

**Prozessbezogene optimierungsbasierte
Regelungsstrukturauswahl
mit Anwendung auf die Reaktivrektifikation**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

vom Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen der Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Tobias Scharf

aus

Dortmund

Tag der mündlichen Prüfung: 1. Dezember 2006

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. S. Engell

2. Gutachter: Prof. Dr. A. Gorak

Dortmund

2007

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Anlagensteuerungstechnik
der Universität Dortmund (Prof.-Dr. Sebastian Engell)

Band 4/2007

Tobias Scharf

**Prozessbezogene optimierungsbasierte
Regelungsstrukturauswahl mit Anwendung
auf die Reaktivrektifikation**

D 290 (Diss. Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 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.: Dortmund, 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 978-3-8322-6790-2

ISSN 0948-7018

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Anlagensteuertechnik im Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen der Universität Dortmund. Dem Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Sebastian Engell danke ich herzlich für die Förderung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Andrzej Górak gilt mein Dank für die freundliche Übernahme des Korreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Henner Schmidt-Traub und Herrn Prof. Dr. David W. Agar danke ich für das Mitwirken in der Prüfungskommission als Prüfer und Vorsitzender.

Für die finanzielle Unterstützung danke ich der Graduate School of Production Engineering and Logistics, die meine Arbeit durch ein Stipendium unterstützt und durch den interdisziplinären Charakter zum Austausch zwischen den Fakultäten eingeladen hat.

Bei den Kollegen des Lehrstuhls möchte ich mich für die Zusammenarbeit in einem angenehmen Klima bedanken. Besonderer Dank gilt hierbei Ralf Gesthuisen, Stefan Krämer und Kai Dadhe, die immer ein offenes Ohr für fachliche und private Probleme hatten. Weiterhin danke ich Wolfgang Mauntz, auf dessen Hilfe immer Verlass ist. Mein Dank gilt auch Gregor Fernholz, für den ich 1998 als studentische Hilfskraft tätig war, und der mir erste Einblicke in die Forschungsarbeit gewährte.

Zum Erfolg meiner Forschung hat Sanja Božanić durch ihre Studienarbeit beigetragen.

Für die Mühe des Korrekturlesens danke ich Annette Wohlfahrt und Anne Meisborn. Allen Freunden danke ich für die Unterstützung in anstrengenden Zeiten.

Meinen Eltern Karin und Horst Scharf gilt besonderer Dank für ihre Förderung, die mir Studium und Promotion erst ermöglicht hat.

Besonderer Dank gilt auch meiner Frau Konstanze für ihre Unterstützung und ihr Verständnis, wenn ihr zustehende Zeit und Aufmerksamkeit in diese Arbeit geflossen ist.

Nürnberg, im November 2007

Tobias Scharf

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit stellt eine Methodik zur Regelungsstrukturauswahl, d. h. zur Auswahl der Mess- und Stellgrößen, die zur Regelung genutzt werden, für verfahrenstechnische Prozesse vor. Ziel ist es die Mess- und Stellgrößen zu wählen, die es ermöglichen, durch Regelung auf einen festen Sollwert ein Verhalten zu erreichen, das einer Online-Optimierung nahe kommt. Dabei wird mit einem rigorosen Modell gearbeitet, um auch nichtlineares Verhalten des Prozesses wiedergeben zu können.

Ausgangspunkt der Untersuchung ist ein Betriebspunkt der Anlage, der im Sinne der Gütefunktion wirtschaftlich optimal ist. Für die Wirtschaftlichkeit des Prozesses wichtige Störungen und Modellfehler werden ermittelt und in der Untersuchung berücksichtigt.

Die mögliche Zahl der Mess- und Stellgrößen wird während einer Analyse der Freiheitsgrade ermittelt. Stehen viele Mess- und Stellgrößen zur Verfügung muss eine Vorauswahl der Strukturen getroffen werden. Diese Vorauswahl wird aufgrund der Sensitivitäten der Stellgrößen gegenüber den Messgrößen getroffen. Die Sensitivitäten werden mit der maximalen Schwankung der Stellgrößen und dem Messfehler skaliert.

Die optimierungsbasierte Untersuchung geht von einem Punkt aus, der den im Mittel über alle Störungen günstigsten Betriebspunkt beschreibt. Zur Ermittlung werden in einer Maximierung alle betrachteten Störungsszenarien parallel betrachtet. Ausgehend von diesem Betriebspunkt wird anhand einer Minimierung der Wirtschaftlichkeit in einem nichtlinearen Modell ermittelt, ob die Struktur einen unwirtschaftlichen Betrieb sicher verhindert. Da die Regelgrößen auf die Sollwerte aus der Multiszenario-Optimierung fixiert und die Stellgrößen als Freiheitsgrade der Minimierung gewählt sind, fungiert der Optimierungsalgorithmus wie ein Regler, ohne eine Reglerstruktur vorzugeben.

Da für nichtlineare Prozesse eine Überlagerung der Störungen nicht zwingend einer Addition der Verluste entspricht, werden für Strukturen, die sich bei der Minimierung der Einzelstörungen ausgezeichnet haben, im Folgenden die Störungen überlagert und erneut eine Minimierung durchgeführt.

Anschließend wird das dynamische Verhalten anhand eines linearen Modells untersucht und ein Regler entworfen. Dazu werden die Techniken verwendet, die in den letzten Jahren am Lehrstuhl für Anlagensteuerungstechnik entwickelt wurden. Abschließend wird der Regler in das nichtlineare Modell implementiert und in Simulationen getestet.

Das vorgestellte Verfahren wird an einer diskontinuierlichen Kolonne zur Produktion von Methylacetat aus Essigsäure und Methanol, wie sie im Technikum des Fachbereichs Bio- und Chemieingenieurtechnik betrieben wird, getestet, für die praktische Betriebserfahrung vorliegt. Weiterhin wird eine kontinuierliche Kolonne zur Produktion von Methylacetat untersucht. Das Modell wurde aus dem der diskontinuierlichen Kolonne entwickelt, so dass die Erfahrung weiter genutzt werden konnte und gleichzeitig das Prozessverhalten des industriellen Kodak-Eastmann-Prozesses modelliert wird.

Abstract

This thesis presents a systematic procedure for control structure selection based on rigorous models. Control structure selection concerns the choice of measured and manipulated variables used for feedback control. The basic idea is that a feedback controller that regulates certain measurable quantities to their set-points should steer the process towards its economic optimum in the presence of disturbances and model uncertainties.

The investigation starts with an analysis of the degrees of freedom of the process available during plant operation to determine the number of possible manipulated variables.

The profit function then has to be defined and constraints of the process must be formulated mathematically. Based on this optimization problem the optimal nominal operating point is determined as the starting point for further processing.

The next step of the procedure is to define the disturbance scenarios. Worst-case disturbances are computed by performing a minimization of the profit. Since the number of structures increases rapidly with increasing numbers of measurements and manipulated variables, an a priori exclusion of unsuitable variables may be necessary. A set of measured variables is unsuitable for control if the resulting inputs under closed-loop control are too sensitive to sensor errors. A sensitivity analysis is performed to investigate the influence of sensor errors.

After the sensitivity analysis the reference value for the control set-point is calculated. For each control structure a set of disturbance scenarios is considered in parallel to obtain one reference value which can be used in all scenarios. Maximization is used to obtain the optimal operating point considering the disturbances.

The main step of investigation are individual minimizations of the profit function for each scenario and structure. Using minimization the worst-case profit is calculated. At least this profit can be guaranteed for operation of a plant with the investigated structure. As a further measure for the suitability of a structure the average value of the profit function is calculated for each structure.

For non-linear processes a superposition of disturbances does not necessarily result in an addition of the effects on the profit function. Therefore disturbances are superposed for structures which achieved good results during the minimization for single scenarios.

It is likely that some of the structures investigated in non-linear analyses are not suitable for linear control. Dynamic controllability is therefore assessed in the next step using linear techniques.

The key idea is that after using performance indices to exclude, e.g., structures with small right half plane zeros, the attainable dynamic performance is computed over all stabilizing linear time-invariant controllers. The corresponding controllers are of high order. For a detailed analysis of the resulting dynamic performance, these controllers are approximated by low-order controllers with prescribed structure and then tested in simulations with the rigorous dynamic model.

The methodology is tested on two examples of reactive distillation columns. One is a batch column operated at the department of Chemical and Biochemical Engineering at the University of Dortmund as a pilot plant, the other is the industrial Kodak-Eastman-Process. Both processes are used to produce methyl acetate from acetic acid and methanol.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Stand des Wissens	2
2	Methodik der Regelungsstrukturauswahl	7
2.1	Bestimmung der Freiheitsgrade	9
2.2	Optimierungsbasierter Ansatz	10
2.2.1	Herleitung der Regelungsstrukturauswahl	11
2.2.2	Abgrenzung gegenüber dem Vorgehen nach Skogestad	19
2.3	Dynamische Optimierung	21
2.4	Beschränkungen in nichtmessbaren Zuständen	24
3	Dynamische Untersuchung am linearisierten Modell	27
3.1	Erzeugung eines linearen Modells	28
3.2	Darstellung von Prozessmodellen und Strecken	29
3.3	Betrachtung von Polen und Nullstellen	30
3.4	Konditionszahl	31
3.5	Berechnung der optimalen Regelgüte	32
3.5.1	Youla Parametrierung des geschlossenen Regelkreises	33
3.6	Reglerdesign durch Frequenzgangs-Approximation	35
3.7	Test am rigorosen Modell	37
4	Diskontinuierlicher Methylacetat-Prozess	39
4.1	Modell der Batchkolonne	40
4.2	Erstellung eines quasi-kontinuierlichen Modells	42
4.2.1	Bestimmung der Freiheitsgrade	46
4.3	Optimierungsbasierte Untersuchung	47
4.3.1	Nominelle Optimierung	48
4.3.2	Minimierung über Störungen	50
4.3.3	Vorauswahl der Strukturen	53
4.3.4	Multiszenarioansatz	54
4.3.5	Minimierung der Gütefunktion für geeignete Strukturen	55
4.3.6	Kombination der Störungen	58
4.4	Dynamische Untersuchung am linearisierten Modell	60

4.4.1	Betrachtung von Nullstellen und Konditionszahl	60
4.4.2	Berechnung der optimalen Regelgüte und Reglerauslegung	61
4.4.3	Reglertest	64
4.5	Ergebnis	69
5	Kontinuierlicher Methylacetat-Prozess	71
5.1	Beschreibung des Modells	72
5.1.1	Bestimmung der Freiheitsgrade	74
5.2	Optimierungsbasierte Untersuchung	74
5.2.1	Nominelle Optimierung	74
5.2.2	Minimierung über Störungen	75
5.2.3	Vorauswahl mit Sensitivitäten	78
5.2.4	Multiszenarioansatz	80
5.2.5	Minimierung der Gütefunktion für geeignete Strukturen	83
5.2.6	Kombination der Störungen	85
5.3	Untersuchung am linearen Modell	86
5.3.1	Betrachtung von Nullstellen und Konditionszahl	86
5.3.2	Berechnung der optimalen Regelgüte und Reglerauslegung	89
5.3.3	Reglertest	93
5.4	Ergebnis	101
6	Zusammenfassung	103
	Literaturverzeichnis	104
	Symbolverzeichnis	111
	Lateinische Symbole	111
	Griechische Symbole	113
	Indices	113
A	Ausführliche Ergebnisse des Batchprozesses	115
A.1	Auswertung der Sensitivitäten	115
A.2	Ergebnisse der Multiszenariountersuchung	119
A.3	Ergebnisse der Minimierung	125
B	Ausführliche Ergebnisse des kontinuierlichen Prozesses	131
B.1	Auswertung der Sensitivitäten	131
B.2	Ergebnisse der Multiszenariountersuchung	133
B.3	Ergebnisse der Minimierung	149