

Reihe 8

Mess-,
Steuerungs- und
Regelungstechnik

Nr. 1259

Dipl.-Ing. Matthias Andersson,
Erlangen

Temperaturgestützte Regelung der Eisenschwammförderung in den Lichtbogenofen



Professur für Automatisierungstechnik

*Professur für Prozessdatenverarbeitung
und Systemanalyse*

Institut für Automatisierungstechnik der
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg

Temperaturgestützte Regelung der Eisenschwammförderung in den Lichtbogenöfen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION
vorgelegt von

Dipl.-Ing. Matthias Andersson

aus Erlangen

Hamburg 2017

Tag der mündlichen Prüfung: 10.04.2017

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Krüger
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Fakultät für Maschinenbau
Professur für Prozessdatenverarbeitung und Systemanalyse

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Pfeifer,
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Fakultät für Maschinenwesen
Fachgruppe für Materialwissenschaft und Werkstofftechnik
Lehrstuhl für Hochtemperaturtechnik und Institut für Industrieofenbau
und Wärmetechnik

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 8

Mess-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Dipl.-Ing. Matthias Andersson,
Erlangen

Nr. 1259

Temperaturgestützte Regelung der Eisenschwammförderung in den Lichtbogenofen



Professur für Automatisierungstechnik

*Professur für Prozessdatenverarbeitung
und Systemanalyse*

Institut für Automatisierungstechnik der
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg

Andersson, Matthias

Temperaturgestützte Regelung der Eisenschwammförderung in den Lichtbogenofen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 08 Nr. 1259. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

148 Seiten, 71 Bilder, 22 Tabellen.

ISBN 978-3-18-525908-1, ISSN 0178-9546,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

Für die Dokumentation: Stahlherstellung – direktreduziertes Eisen – Eisenschwamm – Lichtbogenofen – Energieeffizienz – Akustik – Temperaturmodell – temperaturgestützte Regelung – Eisenschwammförderung – Prozessoptimierung

Diese Arbeit stellt eine innovative Regelung der kontinuierlichen Eisenschwammförderung in den Lichtbogenofen der ArcelorMittal Hamburg GmbH vor. Diese Regelung ermöglicht eine Prozessoptimierung durch das gezielte Einstellen der Stahlbadtemperatur. Insbesondere während der Flachbadphase stellt die Temperatur als essentielle Größe gute Prozessbedingungen sicher. Zugleich bewirkt die Regelstrategie beim anschließenden Warmfahren, dass die Zielgrößen des Abstichs mit hoher Genauigkeit erreicht werden. Grundlage hierfür bilden ein Modell zur kontinuierlichen Prognose der Stahlbadtemperatur sowie ein Modell zur Optimierung der Chargezeitpunkte der zweiten Schrottkörbe und des Beginns der Eisenschwammförderung. Die temperaturgestützte Regelung der kontinuierlichen Eisenschwammförderung steigert die Energieeffizienz sowie die Produktivität des Herstellungsprozesses im Lichtbogenofen.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

Dissertation

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9546

ISBN 978-3-18-525908-1

Geleitwort

Die Automatisierungstechnik ist ein komplexes und vielfältiges wissenschaftliches Gebiet. Am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg wird zum einen die Entwicklung neuer automatisierungstechnischer Methoden vorangetrieben, zum anderen wird die Automatisierung komplexer Produktionsprozesse bearbeitet. Die reale Umsetzung im Rahmen technischer Prozesse, insbesondere industrieller Produktionsprozesse, ist das Ziel des ingenieurwissenschaftlichen Wirkens und zugleich Gradmesser für seinen Erfolg.

Der Elektro-Lichtbogenofen ist seit vielen Jahren Gegenstand der wissenschaftlichen Arbeit an der Professur für Prozessdatenverarbeitung und Systemanalyse. Mit Hilfe mathematischer Modellbildung gelingt es Schritt für Schritt, den Zustand des Schmelzprozesses in Echtzeit quantitativ zu erfassen. Darauf aufbauend wird die umfassende Automatisierung/Regelung des Prozesses vorangetrieben.

Herr Dr. Andersson hat sich in seiner Dissertation mit der Regelung der Fördermenge von direktreduziertem Eisen in den Lichtbogenofen auseinandergesetzt. Novum ist das Regelziel, die energetisch optimale Schmelzbadtemperatur einzuhalten. Folglich hatte er zunächst einen Zustandsschätzer für die nicht kontinuierlich messbare Badtemperatur zu entwickeln. Sowohl der sehr präzise Zustandsschätzer als auch die Regelung haben sich erfolgreich im Industrieinsatz bewiesen. Die Arbeit stellt damit einen weiteren Schritt zur Steigerung der Energieeffizienz des Lichtbogenofens dar.

Die Herausgeber danken dem VDI-Verlag für die Möglichkeit einer breiten Veröffentlichung dieser Ergebnisse.

Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger

Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger gilt mein besonderer Dank für seine permanente Unterstützung sowie zur Anregung der Thematik dieser Arbeit. Mit seinem besonderen Interesse an und seiner umfassenden Fachkenntnis in den Bereichen der Stahlindustrie, der Energietechnik sowie der Regelungstechnik trug er in vielen Diskussionen wesentlich zum Erfolg des Forschungsprojektes bei.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Herbert Pfeifer danke ich für das erwiesene Interesse an dieser Arbeit und die freundliche Übernahme des Korreferats.

Beim Leiter des Stahlwerkes der ArcelorMittal Hamburg GmbH Herrn Dipl.-Ing. Ansgar Jüchter sowie dem ehemaligen Leiter Herrn Dr.-Ing. Uwe Braun bedanke ich mich für die erfolgreiche Zusammenarbeit sowie das entgegengebrachte Vertrauen die wissenschaftlichen Kenntnisse im Betrieb zu erproben. Weiterhin danke ich Herrn Dr.-Ing. Sebastian Gellert sowie allen weiteren Mitarbeitern, die mich durch Ihre Zusammenarbeit und Ihre Ideen unterstützt haben.

Meinen Kollegen am Institut für Automatisierungstechnik danke ich für die fachlichen Impulse und Diskussionen. Ausdrücklich möchte ich Danny Lehmann, Andreas Fischer, Andreas Rathjen und Vico Haverkamp für das Lektorat meiner Arbeit danken.

Es sei auch den Studentinnen und Studenten, die ich im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten und meiner Lehrtätigkeit an der Universität betreut habe, besonders Thorsten Naderhoff, gedankt. Darüber hinaus danke ich der Eishockey AG in welcher ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter stets den Ausgleich zur geistigen Tätigkeit fand.

Zum Schluss möchte ich ganz besonders meinen Eltern, meiner gesamten Familie, meiner Lebensgefährtin Christina Figur sowie meinen Freundinnen Christina Perez und Diana Schneider herzlich für deren Unterstützung danken.

Matthias Andersson

*Möge der geneigte Zuschauer meine Leistung
mit derselben Liebe zur Sache aufnehmen,
aus der sie hervorgegangen ist!*

*Georg Simon Ohm, 1827
- die galvanische Kette -*

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Direktreduziertes Eisen in der Stahlerzeugung	5
2.1 Herstellung von direktreduziertem Eisen	7
2.2 Stahlherstellung mit direktreduziertem Eisen im Lichtbogenofen	15
2.2.1 Prozessphasen der Erzeugung von Rohstahl im Lichtbogenofen	16
2.2.2 Vor- und Nachteile des Einsatzes von Eisenschwamm.....	18
2.2.3 Stand der Technik - Leistungsbezogene DRI-Förderung	20
2.3 Herausforderungen beim Schmelzen von Eisenschwamm	22
2.3.1 Überhitzung der Schmelze als Folge einer zu geringen DRI-Rate	23
2.3.2 Prozessbedingungen bei Einhüllung der Lichtbögen durch Schlacke ...	23
2.3.3 Folgen einer zu hohen DRI-Rate (Eisberg)	23
3 Temperatur des Stahlbades	25
3.1 Bestimmung der Stahlbadtemperatur	25
3.1.1 Temperaturmessung mit Tauchsonden.....	25
3.1.2 Bisherige Modelle zur Prognose der Stahlbadtemperatur	28
3.2 Neues Temperaturmodell zur Prognose der Stahlbadtemperatur	30
3.2.1 Statistischer Ansatz.....	30
3.2.2 Bestimmung der Modellparameter	37
3.2.3 Adaption der Parameter	45
3.2.4 Wissensbasierte Korrektur der ersten Temperaturmessung	48
3.2.5 Strategie zur Anpassung an weitere Temperaturmessungen.....	51
3.2.6 Betriebsergebnisse	54
4 Charakterisierung des Prozesszustandes bei Eisenschwammförderung	56
4.1 Bewertung des Prozesses anhand der elektrischen Größen	56
4.1.1 Grundlagen des elektrischen Verhaltens von Lichtbögen	56
4.1.2 Harmonische Anteile der elektrischen Größen des Lichtbogens.....	58
4.1.3 Elektrische Kenngrößen zur Charakterisierung des Schmelzprozesses	61
4.2 Akustik des Lichtbogenofens	65
4.2.1 Grundlagen der Akustik.....	65
4.2.2 Schalldruck des Drehstrom-Lichtbogenofens.....	78
4.2.3 Modell zur Prognose des emittierten Gesamtschalldrucks.....	83
4.3 Ergebnisse	89

5	Regelung der Eisenschwammförderung	98
5.1	Zielsetzung	98
5.2	Eigenschaften des Systems zur Eisenschwammförderung	98
5.3	Modell zur Optimierung des Startzeitpunktes der Eisenschwammförderung	99
5.3.1	Ansatz	101
5.3.2	Optimierung und Potentialabschätzung	104
5.3.3	Betriebsergebnisse	106
5.4	Temperaturbasierte Regelung der Eisenschwammförderung	111
5.4.1	Regelung in der Hauptphase der Eisenschwammförderung	111
5.4.2	Regelung der Eisenschwammförderung beim Warmfahren	115
5.4.3	Betriebsergebnisse	117
6	Zusammenfassung und Ausblick	121
7	Anhang	125
8	Literaturverzeichnis	126

Abkürzungsverzeichnis

DRI	engl.: Direct Reduced Iron dt.: direkt reduziertes Eisen; auch als Eisenschwamm bezeichnet
EK	1-Korb-Chargen
HYL	Nach dem Unternehmen Hojalata y Lamina S.A. bzw. Hylsa (Mexiko) benanntes Direktreduktionsverfahren für Eisenerz
m ³ (i.N.)	Kubikmeter in Normzustand
MIDREX	Nach dem Unternehmen Midland Ross Co. (Pennsylvania, USA) benanntes Direktreduktionsverfahren für Eisenerz
SNR	engl.: Signal-to-Noise Ratio dt. Signal-Rausch-Verhältnis bzw. Signal-Rausch-Abstand
SVM	engl.: Support Vector Machine
THD	engl.: Total Harmonic Distortion dt.: gesamte harmonische Verzerrung
ZK	2-Korb-Chargen

Symbolverzeichnis

A	Parameter des Temperaturmodells
A_{ak}	Schallquelle vollständig umschließende Fläche
A_H	Absorbierende Oberfläche der Wände eines Raumes
B	Parameter des Temperaturmodells
b	Radius des Ofengefäßes
$B_{Schlacke}$	Basizität der Schlacke
C	Parameter des Temperaturmodells
c	Schallgeschwindigkeit
c_{DRI}	Spezifische Energie zum Schmelzen von Eisenschwamm
c_P	Spezifische Wärmekapazität
d_e	Elektrodendurchmesser
e_{DYN}	Dynamischer Anteil der spez. elektr. Energie des Chargierzeitpunktes
E_{el}	Elektrische Energie
e_{el}	Spezifische elektrische Energie
e_{max}	Maximale Überschwingweite
E_{O_2}	Durch Sauerstoff in Schmelze übertragene Leistung
e_{RW}	Statischer Anteil der spez. elektr. Energie des Chargierzeitpunktes
e_{SW}	Schwellwert der spez. elektr. Energie des Chargierzeitpunktes
$e_{\Delta T}$	Regeldifferenz
f	Schwingungsfrequenz der Schallquelle
f_{abs}	Absoluter Fehler
f_{sno}	Eigenfrequenzen des zylindrischen Raumes
g_A	Prozentualer Anteil an der durch das Temperaturmodell prognostizierten Temperaturveränderung durch den Parameter A
g_B	Prozentualer Anteil an der durch das Temperaturmodell prognostizierten Temperaturveränderung durch den Parameter B
g_T	Gewichtungsfaktor zur Übernahme von Temperaturmesswerten
h	Höhe des Ofengefäßes
I_{ak}	Schallintensität
I_{arc}	Lichtbogenstrom
J	Zylindrische Besselfunktion
k	Kreiswellenzahl
K_{DRI}	Verstärkungsfaktor der PT ₁ -Filterung der Eisenschwamm-Förderrate
$K_{1,unsym}$	Symmetriemaß der Lichtbogenströme
$K_{13,9}$	Kenngröße aus dem Teilklirrfaktor der Nullkomponente des Stromes

$K_{15,7}$	Kenngröße aus dem Teilklirrfaktor der Mit- und Gegenkomponenten des Lichtbogenstromes
K_{low}	Unterer Grenzwert der Stromkenngröße $K_{13,9}$
k_{no}	Nullstellen der Ableitung der Bessel-Funktion
K_{Null}	Teilklirrfaktor der Nullkomponente des Lichtbogenstromes
K_P	Verstärkungsfaktor der PT_1 -Filterung der elektrischen Wirkleistung
K_p	Verstärkungsfaktor des Schalldruckmodells
K_{up}	Oberer Grenzwert der Stromkenngröße $K_{13,9}$
K_{VD}	Verstärkungsfaktor der DT_1 -Filterung der Wärmeverluste (Deckel)
K_{VW}	Verstärkungsfaktor der DT_1 -Filterung der Wärmeverluste (Wand)
L_{arc}	Länge des Lichtbogens
L_{Diff}	Schalldämpfung des Ofengefäßes bzw. Pegel der Schalldruckdifferenz zwischen Modellschalldruck und gemessenem Schalldruck
L_{Mod}	Modellierter Schalldruckpegel
L_P	Schalldruckpegel
m	Masse
M	Metallisierungsgrad
$m_{Abstich}$	Abstichgewicht
$m_{Al_2O_3}$	Masse an Aluminiumoxid
m_{CaO}	Masse an Calciumoxid
m_{DR1}	Masse an Eisenschwamm
$m_{DR1, Soll}$	Soll-Vorgabe der Masse an Eisenschwamm
$m_{Fe^{++}}$	Masse an Eisen(II)
$m_{Fe_{ges}}$	Masse an Eisen
$m_{Fe_{met}}$	Masse an metallischem Eisen
m_{MgO}	Masse an Magnesiumoxid
$m_{O_2, Erz}$	Masse an ursprünglich im Eisenerz vorhandenem Sauerstoff
$m_{O_2, reduziert}$	Masse an (aus Eisenerz) reduziertem Sauerstoff
$m_{Schrott}$	Masse an Stahlschrott
m_{SiO_2}	Masse an Siliziumdioxid
$m_{Warmfahren}$	Einsatzgewicht beim Beginn des Warmfahrens
n	n -te Ableitung der zylindrischen Bessel-Funktion
o	o -te Nullstelle der Ableitung der zylindrischen Bessel-Funktion
p	Schalldruck
p_0	Schalldruck an der Hörschwelle des menschlichen Gehörs für Schallereignisse mit einer Frequenz von 1 kHz
P_{ak}	Akustische Leistung
$P_{ak,K}$	Akustische Leistung einer pulsierenden Kugel
$P_{ak,S}$	Akustische Leistung einer schwingenden Saite

Symbolverzeichnis

$P_{ak,Z}$	Akustische Leistung eines in radialer Richtung pulsierenden Zylinders
P_{DRI}	Zugeführte Leistung zum Schmelzen von Eisenschwamm
P_{el}	Zugeführte elektrische Leistung
p_j	Modellierter Schalldruck eines Lichtbogens der Phase/Elektrode j
p_{low}	Unterer Grenzwert des Schalldrucks
P_{LSeite}	Zugeführte Leistung über Seitenlanze
$P_{LTür}$	Zugeführte Leistung über Türlanze
p_{Mod}	Modellschalldruck
p_{Mod2}	Modellschalldruck (Optimierung: mittlere quadratische Abweichung)
p_{up}	Oberer Grenzwert des Schalldrucks
$P_{VDeckel}$	Wärmeverluste über Deckelelemente
P_{VDiv}	Diverse Leistungsverluste
P_{VWand}	Wärmeverluste über Wandelemente
P_{Wand}	Zugeführte Leistung über Wandbrenner
P_{WV}	Wärmeverlustleistung über Wand und Deckel
Q_{ch}	Zugeführte thermische Energie durch chemische Energie
Q_{DRI}	Thermische Energie zum Schmelzen von Eisenschwamm
Q_{el}	Thermische Energie durch zugeführte elektrische Energie
q_p	Exponent der Lichtbogenanspannung
$Q_{Schmelze}$	Thermische Energie der Schmelze
Q_{WV}	Thermische Energie der Wärmeverluste
Q_{zu}	Der Schmelze zugeführte thermische Energie
r	Abstand zwischen Mikrofon und Schallquelle
R^2	Bestimmtheitsmaß
r_{arc}	Radius des Lichtbogens
R_{DRI}	Reduktionsgrad von Eisenschwamm
r_H	Hallradius
r_{heat}	Aufheizrate der Schmelze
R_S	Spezifische Gaskonstante
r_{soll}	Sollwert der Aufheizrate der Schmelze
s	Nullstelle in Ausbreitungsrichtung der Höhe des Zylinders
T	Temperatur
$t_{10\%}$	Ausregelzeit
T_{60}	Nachhallzeit
$T_{Abstich}$	Abstichtemperatur
T_{air}	Temperatur der Ofenatmosphäre
T_{an}	Ansteigszeit
T_{DRI}	Zeitkonstante der PT ₁ -Filterung der Eisenschwamm-Förderrate
$T_{13,9}$	Zeitkonstante der PT ₁ -Filterung der Nullkomponente des Stromes
X	

$T_{15,7}$	Zeitkonstante der PT ₁ -Filterung der Mit- und Gegenkomponenten des Lichtbogenstromes
T_{Messung}	Gemessene Temperatur
T_{Modell}	Durch Temperaturmodell prognostizierte Temperatur
T_P	Zeitkonstante der PT ₁ -Filterung der elektrischen Wirkleistung
T_{VD}	Zeitkonstante der DT ₁ -Filterung der Wärmeverluste (Deckelelemente)
T_{VW}	Zeitkonstante der DT ₁ -Filterung der Wärmeverluste (Wandelemente)
$t_{\text{Warmfahren}}$	Dauer des Warmfahrens
T_{xe}	Bei Temperaturmessung zu erwartender Temperaturmesswert
U_{arc}	Lichtbogenspannung
v	Schallschnelle
v_{eff}	Geschwindigkeit der Oberflächenschwingung in radialer Richtung
V_H	Raumvolumen
V_{O_2}	Sauerstoffvolumen
w_{CO}	Spezifische Reaktionsenthalpie der Reaktion von Kohlenstoff und Sauerstoff zu Kohlenmonoxid
w_{CO_2}	Spezifische Reaktionsenthalpie der Reaktion von Kohlenstoff und Sauerstoff zu Kohlendioxid
$w\%$	Gewichtsprozent
w_V	An Parameter A des Temperaturmodells gekoppelter Wirkungsgrad zur Umsetzung von chemischer in Thermische Energie
X_{Korr}	Korrekturfaktor der leistungsbezogenen Eisenschwamm-Förderrate
x_L	Faktor zur Beschreibung der Seitwärtsbewegung des Lichtbogens
x_s	Prozentualer Anteil an Schrott je Einsatz einer Charge
z_p	Exponent des Lichtbogenstromes
ΔH_{CO}	Sauerstoffvolumenspezifische Reaktionsenthalpie
$\Delta T_A, \Delta T_B, \Delta T_C$	Durch Temperaturmodell prognostizierte Temperaturänderung hervorgerufen durch Parameter A, B oder C
ΔT_K	Wissensbasierter Korrekturfaktor der ersten Temperaturmessung
α	Mittlerer akustischer Absorptionsgrad
α_l	Kopplungsfaktor von Lichtbogenstrom und Fläche des Lichtbogens
α_{U0}	Kopplungsfaktor von Lichtbogenspannung und -länge
α_{U1}	Kopplungsfaktor von Lichtbogenspannung und -länge
η_{el}	Wirkungsgrad zur Umsetzung von elektrischer in thermische Energie
η_{O_2}	Wirkungsgrad zur Umsetzung von chemischer in thermische Energie
λ	Parameter bei der Korrektur des ersten Temperaturmesswertes
ρ	Schalldichte
ρ_{air}	Dichte der Ofenatmosphäre
ρ_{O_2}	Dichte von Sauerstoff

Symbolverzeichnis

σ	Phasenwinkel
φ	Phasenwinkel
ψ	Phasenwinkel