



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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto: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

<b>1. Zusammenfassung / Summary</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>3. Einführung in den Themenkreis</b> .....	<b>6</b>
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
<b>4. Theoretische Vorbetrachtung zu Char-Charakterisierung und Gichtstaubanalyse mittels LIBS-Messsystem</b> .....	<b>34</b>
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
<b>5. Optische und reaktionskinetische Kohlenstoffphasendifferenzierung im Gichtstaub</b> .....	<b>57</b>
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
<b>6.</b>	<b>Quantitative Gichtstaubanalyse mittels LIBS-Messsystem.....</b>	<b>116</b>
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
<b>7.</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>155</b>
<b>8.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>161</b>
<b>9.</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>167</b>
<b>10.</b>	<b>Literaturangaben .....</b>	<b>170</b>