Modellierung und Regelung
komplexer dynamischer Systeme

Band 44

Stephan Strommer

Mathematische Modellierung, Beobachterentwurf, Regelung und Optimierung eines kontinuierlichen Bandglühofens

Schriften aus den Instituten für

Automatisierungs- und Regelungstechnik (TU Wien)
Regelungstechnik und Prozessautomatisierung (JKU Linz)

Herausgeber: Andreas Kugi und Kurt Schlacher

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 44

Stephan Strommer

Mathematische Modellierung, Beobachterentwurf, Regelung und Optimierung eines kontinuierlichen Bandglühofens

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: Wien, TU, Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2019
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6676-0
ISSN 1866-2242

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Meiner Familie und Freunden/Mojoj obitelji i mojim prijateljem

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) der Technischen Universität Wien. Die Inhalte dieses Buches wurden 2017 in ähnlicher Form als Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Wien eingereicht. Deren erfolgreiche Verteidigung fand im Oktober 2017 statt.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kugi für seine engagierte und hervorragende wissenschaftliche Betreuung während meiner Zeit am Institut und die Weitergabe seines umfangreichen Wissens auf dem Gebiet der mathematischen Modellbildung und Regelungstechnik. Mein weiterer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Dirk Abel für die Erstellung des Erstgutachtens und die hilfreichen Anmerkungen sowie Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.sc.techn. Georg Schitter für die Erstellung des Zweitgutachtens und die konstruktiven Kommentare. Zudem möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik bedanken, der den Vorsitz der Prüfungskommission inne hat.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit wurden an der Feuerverzinkungsanlage 3 der voestalpine Stahl GmbH am Standort Linz in Österreich im Rahmen einer Forschungskooperation bestehend aus Andritz AG und voestalpine Stahl GmbH durchgeführt. Für die Ermöglichung dieser Kooperation möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Michael Böck, Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Maximilian Kaiser und Herrn Dipl.-Ing. Gerald Helekal danken. Weiterhin gebührt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Martin Fein, Herrn Dipl.-Ing. Florian Leeber, Herrn Dipl.-Ing. Krešimir Mavračić, Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Hannes Seyrkammer, Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Stürmer und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Gerhard Trinkl für die vielen fachlichen Diskussionen, die Unterstützung bei Versuchskampagnen und der geleisteten Implementierung.

Für das freundschaftliche Arbeitsklima, die herrschende Hilfsbereitschaft und

die über die Arbeit hinausgehenden Aktivitäten wird mir die Zeit während meiner Dissertation stets in guter Erinnerung bleiben. Dafür möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen herzlichst bedanken. Mein besonderer Dank gebührt Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Steinböck für seine engagierte und hervorragende Betreuung während meiner Zeit am ACIN. Neben der Weitergabe seines umfangreichen Wissens auf dem Gebiet der mathematischen Modellbildung von thermischen Prozessen und Regelungstechnik, war sein Elan und seine motivierenden Worte stets ein Antrieb für meine wissenschaftliche Arbeit. Seine Denkanstöße haben einen entscheidenden Beitrag bei der Entstehung dieser Arbeit geleistet. Zudem möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Martin Niederer bedanken, der mit mir gemeinsam an diesem Thema gearbeitet hat. Durch sein Engagement und seine fachliche Expertise hat er einen maßgeblichen Erfolg an dieser Arbeit. Weiters gebührt mein Dank Dipl.-Ing. Georg Stadler für die Unterstützung hinsichtlich LaTeX und der Korrektur von Manuskripten.

Im Weiteren möchte ich mich bei meinen DiplomandInnen Dipl.-Ing. Christian Begle, Dipl.-Ing. Christoph Fröhlich, Dipl.-Ing. Andreas Deutschmann, Dipl.-Ing. Alexander Aschauer, Dipl.-Ing. Saša Milinić, Dipl.-Ing. Cornelia Steiner, Dipl.-Ing. Andreas Stephanides und Thomas Kopf bedanken. Durch ihre Ergebnisse bei der Bearbeitung ihrer Diplomarbeiten haben sie ebenfalls einen Beitrag zur Entstehung der Dissertation geleistet.

Schließlich möchte ich mich für den Rückhalt meiner Familie und Freunde während meines Studiums und der Anfertigung der Dissertation bedanken. Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Lebensgefährtin Karin für die Geduld und die Unterstützung. Zu besonderem Dank bin ich Elfriede Markvica für die sorgfältige Korrektur meiner Arbeit verpflichtet.

Wien, im Mai 2018 Stephan Strommer

Abstract

In the steel industry, continuous strip annealing furnaces are used for heat-treatment of steel strips to achieve desired mechanical properties. Such furnaces are often part of a hot-dip galvanizing line, where steel strips are coated. The annealing process plays an important role for the product quality of the steel strips. Moreover, continuous strip annealing furnaces are also important cost drivers of strip processing lines due to their high energy consumption.

This work deals with the design of a nonlinear observer and temperature controller for a strip annealing furnace. A high product quality and minimum material scrap should be achieved by means of an accurate temperature control, in particular when a welded joint moves through the furnace. Moreover, the controller should minimize the energy consumption and the CO_2-emissions and maximize the throughput.

First, a full mathematical model of the furnace is developed. The first-principles model uses the mass, the enthalpy, and the heat balance to describe the nonlinear effects and the dynamic behavior of the furnace. Based on this model, a reduced model is derived, which constitutes the basis for the observer and controller design.

The strip annealing furnace constitutes a high-dimensional complex system, where only few process variables can be measured. The furnace temperatures and the inexactly known strip emissivity are determined by an observer. Based on the reduced model, two observer strategies are developed, namely an extended Kalman filter and an ad-hoc adaptive estimator. Due to its good estimation accuracy of the furnace temperatures and the low computational effort, the ad-hoc adaptive estimator was implemented on the hot-dip galvanizing line 3 of voestalpine Stahl GmbH in Linz, Austria. Meanwhile, the estimator is running in nonstop operation.

A hierarchical control structure is developed for the strip annealing furnace. The cascade controller consists of an optimization-based temperature controller

and underlying controllers for the mass flows of fuel and air as well as for the strip velocity. The temperature controller consists of four modules to avoid the real-time solution of a mixed-integer programming problem which is related to the switching (on/off) of heating zones. The strip velocity is not allowed to vary arbitrarily because it is subject to stringent conditions demanded by downstream process steps to ensure the high product quality. An optimal strip velocity trajectory is also designed within the hierarchical control structure.

The four modules contain a static optimization, a trajectory generator for the strip velocity, an optimization-based trajectory planner, and a model predictive controller. The static optimization is used for the selection of an operating point characterized by the strip velocity and the switching state of the heating zones for each strip. Based on the optimal strip velocity determined for each strip, the trajectory generator creates a trajectory for the strip velocity in the strip transition when a welded joint passes the furnace. The module optimization-based trajectory planner is used to plan ahead for transient operational conditions. This module determines reference trajectories for the strip temperature and optimal switching times for the heating zones. The nonlinear model predictive controller calculates optimal mass flows of fuel to realize an accurate temperature tracking control. Optimization-based methods are used in these modules. The original constrained optimization problem is transformed into an unconstrained one by a nonlinear transformation of the optimization variables and additional penalty terms. The unconstrained optimization problem is iteratively solved by the Gauss-Newton method.

The performance of the proposed control concept is demonstrated in a simulation scenario. Here, the real furnace is represented by the validated full mathematical model. The algorithm of the nonlinear model predictive controller is already implemented and running in nonstop operation at the hot-dip galvanizing line 3 of voestalpine Stahl GmbH in Linz, Austria. In comparison with the existing control approach, the results of the proposed control concept show a significant improvement of the annealing process.

Kurzzusammenfassung

In der Stahlindustrie werden kontinuierliche Bandglühöfen zur Erwärmung von Stahlbändern eingesetzt, um gewünschte mechanische Eigenschaften des Materials zu erreichen. Derartige Öfen sind zum Beispiel Teil von Feuerverzinkungsanlagen, in denen Stahlbänder verzinkt werden. Dabei ist die Erwärmung des Bandes, bei der eine hohe Menge an Brennstoff verbraucht wird und deshalb einen kostenintensiven Prozessschritt darstellt, direkt mit der Produktqualität gekoppelt. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Entwurf einer nichtlinearen Beobachter- und Regelungsstrategie eines Bandglühofens. Mithilfe dieser Regelungsstrategie soll die exakte Erwärmung des Bandes insbesondere auch im Übergangsbereich zwischen zwei zusammengeschweißten Bändern verbessert und somit die Produktqualität gesteigert und der Materialausschuss minimiert werden. Darüber hinaus soll der Energieverbrauch und die CO_2-Emissionen minimiert und der Durchsatz maximiert werden.

Zu Beginn dieser Arbeit wird ein vollständiges mathematisches Modell des Bandglühofens basierend auf Bilanzgleichungen für die Masse, Enthalpie und Wärme hergeleitet. Dabei sollen die wesentlichen nichtlinearen Effekte und Dynamiken des Systems abgebildet werden. Ausgehend von diesem Modell wird ein reduziertes mathematisches Modell des Ofens erstellt, das als Basis für den Beobachter- und Regelungsentwurf dient.

Der Bandglühofen ist ein hoch-dimensionales komplexes System, bei dem nur wenige Prozessgrößen gemessen werden können. Der Temperaturverlauf im Ofeninnenraum und die unzureichend bekannte Bandemissivität werden mittels eines Beobachters geschätzt. Es werden zwei Beobachterkonzepte anhand des reduzierten Modells entwickelt, nämlich ein Erweitertes Kalman Filter und ein adaptiver ad-hoc Parameterschätzer. Aufgrund der sehr genauen Schätzung der Ofeninnenraumtemperaturen und des geringen Rechenaufwands wurde der adaptive ad-hoc Parameterschätzer an der Feuerverzinkungsanlage 3 der voestalpine Stahl GmbH am Standort Linz implementiert, welcher mittlerweile im Dauerbetrieb läuft.

Das Regelungskonzept des Bandglühofens basiert auf einer hierarchischen Struktur mit einer aus vier Modulen bestehenden optimierungsbasierten Temperaturregelung und unterlagerten Regelkreisen für die Brennstoff- und Brennluftmassenströme sowie für die Bandgeschwindigkeit. Damit kann die Notwendigkeit einer echtzeitfähigen Lösung eines gemischt-ganzzahligen Programms für das Ein- und Ausschalten der Heizzonen umgangen werden. Zudem kann mit diesem Regelungskonzept eine geeignete Bandgeschwindigkeitstrajektorie entworfen werden, da aufgrund von stringenten Qualitätsanforderungen an die Zinkschicht die Bandgeschwindigkeit nicht beliebig variiert werden darf.

Zu den vier Modulen zählen eine statische Optimierung, ein Trajektoriengenerator für die Bandgeschwindigkeit, ein optimierungsbasierter Trajektorienplaner und eine nichtlineare modellprädiktive Regelung. Die statische Optimierung legt für jedes Band einen optimalen Arbeitspunkt fest, der durch die Bandgeschwindigkeit und den Schaltzustand der Heizzonen charakterisiert ist. Anhand der optimalen Geschwindigkeiten für die einzelnen Bänder bestimmt ein Trajektoriengenerator eine Trajektorie der Bandgeschwindigkeit im Übergangsbereich zwischen zwei Bändern wenn sich eine Schweißnaht im Ofen befindet. Der optimierungsbasierte Trajektorienplaner dient zur Vorausplanung von transienten Betriebsszenarien. Dieses Modul ermittelt Referenztrajektorien der Bandtemperatur und optimale Schaltzeitpunkte für die Brenner. Die modellprädiktive Regelung berechnet optimale Brennstoffmassenströme und realisiert so eine Folgeregelung für die Bandtemperatur. Bei diesen Modulen kommen optimierungsbasierte Methoden zum Einsatz. Das zugrunde liegende beschränkte Optimierungsproblem wird mittels einer sigmoiden Abbildung der Eingänge und zusätzlichen Straftermen in eine unbeschränkte Optimierungsaufgabe übergeführt. Zur iterativen numerischen Lösung dieses Problems wird die Gauß-Newton-Methode verwendet.

Der entworfene Regler wird in einer Simulationsumgebung mit dem validierten vollständigen mathematischen Modell des Ofens getestet. Der Algorithmus der nichtlinearen modellprädiktiven Regelung wurde bereits erfolgreich an der Feuerverzinkungsanlage 3 der voestalpine Stahl GmbH am Standort Linz implementiert und läuft gegenwärtig im Dauerbetrieb. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung der Erwärmung des Bandes im Vergleich zum bestehenden Regelungskonzept.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis **xiii**

1 Einleitung **1**
1.1 Kontinuierlicher Bandglühofen 2
1.2 Regelungsaufgabe 4
1.3 Stand der Technik 5
1.3.1 Modellierungsansätze für Glühöfen 6
1.3.2 Zustandsbeobachter für Glühöfen 9
1.3.3 Regelungsstrategien für Glühöfen 10
1.4 Motivation und Zielsetzung der Arbeit 15
1.5 Lösungsweg 16
1.6 Gliederung der Arbeit 17

2 Mathematische Modellbildung **21**
2.1 Aufbau und Funktionsweise des direkt-befeuerten Ofens 21
2.2 Zwei Modelle mit unterschiedlicher Zielsetzung 24
2.2.1 Abstrahierte Teilmodelle und örtliche Diskretisierung . . . 24
2.2.2 Medienversorgung der Heizzonen 28
2.3 Wärmetransportmechanismen 30
2.3.1 Konvektion 30
2.3.2 Wärmeleitung 34
2.3.3 Wärmestrahlung 34
2.4 Vollständiges Modell des direkt-befeuerten Ofens 39
2.4.1 Verbrennung 40
2.4.2 Modellierung der Abgasdynamik 47
2.4.2.1 Abgaszusammensetzung 47
2.4.2.2 Strömung im Ofenraum 49

2.4.2.3 Abgastemperatur 52
2.4.3 Modellierung der Wandtemperatur 54
2.4.4 Modellierung der Bandtemperatur 56
2.4.5 Modellierung der Ofenrollentemperatur 59
2.4.6 Assemblierung der Teilmodelle 60
2.5 Reduktion mittels singulärer Störtheorie 61
2.5.1 Singuläre Störtheorie 62
2.5.2 Anwendung der singuläre Störtheorie 62
2.5.3 Struktur des direkt-befeuerten Ofenmodells 66
2.6 Vollständiges Modell des Bandglühofens 69
2.6.1 Vollständiges Modell des indirekt-befeuerten Ofens 70
2.6.2 Assemblierung des Gesamtmodells 73
2.6.3 Zeitdiskretisierung 74
2.7 Reduziertes Modell des Bandglühofens 75
2.7.1 Verbrennung und Abgas im direkt-befeuerten Ofen 76
2.7.2 Strahlheizrohr 78
2.7.3 Assemblierung des reduzierten Modells 78
2.8 Validierung des direkt-befeuerten Ofens 79

3 Beobachterentwurf 87
3.1 Die Schätzaufgabe 87
3.2 Erweitertes Kalman Filter 89
3.3 Adaptiver ad-hoc Parameterschätzer 93
3.4 Validierung des Beobachterkonzeptes 94

4 Automatisierungssystem des Ofens 99
4.1 Qualitative Regelungsziele 99
4.2 Quantitative Regelungsziele und Beschränkungen 101
4.3 Hierarchisches Regelungskonzept 104

5 Optimierungsbasierte Temperaturregelung 109
5.1 Struktur der Temperaturregelung 110
5.2 Entwurf der Kostenfunktion 113
5.3 Statische Optimierung 115
5.4 Trajektoriengenerator Bandgeschwindigkeit 118
5.5 Optimierungsbasierter Trajektorienplaner 119
5.6 Modellprädiktive Regelung 126
5.7 Numerische Lösung des Optimierungsproblems 127

6 Validierung des Regelungskonzeptes 133
6.1 Simulationsstudie 133
6.2 Messergebnisse 138
6.2.1 Messergebnisse mit dem bestehenden PI-Regelungskonzept 140

6.2.2 Messergebnisse mit dem Modul modellprädiktive Regelung 141

7 Zusammenfassung und Ausblick 147
7.1 Zusammenfassung 147
7.2 Ausblick 149

A Upwind-Verfahren und Banddynamik mit Lagrange-Koord. 151
A.1 Upwind-Verfahren 151
A.2 Lagrange-Koordinaten 153

B Optimierungsbasierte Parameteridentifikation 157

C Messeinrichtungen 159
C.1 Temperatur 159
C.2 Abgaszusammensetzung 162

D Schaltpunkt-Optimierung 167
D.1 Herleitung des Gradienten im zeitkontinuierlichen Bereich 168
D.2 Herleitung des Gradienten im zeitdiskreten Bereich 170