

Reihe 8

Mess-,
Steuerungs- und
Regelungstechnik

Nr. 1260

Dipl.-Ing. Andreas Fischer,
Mattstedt

Quantitative Erfassung der Spülwirkung während der Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen



Professur für Automatisierungstechnik

*Professur für Prozessdatenverarbeitung
und Systemanalyse*

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

Quantitative Erfassung der Spülwirkung während der Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen

Der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut–Schmidt–Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor–Ingenieurs vorgelegte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Andreas Fischer

aus Apolda

Hamburg 2018

Tag der mündlichen Prüfung: 12.01.2018

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Niemeyer
Helmut-Schmidt-Universität
Universität der Bundeswehr Hamburg
Fakultät für Maschinenbau
Professur für Verfahrenstechnik, insbesondere Stofftrennung

Ein hartnäckiger Begleiter der Erkenntnis ist die Unwissenheit über die eigene Unwissenheit.

Stanislaw Lem (1921 – 2006)

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 8

Mess-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Dipl.-Ing. Andreas Fischer,
Mattstedt

Nr. 1260

Quantitative Erfassung
der Spülwirkung während
der Vakuumbehandlung
von Stahlschmelzen



Professur für Automatisierungstechnik

*Professur für Prozessdatenverarbeitung
und Systemanalyse*

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

Fischer, Andreas

Quantitative Erfassung der Spülwirkung während der Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 08 Nr. 1260. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

170 Seiten, 108 Bilder, 20 Tabellen.

ISBN 978-3-18-526008-7, ISSN 0178-9546,

€ 62,00/VDI-Mitgliederpreis € 55,80.

Für die Dokumentation: Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen – Labormodell – Leckageerkennung – spektrale Analyse – Druck – Schwingungsmessung – Wasserstoffentgasungsmodell – Prozessanalyse

Forschungsgegenstand dieser Arbeit ist die Untersuchung, inwieweit durch eine geeignete Druck- und Schwingungsmessung die Beurteilung der wirksamen Spülgasmenge und der daraus resultierenden Spülwirkung bei der sekundärmetallurgischen Behandlung von Stahlschmelzen möglich ist. Da eine direkte Messung der Spülgasmenge in der Spüldüse aufgrund der Umgebungsbedingungen schwer zuverlässig durchführbar ist, können mögliche Leckagen die tatsächliche Rührleistung stark verringern. Anhand eines Laborspülstands werden geeignete Messgrößen für die Bewertung des effektiven Volumenstromes identifiziert und anschließend auf den Einsatz im Stahlwerk übertragen. Für die Bewertung und Dimensionierung der erstellten Modellberechnungen wird die Modellierung des Wasserstoffgehalts der Schmelzen genutzt. Diese Arbeit zeigt, dass diese Modellierung von Prozessgrößen auch geeignet ist, um Einflüsse und Eingriffe in den Prozess zu bewerten und somit zur Optimierung von Verfahrensabläufen eingesetzt werden kann.

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 978-3-18-526008-7

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 systemtheoretische Analyse komplexer technischer Prozesse verfolgt, einschließlich der darauf aufbauenden Automatisierung. Die erfolgreiche Umsetzung der erzielten theoretischen Ergebnisse, insbesondere im Rahmen der industriellen Wertschöpfung, ist das Ziel des ingenieurwissenschaftlichen Wirkens und zugleich Gradmesser für seinen Erfolg. Der Prozess der Stahlerzeugung ist seit vielen Jahren Gegenstand der wissenschaftlichen Arbeit am Institut. Insbesondere mit Hilfe mathematischer Modellbildung gelang es wesentliche Prozessschritte formal zu beschreiben und darauf aufbauend entsprechende Regelungen zu entwickeln.

Herr Dr. Fischer hat in seiner Dissertation das Spülen des flüssigen Stahls in der Pfanne betrachtet. Vorbereitend führte er Studien im Labor durch, anschließend wandte er sich einem Produktionsaggregat im Stahlwerk zu. Anhand einer detaillierten Analyse hochaufgelöster Druck- und Körperschallsignale gelang es ihm, quantitative Kenngrößen zur Beschreibung des Prozesszustandes zu entwickeln. Dies ermöglicht heute ein präziseres Fahren dieses für die Erzeugung hochwertiger Stahlgüten erforderlichen Prozessschrittes.

Die Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH.

Die Herausgeber danken den Hüttenwerken Krupp Mannesmann, insbesondere Herrn Dr. Weinberg, für die Förderung der Arbeit sowie dem VDI-Verlag für die Möglichkeit einer breiten Veröffentlichung der Ergebnisse.

Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger

Prof. Dr.-Ing Alexander Fay

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik an der Professur für Prozessdatenverarbeitung und Systemanalyse der Helmut Schmidt Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg in Zusammenarbeit mit den Hüttenwerken Krupp Mannesmann GmbH.

Die wissenschaftliche Betreuung erfolgte durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger, dem ich für das entgegengebrachte Interesse, das wissenschaftliche Engagement und den vielen wertvollen Ratschlägen und Anregungen bei der Durchsicht meines Manuskriptes herzlich danken möchte.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Markus Bause gilt mein Dank für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Niemeyer für die freundliche Übernahme des Korreferates und den in diesem Zusammenhang entstandenen Diskussionen.

Den Mitarbeitern der Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH sei herzlich für die hervorragende Zusammenarbeit gedankt. Insbesondere Herrn Dr.-Ing Matthias Weinberg sei für die vielen interessanten Diskussionen und Anregungen gedankt. Ebenfalls bedanke ich mich für die Unterstützung und unkomplizierte Hilfestellungen bei den Herausforderungen, welche sich bei den Arbeiten in einem Stahlwerk ergaben bei Herrn Dr.-Ing. Marco Knepper und Frau Dipl.-Ing Katrina Steindor.

Mein aufrichtiger Dank gilt auch allen Mitarbeitern des Instituts für ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung.

Ganz besonderen Dank gilt es noch meiner Familie und meinen Freunden auszusprechen, die mich stets unterstützt haben. Insbesondere Frau Prof. Dr. Sylvia Bös und Herr Dr.-Ing Henry Romanus möchte ich an dieser Stelle für die Unterstützung bei der Korrektur meines Manuskriptes danken.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Spülen von Stahlschmelzen	4
2.1 Anforderungen an die Pfannenmetallurgie	4
2.2 Arten des Spülens	5
2.3 Beurteilung der Spülwirkung	6
2.4 Versuchsaufbau am Realspülstand	11
3 Labormodell	12
3.1 Dimensionierung des Modells	12
3.1.1 Rohrströmung	13
3.1.2 Spülgefäß	19
3.1.3 Düse	23
3.2 Auslegung des dimensionierten Modells	26
3.2.1 Sensorbestückung des Laborspülstandes	26
3.2.2 Gestaltung der Düsen	27
3.2.3 Gestaltung des Spülgefäßes	28
3.3 Experimentelle Ergebnisse des Labormodells	29
3.3.1 Leckage in den Zuleitungen	30
3.3.2 Leckagerohr mit Sägespalt	30
3.3.3 Leckgerohr mit drei Bohrungen	31
3.3.4 Dämpfungsverhalten	34
3.3.5 Vergleich der Position der Düse	35
3.3.6 Einflussfaktor Durchfluss	38
3.3.7 Variation des Füllstandes	42
3.3.8 Einfluss der Düsengeometrie	44
3.3.9 Simulation der Schlacke	50
3.3.10 Spüldichterkennung	53
3.3.11 Reinheitsgradspülen	57
3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Laborversuchen	59
4 Ergebnisse am Realspülstand	62
4.1 Planung am Realspülstand	62
4.2 Versuche mit leeren Pfannen	64
4.3 Spektrale Analyse der Messsignale von Körperschall- und Drucksensoren	68
4.4 Körperschallmodell	75

4.5	Druckmodell	80
4.5.1	Leckageerkennung	80
4.5.2	Spülerdichterkennung anhand der Druckdaten	90
4.6	Bewertung der Spülwirkung	94
4.6.1	Bewertung über Spülleistungsberechnung	94
4.6.2	Wasserstoffgasungsmodell	97
4.6.2.1	Adaption des Wasserstoffmodells an einem Realspülstand	106
4.6.2.2	Wasserstoffmodell zur Prozessbeurteilung	116
4.6.2.3	Bewertung des Kammerdrucks	117
4.6.2.4	Bewertung des Durchflusses	120
4.6.2.5	Bewertung des Leckagemodells	122
4.6.2.6	Bewertung des Spülerdichtmodells	124
4.6.2.7	Bewertung des ferrostatischen Drucks	126
4.6.2.8	Bewertung des Körperschallmodells	128
4.6.2.9	Wasserstoffmodell zur Echtzeitanalyse	129
4.6.3	Vergleichende Spülerbewertung	130
4.6.4	Bewertung einzelner Prozessabschnitte	133
4.6.4.1	Vorlauf sowie Einsetzen der Pfanne	133
4.6.4.2	Anspülen	134
4.6.4.3	Leckagetest	134
4.6.4.4	Reinheitsgradspülen	135
4.6.4.5	Spülunterbrechung	135
4.6.5	Störgrößen	136
4.6.5.1	Druck	136
4.6.5.2	Körperschall	137
5	Zusammenfassung und Ausblick	138
	Anhang	142
A.1	Tabellen	142
A.2	Tafeln	143
A.3	Monte Carlo Methode	144
A.4	Abstandsmodell als Bewertungskriterium	145
A.5	Verfahrensbeschreibung des Wasserstoffmodells	148
	Literaturverzeichnis	150

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

A.	Anhang
at%	Atomprozent
DDD	Durchfluss–Druck–Diagramm
EPS	expandiertes Polystyrol
FEM	Finite Elemente Methode
FFT	schnelle Fourier–Transformation
FWHM	Halbwertsbreite
HKM	Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH
Ks	Körperschall
Max.	Maximum
MFC	Massendurchflussregler
Min.	Minimum
norm.	normiert
PMMA	Polymethylmethacrylat
Pos.	Position
ppm	Teile von einer Million (bezogen auf das Gewicht)
RMS	quadratischer Mittelwert
SGM	Spülgasmenge nach dem Bewertungssystem der HKM
SNR	Signal–zu–Rausch–Verhältnis
SNR_{norm}	normiertes Signal–zu–Rausch–Verhältnis
Tab.	Tabelle
TWB	Temperaturwechselbelastung
VM	Verbrauchsmenge an Spülgas
vol%	Volumenprozent
wt%	Gewichtsprozent

Symbole

A	Querschnittsfläche
A_b	Phasengrenzfläche der Spülgasblasen
A_f	Faktor der Arrhenius–Gleichung
a	Proportionalitätskonstante
a_H	Aktivität des Wasserstoffs
a_{Ks}	Körperschallsignal
$a_{Ks_{max}}$	Änderungsgrenze des Effektivwerts des Körperschallmesswerts in %

b	Skalierungsfaktor
c_H	Wasserstoffgehalt
$c_{H_{\max}}$	maximaler Wasserstoffgehalt
$c_{H_{\min}}$	Wasserstoffgehalt im Gleichgewicht
$c_{H_{\text{Start}}}$	Startwert des Wasserstoffgehalts
c	Schallgeschwindigkeit
c_p	spezifische Wärme bei konstantem Druck
c_v	spezifische Wärme bei konstantem Volumen
D	Dämpfungsfaktor der PT1–Filterung
d	Durchmesser
\bar{d}	Mittelwert der Verteilungsfunktion
d_{10-90}	Spannweite der Verteilungsfunktion zwischen 10 % und 90 % der Messwerte
d_{100}	Spannweite der Verteilungsfunktion der Messwerte
d_b	Blasendurchmesser
$d_{\text{Düse}}$	Düsendurchmesser
d_g	Gefäßdurchmesser
d_r	Rohrdurchmesser
d_S	Kernspaltabstand
e_B	Einstellgröße nach Buckingham [1]
η	dynamische Viskosität
η_H	Wirkungsgrad aus dem Wasserstoffentgasungsmodell
E_A	Aktivierungsenergie
E_o	Eötvös–Zahl
f	Frequenz
f_g	Grenzfrequenz
f_{Hieb}	Hiebtonfrequenz
f_m	Oktavmittelfrequenz
f_p	Spitzenfrequenz
f_s	Schneidentonfrequenz
g	Erdbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
γ	Oberflächenspannung
g_B	Grundgröße nach Buckingham [1]
h	Höhe
h_g	Höhe des Spülgefäßes
h_M	Füllstand des Spülgefäßes
I_{Dicht}	Spülerdichtindex
I_{Druck}	Druckindex
I_{Leck}	Leckageindex
k	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante
K_H	Gleichgewichtskonstante für Wasserstoff

k_n	Modal-Faktor (mit $n \in \mathbb{N}$)
k_{Var}	Variationskoeffizient
κ	Adiabatenexponent
L	spezifische Länge (Verhältnis von Volumen zu Oberfläche)
l	Länge
λ	Wellenlänge
ΔL_A	A-Bewertung nach Tabelle A.1
L_B	Grundgröße Länge nach Buckingham [1]
l_r	Rohrlänge
$\Delta L_{W\text{fm}}$	Pegeldifferenz
$L_{W\text{i}}$	innerer Schalleistungspegel
$L_{W\text{okt}}$	Oktavband-Schalleistungspegel
m	Masse
Ma	Machzahl
M_B	Grundgröße Masse nach Buckingham [1]
Mo	Morton-Zahl
N	spezifische Gaskonstante
ν	kinematische Viskosität
ν_G	kinematische Viskosität des Spülgases
ν_M	kinematische Viskosität der Schmelze
Oh	Ohnesorge-Zahl
p	Druck in bar
\bar{p}	Mittelwert des Drucksignals in bar
p_{abs}	absoluter Druck
$p_{\text{Düse}}$	Leitungsdruck an der Düse bzw. Spülstein in bar
p_{dyn}	dynamischer Druck
p_{ferro}	Ferrostatischer Druck in bar
p_{ges}	Gesamtdruck
p_g	Grenzdruck für die Berechnung des Körperschallmodells in bar
p_{H_2}	Wasserstoffpartialdruck
p_{hydro}	hydrostatischer Druck in bar
π_B	dimensionslose Kennzahlen nach Buckingham [1]
p_{Of}	Kammerdruck in bar
\bar{p}_{RMS}	quadratischer Mittelwert des Drucksignals in bar
p_{Stau}	Gesamtdruck
r	Radius
R	universelle Gaskonstante ($R = 8,314 \text{ J/mol K}$)
R_B	Streubreite
R^2	Bestimmtheitsmaß
Re	Reynolds-Zahl
Re_b	Blasen-Reynolds-Zahl

Re_{krit}	kritische Reynolds-Zahl
ρ	Dichte
ρ_G	Dichte des Spülgases
ρ_M	Dichte der Schmelze
σ	Standardabweichung
St	Strouhal-Zahl
T_0	Labortemperatur ($T_0 = 293 \text{ K}$)
T_B	Grundgröße Zeit nach Buckingham [1]
T	Temperatur
T_m	Temperatur der Stahlschmelze
v_G	Strömungsgeschwindigkeit des Gases
v_b	Aufstiegsgeschwindigkeit der Blase
V_0	Zeitkonstante für Wasserstoffentfernung
\dot{V}	Volumenstrom
Var	Varianz
\dot{V}_{calc}	berechneter Volumenstrom
V_g	Volumen des Spülgefäßes
V_G	Verbrauchsmenge des Spülgases
\dot{V}_D	Volumenstrom des Spülgases aus dem Druckmodell berechnet
\dot{V}_G	Volumenstrom des Spülgases
\dot{V}_{KS}	Volumenstrom des Spülgases aus dem Körperschallmodell berechnet
\dot{V}_{Leck}	Leckagestrom des Spülgases
\dot{V}_{SGM}	Volumenstrom des Spülgases aus dem Bewertungsmodell des Stahlwerkes
V_M	Volumen der Schmelze
V_N	molares Volumen ($V_N = 22,414 \text{ L/mol}$)
V_{spez}	spezifisches Spülgasvolumen
We	Weber-Zahl
Z	Realgasfaktor