

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 55

Florian Rötzer

Modeling and Control of Reheating Strategies for Refractory Metals

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 55

Florian Rötzer

**Modeling and Control of Reheating Strategies
for Refractory Metals**

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., 2021

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 978-3-8440-8247-0

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

“Unless the Lord builds the house, those who build it labor in vain.”

– King Solomon of Israel

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) an der Technischen Universität Wien. Im August 2021 wurde die Arbeit in ähnlicher Form als Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik an der Technischen Universität Wien eingereicht und erfolgreich verteidigt. Die zugrundeliegende Projektarbeit wurde im Rahmen des EU-Projekts Power Semiconductor and Electronics Manufacturing 4.0 (SemI40) in Kooperation mit Plansee SE durchgeführt.

Die Kooperation wurde durch meinen Doktorvater Andreas Kugi initiiert, welchem ich hier meinen besonderen Dank aussprechen möchte. Danke Andreas für Deine klare und loyale Führung im Zuge dieses Projekts und für die vielen Freiheiten, die ich bei dieser Arbeit nutzen und genießen durfte. Ich schätze Dein Engagement und Vertrauen in Deine Mitarbeiter, und auch die starken Prinzipien und Werte, die dahinterstehen. Mein weiterer Dank gilt Prof. Ian Craig und Prof. Wolfgang Kemmetmüller für die Erstellung der Gutachten, sowie Prof. Wolfgang Gawlik für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungssenats. Bedanken möchte ich mich außerdem bei Andreas Steinböck, dessen Erfahrung und guten Rat ich im Zuge dieses Projekts sehr zu schätzen gelernt habe. Danke Andreas für Deinen untrüglichen Scharfsinn und Deine unerschöpfliche Geduld, sowie für Deine zahlreichen Ratschläge, welche ich mitunter erst verzögert wahrgenommen und verstanden habe.

Seitens unseres Projektpartners Plansee SE gilt mein besonderer Dank Michael Eidenberger-Schober und Gernot Reichl, welche am Standort, trotz knapper Zeit und Ressourcen, für eine verlässliche und erfolgreiche Durchführung des Projekts Sorge getragen haben. Bedanken möchte ich mich außerdem bei Dietmar Koch, Jonathan Schäfer, Joachim Resch, Reinhard Wörle, Karl Raggl, Alexander Leuprecht und Lukas Egger, deren Wissen über die Anlage und den Produktionsprozess ebenfalls in die Arbeit eingeflossen sind. Außerdem gilt mein Dank Bernd Lörler

für den Einblick in das Informationssystem der Produktionslinie.

Bedanken möchte ich mich weiters bei meinen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am ACIN. Zahlreiche fachliche Diskussionen und der offene Austausch von Wissen und Erfahrungen prägen die Atmosphäre und wecken den Enthusiasmus, immer weiter zu forschen, zu fragen und genauer hinzuschauen. Im Lauf der Jahre habe ich nahezu jedes Büro am Institut einmal aufgesucht, um mir Tipps einzuholen, oder um Ideen zu diskutieren. In bester Erinnerung werden mir dabei die angeregten – nicht ausschließlich fachlichen – Diskussionen mit Lukas Marko, Andreas Ettl, Gabriel Forstner, Michael Schwegel, Andreas Deutschmann und Ulrich Knechtelsdorfer bleiben. Besonders danken möchte ich meinem langjährigen Bürokollegen Alexander Aschauer. Danke Alex für Deine sachlichen Argumente und pragmatische Einstellung, die mir geholfen haben, den Blick auf das Wesentliche nicht zu verlieren.

Schließlich gilt mein Dank meinen Eltern Peter und Maria, welche mich uneingeschränkt unterstützt und mir das Studium an der TU Wien ermöglicht haben, sowie meinem Bruder Sebastian, der mir auf diesem Weg – wenngleich auf einer anderen Fakultät – vorausgegangen ist. Ich bedanke mich außerdem bei den Mitgliedern der International Christian Fellowship Wien, allen voran Thorsten Priesching und Da-Hyei Min (민 다혜), die mir in dieser Zeit gleichermaßen Rückhalt und Vorbild waren und sind.

Wien, im September 2021

Florian Rötzer

Abstract

The production of plates from refractory metals involves several reheating processes that have a critical influence on the quality of the final product. This thesis deals with the application of control engineering methods to two reheating processes in a flat stock production line. The objective in both cases is to save time and energy in the reheating processes, while the quality of the products should not be compromised.

In the first part of the thesis, batch-type chamber furnaces used in a hot rolling plant are considered. Energy saving is achieved by minimizing the residence times for each product that is charged into the furnace. When the product is in the furnace, its temperature cannot be measured. Therefore, a detailed process model of the chamber furnace is derived from first principles and subsequently reduced to a first-order nonlinear system, which is able to capture the time evolution of the discharge temperature of the product with sufficient accuracy. The first-order model is exploited in a learning strategy to improve the estimates of the minimum residence times from one product to the next. Additionally, the products of the plant are assigned to product classes according to their material and surface properties to further improve the estimation results.

Simulation studies are performed with the validated detailed process model and the proposed learning strategy with different product classes. The results show a high accuracy if the product parameters are well known. Uncertainties in the product parameters have a moderate influence on the estimation results that can be mitigated by narrowing the definitions of the product classes. The designed estimator is computationally inexpensive and can be applied to a wide range of similar furnace systems.

The second part of the thesis deals with an induction heating system used in the strip coil production. Thin sheets of refractory metals are reheated along a cutting

line to improve the quality of the cutting edges. Flatness defects of the sheet cause fluctuations in the air gap between the inductor and the sheet, which entail strong temperature inhomogeneities. The goal is to bring the temperature along each cutting line above a minimum threshold without unnecessary overheating.

The induction heating problem is formulated as a multiphysics process model, which is subsequently simplified for the controller design. The resulting control-oriented model consists of an advection equation and an equivalent circuit model. Based on the control-oriented model, a cascade controller for the transmitted heating power and a two-degrees-of-freedom temperature controller, comprising a feedforward and a feedback part, are designed to compensate for changes in the mean air gap.

Based on the validated detailed process model, the performance of the designed temperature controller is tested in extensive simulation studies. The results show that the proposed controller performs well for sufficiently homogeneous air gap geometries. The concept allows for further improvements in several directions, depending on the available system inputs and outputs.

Kurzzusammenfassung

Bei der Produktion von Platten aus Refraktärmetallen werden mehrere Erwärmprozesse durchlaufen, welche einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Endprodukts haben. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Anwendung regelungstechnischer Methoden auf zwei Erwärmprozesse in einer Flachgüterproduktionslinie. Das Ziel ist in beiden Fällen die Reduktion von Zeit- und Energieverbrauch des jeweiligen Prozesses, wobei die Qualität des Produkts erhalten bleiben soll.

Im ersten Teil der Arbeit werden die Kammeröfen einer Warmwalzanlage betrachtet. Durch Minimierung der Liegezeit der Produkte im Ofen wird Energie eingespart. Während des Erwärmens im Ofen kann die Produkttemperatur nicht gemessen werden. Deshalb wird ein detailliertes Prozessmodell eines Kammerofens erstellt und sukzessive auf ein nichtlineares Modell erster Ordnung reduziert, welches imstande ist, den zeitlichen Verlauf der Produktentnahmetemperatur hinreichend genau abzubilden. Das Modell erster Ordnung dient als Basis für eine Lernstrategie, die die Schätzung der minimalen Liegezeiten von Produkt zu Produkt verbessert. Darüber hinaus wird das Produktportfolio nach Materialeigenschaften und Oberflächenbeschaffenheit in Produktklassen eingeteilt, um die Genauigkeit der Schätzung weiter zu erhöhen.

Die vorgeschlagene Lernstrategie mit mehreren Produktklassen wird anhand des validierten Prozessmodells in ausführlichen Simulationsstudien getestet. Für den Fall, dass die Produktparameter hinreichend genau bekannt sind, weisen die erzielten Ergebnisse eine sehr hohe Genauigkeit auf. Unsicherheiten in den Produktparametern zeigen einen mäßigen Einfluss auf das Schätzergebnis, welcher durch Einengung der Definitionen der Produktklassen weiter minimiert werden kann. Der entworfene Schätzer kann ohne großen Rechenaufwand implementiert werden und ist für eine Vielzahl von ähnlichen Öfen anwendbar.

Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der induktiven Erwärmung in der

Bandrollen-Produktionsanlage. Dünne Bleche werden entlang einer Schnittpur erwärmt, um die Qualität der Schnittkanten zu verbessern. Unebenheiten im Blech bewirken dabei Schwankungen des Luftspalts zwischen Induktor und Blech, welche wiederum starke Inhomogenitäten beim Erwärmen der Schnittpur nach sich ziehen. Das Ziel ist es nun, die Temperatur entlang jeder Schnittpur über einen vorgegebenen unteren Schwellwert zu bringen, ohne unnötig zu überheizen.

Für das induktive Erwärmproblem wird zunächst ein detailliertes Prozessmodell erstellt und anschließend für den Reglerentwurf vereinfacht. Das resultierende Entwurfsmodell besteht dabei aus einer Transportgleichung für das thermische und einem Ersatzschaltbild für das elektromagnetische Teilsystem. Auf Basis des Entwurfsmodells wird dann ein kaskadierter Reglerentwurf durchgeführt. Der innere Kreis der Kaskade regelt die übertragene Heizleistung und über den äußeren Kreis wird die Temperatur entlang der Schnittpur über eine Zwei-Freiheitsgrad-Regelung, bestehend aus einem Vorsteuer- und einem Regleranteil, eingestellt und Schwankungen des Luftspaltemittelwerts ausgeglichen.

Die Regelgüte des entworfenen Zwei-Freiheitsgrad-Reglers wird anschließend in Simulationsstudien am validierten Prozessmodell getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass der Regler für einen hinreichend homogenen Luftspalt sehr gut arbeitet. Der Regler erlaubt verschiedene Erweiterungen, je nach Vorhandensein von Stellgrößen und Messinformationen.

Contents

List of Symbols	xiii
1 Introduction	1
I Reheating of Sintered Blocks in Chamber Furnaces	3
2 Preliminaries	5
2.1 Industrial Requirements	6
2.2 State of the Art	7
2.2.1 Reheating Time Optimization	7
2.2.2 Furnace Modeling and Simulation	8
2.2.3 Temperature and Parameter Estimation	9
2.3 Motivation and Goals	9
2.4 Approach and Scientific Contributions	10
2.5 Outline of Part I	10
3 Physical Modeling	11
3.1 Heat Transfer and Furnace Geometry	13
3.1.1 Heat Transfer	13
3.1.2 Furnace Model Geometry	16
3.2 Model Discretization	19
3.2.1 Meshing Strategy	19
3.2.2 Discretized Process Model	20
3.3 Temperature Sensors and Control Loop	21
3.4 Model Parameter Identification	22
3.4.1 Identification of the Parameter η	22
3.4.2 Identification of the Plate Emissivity ε^p	24

4	Model Reduction and Analysis	27
4.1	Proper Orthogonal Decomposition	27
4.1.1	Computation of the POD Modes	28
4.1.2	Reduced-Order Model	29
4.1.3	Contributions to the Pyrometer Output	31
4.2	Minimal Model	32
4.2.1	Radiation Equivalent Circuit	33
4.2.2	Dynamics	34
4.2.3	Model Reduction	35
5	Calculation of Optimum Reheating Times	37
5.1	Parameter Estimation and Calculation of Optimal Reheating Times	37
5.1.1	Heat Flow through Furnace Wall	38
5.1.2	Product Classes	39
5.1.3	Estimation of E^w	39
5.1.4	Estimation of E^p	41
5.1.5	Calculation of Optimum Reheating Times	42
5.2	Proof of Concept	42
5.2.1	Plant Analysis	42
5.2.2	Test Scenario	43
5.2.3	Simulation Results	44
5.3	Long-Term Tests	45
5.3.1	Varying Plate Dimensions	46
5.3.2	Effects of Narrowing the Product Classes	46
6	Conclusions and Outlook	53
6.1	Summary	53
6.2	Conclusions	54
6.3	Outlook	54
II	Induction Reheating of Thin Metal Sheets	55
7	Preliminaries	57
7.1	Industrial Requirements	57
7.2	State of the Art	58
7.3	Motivation	59
7.4	Approach and Scientific Contributions	59
7.5	Outline of Part II	60
8	Physical Modeling	61
8.1	Process Model	63
8.1.1	Electromagnetic Field	64

8.1.2	Heat Transfer	66
8.1.3	Model Summary	66
8.1.4	Validation of the Process Model	67
8.2	Control-Oriented Model	69
8.2.1	Transition to Advection Equation	69
8.2.2	Equivalent Circuit Formulation	71
8.2.3	Continuous-Time Model Summary	73
8.2.4	Discrete-Time Model	73
8.2.5	Validation of the Control-Oriented Model	74
9	Controller Design	77
9.1	Decomposition	77
9.2	Temperature Control	79
9.2.1	Feedforward Controller	79
9.2.2	Feedback Controller	80
9.3	Controller Extension for Charge and Exit	83
9.3.1	Estimation of the Sheet Position	83
9.3.2	Temperature Controller Extension	84
10	Results and Performance	87
10.1	Test Scenario and Experiments	87
10.2	Simulation Results and Evaluation	89
11	Conclusions and Outlook	97
11.1	Summary	97
11.2	Conclusions	98
11.3	Outlook	98
	Appendices	100
A	Finite Volume Method	103
A.1	Left-Hand Side	103
A.2	Right-Hand Side	104
A.2.1	Heat Conduction in Solids	104
A.2.2	Outer Boundary	105
A.2.3	Radiation Enclosure	106
A.3	System Matrices	107
A.4	ODE System Analysis	108
B	Cascade Power Controller for Induction Heating	111
B.1	Estimation of R^c during Idle Operation	112
B.2	Heating Power Controller	112
B.2.1	Practical Implementation of the Power Controller	113

C Alternative Temperature Controller Design for Induction Heating	115
C.1 Decomposition into Forward Model and Error Model	115
C.2 Feedforward Temperature Control	117
C.3 Comparison to the Early-Lumping Design	118
Bibliography	121