

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 51

Martin Saxinger

Model-based control of the transverse strip shape and position in a hot-dip galvanizing line

Schriften aus den Instituten für

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

Herausgeber: Andreas Kugi, Kurt Schlacher und
Wolfgang Kemmetmüller

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 51

Martin Saxinger

**Model-based control of the transverse strip shape
and position in a hot-dip galvanizing line**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Wien, TU, Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7847-3

ISSN 1866-2242

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im CD-Labor für „Modellbasierte Prozessregelung in der Stahlindustrie“ am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) der Technischen Universität Wien. Im Dezember 2020 wurde diese Arbeit in einer ähnlichen Form als Dissertation mit dem Titel „Model-based control of the transverse strip shape and position in a hot-dip galvanizing line“ eingereicht und erfolgreich verteidigt. Ich bedanke mich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung, die Christian Doppler Forschungsgesellschaft sowie durch die voestalpine Stahl GmbH.

Mein ganz besonderer Dank gebührt an erster Stelle Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kugi für die hervorragende Betreuung der Arbeit. Die Diskussionen mit Prof. Kugi fanden üblicherweise in der wöchentlichen „CD-Labor Besprechung“ statt, welche ein regelmäßiger Bestandteil des CD-Labors war. Im Besonderen danke ich auch Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Steinböck, der mich in zahlreichen Diskussionen mit Rat und Tat unterstützt hat.

Auch meinen CD-Labor Kollegen Dipl.-Ing. Lukas Marko und Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Baumgart gebührt ein herzlicher Dank für die gemeinsame Zusammenarbeit im Projekt Feuerverzinken. Gerne erinnere ich mich auch an unsere Fahrten zur voestalpine Stahl GmbH und die zahlreichen fachlichen Gespräche. Für die Unterstützung beim Aufbau des Laborversuchs danke ich Dipl.-Ing. Andreas Ettl, Dipl.-Ing. Ulrich Knechtelsdorfer und Dipl.-Ing. Christoph Orth. Ein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Georg Stadler für den unermüdlichen L^AT_EX Support. In guter Erinnerung werde ich auch alle anderen Kolleginnen und Kollegen am ACIN behalten.

Auf Seiten der voestalpine Stahl GmbH gilt mein großer Dank Dipl.-Ing. Peter Kerschbaummayr, Dipl.-Ing. Josef Nigl und Dipl.-Ing. Andreas Eder für die große Hilfsbereitschaft, die tatkräftige Unterstützung und die flotte Umsetzung unserer

Vorhaben.

Meiner Familie danke ich herzlichst für das Vertrauen, das Ermöglichen meiner Ausbildung und die Unterstützung meiner Entscheidungen.

Abstract

Hot-dip galvanizing is the state-of-the-art technology to produce zinc coats on steel strips. For quality reasons, the steel industry has to guarantee a required minimum coating thickness at any lateral position of the strip. The primary objective of this process is to establish a zinc layer with a defined uniform thickness. In this way, the zinc consumption and thus the operating costs of the plant can be significantly reduced without violating the coating thickness requirement. One condition to achieve a homogeneous zinc layer is a uniform air gap between the strip and the gas wiping dies, where excess liquid zinc is blown off. Hence, a flat transverse strip profile at the gas wiping dies is required. However, the steel strips processed in such plants often exhibit unknown but usually only slowly varying residual curvatures which entail transverse flatness defects of the strip. In addition, vibrations of the strip at the gas wiping dies must be suppressed to keep the air gaps constant. Persistently exciting vibrations of the strip are frequently encountered in hot-dip galvanizing lines. These vibrations typically exhibit a dominant sinusoidal or sometimes multi-harmonic shape. The underlying excitation process, the frequency, the amplitude, and the phase are generally unknown. Clearly, flatness defects and superimposed strip vibrations at the gas wiping dies cause non-uniform and time-varying air gaps and hence an inhomogeneous zinc coating thickness.

In modern hot-dip galvanizing lines, electromagnetic actuators are used for contactless vibration and shape control of the transverse strip shape. In the considered application, the control input (force of electromagnetic actuators), the sensor output (measured transverse strip displacements near the electromagnets), and the system output to be controlled (transverse strip displacement at the gas wiping dies) are usually located at different positions along the strip, which makes the overall control task quite challenging. In addition, the disturbance input (source of multi-harmonic periodic excitation) is also located at an unknown position. State-of-the-art control algorithms realize an approximately flat strip

profile only at the height of the displacement sensors but it is unfeasible to mount distance sensors directly at the gas wiping dies. Moreover, a persistently exciting disturbance cannot be fully suppressed by the state-of-the-art control algorithms (not even at the measured positions). This usually entails a time-varying flatness defect with non-zero mean at the gas wiping dies, which in turn brings along a suboptimal zinc coating thickness.

In this thesis, model-based methods are developed to improve the homogeneity and accuracy of the zinc coating thickness compared to state-of-the-art methods. To this end, a dynamical model of the motion and elastic deformation of the steel strip in an industrial hot-dip galvanizing line is derived that captures the most important physical effects, e.g., the flatness defects in the strip, the electromagnetic forces, and the transverse loads of impinging air cooling jets. The underlying partial differential equations are derived via Hamilton's principle for systems of changing mass. The Galerkin weighted residual method is employed for spatial discretization. The domain of the strip is divided into finite elements, where local ansatz functions are used. A tailored time integration scheme for structural mechanics problems is applied to perform time-efficient transient simulations. The model is validated for both steady-state and dynamic cases with measurements from the industrial hot-dip galvanizing line for different test strips.

The mathematical model serves as a basis for the design of a feedforward controller of the transverse strip profile at the position of the gas wiping dies. For this, an estimator of the flatness defects is designed and validated for different test strips and settings of the plant. Using the validated mathematical model, a simulation study is conducted to compare the state-of-the-art control method (flat strip profile at the electromagnets) with the developed feedforward controller (flat strip profile at the gas wiping dies). Furthermore, the influence of the vertical distance between the gas wiping dies and the electromagnets on the control performance is analyzed in detail.

In order to suppress persistently exciting disturbances at the position of the gas wiping dies, a control concept is developed that consists of a linear quadratic regulator (LQR) combined with a disturbance feedforward concept based on the theory of invariant manifolds and an extended Kalman filter (EKF). The proposed control strategy is successfully validated by means of an experimental test rig that mimics the essential properties of the industrial hot-dip galvanizing line. To this end, custom-made electromagnetic actuators are used to exert forces on the strip. The desired electromagnetic control force is realized in a pure feedforward mode, where neither a force sensor nor a displacement sensor for measuring the air gap between the strip and the magnetic core are required. Finally, measurement results of the control concept, which demonstrate the excellent performance to suppress persistently exciting disturbances, are presented for the experimental test rig.

Kurzzusammenfassung

Kontinuierliches Feuerverzinken ist eine Standardtechnologie zur Herstellung von verzinkten Stahlbändern. Zur Erfüllung der Produktqualitätsansprüche muss die Stahlindustrie eine erforderliche Mindestdicke der Zinkschicht an jeder beliebigen Querposition des Bandes garantieren. Das primäre Ziel dieses Prozesses ist das Aufbringen einer Zinkschicht mit einer definierten gleichmäßigen Dicke. In diesem Fall können der Zinkverbrauch und daher auch die Betriebskosten der Anlage deutlich reduziert werden, ohne dass die Anforderung bezüglich der erforderlichen Zinkschichtdicke verletzt wird. Eine maßgebliche Bedingung zur Aufbringung einer homogenen Zinkschicht ist ein gleichmäßiger Luftspalt zwischen dem Band und der Luftabstreifdüse, mit welcher überschüssiges, am Band haftendes Zink, abgeblasen wird. Dazu wird ein möglichst flaches Bandprofil in der Abstreifdüse benötigt. Tatsächlich weisen die zu verzinkenden Bänder in solchen Anlagen häufig unbekannte, jedoch meist nur langsam variierende plastische Vorverformungen auf, welche zu Ebenheitsfehlern des Bandes führen. Treten unerwünschte Bandschwingungen in der Luftabstreifdüse auf, so führt dies zu einer zusätzlichen zeitlichen Variation des Luftspaltes. In Feuerverzinkungsanlagen werden oftmals Bandschwingungen beobachtet, die über einen externen Mechanismus permanent angeregt werden. Solche Bandschwingungen haben typischerweise eine ausgeprägte Sinusform, es können aber auch Oberwellen überlagert sein. Der zugrundeliegende Mechanismus zur Anregung, die Frequenz, die Amplitude und die Phase der Schwingung sind dabei unbekannt. Plastische Vorverformungen und Bandschwingungen führen typischerweise zu ungleichmäßigen und zeitlich variierenden Luftspalten in der Luftabstreifdüse und damit in weiterer Folge zu einer inhomogenen Zinkschichtdicke.

Moderne Feuerverzinkungsanlagen sind mit mehreren Elektromagnetaktuatoren ausgestattet, welche zur kontaktlosen Schwingungsdämpfung und zur Regelung der transversalen Bandform verwendet werden. Genau genommen befinden sich in der betrachteten Anwendung der Steuereingang (Kräfte der Elektromagnete),

der Messausgang (gemessene transversale Bandauslenkung in der Nähe der Elektromagnete) und der zu regelnde Ausgang (Bandauslenkung in der Abstreifdüse) normalerweise an unterschiedlichen Positionen entlang des Bandes. Dies führt auf ein komplexes regelungstechnisches Problem. Zusätzlich befindet sich auch der Störeingang (Quelle der periodischen Bandschwingung) an einer anderen Position. Herkömmliche Regelalgorithmen realisieren ein annähernd flaches Bandprofil auf Höhe der Abstandssensoren. Eine direkte Montage von Abstandssensoren auf der Luftabstreifdüse ist jedoch nicht möglich. Periodisch angeregte Bandschwingungen können von solchen Regelalgorithmen nicht vollständig unterdrückt werden (auch nicht auf der Höhe der Abstandssensoren). Dies führt dazu, dass typischerweise ein zeitlich variierender und nicht mittelwertfreier Ebenheitsdefekt an der Abstreifdüse verbleibt, welcher eine suboptimale Zinkschichtdicke zur Folge hat.

In dieser Arbeit werden modellbasierte Methoden entwickelt, die im Vergleich zu existierenden Methoden zu einer weiteren Verbesserung der Zinkschichtdickenhomogenität und -genauigkeit führen sollen. Zu diesem Zweck wird ein dynamisches Modell der Bewegung und elastischen Deformation eines Stahlbandes in einer Feuerverzinkungsanlage entwickelt. Die wichtigsten physikalischen Einflussgrößen, wie z. B. die plastische Vorverformung des Bandes, die Kräfte der Elektromagnete und die Strömungskräfte durch die Luftkühler werden berücksichtigt. Die zugrundeliegenden Differentialgleichungen folgen aus dem Hamiltonschen Prinzip für offene Systeme mit veränderlicher Masse. Zur örtlichen Diskretisierung kommt die Galerkin-Methode der gewichteten Residuen zum Einsatz, wobei das Rechengebiet mithilfe von lokalen Ansatzfunktionen in finite Elemente diskretisiert wird. Transiente Simulationen werden mit einem speziellen Zeitintegrationsverfahren durchgeführt, welches für strukturelle Systeme entwickelt wurde. Das Bandmodell wird mithilfe von Messungen in quasistatischen und dynamischen Szenarien validiert. Die Messungen dazu wurden an der industriellen Feuerverzinkungsanlage für verschiedene Testbänder durchgeführt.

Das mathematische Modell wird für die Entwicklung einer Vorsteuerung des transversalen Bandprofils bei der Luftabstreifdüse verwendet. Dazu wird ein Schätzer der Ebenheitsdefekte entworfen und mithilfe von verschiedenen Testbändern und Einstellungen der Anlage validiert. Mithilfe des validierten Bandmodells wird eine Simulationsstudie durchgeführt, um die derzeitige Standardmethode (flaches Bandprofil bei den Elektromagneten) mit der entwickelten Vorsteuerung (flaches Bandprofil bei der Luftabstreifdüse) zu vergleichen. Des Weiteren wird der Einfluss des vertikalen Abstands zwischen der Luftabstreifdüse und den Elektromagneten auf die Ergebnisse der Vorsteuerung detailliert untersucht.

Zur Unterdrückung von periodisch angeregten Bandschwingungen wird ein Regelungskonzept entworfen, welches aus einem linear-quadratischen Regler in Kombination mit einer Störgrößenvorsteuerung und einem erweiterten Kalman-Filter besteht. Die Störgrößenvorsteuerung basiert auf der Theorie der invarianten Mannigfaltigkeiten. Das entwickelte Regelungskonzept wird dabei erfolgreich mithilfe eines experimentellen Versuchsaufbaus validiert, mit welchem die wesentlichen

Eigenschaften des Feuerverzinkungsprozesses nachgebildet werden können. Zum Aufbringen der Kraft werden selbst entwickelte elektromagnetische Aktuatoren verwendet. Die gewünschte elektromagnetische Kraft wird mithilfe einer reinen Vorsteuerung realisiert, d. h., es werden weder ein Kraftsensor noch ein Abstandssensor zur Messung des Luftspalts zwischen Band und Magnetkern verwendet.

Contents

List of symbols	xiii
1 Introduction	1
1.1 Continuous hot-dip galvanizing lines	1
1.1.1 Industrial processing of zinc-coated steel strips	2
1.1.2 Hot-dip galvanizing section	3
1.1.2.1 Three-roll tension leveler in the zinc pot	7
1.1.2.2 Gas wiping dies and electromagnetic strip stabilizer	7
1.1.2.3 Cooling elements	10
1.1.2.4 Radiometric gauges of the zinc coating weight	11
1.1.3 Current problems at the industrial plant	11
1.1.3.1 Stability problems caused by the air coolers	11
1.1.3.2 The transverse strip profile at the gas wiping dies	13
1.1.3.3 Eccentric rolls in the zinc pot	14
1.2 Objectives of this work	16
1.3 State of the art and new contributions of this work	17
1.3.1 Dynamic strip models and suitable solvers	19
1.3.2 Hot-dip galvanizing line	20
1.3.2.1 Models used for analyses	20
1.3.2.2 Position control of the transverse strip profile	22
1.3.3 Experimental test rig	24
1.4 Structure of this thesis	26
2 Mathematical modeling	29
2.1 Dynamic model of the axially moving strip	29
2.1.1 Electromagnetic forces	30
2.1.2 Pressure load caused by the cooling elements	32

2.1.2.1	Relation between fan speed and pressure	32
2.1.2.2	Flow simulator	33
2.1.2.3	Cooling elements	34
2.1.3	Hamilton's principle	36
2.1.4	Material model	38
2.1.5	Initial and boundary conditions	40
2.1.6	Spatial discretization	41
2.1.6.1	Finite elements	42
2.1.6.2	Assembly	50
2.1.7	Transient solution	53
2.1.7.1	Prediction	54
2.1.7.2	Correction	55
2.1.8	Steady-state solution	56
2.1.9	Normalization of parameters	57
2.1.10	Conclusions	57
2.2	Beam model of the strip in the zinc pot	58
2.2.1	Evaluation of the deformation history	59
2.2.2	Maximum crossbow downstream of the zinc pot	61
2.2.3	Conclusions	63
3	System analysis	65
3.1	Geometrically nonlinear and linear models	65
3.1.1	Natural oscillation frequencies of the strip	66
3.1.2	Steady-state shape of the strip	67
3.1.3	Conclusions	69
3.2	Impact of air cooling jets on strip stability	70
3.2.1	Numerical results	70
3.2.1.1	Types of equilibria	70
3.2.1.2	Influence of the boundary conditions	73
3.2.1.3	Influence of pressure and cooler fan speed	73
3.2.1.4	Influence of an offset of the strip pass line	74
3.2.2	Conclusions	74
3.3	Identification of damping parameters	75
3.3.1	Strip vibration without the zinc pot	75
3.3.2	Strip vibration with the zinc pot	78
3.3.3	Conclusions	79
4	Controller and estimator design	83
4.1	Application of new model-based control concepts in the industrial plant	83
4.2	Estimator of the residual curvature	85
4.2.1	Validation of the estimator	87
4.2.2	Conclusions	92

4.3	Feedforward control of the transverse strip profile	94
4.3.1	Feedforward control	94
4.3.2	Performance evaluation based on the validated model . . .	97
4.3.3	Conclusions	101
5	Suppression of harmonic disturbances	103
5.1	Motivation and design	103
5.2	State-space model of the strip shape	104
5.3	Vibration control strategy	106
5.3.1	Controller design	107
5.3.2	Observer design	109
5.3.2.1	EKF based on the explicit discrete-time model .	109
5.3.2.2	EKF based on an implicit Euler discretization . .	112
5.4	Overview of the components	114
5.4.1	Tensioning device	115
5.4.2	Displacement sensors	115
5.4.3	Source of disturbance	115
5.4.4	Electromagnetic actuator	116
5.4.4.1	PI current controllers	118
5.5	Model parametrization	119
5.6	Proof of concept at the test rig	120
5.6.1	Overall disturbance rejection control system	120
5.6.2	Sinusoidal disturbance	123
5.6.3	Multi-harmonic disturbance	126
5.6.4	Conclusions and outlook	130
6	Conclusions and outlook	133
6.1	Summary	133
6.2	Conclusions	135
6.3	Outlook	137
A	Jacobian matrices	139
A.1	Finite elements	139
A.1.1	In-plane system	139
A.1.2	Out-of-plane system	140
A.2	Assembly	141
	Bibliography	143