

## 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 Lichtbogenofen**

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](http://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](http://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 unterstütz 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**

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Direktreduziertes Eisen in der Stahlerzeugung</b>	<b>5</b>
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
<b>3 Temperatur des Stahlbades</b>	<b>25</b>
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
<b>4 Charakterisierung des Prozesszustandes bei Eisenschwammförderung</b>	<b>56</b>
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

<b>5</b>	<b>Regelung der Eisenschwammförderung</b>	<b>98</b>
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
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>121</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>125</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>126</b>

**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 <sup>3</sup> (i.N.)	Kubikmeter in Normzustand
MIDREX	Nach dem Unternehmen Midland Ross Co. (Pennsylvania, USA) be- nanntes 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 <sub>1</sub> -Filterung der Eisenschwamm-Förderrate
$K_{l,unsym}$	Symmetriemaß der Lichtbogenströme
$K_{i3,9}$	Kenngröße aus dem Teilkirrfaktor 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 <sub>1</sub> -Filterung der elektrischen Wirkleistung
$K_p$	Verstärkungsfaktor des Schalldruckmodells
$K_{up}$	Oberer Grenzwert der Stromkenngröße $K_{13,9}$
$K_{VD}$	Verstärkungsfaktor der DT <sub>1</sub> -Filterung der Wärmeverluste (Deckel)
$K_{VW}$	Verstärkungsfaktor der DT <sub>1</sub> -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
$m_{DRI}$	Masse an Eisenschwamm
$m_{DRI, Soll}$	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

$P_{ak,Z}$	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 Mikrophon 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 <sub>1</sub> -Filterung der Eisenschwamm-Förderrate
$T_{13,9}$	Zeitkonstante der PT <sub>1</sub> -Filterung der Nullkomponente des Stromes

$T_{I5,7}$	Zeitkonstante der PT <sub>1</sub> -Filterung der Mit- und Gegenkomponenten des Lichtbogenstromes
$T_{\text{Messung}}$	Gemessene Temperatur
$T_{\text{Modell}}$	Durch Temperaturmodell prognostizierte Temperatur
$T_P$	Zeitkonstante der PT <sub>1</sub> -Filterung der elektrischen Wirkleistung
$T_{VD}$	Zeitkonstante der DT <sub>1</sub> -Filterung der Wärmeverluste (Deckelelemente)
$T_{VW}$	Zeitkonstante der DT <sub>1</sub> -Filterung der Wärmeverluste (Wandelemente)
$t_{\text{Warmfahren}}$	Dauer des Warmfahrens
$T_{xe}$	Bei Temperaturmessung zu erwartender Temperaturmesswert
$U_{\text{arc}}$	Lichtbogenspannung
$v$	Schallschnelle
$v_{\text{eff}}$	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
$wt\%$	Gewichtsprozent
$w_V$	An Parameter A des Temperaturmodells gekoppelter Wirkungsgrad zur Umsetzung von chemischer in Thermische Energie
$X_{\text{Korr}}$	Korrekturfaktor der leistungsbezogenen Eischwamm-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
$\Delta H_{CO}$	Sauerstoffvolumenspezifische Reaktionsenthalpie
$\Delta T_A, \Delta T_B, \Delta T_C$	Durch Temperaturmodell prognostizierte Temperaturänderung hervorgerufen durch Parameter A, B oder C
$\Delta T_K$	Wissensbasierter Korrekturfaktor der ersten Temperaturmessung
$\alpha$	Mittlerer akustischer Absorptionsgrad
$\alpha_l$	Kopplungsfaktor von Lichtbogenstrom und Fläche des Lichtbogens
$\alpha_{U0}$	Kopplungsfaktor von Lichtbogenspannung und -länge
$\alpha_{U1}$	Kopplungsfaktor von Lichtbogenspannung und -länge
$\eta_{el}$	Wirkungsgrad zur Umsetzung von elektrischer in thermische Energie
$\eta_{O_2}$	Wirkungsgrad zur Umsetzung von chemischer in thermische Energie
$\lambda$	Parameter bei der Korrektur des ersten Temperaturmesswertes
$\rho$	Schalldichte
$\rho_{\text{air}}$	Dichte der Ofenatmosphäre
$\rho_{O_2}$	Dichte von Sauerstoff

$\sigma$	Phasenwinkel
$\varphi$	Phasenwinkel
$\psi$	Phasenwinkel