

# Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 20

Rechnerunter-  
stützte Verfahren

Nr. 466

Dipl.-Ing. Björn Dittmer,  
Nürnberg

## Zustandsbasierte Leistungsregelung von Drehstrom- Lichtbogenöfen



Professur für Automatisierungstechnik  
Professur für Prozessdatenverarbeitung  
und Systemanalyse  
Institut für Automatisierungstechnik der  
Helmut-Schmidt-Universität /  
Universität der Bundeswehr Hamburg



# **Zustandsbasierte Leistungsregelung von Drehstrom-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. Björn Dittmer**

aus Winsen (Luhe)

Hamburg 2017

Tag der mündlichen Prüfung: 23. März 2016

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

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Fakultät für Maschinenbau  
Professur für Automatisierungstechnik

# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 20

Rechnerunterstützte  
Verfahren

Dipl.-Ing. Björn Dittmer,  
Nürnberg

Nr. 466

Zustandsbasierte  
Leistungsregelung  
von Drehstrom-  
Lichtbogenöfen

  
*Professur für Automatisierungstechnik*  
*Professur für Prozessdatenverarbeitung*  
*und Systemanalyse*  
Institut für Automatisierungstechnik der  
Helmut-Schmidt-Universität/  
Universität der Bundeswehr Hamburg

Dittmer, Björn

## **Zustandsbasierte Leistungsregelung von Drehstrom-Lichtbogenöfen**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 466. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

130 Seiten, 68 Bilder, 7 Tabellen.

ISBN 978-3-18-346620-7, ISSN 0178-9473,

€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

**Für die Dokumentation:** Drehstrom-Lichtbogenöfen – Lichtbogen – Leistungsregelung – Zustandsbestimmung – Körperschall – Oberwellen – Modellbildung – Strahlungsleistung – Chargiersignal

Die vorliegende Arbeit befasst sich zum einen mit der Zustandsbestimmung des Schmelzprozesses im Drehstrom-Lichtbogenofen und zum anderen mit der darauf aufbauenden Regelung der elektrischen Leistung. Dazu werden bereits bekannte Methoden wie beispielsweise die Spektralanalyse der Ströme erweitert und um eine Auswertung der Körperschallemissionen ergänzt. Die so erhaltenen Information über den Schmelzprozess wird anhand weniger Zustandsvariablen quantifiziert und u.a. auch für ein automatisches Chargiersignal genutzt. Darauf aufbauend wird die beste Arbeitspunkt-kombination der drei Lichtbögen durch die Leistungsregelung bestimmt. Dazu wird ein neues Modell zur Strahlungsleistung eines Lichtbogens eingeführt und mit bereits vorhandenen Modellen verglichen. Die positiven Ergebnisse des Betriebs der Regelung an Lichtbogenöfen zur Erschmelzung von rostfreiem Edelstahl und von Baustahl zeigen die Wirksamkeit der Zustandsbasierten Leistungsregelung.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.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  
<http://dnb.ddb.de>.

Dissertation

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

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 0178-9473

ISBN 978-3-18-346620-7

---

## **Geleitwort der Herausgeber**

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 der Professur für Prozessdatenverarbeitung und Systemanalyse am Institut. Insbesondere mit Hilfe mathematischer Modellbildung konnte dabei das Verständnis der Abläufe beim Schmelzprozess formal beschrieben werden und damit die Basis für eine verbesserte Regelung gelegt werden.

Herr Dr. Dittmer hat in seiner Dissertation für mehrere für die Prozessführung des Ofens relevante Zustandsgrößen geeignete Zustandsschätzer entwickelt und darauf aufbauend systematisch eine verbesserte, zustandsbasierte Regelung für den Ofen erarbeitet, welche im industriellen Einsatz im Vergleich zur vorherigen Betriebsweise vorteilhafte Ergebnisse zeigte.

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**

Die Inhalte der vorliegenden Arbeit entstanden während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg. Die letztendliche Fertigstellung der Arbeit erfolgte erst nach dieser Zeit.

Mein besonderer Dank gilt an erster Stelle Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger für das ermöglichen meiner Promotion. Ohne seine fachliche Anleitung und tiefgreifende Expertise über den Lichtbogenofen hätte es die vorliegende Arbeit nicht gegeben. Während der vielen Fachgespräche habe ich ihn dabei auch persönlich stets sehr geschätzt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats. Zudem bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Meywerk für den Vorsitz des Prüfungsausschusses.

Der Firma Siemens AG danke ich für die Finanzierung meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Insbesondere gilt dabei mein Dank den Betreuern meiner Tätigkeit Herrn Dr.-Ing. Thomas Matschullat, Herrn Dr. rer. nat. Detlef Rieger und Herrn Arno Döbbeler für die Unterstützung bei der praxisnahen Umsetzung.

Für die Erlaubnis zur Erprobung der Leistungsregelung danke ich der ehemaligen Firma ThyssenKrupp Nirosta GmbH in Bochum. Für die erfahrene Unterstützung der gesamter Belegschaft, vor allem von Herrn Jürgen Höhl und Herrn Dr.-Ing. Helge Mees bedanke ich mich sehr.

Mein Dank gilt zudem Herrn Dr.-Ing. Tobias Jansen und Herrn Dr.-Ing. Vico Haverkamp für die erste Korrektur meiner Arbeit. Neben diesen beiden langjährigen Kollegen an der Professur danke ich auch den weiteren wissenschaftlichen Mitarbeitern die meinen Weg ein Stück weit begleitet haben für die gute Zeit.

Von ganzem Herzen möchte ich darüber hinaus meinen Eltern Inge Dittmer und Klaus Dittmer danken, die mich stets liebevoll unterstützt haben. Ohne euch wäre all dies nicht möglich gewesen.

Zu guter Letzt möchte ich meiner geliebten Ehefrau Danijela Stefanović-Dittmer für ihre Liebe, ihren Zuspruch und für ihre Geduld danken.

Nürnberg, im November 2016

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Der Lichtbogenofen .....	2
1.2 Herausforderungen .....	4
1.3 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit.....	5
<b>2 Technik des Drehstrom-Lichtbogenofens .....</b>	<b>7</b>
2.1 Stand der Technik Drehstrom-Lichtbogenofen.....	7
2.2 Elektrische Ersatzschaltbilder.....	11
2.3 Regelungstechnische Systemanalyse.....	17
2.4 Leistungsumsetzung im Wechselstrom-Lichtbogen .....	23
2.5 Verifikation und Modellgenauigkeit.....	27
<b>3 Zustandsbeobachtung am Drehstrom-Lichtbogenofen .....</b>	<b>37</b>
3.1 Fuzzy-basierte Auswertung des thermischen Zustands.....	37
3.2 Elektrische Signale im Prozessverlauf .....	43
3.3 Körperschallmessungen.....	65
<b>4 Zustandsbasierte Leistungsregelung .....</b>	<b>88</b>
4.1 Struktur der zustandsbasierten Leistungsregelung .....	88
4.2 Regelung der elektrischen Leistung .....	91
4.3 Regelung der Strahlungsleistung der Lichtbögen.....	95
<b>5 Betriebsergebnisse .....</b>	<b>104</b>
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>106</b>
<b>7 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>109</b>
<b>Veröffentlichungen des Verfassers.....</b>	<b>118</b>

## ***Abkürzungsverzeichnis***

AC-EAF	Alternating Current Electric Arc Furnace (Drehstrom-Lichtbogenofen)
DC-EAF	Direct Current Electric Arc Furnace (Gleichstrom-Lichtbogenofen)
LF	Ladle Furnace (Pfannenofen)
LZI	Linear zeitinvariant
SPLC	Smart Predictive Line Controller
SVC	Static VAR Compensator (statischer Blindleistungskompensator)
TCR	Thyristor Controlled Reactor (thyristorgesteuerte Drossel)
TRIP	Transformation Induced Plasticity (umwandlungsbewirkte Plastizität)

## Symbolverzeichnis

$a$	Regressionskoeffizient 1. Ordnung Reaktanzmodell nach Köhle
$A_h$	Signal-Rausch-Abstand der Oberwelle $h$
$A_m$	Mittlerer Signal-Rausch-Abstand Körperschall
$b$	Regressionskoeffizient 2. Ordnung Reaktanzmodell nach Köhle
$B_{Av}$	Chargiersignal auf Basis Körperschall
$B_{qi}$	Chargersignals auf Basis Strangströme
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität Kühlwasser
$C_s$	Relativer Anteil kalten Schrotts am Fußpunkt eines Lichtbogens
$d$	Abstand Mitte Lichtbogensäule und Ofenwand
$D_n$	Normierte Verzerrungsleistung
$D_{q1}$	Spektrale Signalleistung Zwischenharmonische quadrierter Strom
$D_{q2}$	Spektrale Signalleistung Oberwellen quadrierter Strom
$f_A$	Abtastfrequenz
$g$	Grundschwingungsgehalt des Stroms
$G_v$	Wandabschirmung
$h$	Ordnungszahl Oberwelle
$I, i$	Strangstrom
$I_{50\text{ Hz}}$	Effektivwert Grundschiwingung Strom
$I_{\text{eff}}$	Effektivwert Strom
$k$	Laufende Variable Strang
$L_{ak}$	Schalldruckpegel
$L_{HS}$	Induktivität Hochstromsystem
$\dot{m}$	Massenstrom Kühlwasser
$N$	Anzahl Stützstellen
$n$	Diskrete Stützstelle
$N_D$	Stellung Drosselstufenschalter
$N_{D,d}$	Berechnete Veränderungsvorgabe des Drosselstufenschalters
$N_{D,F}$	Sollwertvorgabe Fahrdiagramm für Drosselstufenschalter
$N_{OT}$	Stellung Stufenschalter Ofentransformator
$N_{OT,d}$	Berechnete Veränderungsvorgabe des Ofentransformators
$N_{OT,F}$	Sollwertvorgabe Fahrdiagramm für Ofentransformator
$o$	Laufvariable Wandelement
$P$	Wirkleistung
$p$	Diskrete Frequenzstützstelle
$P_{ak,0}$	Bezugsschalldruck
$P_{ak}$	Schallleistung

$p_{\text{ak}}$	Schalldruck
$p_{\text{ak,eff}}$	Effektivwert Schalldruck
$P_{\text{Sm}}$	Mittlere Signalleistung
$Q_{\text{Ist}}$	Aktuelle Vorlaufmenge
$Q_{\text{max}}$	Normierungsfaktor Abweichung Vorlaufmenge
$Q_{\text{Soll}}$	Sollwert Vorlaufmenge
$R_{\text{AT}}$	Resistanz Abspanntransformator
$R_{\text{D}}$	Resistanz Drossel
$R_{\text{HS}}$	Resistanz Hochstromsystem
$r_{\text{k}}$	Radius des Kathodenflecks
$R_{\text{LB}}$	Resistanz Lichtbogen
$R_{\text{OT}}$	Resistanz Ofentransformator
$R_{\text{TCR}}$	Resistanz TCR-System
$S$	Scheinleistung
$S_{\text{ak}}$	Abschätzung Schalldruck Lichtbögen
$S_i$	Leistungsdichtespektrum des Stroms
$S_n$	Normiertes Leistungsdichtespektrum
$S_q$	Leistungsdichtespektrum des quadrierten Stroms
$T_{\text{aus}}$	Ausgangstemperatur Kühlwasser
$T_{\text{ein}}$	Eingangstemperatur Kühlwasser
$\tilde{u}_{\text{AT}}$	Übertragungsfaktor Abspanntransformator
$U_{\text{LB}}$	Lichtbogenspannung
$U_{\text{M}}$	Gemessene Strangspannung
$U_{\text{N1}}$	Primärseitige Nennspannung Ofentransformator
$U_{\text{N2}}$	Sekundärseitige Nennspannung Ofentransformator
$\tilde{u}_{\text{OT}}$	Übertragungsfaktor Ofentransformator
$U_{\text{VN}}$	Spannungsquelle Versorgungsnetz
$v$	Körperschall
$W_{\text{Cs}}$	Gewichtungsfaktor kalter Schrott
$W_{h,A}$	Gewichtungsfaktor Signal-Rausch-Abstand der Oberwellen $h$
$W_{h,k}$	Gewichtungsfaktor Wandabschirmung der Oberwellen $h$
$W_{k,o}$	Gewichtungsfaktor Wandelementzuordnung
$X_{\text{AT}}$	Reaktanz Abspanntransformator
$X_{\text{D}}$	Reaktanz Drossel
$X_{\text{FC}}$	Kapazitive Reaktanz Filterkreise
$X_{\text{HS}}$	Reaktanz Hochstromsystem
$X_{\text{LB}}$	Reaktanz Lichtbogen
$X_{\text{OT}}$	Reaktanz Ofentransformator
$X_{\text{sc}}$	Kurzschlussreaktanz

---

$X_{TCR}$	Reaktanz TCR-System
$X_{VN}$	Reaktanz Versorgungsnetz
$Z_{instabil}$	Stabilitätsgrenze des Lichtbogens als Impedanz
$Z_{sc}$	Kurzschlussimpedanz
$Z_{Soll}$	Impedanz-Sollwert
$Z_{Soll,d}$	Berechnete Veränderungsvorgabe des Impedanz-Sollwertes
$Z_{Soll,F}$	Vorgabe Impedanz-Sollwert aus Fahrdiagramm
$\alpha$	Sperrbereich zu Oberwellen
$\beta$	Anpassungsfaktor Wandabschirmung
$\gamma$	Normiertes Verhältnis spektraler Anteile
$\Delta Q$	Normierte Abweichung der Vorlaufmenge
$\Delta Q_{k,max}$	Maximaler Rückgang Vorlaufmenge im Bereich des Strangs $k$
$\Delta Q_{k,V}$	Vergangenheit Rückgang Vorlaufmenge
$\lambda$	Exponent Vorverarbeitung Strangströme
$\mu_0$	Magnetische Feldkonstante
$\nu$	Normierungsfaktor mittlerer Signal-Rausch-Abstand
$\sigma$	Minimaler mittlerer Signal-Rausch-Abstand
$\Phi_{LB}$	Durch den Lichtbogen emittierte Strahlungsleistung
$\Phi_{LB,d}$	Berechnete Veränderungsvorgabe der Strahlungsleistung
$\Phi_{LB,sp}$	Strahlungsleistung pro Fläche im Abstand $d$ zum Lichtbogen

---

*„Wer will was Lebendig's erkennen und beschreiben,  
Sucht erst den Geist heraus zu treiben,  
Dann hat er die Teile in seiner Hand,  
Fehlt, leider! nur das geistige Band.“*

Faust. Eine Tragödie. von Johann Wolfgang von Goethe