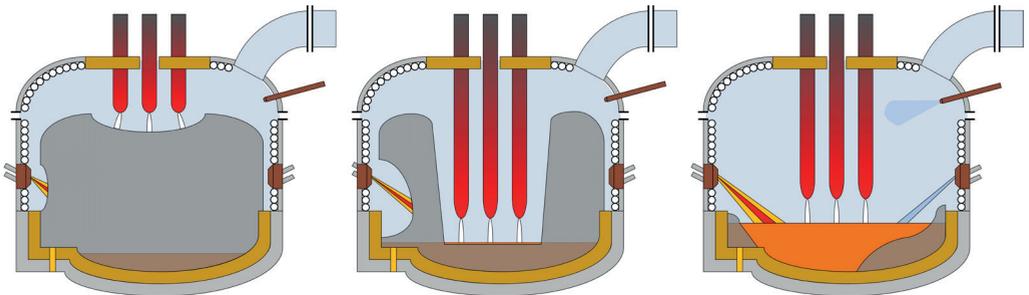


Dynamische Modellierung des Lichtbogenofenverfahrens mit objektorientierten Beschreibungsansätzen



Professur für Gassensoren
Institut für Mikrosystemtechnik

Dynamische Modellierung des Lichtbogenofenverfahrens mit
objektorientierten Beschreibungsansätzen

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Technischen Fakultät
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

vorgelegt von
Florian Opitz
– 2019 –

Dekanin: Prof. Dr. Hannah Bast

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr. Jürgen Wilde

Beisitzer der Prüfungskommission: Prof. Dr. Lars Pastewka

Erstgutachter und Betreuer: Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein

Zweitgutachter: Prof. Dr. Leonhard Reindl

Betreuer Hochschule Offenburg: Prof. Dr. Peter Treffinger

Datum der mündlichen Prüfung: 18.02.2019

Gas Sensors
herausgegeben von Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein

Volume 8

Florian Opitz

**Dynamische Modellierung des
Lichtbogenofenverfahrens mit
objektorientierten Beschreibungsansätzen**

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Freiburg, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7063-7

ISSN 2566-8552

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzzusammenfassung

In Elektrostahlwerken wird unter Verwendung elektrischer, fossiler und chemischer Energie flüssiger Stahl aus Stahlschrott oder direkt reduziertem Eisen erschmolzen. Der größte Teil des Energieeintrags erfolgt hierbei durch drei Lichtbögen, die zwischen Graphitelektroden und dem Einsatzgut brennen, sowie durch Gasbrenner. Aufgrund seines hohen Energiebedarfs von ca. 600 kWh/t bis 850 kWh/t [Kir07, S. 15] ist der Lichtbogenofenprozess seit Beginn seiner industriellen Nutzung Gegenstand von Optimierungsbemühungen der ingenieurwissenschaftlichen Forschung.

In der vorliegenden Arbeit wird hierfür ein physikbasiertes Gesamtsystemmodell des Lichtbogenofenprozesses vorgeschlagen. Dieses Modell zeichnet sich durch eine generalisierte, objektorientierte Formulierung aus, die es ermöglicht einzelne Teilelemente separat zu diskutieren, zu überarbeiten oder auszutauschen. Hierzu wird eine allgemeingültige Subsystemzerlegung sowie eine einheitliche Definition der Schnittstellen zwischen den Teilelementen entwickelt. Im Sinne einer rein deduktiven Systembeschreibung wird außerdem auf die Verwendung von Schätzparametern zur Anpassung des Systemmodells an Experimentaldaten verzichtet. Dieses Vorgehen begründet sich in der angestrebten Allgemeingültigkeit des Modells.

Inhaltlich werden weitere Subsysteme und physikalische Phänomene des Lichtbogenofenprozesses der Beschreibung in Systemmodellen zugänglich gemacht. Dies sind beispielsweise die Gas- und Staubstrahlung in der geometrisch variablen Ofenatmosphäre, die lokale Auflösung der Feststoffphase, die Bewegung des Schrotts im Ofengefäß, sowie die Einbindung von Elementen des Abgassystems. Das entwickelte Gesamtmodell wird mithilfe von Messwerten eines Ofens der Badischen Stahlwerke GmbH in Kehl am Rhein validiert. Hierbei zeigt sich, dass sowohl das elektrische als auch das thermische Verhalten des realen Systems valide durch das Modell wiedergegeben werden. Somit kann davon ausgegangen werden, dass das Zusammenwirken der verschiedenen Teilkomponenten und die energetischen Umsetzungen korrekt erfasst werden.

Das vorgeschlagene Modell kann zukünftig zur Untersuchung des Gesamtsystemverhaltens von Elektrostahlwerken bei der Erzeugung von Rohstahl aus Stahlschrott verwendet werden. Insbesondere kann es beispielsweise zur Entwicklung und Prüfung neuer Betriebs- oder Regelungsstrategien, zur Untersuchung verschiedener geometrischer Konfigurationen und zur Durchführung weiterer Parameterstudien eingesetzt werden.

Abstract

Electric arc furnaces are used for the production of crude steel from scrap or direct reduced iron. A major portion of the input energy is transferred by electric arcs and natural gas burners. Due to the high energy demand of this process, which is approximately between 600 kWh/t and 850 kWh/t [Kir07, S. 15], industrial as well as scientific researchers continuously tried to further optimize the process.

With the above mentioned basis, the aim of the present work is the development of a physics based system model of the electric arc furnace process. The system model is characterized by an object-oriented formulation and therefore enables a separated discussion or revision of different subcomponents. For this purpose the system is deconstructed in a universal manner and standardized interfaces between the system elements are developed. In order to achieve a deductive description of any real system, the model is not adapted to measuring data by fitting parameters. This approach is motivated by the intended universality of the model.

Several subcomponents and physical phenomena are considered in a system model of the process for the first time. These are the radiation of gas and dust in the variable atmosphere of the vessel, the spatial resolution of the solid phase, the movement of the scrap in the vessel and the implementation of components of the dedusting system. The validation of the developed model is done using measurement data from a furnace of the Badische Stahlwerke GmbH in Kehl, Germany. It is shown that both the electrical and the thermal behavior of the real system are reproduced by the model in a valid manner. Therefore the model seems to reproduce the interactions between the subcomponents including their energy conversions correctly.

In the future, the proposed model can be applied in studies dealing with the overall system behavior of electric arc furnaces during the production of crude steel from steel scrap. Particularly, the model can be used in the development of new operation and control strategies, the testing of different dimensioning concepts or carrying out further parameter studies.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	i
Abstract	ii
1 Einleitung	1
2 Stahlerzeugung im Lichtbogenofen	3
2.1 Prozessablauf	3
2.2 Wirtschaftliche und ökologische Bedeutung der Stahlindustrie	5
2.3 Energetische Bilanzierung des Lichtbogenofenprozesses	8
3 Stand der Technik und Ziele der Arbeit	11
3.1 Statistische Modelle	11
3.2 Deterministische Modelle	13
3.2.1 Prozessmodelle	14
3.2.2 Physikbasiertes Gesamtsystemmodell	16
3.3 Fragestellung und Ziele der Arbeit	17
4 Methodisches Vorgehen	19
4.1 Modellierungskonzept	20
4.1.1 Signalfussorientierter Modellierungsansatz	21
4.1.2 Objektorientierter Modellierungsansatz	22
4.1.3 Umsetzung des objektorientierten Modellierungsansatzes in Modelica und Dymola	24
4.2 Subsystemzerlegung nach der Methode der strukturierten Analyse	27
4.3 Anwendung der Subsystemzerlegung auf das System Elektrostahlwerk	29
4.3.1 Kontextdiagramm und Datenflussdiagramm des gesamten Elektro- stahlwerks	30
4.3.2 Unterteilung des Schmelzgefäßes (Ebene 2 und 3)	32
4.3.3 Unterteilung der Elektrodenregulierung (Ebene 2)	35
4.3.4 Unterteilung des Abgassystems (Ebene 2)	36

4.4	Komponentenübergreifende Beschreibungsansätze	38
4.4.1	Erhaltungsgleichungen	38
4.4.2	Transportgleichungen	40
4.4.3	Wärmeübertragung durch Strahlung	43
4.4.4	Beschreibung der Stoffeigenschaften	50
5	Modellbildung	57
5.1	Elektrisches System	57
5.1.1	Topologie des elektrischen Netzes	58
5.1.2	Mathematische Beschreibung des Systems	60
5.1.3	Modelle zur Berechnung der Lichtbogenimpedanzen	64
5.1.4	Beispielhafte Simulationsergebnisse	69
5.2	Schmelzvorgang und Wärmeübertragung im Gefäß	72
5.2.1	Modellierung der festen Phase	72
5.2.2	Modellierung der Schmelzphase	77
5.2.3	Modellierung der Gasphase	78
5.2.4	Relative Bedeutung der Wärmetransportmechanismen	80
5.2.5	Konvektiver Wärmeübergang zwischen den Phasen	81
5.2.6	Wärmestrahlung	86
5.2.7	Energieeintrag durch Lichtbögen	96
5.2.8	Energieeintrag durch Brenner	98
5.2.9	Energieeintrag durch chemische Reaktionen	100
5.2.10	Modellierung wassergekühlter Wand- und Deckelpanels	101
5.3	Elektrodenregulierung	102
5.3.1	Pumpe und Pumpenregelung	103
5.3.2	Hydraulikspeicher	104
5.3.3	Elektrodentragarme	104
5.3.4	Modellierung weiterer Komponenten	105
5.4	Komponenten des Abgassystems	106
5.4.1	Gebläse	108
5.4.2	Rohrleitungen	108
5.4.3	Abgasspalt	109
5.5	Modell des Gesamtsystems	111
6	Simulation und Validierung	115
6.1	Vergleichsstahlwerk und Parametrisierung des Modells	115
6.2	Modellvalidierung	118
6.2.1	Massenentwicklung im Gefäß und Schmelzdauer	119

6.2.2	Verhalten des elektrischen Systems	121
6.2.3	Validierung thermischer Größen	125
6.2.4	Sensitivitätsanalyse des Diskretisierungsgrades	129
6.3	Diskussion weiterer Simulationsergebnisse	132
6.3.1	Strahlungsaustausch im Gefäß	132
6.3.2	Verhalten von Peripheriemodellen	141
6.3.3	Energetische Gesamtbilanz des Prozesses	143
6.4	Vergleich mit Literaturdaten	145
6.4.1	Vergleich elektrischer Größen	146
6.4.2	Vergleich des Schmelzverlaufs	146
6.4.3	Vergleich thermischer Größen	149
6.4.4	Zusammenfassung	150
7	Zusammenfassung und Ausblick	153
8	Literatur	157
	Abbildungsverzeichnis	171
	Tabellenverzeichnis	175
	Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	177
	Danksagung	183
	Erklärung	185
Anhang		187
A	Berechnung der Längsimpedanzen wesentlicher Betriebsmittel	187
B	Verwendete Sichtfaktoren	191
B.1	C-77: Mantelfläche eines Zylinders zu Kreisscheibe am Ende des Zylinders .	191
B.2	C-95: Innerer Kreiszyylinder zu einem äußeren Kreiszyylinder 1	192
B.3	C-96: Innerer Kreiszyylinder zu einem äußeren Kreiszyylinder 2	193
B.4	C-97: Innerer Kreiszyylinder zu einem äußeren Kreiszyylinder 3	194
B.5	C-98: Innerer Kreiszyinders zu einem äußeren Kreiszyinders 4	195
C	Werte der Integraleponentialfunktion	197

D Elektrische Parameter des Elektrostahlwerks zur Validierung	201
E Parametrisierung nach Logar et al.	203