creating and testing of fuzzy -systems. The softwaretool offers the possibility to generate a runtime-c-code of the developed fuzzy -system, which can be used in any controller applications PC-independently.

This diploma presents a complete total algorithm for the regulation of biological gas facilities, which on the basis of online entered data records over a data preparation with feature identification, a fuzzy -system structured, tests and PC -independently on the microcontroller 80C167 implement.

# Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Institut für Bioprozeß - und Analysenmeßtechnik e.V. (iba) – Heiligenstadt in Zusammenarbeit mit den Firmen Btn -Nordhausen und InTRos GmbH – Heiligenstadt.

Mein Dank gilt besonders Herrn Dipl. Ing. Thomas Nacke und Herrn Dipl. Ing. Steffen Patzwahl für die Betreuung und dem Interesse am Erfolg der Arbeit. Auch allen anderen Kollegen des Institutes, insbesondere den Mitarbeitern des Biogaslabors im iba -Heiligenstadt, gilt mein Dank.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinem Hochschulbetreuer Prof. Dr. Ing. Klaus -Dietrich Kramer, nicht nur für sein Engagement zum Gelingen der Arbeit, auch für eine gute Zusammenarbeit in meiner zurückliegenden Studienzeit.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	I
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	II
<b>Anlagenverzeichnis</b> .....	V
<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b> .....	VI
<b>Verwendete Formelzeichen</b> .....	VIII
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Einführung in die Bioabfallvergärung</b> .....	<b>3</b>
2.1 Biologische Grundlagen .....	3
2.1.1 Hydrolyse .....	4
2.1.2 Säurebildung .....	4
2.1.3 Essigsäurebildung (Acetogenese) .....	5
2.1.4 Methanbildung (Methanogenese) .....	5
2.2 Überblick zur Verfahrenstechnik der Bioabfallvergärung .....	6
2.2.1 Materialaufbereitung / Vorbehandlung .....	6
2.2.2 Einteilung der Vergärungsverfahren .....	7
2.2.3 Einstufige / Zweistufige Verfahren .....	7
2.2.4 Trockene / Nasse Verfahren .....	8
2.2.5 Mesophile / Thermophile Verfahren .....	8
2.2.6 Kontinuierliche / Diskontinuierliche Betriebsweise .....	8
2.2.7 Art der Durchmischung .....	8
2.2.8 Nachbehandlung des Materials .....	9
2.3 Bedeutung der geregelten Substratzufuhr .....	9
2.4 Stand der Technik .....	9
<b>3 Erfassung von Prozeßgrößen einer Bioabfallvergärungsanlage</b> .....	<b>12</b>
3.1 Laborvergärungsanlage des iba .....	12
3.2 Erfassung von Prozeßgrößen zur Bildung einer Datenbasis .....	13
3.2.1 Erfasste Prozeßgrößen .....	13
3.2.2 Eingesetzte Sensoren und online-Meßtechnik .....	13
3.2.3 Umrechnung der Sensorsignale .....	14
3.2.3.1 Umrechnung des Sensorausgangssignals für den Methangassensor .....	15



3.2.3.2	Umrechnung des Sensorausgangssignals für den Kohlendioxidssensor .....	16
3.2.3.3	Umrechnung des Sensorausgangssignals für den Sauerstoffsensor .....	16
3.2.3.4	Umrechnung des Sensorausgangssignals für den Schwefelwasserstoffsensor.....	16
3.2.3.5	Umrechnung des Sensorausgangssignals für die pH-Wertsonde.	17
3.2.3.6	Umrechnung des Sensorausgangssignals für den Redoxsensor...	17
3.2.3.7	Umrechnung des Sensorausgangssignals für den pO <sub>2</sub> -Sensor.....	17
3.2.4	Datenerfassung mit DIAdem <sup>®</sup> .....	17
3.2.5	Datenaufbereitung mit DIAdem <sup>®</sup> -Auto .....	18
3.2.6	Datenauswertung und Schlußfolgerungen .....	19
<b>4</b>	<b>Merkmalsbildung .....</b>	<b>21</b>
4.1	Splitten der Datenreihen in Tageskurven .....	21
4.2	Merkmale des Biovergärungsprozesses .....	21
4.2.1	Eigenschaften des Biogases .....	21
4.2.2	Prozeßzustand im Fermenter .....	26
4.3	Realisierung der Merkmalsbildung .....	28
4.4	Ergebnis der Merkmalsbildung .....	29
<b>5</b>	<b>Modellbildung am Prozeß der Bioabfallvergärung durch Einsatz von Fuzzy-Control .....</b>	<b>31</b>
5.1	Grundlegende Merkmale von Fuzzy-Control-Systemen .....	31
5.2	Modellbildung durch Fuzzy-Control .....	33
5.2.1	Fuzzifizierung .....	33
5.2.2	Regelbasis und Inferenz .....	35
5.2.3	Defuzzifizierung .....	37
5.3	Umsetzung des FC-Systems unter Matlab <sup>®</sup> .....	38
5.4	Ergebnis und Auswertung der Modellbildung mit FC .....	39
<b>6</b>	<b>Entwicklung einer Gesamtlösung zur Regelung von Biogasanlagen ....</b>	<b>41</b>
6.1	Aufbau der Anlage mit dem eingesetzten µC-System .....	41
6.2	Die eingesetzte Hardware (µC-System) .....	42
6.2.1	Die µC-Hardware .....	42
6.2.2	Die Anwendungsschaltung .....	42
6.3	Implementierung des Regelungssystems auf die µC-Hardware .....	43
6.3.1	Datenerfassung .....	44
6.3.2	Merkmalsbildung .....	46

6.3.3	Fuzzy-Control .....	48
6.3.4	Anzeigesteuerung .....	50
6.4	FuzzySysOnConApp .....	51
6.4.1	Entwicklung von FC-Systemen mit FuzzySysOnConApp .....	52
6.4.2	Test von FC-Systemen unter FuzzySysOnConApp .....	52
6.4.3	Umsetzung von FC-Systemen auf den $\mu$ C 80C167 mit FuzzySysOnConApp .....	53
6.5	Simulation und Test des Regelungssystems .....	54
6.6	Inbetriebnahme des Regelungssystems .....	56
6.7	Ergebnis und Auswertung .....	57
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>Ausblicke und weiterführende Arbeiten .....</b>	<b>62</b>
	<b>Anlagen .....</b>	<b>ff.</b>
	<b>Verzeichnis der Bilder und Tafeln .....</b>	<b>XII</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>XIV</b>

## Anlagenverzeichnis

<b>Bezeichnung</b>	<b>Titel</b>	<b>Seiten - umfang</b>
Anlage 1	Klassifizierung von Inputmaterialien	5
Anlage 2	Zusammensetzung von Biogas	1
Anlage 3	Grundlegende Kenndaten von Vergärungsverfahren	1
Anlage 4	Meßprinzip der Gassensoren des DGM 4HB1	3
Anlage 5	Datenerfassung mit DIAdem <sup>®</sup>	6
Anlage 6	DIAdem <sup>®</sup> -Autosequenzen zur Datenaufbereitung	6
Anlage 7	DIAdem <sup>®</sup> -Autosequenz zum Splitten von Datenreihen	2
Anlage 8	DIAdem <sup>®</sup> -Autosequenz zur Merkmalsbildung	5
Anlage 9	Ergebnis der Merkmalsbildung	6
Anlage 10	Test des FC-Systems unter Matlab <sup>®</sup>	1
Anlage 11	Leistungsmerkmale der $\mu$ C-Hardware	6
Anlage 12	Schalt- und Bestückungsplan der Anwendungsschaltung	2
Anlage 13	Compiler-Einstellungen	4
Anlage 14	Bedienungsanleitung zum Programm FuzzySysOnConApp	11
Anlage 15	Prozeßsimulation mit DIAdem <sup>®</sup>	5
Anlage 16	Dateiverzeichnis der CD zur Diplomarbeit	2

## Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
%Sätt	gibt die prozentuale Sättigung des Stoffes, bezogen auf die maximal mögliche Lösungsmenge im Medium an
ADDAT	Register zur Aufnahme des Ergebniswertes der Analog-Digital-Umsetzung des $\mu\text{C}$ 80C167
ADU	Analog-Digital-Umsetzung, Analog-Digital-Umsetzer
ANx	Analoger Eingangskanal AN0 - AN9 des $\mu\text{C}$ 80C167
CD	Compact Disc
COA	Defuzzifizierungsverfahren „Center Of Area“ (Flächenschwerpunktverfahren)
DAC	Data Aquisition
DAU	Digital-Analog-Umsetzung
DIN	Digital Input
DLL	dynamic link library
DOU	Digital Output
EEPROM	Electrical Erasable Programmable Read Only Memory
FC	Fuzzy-Control
FSP	Flächenschwerpunkt
FuzzySysOnConApp	<b>Fuzzy Systems on Controller Applications</b> (Softwarewerkzeug zum Erstellen und Testen von FC -Systemen mit Runtime -C-Code Generierung)
iba	Institut für Bioprozeß- und Analysenmeßtechnik e.V.
KNN	Künstliches Neuronales Netz
MB	Megabyte
MSR	Messen / Steuern / Regeln
NDIR	Nicht Dispersive Infrarot Absorption
oTM	organische Trockenmasse

PAP	Programmablaufplan
PC	Personalcomputer
PWM	Puls-Weiten Modulation
ppm	parts per million
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
RTC	Real-Time-Clock
SOBG	Baudratengenerator Reload-Register für serielle Schnittstelle 0 des $\mu\text{C}$ 80C167
$t_{\text{ab}}$	Abtastzeit (10 Minuten)
TM	Trockenmasse ( Substanzmenge nach Trocknung bei 105°C )
Vol.-%	Volumenprozent
$\mu\text{C}$	Mikrocontroller

## Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
$BGV_e$	erster gemessener Biogasvolumenwert einer Tageskurve	$\text{dm}^3$
$BGV_i$	Biogasvolumen zur Abtastzeit $i$	$\text{dm}^3$
$BGV_l$	letzter gemessener Biogasvolumenwert einer Tageskurve	$\text{dm}^3$
$f_{ab}$	Abtastfrequenz	$1/\text{s}$
$f_{BGS0}$	Taktfrequenz des Baudratengenerators	$1/\text{s}$
$f_{cpu}$	Taktfrequenz des Controllers	$1/\text{s}$
$GM$	entstandenes Biogasvolumen in der Zykluszeit (Gasmenge)	$\text{dm}^3/\text{d}$
$\ddot{A} GM$	Änderung der Gasmenge bezogen auf den Vortag	$\text{dm}^3/\text{d}$
$GM_{ak}$	Gasmenge der aktuellen Zykluskurve	$\text{dm}^3/\text{d}$
$GM_i$	Entstandenes Biogasvolumen zwischen der Abtastung $i-1$ und $i$	$\text{dm}^3/t_{ab}$
$GM_{vT}$	Gasmenge des Vortages	$\text{dm}^3/\text{d}$
$CH_4$	Methangas-Konzentration im Biogasvolumen	%
$CH_{4\_an}$	Steigung zwischen Minimum und Maximum der $CH_4$ -Konzentration einer Zykluskurve	$\%/t_{ab}$
$CH_{4\_d}$	Methangas-Konzentration im entstandenen Biogasvolumen bezogen auf die Zykluszeit (ein Tag)	%
$CH_{4\_diff}$	Differenz zwischen Minimum und Maximum der $CH_4$ -Konzentration	%
$CH_{4i}$	$CH_4$ -Konzentration im Biogas zur Abtastzeit $i$	%
$CH_{4\_max}$	Maximum der $CH_4$ -Konzentration in einem Zyklus	%
$CH_{4\_min}$	Minimum der $CH_4$ -Konzentration in einem Zyklus	%
$CO_2$	Kohlendioxid-Konzentration im Biogasvolumen	%
$CO_{2\_an}$	Steigung zwischen Minimum und Maximum der $CO_2$ -Konzentration einer Zykluskurve	$\%/t_{ab}$

$CO_2\_d$	Kohlendioxid-Konzentration im entstandenen Biogasvolumen bezogen auf die Zykluszeit (ein Tag)	%
$CO_2\_diff$	Differenz zwischen Minimum und Maximum der $CO_2$ -Konzentration	%
$CO_{2i}$	$CO_2$ -Konzentration im Biogas zur Abtastzeit i	%
$CO_2\_max$	Maximum der $CO_2$ -Konzentration in einem Zyklus	%
$CO_2\_min$	Minimum der $CO_2$ -Konzentration in einem Zyklus	%
$H_2S$	Schwefelwasserstoff-Konzentration im Biogas	ppm
$I_x$	Wert der Fuzzy-Eingangsgröße	--
$MW$	Wert, der durch die ADU erfaßten Eingangsgröße	V
$O_2$	Sauerstoff-Konzentration im Biogasvolumen	%
$O_2\_an$	Steigung zwischen Minimum und Maximum der $O_2$ -Konzentration einer Zykluskurve	%/t <sub>ab</sub>
$O_2\_d$	Sauerstoff-Konzentration im entstandenen Biogasvolumen bezogen auf die Zykluszeit (ein Tag)	%
$O_2\_diff$	Differenz zwischen Minimum und Maximum der $O_2$ -Konzentration	%
$O_{2i}$	$O_2$ -Konzentration im Biogas zur Abtastzeit i	%
$O_2\_max$	Maximum der $O_2$ -Konzentration in einem Zyklus	%
$O_2\_min$	Minimum der $O_2$ -Konzentration in einem Zyklus	%
$pH$	pH-Wert im Fermenter	--
$\overline{pH}$	arithmetische Mittel des pH-Wertes	--
$pH\_an$	Steigung zwischen Minimum und Maximum des pH-Wertes einer Zykluskurve	1/t <sub>ab</sub>
$pH\_diff$	Differenz zwischen Minimum und Maximum des pH-Wertes	--
$\overline{pH}_g$	geometrische Mittel des pH-Wertes	--
$pH_i$	pH-Wert im Fermenter zur Abtastzeit i	--
$\overline{pH}_h$	harmonische Mittel des pH-Wertes	--

$\overline{pH}_q$	quadratische Mittel des pH-Wertes	--
$pH_{max}$	Maximum des pH-Wertes in einem Zyklus	--
$pH_{min}$	Minimum des pH-Wertes in einem Zyklus	--
$pO_2$	Konzentration an gelöstem Sauerstoff im Fermenter	%Sätt
$RP$	Redoxpotential im Fermenter	mV
$RP_i$	Redoxpotential im Fermenter zur Abtastzeit i	mV
$\overline{RP}$	arithmetische Mittel des Redoxpotentials	mV
$r_{xy}$	Korrelationskoeffizient	--
$Schiefe_{pH}$	Formmaß der Schiefe des pH-Wertes für eine Zykluskurve	--
$S_x$	Standardabweichung für x	--
$S_y$	Standardabweichung für y	--
$T3_{ZK}$	Zeitkonstante Timer 3	--
$T4_{ZK}$	Zeitkonstante Timer 4	--
$t_{CH_4_{max}}$	Zeitpunkt des CH <sub>4</sub> -Maximums	t <sub>ab</sub>
$t_{CH_4_{min}}$	Zeitpunkt des CH <sub>4</sub> -Minimums	t <sub>ab</sub>
$t_{CO_2_{max}}$	Zeitpunkt des CO <sub>2</sub> -Maximums	t <sub>ab</sub>
$t_{CO_2_{min}}$	Zeitpunkt des CO <sub>2</sub> -Minimums	t <sub>ab</sub>
$t_{O_2_{max}}$	Zeitpunkt des O <sub>2</sub> -Maximums	t <sub>ab</sub>
$t_{O_2_{min}}$	Zeitpunkt des O <sub>2</sub> -Minimums	t <sub>ab</sub>
$t_{pH_{max}}$	Zeitpunkt des pH-Wert-Maximums	t <sub>ab</sub>
$t_{pH_{min}}$	Zeitpunkt des pH-Wert-Minimums	t <sub>ab</sub>
$U_{Sensor_{CO_2}}$	Sensorausgangssignal des CO <sub>2</sub> -Sensors	V
$U_{Sensor_{H_2S}}$	Sensorausgangssignal des H <sub>2</sub> S-Sensors	V