

Prädiktive Regelungsstrategien zur Stickstoffelimination in kommunalen Kläranlagen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Michael Schuhen
aus Bühl

ingereicht dem
Fachbereich Maschinenbau
der Universität Siegen

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Köhne
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Düchting

Tag der mündlichen Prüfung
13. November 2006

ZESS-Forschungsberichte

Nr. 25

Michael Schuhen

Prädiktive Regelungsstrategien zur Stickstoffelimination in kommunalen Kläranlagen

Universität Siegen
Zentrum für Sensorsysteme
Paul-Bonatz-Straße 9-11
57068 Siegen
Tel.: 0271 / 740-3323
Fax: 0271 / 740-2336
e-mail: gs@zess.uni-siegen.de
Internet: <http://www.zess.uni-siegen.de/>

Siegen 2007

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.

Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2007

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6259-4

ISSN 1433-156X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand zum größten Teil während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanik und Regelungstechnik des Fachbereichs Maschinenbau der Universität Siegen.

Sehr herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Köhne für dessen Förderung und stetige Unterstützung bei der Durchführung und Anfertigung dieser Arbeit. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Düchting für sein Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferats. Weiter möchte ich all meinen früheren Kollegen des Instituts für die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima danken.

Privat gilt mein besonderer Dank meiner Frau Christine Büdenbender und meiner Tochter Laura. Ohne deren vielfältige Unterstützung und die dadurch geschaffenen Freiräume wäre eine Fertigstellung der Arbeit nicht möglich gewesen. Danken möchte ich auch meinen Eltern, die den Grundstein für meine akademische Ausbildung gelegt haben.

Bühlertal, im Mai 2007

Michael Schuhen

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Symbole.....	VI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	3
2 Biologische Abwasserreinigung in kommunalen Kläranlagen.....	5
2.1 Kommunales Abwasser	6
2.1.1 Abwasserzusammensetzung	6
2.1.2 Störgröße zufließendes Abwasser.....	8
2.1.3 Regelgröße abfließendes Abwasser	10
2.2 Abwasserreinigungsprozesse in kommunalen Kläranlagen.....	10
2.3 Biologische und verfahrenstechnische Grundlagen.....	12
2.3.1 Mikrobiologische und biochemische Grundlagen	12
2.3.2 Verfahrenstechnische Grundlagen und Anlagenbeispiele	15
2.4 Abwassermeßtechnik.....	18
2.5 Stellgrößen zur Beeinflussung der biologischen Stickstoffelimination.....	19
3 Modellbildung und Simulation der biologischen Abwasserreinigungs- prozesse.....	23
3.1 Modellbildung des Belebungsverfahrens.....	24
3.1.1 Belebungsbecken	25
3.1.2 Nachklärbecken	39
3.1.3 Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik	43
3.2 Simulationswerkzeug.....	44
3.3 Modellbildung und Simulation der Anlagenbeispiele	45
3.3.1 Belebungsanlage mit intermittierender Denitrifikation	45
3.3.2 Belebungsanlage mit vorgeschalteter Denitrifikation.....	55
4 Konventionelle Prozeßführungsstrategien	64
4.1 Konventionelle Prozeßführung der Belebungsanlage mit intermittierender Denitrifikation	64
4.1.1 Betrieb mit konstanten Denitrifikations- und Nitrifikationsintervallen.....	64
4.1.2 Betrieb mit variablen Denitrifikations- und Nitrifikationsintervallen	66

4.2	Konventionelle Prozeßführung der Belebungsanlage mit vorgeschalteter Denitrifikation	70
4.2.1	Mengenabhängige Steuerungsstrategie.....	71
4.2.2	Frachtabhängige Steuerungsstrategie.....	76
4.2	Anforderungen an eine verbesserte Prozeßführung.....	81
5	Modellgestützte prädiktive Regelungsstrategien	82
5.1	MPR-Anwendungen bei biologischen Abwasserreinigungsprozessen.....	83
5.2	Prinzipien modellgestützter prädiktiver Regelungen.....	84
5.3	Entwurf der modellgestützten prädiktiven Regelung	89
5.3.1	Ordnungsreduzierte Modelle	92
5.3.1.1	Kalman-Filterentwurf	98
5.3.1.2	Modellierung der Reaktionskinetik	102
5.3.1.3	Modellierung der Durchmischungs- und Transportvorgänge.....	108
5.3.2	Künstliche neuronale Netze.....	112
5.3.2.1	Künstliches neuronales Netz als Reglerentwurfsmodell	114
5.3.2.2	Hybrides neuronales Netz als Reglerentwurfsmodell.....	116
5.3.2.3	Verzögerungsketten der Netzeingangsgrößen	118
5.3.2.4	Netztraining und Adaptionstrategie	120
5.3.2.5	Vergleich der Reglerentwurfsmodelle	121
5.3.3	Störgrößenmodelle.....	124
5.3.4	Entwurfparameter des Gütefunktional.....	126
5.3.4.1	Prädiktionshorizonte.....	126
5.3.4.2	Wichtungsfaktoren.....	130
6	Prädiktive Prozeßführungsstrategien	132
6.1	Prädiktive Prozeßführung der Belebungsanlage mit intermittierender Denitrifikation	132
6.1.1	Prädiktive Steuerung der Denitrifikations- und Nitrifikationsintervalle	132
6.1.2	Prädiktive Gesamtstrategie	136
6.2	Prädiktive Prozeßführung der Belebungsanlage mit vorgeschalteter Denitrifikation	140
6.2.1	Prädiktive Regelung mit Frachtausgleich.....	140
6.2.2	Prädiktive Regelung mit Kohlenstoffzugabe.....	148

6.2.3	Prädiktive Steuerung des belüfteten Beckenvolumens	152
6.2.4	Prädiktive Gesamtstrategie	157
7	Zusammenfassung und Ausblick	167
Anhang		169
A 1	Modellbibliothek KSIM	169
A 1.1	Simulationsumgebung	169
A 1.2	Aufbau und Inhalt von KSIM	169
A 1.3	Grafische Gestaltung der Modellmodule	172
A 1.4	Informationsübertragung im Simulationsmodell	173
A 1.5	Parametrierung der Modellmodule	174
A 1.6	Zusammenfassung	175
A 2	Extended Kalman Filter	176
A 3	Künstliche neuronale Netze	178
A 3.1	Aufbau eines Neurons	178
A 3.2	Multilayer-Perceptron-Netz	179
A 3.3	Netzwerkstrukturen	180
A 3.4	Lernverfahren	181
A 3.5	Backpropagation-Algorithmus	182
A 4	Reglerentwurfs- und Prädiktionsmodelle	188
A 4.1	Reglerentwurfs- und Prädiktionsmodell NH_4^+ -N für die Belebungsanlage mit intermittierender Denitrifikation	188
A 4.2	Prädiktionsmodell N_{ges} für die Belebungsanlage mit vorgeschalteter Denitrifikation - Prädiktive Regelung mit Frachtausgleich	190
A 4.3	Prädiktionsmodell N_{ges} für die Belebungsanlage mit vorgeschalteter Denitrifikation - Prädiktive Regelung mit Kohlenstoffzugabe	192
A 4.4	Prädiktionsmodell NH_4^+ -N für die Belebungsanlage mit vorgeschalteter Denitrifikation - Prädiktive Steuerung des belüfteten Beckenvolumens	194
Literatur		196

Formelzeichen und Symbole

Aufgeführt sind die wichtigsten der in dieser Arbeit verwendeten Formelzeichen und Symbole. Davon abweichende Bedeutungen und Bezeichnungen sind im Text erläutert.

Lateinische Buchstaben:

<i>Zeichen</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit</i>
a	Parameter der Absatzfunktion des Belebtschlammes	m^3/g
A	Fläche	m^2
A_j	Oberfläche der Schicht j im Nachklärbecken	m^2
A	Dynamikmatrix der linearisierten Systemgleichungen	-
c	Stoffkonzentration	g/m^3
\bar{c}	mittlere Stoffkonzentration	g/m^3
C	Meßmatrix, Ausgangsmatrix	-
d	diskrete Totzeit	-
D_j	Verdünnungsrate des Rührkessels j	1/h
D	Matrix der Verdünnungsraten	-
e	Regelfehler	-
\hat{e}	prädizierter Regelfehler	-
f	Vektor der nichtlinearen Systemgleichungen	-
f_F, f_Q	Faktoren für das Speichern von Abwasser im Ausgleichsbecken	-
F	Fracht, Produkt aus Volumenstrom und Konzentration	kg/h
F_S	Stöchiometriematrix	-
g	Vektor der nichtlinearen Stellgrößen	-
h	Vektor der nichtlinearen Meßgrößen	-
J	Gütefunktional	-
k	Abtastschritt	-
k_B	Belüftungsrate	1/h
k^*	anlagenspezifische Konstante	g/m^3
K_{NH}	Sättigungsbeiwert des Ammonium-Stickstoffs	g/m^3
K_{NO}	Sättigungsbeiwert des Nitrat-Stickstoffs	g/m^3
K_{OH}	Sättigungsbeiwert des gelösten Sauerstoffs	g/m^3
K_M	Michaelis-Menten-Konstante	g/m^3
K_S	Sättigungsbeiwert der Kohlenstoffverbindungen	g/m^3
m	Masse	kg
m	Anzahl der Abtastschritte	-
n	Anzahl der Meßwerte	-
n_u, n_y	Anzahl der zeitlich zurückliegenden Netzeingänge und -ausgänge	-

n, n_1, n_2	Rührkesselanzahl	-
N_u	Stellgrößenhorizont	-
N_p	oberer Prädiktionshorizont	-
N_1, N_2	unterer und oberer Prädiktionshorizont	-
p	Anzahl der Meßwerte	-
\mathbf{p}	Parametervektor	-
\mathbf{p}_N	Vektor der Netzparameter	-
\mathbf{Q}	Kovarianzmatrix des Systemrauschens	-
\bar{Q}	Abwasservolumenstrom	m ³ /h
\bar{Q}	mittlerer Abwasservolumenstrom	m ³ /h
\hat{Q}	prädizierter Abwasservolumenstrom	m ³ /h
Q_{ges}	gesamter Abwasservolumenstrom	m ³ /h
Q_L	Luftvolumenstrom	m ³ /h
r	Umwandlungsrate	g/(m ³ h)
\mathbf{r}	Vektor der Umwandlungsraten	-
\hat{r}	prädizierte Umwandlungsrate	g/(m ³ h)
r_{xy}	Korrelationskoeffizient	-
\mathbf{R}	Kovarianzmatrix des Meßrauschens	-
s	komplexe Laplace-Variable	-
S	gelöster Abwasserinhaltsstoff, Substrat	g/m ³
\hat{S}	prädizierter Abwasserinhaltsstoff	g/m ³
\mathbf{S}	Vektor der gelösten Abwasserinhaltsstoffe	-
S_{NH}	Ammonium-Stickstoffkonzentration	g/m ³
S_{NO}	Nitrat-Stickstoffkonzentration	g/m ³
S_O	Konzentration des gelösten Sauerstoffs	g/m ³
S_S	Konzentration der leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen	g/m ³
t	Zeit	h
t_d	zurückliegender Zeitraum	h
t_m	Zeitraum der Mittelwertbildung	h
t_p	Prädiktionzeitraum	h
T	Abwasser-Belebtschlamm-Temperatur	°C
T_e	Zeitkonstante des Fehlermodells	h
T_A	Abtastzeit	h
T_D	Denitrifikationszeit	h, min
T_N	Nitrifikationszeit	h, min
T_{ges}	Gesamtzeit der Nitrifikation und Denitrifikation ($T_N + T_D$)	h, min
\bar{T}_V	mittlere Verweilzeit des Abwassers im Belebungsbecken	h

T_0	Totzeit	h, min
T_1, T_2	Zeitkonstanten	h
T_ρ	Zeitkonstanten der Reaktionsgeschwindigkeit	h
u	Stellgröße	-
\mathbf{u}_N^*	Netzeingangsvektor	-
u_B	Steuersignal Belüftung ein oder aus	-
U_{SO}	Sauerstoffmenge (-massenstrom)	g/h
\mathbf{v}	Vektor des Meßrauschens	-
v_S	Absetzgeschwindigkeit des Belebtschlamm	m/h
v_0	maximale Absetzgeschwindigkeit des Belebtschlamm	m/h
V	Volumen (Becken, Bereich, Rührkessel, Schicht, Zone...)	m ³
w	Referenzgröße	-
\mathbf{w}	Vektor des Systemrauschens	-
x	Zustandsgröße	-
\mathbf{x}	Zustandsgrößenvektor	-
\hat{x}	prädizierte Zustandsgröße	-
X	partikulärer Abwasserinhaltsstoff	g/m ³
\mathbf{X}	Vektor der partikulären Abwasserinhaltsstoffe	-
y	Meß-, Ausgangs- oder Regelgröße	-
\mathbf{y}	Vektor der Meßgrößen	-
\mathbf{y}_N^*	Netzausgangsvektor	-
\hat{y}	prädizierte Regelgröße	-
\mathbf{z}	Vektor der Störgrößen	-
$\hat{\mathbf{z}}$	Vektor der prädizierten Störgrößen	-

Griechische Buchstaben:

β_i	Wichtungsfaktoren der Stellgrößenänderungen	-
γ_i	Wichtungsfaktoren der Prädiktionsfehler	-
λ	Verschiebezeit	h
η_N	Eliminationsgrad der Stickstoffelimination	-
ρ	Reaktionsrate oder -geschwindigkeit	g/(m ³ h)
$\boldsymbol{\rho}$	Vektor der Reaktionsraten oder -geschwindigkeiten	-
τ	Integrationszeit	h, min
μ	spezifische Wachstumsgeschwindigkeit	g/(m ³ h)
μ^*	maximale Wachstumsgeschwindigkeit	g/(m ³ h)
Δ	Differenz	-

Indices:

<i>ab</i>	Ablauf
<i>A</i>	Ausgleichs-, Regenüberlaufbecken
<i>B</i>	Belebung, Belüftung
<i>C</i>	Kohlenstoff
<i>d</i>	Rührkessel Denitrifikation
<i>D</i>	Denitrifikation
<i>eff</i>	effektiv
<i>Grenz</i>	Grenzwert
<i>i</i>	Laufvariable
<i>I</i>	Indikatorlösung
<i>j</i>	Laufvariable
<i>k</i>	Rührkessel Nachklärung
<i>K</i>	Nachklärung
<i>L</i>	Luft
<i>max</i>	maximaler Wert
<i>min</i>	minimaler Wert
<i>n</i>	Rührkessel Nitrifikation
<i>N</i>	Nitrifikation
<i>NH</i>	Ammonium-Stickstoff
<i>NO</i>	Nitrat-Stickstoff
<i>N_{ges}</i>	Gesamtstickstoff
<i>O</i>	Sauerstoff
<i>Q</i>	Abwasservolumenstrom
<i>R</i>	Rührkessel
<i>RS</i>	Rücklaufschlammvolumenstrom
<i>RZ</i>	Rezirkulationsvolumenstrom
<i>Sätt</i>	Sättigung
<i>Soll</i>	Sollwert
<i>T</i>	Verhältnis Denitrifikations- zur Nitrifikationszeit
<i>TW</i>	Totwasser
<i>ÜS</i>	Überschußschlammvolumenstrom
<i>V</i>	Verhältnis Denitrifikations- zu Nitrifikationsvolumen
<i>VK</i>	Vorklärung
<i>zu</i>	Zulauf

Abkürzungen:

AB	Ausgleichsbecken
ASM1, ASM2	Activated Sludge Model No.1/No.2
ATV	Abwassertechnische Vereinigung
BB	Belebungsbecken
BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DB	Denitrifikationsbecken (-bereich)
EKF	Extended Kalman Filter
EW	Einwohnerwert
EWG	Einwohnergleichwert
FA	Frachtausgleich
GFA	Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik
HNN	Hybrides Neuronales Netz
KNN	Künstliches Neuronales Netz
KA	Kläranlage
MLP	Multilayer-Perceptron
MPR	Modellgestützte Prädiktive Regelung
MSR	Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik
N _{anorg}	anorganischer Stickstoff
N _{ges}	Gesamtstickstoff
N _{org}	organischer Stickstoff
NB	Nitrifikationsbecken (-bereich)
NK	Nachklärbecken
NH ₄ ⁺ , NH ₄ ⁺ -N	Ammonium, Ammonium-Stickstoff
NO ₂ ⁻ , NO ₂ ⁻ -N	Nitrit, Nitrit-Stickstoff
NO ₃ ⁻ , NO ₃ ⁻ -N	Nitrat, Nitrat-Stickstoff
NO _x ⁻ -N	Summe Nitrat- und Nitrit-Stickstoff
ORM	Ordnungsreduziertes Modell
P	Phosphor
P _{ges}	Gesamtphosphor
PO ₄ , PO ₄ -P	Phosphat, Phosphat-Phosphor
RI-Fließbild	Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild
TDNN	Time Delay Neural Network
TS	Trockensubstanz