
Optimization of Encircling Eddy Current Sensors for Online Monitoring of Hot Rolled Round Steel Bars

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Chemnitz

genehmigte
Dissertationsschrift
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

vorgelegt
von Dipl.-Ing. Jens Weidenmüller
geboren am 13.03.1980 in Reichenbach
eingereicht am 15. Januar 2014

Gutachter: Prof. Dr. Olfa Kanoun
Prof. Dr. Jörg Himmel

Tag der Verleihung: 26.03.2014

Reports on Measurements and Sensor Technology

Volume 3

Jens Weidenmüller

**Optimization of Encircling Eddy Current Sensors for
Online Monitoring of Hot Rolled Round Steel Bars**

D 93 (Diss. TU Chemnitz)

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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 978-3-8440-2794-5

ISSN 2197-9006

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

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

Referat

Zur Qualitätssteigerung in der Herstellung von warmgewalzten Rundprodukten werden die Walzanlagen mit dem Ziel einer möglichst dynamischen Prozesssteuerung stetig weiterentwickelt. Unter anderem durch die Implementierung von Einzelantrieben zur separaten Ansteuerung der verschiedenen Walzensequenzen sollen typische Walzfehler reduziert werden. Diese Maßnahmen erfordern zusätzliche Sensoren um die Walzparameter direkt an den einzelnen Umformschritten zu ermitteln. Als besondere Herausforderungen dieser Messaufgabe sind die hohen Temperaturgradienten von bis zu 1200°C, welche beim Ein- und Austritt des glühenden Walzgutes erreicht werden, und die hohen Transportgeschwindigkeiten von bis zu 120 m/s zu nennen.

Wirbelstrombasierte Systeme sind durch ihre Robustheit eines von wenigen Verfahren die für diese Aufgaben in Frage kommen. Der Einsatz von Wirbelstromsensoren in der On-lineüberwachung von glühenden Halbzeugen hat bereits begonnen, jedoch ist die Messunsicherheit der Systeme aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren zu groß. Die Messung der Querschnittsfläche des Walzgutes wird zum Beispiel von der Lage, Geometrie, Temperatur und seiner Materialeigenschaften beeinflusst. Dadurch steigt die Messunsicherheit bei der Verwendung von Wirbelstromsensoren auf bis zu 1% und das Einsatzgebiet wird stark eingeschränkt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zunächst die Einflüsse der verschiedenen Parameter modellbasiert untersucht, um anschließend Methoden zur Separierung der Querschnittsfläche des glühenden Stabes von den verschiedenen Störgrößen zu entwickeln. Mit Hilfe eines analytischen Modells werden die typischen Störgrößen für rotationssymmetrische Stäbe untersucht und ein weiteres FEA Modell deckt asymmetrische Walzfehler ab. Zusätzlich wurde ein Verfahren zur Kantenerkennung der Rundprodukte entwickelt.

Im Feld konnten mit den in dieser Arbeit entwickelten Methoden etwa 466 Tonnen glühender Rundstahl direkt im Produktionsprozess vermessen werden. Mit Hilfe der gewonnenen Messdaten ist eine umfängliche Validierung des Wirbelstromverfahrens in den Anwendungen möglich. Die Zählgenauigkeit der Kantenerkennung betrug bei 2876 vermessenen Stäben 99.93 %. Bei der Querschnittsflächenmessung wurde mit den entwickelten Verfahren eine Reduzierung der Messunsicherheit auf $\pm 0.29\%$ im Mittel erreicht.

Abstract

Modern manufacturing industries are continually working on quality enhancements for the hot rolling process of round products. One method for improving the finalisation of the rods is the implementation of an automatic size control system. As a result of these trends over the last few years, there has been an increasing demand for more accurate online measurements. Thus the reason for the research performed for this thesis. A particular challenge throughout this research was dealing with the temperature changes (up to 1200°C) from the in- and output of the fervent rolling stocks, and the effect this temperature changes had on the sensors. Furthermore, there is also high demand for developing fast and practical electronic measuring equipment, capable of measuring during high transport velocities (up to 120 m/s).

The eddy current principle is just one of the very few methods available which can withstand such harsh industrial environments. In fact, eddy current sensors are already being integrated into online monitoring tasks for hot rolling processes. The measurement uncertainty, however, is still considerably large for process control purposes. One reason for this lies within the ability for eddy current detectors to receive signals influenced by outward forces, i.e. forces dependent on its location, its geometry, the outside temperature and the material properties of a particular target. Thus the current accuracy for a cross-sectional area measurement, for example, is no higher than 1%. As a result, this thesis investigates the magnitude of all individual influential factors on the eddy current detectors, using model-based analysis techniques. The analytical model provides a solution for all rotationally symmetrical targets and the FEA model covers all of the other influencing parameters in a more time consuming manner. This thesis then provides different methods which are developed to separate the cross-sectional area measurement of a rod from all of the other influencing parameters. In addition, a material tracking approach for round products is developed.

Two different kinds of prototypes, capable of measuring approximately 466 Tons of red-hot steel rods during the production process, are finally introduced in this thesis. The usefulness of the eddy current principle is validated by the provided field test results. The count accuracy for the identification of 2876 bars was found to be 99.93%, and the average measurement accuracy for the cross-sectional area experiments was reduced to $\pm 0.29\%$ when including all of the findings.

Contents

Abbreviations and Symbols	9
1 Introduction	13
1.1 Motivation	13
1.2 Rod and Steel Bar Hot Rolling	15
1.2.1 Production Process	15
1.2.2 In-Line Process Control	17
1.2.3 Typical Wire and Rod Defects	18
1.3 State of the Art in Hot Testing	24
1.3.1 Material Tracking	24
1.3.2 Speed Measurements	24
1.3.3 Cross-Sectional Measurements	25
1.3.4 Dimensional Control	25
1.3.5 Crack Inspection	26
1.4 Approach and Structure of the Thesis	27
2 Theoretical Background	31
2.1 Eddy Currents	31
2.2 Penetration Depth	31
2.3 Maxwell Equations	32
2.3.1 Matter in Magnetic Fields	32
2.3.2 Permeability in Alternating Magnetic Fields	33
2.3.3 Eddy Current Approximation	34
2.4 Electromagnetic Properties of Carbon Steel	35
2.5 Magnetic Vector Potential	36
2.6 Inductance	37
2.6.1 Self-Inductance	37
2.6.2 Mutual Inductance	39
2.7 Ideal Coil Approximation	40
2.8 Cylindrical Inductors	41
2.9 Coil-Workpiece Model	43
3 Eddy Current Modelling	47
3.1 Analytical Modelling	47
3.1.1 Coil Impedance in Free Space	49
3.1.2 Encircling Offset Coil Around an Infinite Rod	50
3.2 FEA Modelling - An Offset Coil and Imperfect Rod	52
3.2.1 Modelling	53
3.2.2 Meshing	54

3.2.3	Physics and Boundary Condition	56
3.3	Conversion - Impedance Into Cross-Sectional Area	58
4	Theoretical Investigation of Influencing Parameters	61
4.1	Benchmark of the Eddy Current Models	62
4.1.1	Isolated Coil Impedance (Z_0) Validation	62
4.1.2	ΔZ Validation	63
4.2	Conversion Error in Cross-Sectional Area Data	65
4.3	Investigation of Typical Rod Imperfections	68
4.4	Investigation of Lateral Rod Movements	71
4.4.1	Validation of the Rod Position Effect	71
4.4.2	Inhomogeneous Field Correction Approach	73
4.4.3	Inhomogeneous Field Correction - Laboratory Test	77
4.5	Investigating the Influence of the Guidance Parts	78
4.6	Investigation of the Temperature Influence	80
4.6.1	Z_0 Compensation Approach I	81
4.6.2	Z_0 Compensation Approach II	83
4.6.3	Comparison of Both Compensation Methods	87
5	Measurement Systems for Eddy Current Transducer	89
5.1	Resonant Frequency Method	89
5.1.1	Case I - Step Response for 0 V to Vcc	90
5.1.2	Case II - Step Response for Vcc to 0 V	93
5.1.3	Chronological Sequence in Operation	94
5.1.4	Adaptations for Hot Testing	95
5.2	Impedance Measurement Method	95
5.2.1	Signal Source	96
5.2.2	Reflection Bridge	97
5.2.3	Detector	99
5.2.4	Adaptations for Hot Testing	100
5.3	Performance Characteristics	101
5.3.1	Performance of the Resonant Frequency System	102
5.3.2	Performance of the Impedance Measurement System	103
6	Experimental Setups	105
6.1	Laboratory Tests	105
6.1.1	Setup I - Dynamic Tests	105
6.1.2	Setup II - Static Tests	108
6.1.3	Sensor Cooling for Rod Temperatures Around 1000°C	109
6.2	Prototypes for Field Tests	113
6.2.1	Material Tracking Prototype	114
6.2.2	Cross-Sectional Area Prototype	115
7	Field Test Results	117
7.1	Material Tracking in a Rod Mill	117
7.2	Cross-Sectional Measurements in a Wire Mill	119
7.3	Comparison with the Current In-use Sensors	124
8	Conclusion and Prospects	129

8.1	Summary and Conclusion	129
8.2	Further Applications in Online Monitoring	131
8.3	Outlook	133
A	Appendix	135
A.1	Transposing the Vector Potential into Elliptic Integrals	135
A.2	Magnetic Field of a Cylindrical Coil	137
A.3	Source Code for the Impedance of an Isolated Coil	137
A.4	Source Code: The Impedance Change of an Encircling Offset Coil	138
A.5	Characteristics of the FEA Model	139
A.6	Electronics for Eddy Current Transducers	140
A.7	Experimental Results from Setup I: Dynamic Tests	141
A.8	Temperature Tests	141
A.9	Photographs from the Field Tests	143
A.10	Results and Discussion	144
	A.10.1 Validation of the Eddy Current Models	144
A.11	Investigation of Typical Rod Imperfections	145
A.12	Compensation of Rod Position	146
A.13	Material Tracking in a Bar Mill	147
A.14	Cross-Sectional Measurements in a Wire Mill	148
	Bibliography	149