

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 50

Alexander Zeiler

Mathematical Modeling, Process Optimization and Quality Estimation in Side-trimming of Heavy Steel Plates

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 50

Alexander Zeiler

**Mathematical Modeling, Process Optimization
and Quality Estimation in Side-trimming
of Heavy Steel Plates**

Shaker Verlag
Düren 2022

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 2022

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 978-3-8440-7712-4

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

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) der Technischen Universität Wien. Das Projekt wurde während seiner gesamten Laufzeit mit finanziellen Mitteln aus der Kooperation mit der AG der Dillinger Hüttenwerke unterstützt.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei Herrn Univ.-Prof. Dr. Andreas Kugi bedanken, durch dessen Engagement der Grundstein für dieses Forschungsprojekt gelegt wurde. Seine fachlichen und persönlichen Ratschläge, aber auch die durch ihn ermöglichten wissenschaftlichen Freiheiten haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Bei Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Bambach bedanke ich mich ganz herzlich für die Erstellung des Gutachten.

Mein besonderer Dank gebührt Assoc. Prof. Dr. Andreas Steinböck, welcher sich immer Zeit für meist ausufernd lange Diskussionen nahm und somit maßgeblich zur Findung von richtungsweisenden Ideen beitrug. Auf Seiten der AG der Dillinger Hüttenwerke möchte ich mich besonders bei Dr. Martin Jochum bedanken, welcher stets bemüht war die zahlreichen hardwaremäßigen Anschaffungen und Messungen möglichst schnell zu ermöglichen.

Danke auch an meine Kollegen für die tolle Hilfsbereitschaft und meiner Familie und Freunden Danke für den nötigen Ausgleich zum Arbeitsalltag. Schlussendlich möchte ich meiner Lebensgefährtin Ruth für ihre liebevolle Unterstützung während des Dissertationsprojekts danken.

Wien, im Oktober 2020

Alexander Zeiler

Abstract

This thesis deals with the mathematical modeling, the inline measurement of quality parameters, and the optimization of the process and machine design of rolling-cut trimming shears for heavy steel plates. Side and longitudinal trimming of heavy plates constitute one of the last process steps in the finishing part of rolling mills. Thus, the product quality with respect to its geometrical shape is mainly determined by this process step. Traditionally, a mechanical rolling-cut shearing technique is utilized to conduct the plate trimming due to its high process speed. However, this technique frequently provokes quality defects on the plate geometry, in particular on the trimmed edges. These defects often bring along the necessity of costly post-processing of the steel plates. This motivates to develop an optimization strategy which yields a reduction or even avoidance of these quality defects. An important prerequisite is the accurate and complete inline measurement of quality parameters, which additionally enables a seamless quality monitoring.

The first part of this thesis is dedicated to gain a physical understanding of the rolling-cut shearing process. For this purpose, a suitable mathematical 3D model of the trimming shear is developed and validated by plant measurements. Based on this model, the process forces and their nexus to common quality defects are investigated. The lateral process force, in particular its variation during the cut, turns out to be a root cause for these quality defects. Tailored plant measurements and simulations allow to provide a physical explanation of the variable lateral process force and its connection to the common machine design.

These insights are utilized in the second part to optimize the geometrical design of common rolling-cut trimming shears. In fact, the specific shape of the cutting blades turns out to determine the time evolutions of the lateral process force during the cut and thus the product quality. A model-based approach aims in optimizing this shape in order to ensure a constant lateral process force. Long-term plant measurements demonstrate the significant quality improvements

achieved by this low-cost adaption of the cutting blades.

The third part presents an automated inline quality inspection system for trimmed steel plates. This novel system consists of a charge-coupled device camera and 2D laser sensors, which allow for a complete and accurate estimation of the product quality without interfering the production process. The developed estimation method includes machine vision concepts, sensor fusion, and model-based optimization algorithms. Comprehensive plant measurements demonstrate the accuracy and robustness of this system, which, in the meanwhile, is permanently installed at the rolling-mill of *AG der Dillinger Hüttenwerke*, Germany. This enables a seamless quality control, generates valuable process data, and enables to warn the plant operator in case of extensive quality defects.

The final part of this thesis is concerned with the optimization of process parameters for rolling-cut trimming shears. The goal of this optimization is to achieve a high and consistent product quality. A data set generated by the proposed quality inspection system serves as a basis for machine learning applications. A data-based model is generated to predict the product quality based process parameters. An optimal adjustment for the most important process parameters is deduced from this model. Simulations reveal that utilizing this optimized adjustment yields reduced quality defects and a consistent product quality at the considered trimming shear.

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der mathematischen Modellierung, der Echtzeiterfassung von Qualitätsparametern und der Prozess- und Anlagenoptimierung beim Rollschnitt-Scherprozess von Grobblech. Besäumen oder auch das Längsteilen stellen einen der letzten Prozessschritte im Grobblechwalzwerk dar. Somit ist dieser Prozessschritt ausschlaggebend für die resultierende Produktqualität in Hinblick auf die geometrische Form. Aufgrund des hohen Materialdurchsatzes erfolgt dieser Prozessschritt im Grobblechbereich üblicherweise per Rollschnittscheren. Dieses Verfahren führt häufig zu Qualitätsdefekten, die oftmals eine kostenintensive Nachbearbeitung der Grobbleche erfordern. Daraus resultiert die Notwendigkeit durch gezielte Optimierung den Prozess zu verbessern. Eine notwendige Voraussetzung dafür ist eine umfassende und genaue Messung der Qualitätsparameter, die unter anderem auch ein lückenloses Qualitätsmonitoring ermöglicht.

Der erste Teil dieser Arbeit befasst sich mit dem physikalischen Verständnis des Rollschnitt-Scherprozesses. Als Basis dient ein mathematisches 3D Simulationsmodell, welches die wichtigsten Anlagenteile der Schere berücksichtigt. Dies ermöglicht die Untersuchung der auftretenden Prozesskräfte und deren spezifische Auswirkung auf die Qualitätsdefekte. Die Variation der lateralen Prozesskraft innerhalb eines Schnittes wird als Haupteinflussfaktor für die gängigsten Qualitätsdefekte identifiziert. Auf Basis des Simulationsmodells und spezieller Anlagenmessungen gelingt es ein physikalisch motiviertes Erklärungsmodell zu generieren.

Diese Erkenntnisse ermöglichen eine Optimierung des Anlagendesigns von Rollschnittscheren. In diesem zweiten Teil der Arbeit wird eine modellbasierte Optimierungsmethode vorgestellt, welche die geometrische Form der Schneidmesser so optimiert, dass während des Schnitts nahezu konstante laterale Prozesskräfte auftreten. Experimente und ein Langzeiteinsatz dieser optimierten Messer zeigen die deutlichen Qualitätsverbesserungen an der Anlage.

Im dritten Teil dieser Arbeit wird ein automatisiertes Messsystem zur Beurteilung der Qualität der Schneidekanten von Grobblechen vorgestellt, welches

während der Produktion in Echtzeit fungiert. Dieses neuartige System besteht aus einer CCD Kamera und 2D Laserabstandssensoren. Dies ermöglicht eine vollständige Schätzung von Produktqualitätsparametern *ohne dabei* den Produktionsprozess zu beeinflussen. Die Schätzmethode basiert auf einer Kombination von Methoden der Bildverarbeitung, Sensorfusion und Algorithmen der Signalverarbeitung. Ein Vergleich der Schätzergebnisse mit umfassenden Anlagenmessungen bestätigt die Robustheit und Güte dieser Methode. Das entwickelte Messsystem ist mittlerweile permanent im Walzwerk der *AG der Dillinger Hüttenwerke* in Betrieb. Dies ermöglicht unter anderem auch eine lückenlose Qualitätskontrolle, die Generierung einer Datenbasis für maschinelles Lernen sowie das automatische Auslösen von Alarmfunktionen im Falle von problematischen Qualitätsdefekten.

Der letzte Teil der Arbeit behandelt die optimale und systematische Einstellung der wichtigsten Prozessparameter. Diese Einstellung soll nicht nur die Produktqualität selbst erhöhen, sondern auch zu einer konsistenten und nachvollziehbaren Produktqualität über alle gewalzten Grobbleche hinweg führen. Aus diesem Grund wird mit Hilfe von bekannten Algorithmen des maschinellen Lernens ein datenbasiertes Modell entwickelt, das in Abhängigkeit von Prozessparametern die Produktqualität vorhersagt. Die optimale Einstellung der Prozessparameter erfolgt über Optimierung auf Basis des datenbasierten Modells. In Simulationen wird gezeigt, dass durch die optimale Vorgabe der Prozessparameter im Vergleich zur existierenden manuellen Einstellung eine deutliche Verbesserung der Produktqualität und deren Konsistenz erzielt werden kann.

Contents

List of symbols	xi
1 Introduction	1
1.1 Side trimming of heavy plates	1
1.2 Rolling-cut shearing and description of the considered plant . . .	2
1.3 Problem description and motivation	5
1.4 State of the art	7
1.4.1 Shearing process and related quality defects	7
1.4.2 Design optimization in rolling-cut shearing	9
1.4.3 Quality inspection in metal shearing	10
1.4.4 Data analytics and machine learning applications in metal shearing	12
1.5 Objectives	13
1.6 New contributions by published results	14
1.7 Structure of the thesis	14
2 Modeling and analysis of the rolling-cut process	17
2.1 Kinematic model of the motion of the upper blade	18
2.1.1 Equations of motion	19
2.1.2 Calculation of the shearing angle	20
2.1.3 Measurement setup for the motion of the upper blade . . .	21
2.1.4 Validation of the kinematic model	22
2.2 FEM model of the rolling-cut shearing process	23
2.2.1 Simulation setup and assumptions	23
2.2.2 Constitutive and damage model for the plate material . . .	25
2.2.3 Simulation of the lateral blade motion	26
2.3 Measurement setup for the lateral blade motion	27

2.4	Measurement setup for the longitudinal shape of the trimmed edge	28
2.5	Results and model validation	28
2.5.1	Lateral blade motion	28
2.5.2	Process forces	31
2.6	Analysis of the varying lateral force	33
2.7	Summary	40
3	Mathematical optimization of the blade geometry	43
3.1	Problem formulation	43
3.2	Mathematical formulation	45
3.3	Optimization results	48
3.4	Materials and experimental procedure	49
3.5	Experimental results	51
3.6	Results of long-term field test	52
3.7	Summary	55
4	Measurement and estimation of the product quality	57
4.1	Motivation	58
4.2	Measurement setup	58
4.3	Quality indicators	60
4.4	Laser-sensor-based quality inspection	61
4.4.1	Estimation of the quality indicators characterizing the profile shape of the trimmed edge	61
4.4.2	Optimization-based plate contour estimation	64
4.4.3	Quality indicators characterizing camber and saw-tooth shape	67
4.4.4	Validation and measurement results	67
4.4.5	Validation of the contour and the camber estimation	68
4.4.6	Validation of the edge profile estimation	68
4.5	Vision-based quality inspection	70
4.5.1	Algorithm	71
4.5.2	Image preprocessing	72
4.5.3	Edge surface segmentation and burr detection	72
4.5.4	Segmentation of the burnished area	74
4.5.5	Segmentation of the defective fractured surface	76
4.5.6	Results and segmentation performance	79
4.6	Summary	81
5	Data-based process parameter optimization	83
5.1	Motivation and objectives	83
5.2	Description of the data set	84
5.3	Analysis of the data set	86
5.4	Data-based modeling of the product quality	88

5.4.1	Linear basis function models	88
5.4.2	Neural network models	90
5.4.3	Model validation	91
5.5	Optimization of the blade clearance	93
5.5.1	Analysis of the optimized blade clearance	95
5.5.2	Quality improvements due to the optimized blade clearance	96
5.6	Summary	97
6	Conclusions and Outlook	99
6.1	Conclusions	99
6.2	Outlook on future research activities	100
A	Sauer's formula for the cutting force	103
B	Estimation of the wear state of the cutting blades	105