



Berichte aus dem
Institut für Eisenhüttenkunde



Richard W. Geyer

**Untersuchungen des Gichtstaubes zur
Steuerung des Kohlenstaubeinblasens
in den Hochofen**

**Untersuchungen des Gichtstaubes
zur Steuerung des Kohlenstaubeinblasens in den Hochofen**

Der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

vorgelegte Dissertation

von

Richard W. Geyer, M.Sc.
aus Hagen (Westf.)

Berichter:

Professor Dr.-Ing. Dr. h. c. (CZ) Dieter Senk

Professor Dr.-Ing. Peter Schmöle

Professor Dr.-Ing. Hermann Wotruba

Tag der mündlichen Prüfung: 14.12.2022

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar



**Berichte aus dem
Institut für Eisenhüttenkunde**

Richard W. Geyer

**Untersuchungen des Gichtstaubes zur Steuerung des
Kohlenstaubeinblasens in den Hochofen**

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. W. Bleck
Prof. Dr.-Ing. U. Krupp
Prof. Dr.-Ing. S. Münstermann
Prof. Dr.-Ing. D. Senk

Band 1/2023

Shaker Verlag

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8928-8

ISSN 0943-4631

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde während meiner Assistentenzeit am Institut für Eisenhüttenkunde der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen im Rahmen eines durch die Europäische Union finanziell unterstützten RFCS-Projektes durchgeführt.

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Prof. h.c. (CN) Dr.-Ing. Dr. h.c. (CZ) Dieter Georg Senk besonders herzlich, mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben zu haben. Insbesondere danke ich ihm für die wertvollen Hinweise und Anregungen in zahlreichen Diskussionen sowie seinem sehr großen Interesse bei der Durchführung dieser Arbeit.

Weiterhin bedanke ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Schmöle und Herrn Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba für Ihr Interesse und die wertvollen Diskussionen.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Alexander Babich für die gemeinsame Projektbetreuung, das Einbringen seiner Erfahrung sowie seiner Expertise in zahlreichen Fachgesprächen.

Allen Mitarbeitern des Institutes und meinen Kollegen danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit und den interessanten fachlichen Austausch.

Ebenfalls danke ich allen Bachelor- und Masterarbeitern sowie meinen studentischen Hilfskräften, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meinen Eltern Sabine und Hans-Wilhelm Geyer gilt der größte Dank, da sie mir meine gute Ausbildung sowie mein Studium überhaupt erst ermöglicht haben. Meinem Bruder Roland Geyer danke ich für sein stets offenes Ohr, seinen fachlichen Rat und seine Ehrlichkeit.

Von ganzem Herzen danke ich zuletzt meiner Partnerin Nina Falck für die Durchsicht der Arbeit, Ihre Zusprüche und Ermutigungen, insbesondere gegen Ende der Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung / Summary	1
2. Einleitung	4
3. Einführung in den Themenkreis	6
3.1 Wirtschaftliche und ökologische Bedeutung der Eisen- und Stahlindustrie	6
3.2 Gichtstaub, -gas und -schlamm im Hochofenprozess	12
3.2.1 Entstehung von Gichtgas und Gichtstaub	12
3.2.2 Char im Hochofenprozess	14
3.2.3 Trennung des Gichtstaubes vom Gichtgas	25
3.2.4 Charakteristika von Gichtstaub	29
3.3 Analyseverfahren für Gichtstaub und Gichtschlamm	29
3.4 Differenzierung von Kohlenstoffträgern im Gichtstaub	31
4. Theoretische Vorbetrachtung zu Char-Charakterisierung und Gichtstaubanalyse mittels LIBS-Messsystem	34
4.1 Kohlenstoffphasendifferenzierung im Gichtstaub	34
4.1.1 Identifizierungs- und Quantifizierungsansätze verschiedener Kohlenstoffphasen im Gichtstaub	34
4.1.2 Entwicklung einer kombinierten Methodik zur Identifizierung und Quantifizierung verschiedener Kohlenstoffphasen im Gichtstaub	41
4.2 Gichtstaubanalyse mittels LIBS-Messsystem	42
4.2.1 Grundlagen der Strahlung	42
4.2.2 Aufbau eines Lasersystems	44
4.2.3 Implementierung eines Lasersystems in LIBS	45
4.2.4 LIBS-Messsystem zur Gichtstaubanalyse	46
5. Optische und reaktionskinetische Kohlenstoffphasendifferenzierung im Gichtstaub	57
5.1 Versuchsmaterialien, Probenpräparation und Untersuchungsmethoden	57
5.1.1 Versuchsmaterialien	57
5.1.2 Probenpräparation	62
5.1.3 Untersuchungsmethoden	62
5.2 Experimentelle Durchführungen	69
5.2.1 Herstellung und Untersuchungen von synthetischem Char	69
5.2.2 Herstellung und Untersuchungen von synthetischem Koksabrieb	70
5.2.3 Untersuchung der Gichtstaubproben mittels Rasterelektronenmikroskopie, energiedispersiver Röntgenspektroskopie und lichtoptischer Mikroskopie	72
5.2.4 Kohlenstoffdifferenzierung im Gichtstaub mittels TGA-Analyse	72
5.3 Ergebnisse und Diskussion der Untersuchungen der synthetischen Char- und Koksproben	75
5.3.1 Ergebnisse der Untersuchungen der synthetischen Charproben	75
5.3.2 Ergebnisse der Untersuchungen der synthetischen Koksabriebproben	80
5.3.3 Ergebnisse der TGA-Analyse der synthetischen Char- und Koksproben	84

5.3.4	Diskussion der Ergebnisse bezogen auf die Untersuchungen der synthetischen Char- und Koksproben.....	92
5.4	Ergebnisse und Diskussion der Gichtstaubanalyse.....	95
5.4.1	Ergebnisse der optischen Kohlenstoffphasendifferenzierung	95
5.4.2	Ergebnisse der TGA-Analyse der Gichtstaubproben.....	106
5.4.3	Diskussion der Ergebnisse der Gichtstaubanalyse.....	107
6.	Quantitative Gichtstaubanalyse mittels LIBS-Messsystem.....	116
6.1	Versuchsmaterialien, Probenpräparationen und Versuchsaufbauten.....	116
6.1.1	Versuchsmaterialien und Probenpräparationen.....	116
6.1.2	Versuchsaufbau des LIBS-Messsystem zur Analyse präparierter Gichtstaubproben	119
6.1.3	Versuchsaufbau des LIBS-Messsystem zur Analyse eines staubbeladenen Gasstroms.....	121
6.2	Versuchsdurchführung mittels LIBS-Messsystem (präparierte Gichtstaubproben).....	122
6.2.1	Vorversuche zur Ermittlung der Einstellungen des Lasersystems	122
6.2.2	Durchführung der Hauptversuche.....	125
6.3	Strömungssimulation und Partikelverteilungsvorhersage für das LIBS-Messsystem (staubbeladener Gasstrom).....	126
6.3.1	<i>Large Eddy Simulation (LES)</i>	127
6.3.2	Berechnungs- und Simulationsbedingungen	127
6.3.3	Durchführung und Nachbearbeitung der berechneten Ergebnisse.....	129
6.4	Ergebnisse und Diskussion der experimentellen Durchführungen sowie der numerischen und mathematischen Untersuchungen	130
6.4.1	Ergebnisse und Diskussion der experimentellen Durchführungen der stationären Versuche.....	130
6.4.2	Ergebnisse und Diskussion der Strömungssimulation und Partikelverteilungsvorhersage für das LIBS-Messsystem.....	144
7.	Schlussfolgerungen und Ausblick	155
8.	Abbildungsverzeichnis	161
9.	Tabellenverzeichnis	167
10.	Literaturangaben	170