



André Dammschröder

**Entwicklung und
Untersuchung von
Schlackensystemen zur
weitgehenden Vermeidung
von Cr Verlusten und
Verschleppungen in
Cu Schmelzen**

„Entwicklung und Untersuchung von Schlackensystemen zur weitgehenden Vermeidung von Cr Verlusten und Verschleppungen in Cu Schmelzen“

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

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation
vorgelegt von **Dipl.-Ing.**

André Dammschröder

aus Solingen / NRW

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. (UA) Karl Bernhard Friedrich
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Christian Roos
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike

Tag der mündlichen Prüfung: 16.08.2017

Schriftenreihe des IME

Band 55

André Dammschröder

**Entwicklung und Untersuchung von Schlacken-
systemen zur weitgehenden Vermeidung von
Cr Verlusten und Verschleppungen in Cu Schmelzen**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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, 2017)

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6066-9

ISSN 1610-0727

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling (IME) der RWTH Aachen.

Mein ganz besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. (UA) Karl Bernhard Friedrich für das entgegengebrachte Vertrauen, sein Interesse an dieser Arbeit sowie seine wissenschaftlichen Anregungen und Förderungen. Den Herren Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Christian Roos und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike danke ich für Ihre Bereitschaft, das Koreferat zu übernehmen.

Besonders herzlich möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Harald Siegele der Firma Wieland für die freundliche Unterstützung während der Durchführung meiner Versuchsreihen und theoretischen Aufwertung der vorliegenden Arbeit bedanken. Weiterhin danke ich der Firma Wieland, welche die Finanzierung und die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit bot.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls möchte ich meinen Dank für die kooperative und kollegiale Arbeitsatmosphäre aussprechen, die meine Arbeit erleichtert und so angenehm gestaltet hat. Insbesondere möchte ich mich bedanken bei der Hallenmannschaft um Leo Klinkenberg, Horst Leuchter, Jürgen Eschweiler und Amir Khamoushkoo sowie der Werkstatt unter der Leitung von Herrn Karl-Heinz Kamp. Im Weiteren dem analytischen Laboratorium unter der Leitung von Herrn Paul van der Heiden und natürlich unserem allzeit gut gelaunten Sekretariat unter der Leitung von Frau Irmgard Koren und ihrer Nachfolgerin Frau Debora Schnabel.

Herrn Dr.-Ing. Jan Reitz, meinem Freund und Institutskollegen, danke ich ganz besonders für seine Unterstützung und Ratschläge. Den Herren Dr.-Ing. Andreas Lützerath und Dr.-Ing. Tim Georgi, meinen Freunden und Bürokollegen, gilt mein herzlichster Dank für zahlreiche Diskussionen und Anregungen.

Meinem Diplomarbeiter Sebastian Maurell-Lopez sowie meinem Studienarbeiter und HiWi Christoph Kemper möchte ich danken für ihren engagierten Einsatz bei der Durchführung und Auswertung unzähliger Versuche und den Abschluss ihrer sehr gelungenen Arbeiten.

Meiner Familie und meinen Freunden gilt mein besonders herzlicher Dank. Durch ihre Geduld, ihren Verzicht und ihre Rückendeckung haben sie den erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit sehr gefördert. Insbesondere gilt dies für meine Frau Annemieke Rugenberg, die gerade in der „heißen Phase“ der Arbeit durch ihr Verständnis und die richtigen Worte einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet hat. Abschließend möchte ich auch meinen beiden Söhnen Noam Leo und Eli Samuel danken, die mich auch in den schwierigen Phasen der Fertigstellung dieser Arbeit immer wieder zum Lachen gebracht haben.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
Kurzfassung	XI
Abstract	XII
Extended Abstract	XIII
1 Einleitung	1
2 Kupferlegierungen	2
2.1 Chrom als Legierungselement	4
2.1.1 Das binäre System Cu-Cr	5
2.1.2 Einfluss zusätzlicher Legierungselemente auf das System Cu-Cr	8
2.1.3 Zusammenfassung	10
3 Wechselwirkung von Kupferschmelzen mit Schlacken	11
3.1 Schlacken in der Metallurgie	14
3.1.1 Struktur und Basizität	15
3.1.2 Dichte und Schmelzpunkt	17
3.1.3 Viskosität	19
3.1.4 Verschlackungsneigung und Sauerstoffpermeabilität	22
3.2 Schlackenbehandlung von Kupferschmelzen	26
3.2.1 Schlackenbehandlung zur Kontrolle von Wertmetallverlusten	28
3.2.2 Übliche Abdecksysteme für Kupferschlacken	29
3.3 Zusammenfassung	31
4 Untersuchungsmethoden für die Ermittlung von (thermochemischen) Gleichgewichten und Bestimmung der Reaktionskinetik	32
4.1 Bestimmung von Gleichgewichten und der Kinetik in verschiedenen Metall-Schlacke Systemen	32
4.1.1 Schlussfolgerung für eigene Versuche zur Bestimmung des Gleichgewichts und der Kinetik	35
5 Feuerfeste Werkstoffe in der Kupfermetallurgie	37
5.1 Verwendete FF Materialien in der Kupfermetallurgie	37
5.2 Wechselwirkung zwischen Schlacke und Feuerfestmaterial	42
5.2.1 Lösungskorrosion	43
5.2.2 Generelle Prüfmethoden in Bezug auf die Wechselwirkung zwischen Schmelze und Feuerfestmaterial	45
5.3 Zusammenfassung	48
6 Thermochemische Modellierung des Systems Cu-Cr und Schlacke	49
6.1 Auswahl der zu untersuchenden Schlackenkomponenten	50
6.2 Berechnung der Schlackensysteme	52
6.3 Ergebnisse	55
7 Experimentelle Untersuchung der Schlackensysteme	57
7.1 Gleichgewichtsversuche im Schutzgas-Induktionsofen	58

7.1.1	Versuchsdurchführung und Beobachtung	60
7.1.2	Bewertung der Ergebnisse	63
7.1.3	Zusammenführung von Modellierung und Vergleich mit den Gleichgewichtsversuchen	66
7.2	Bestimmung der Cu, Cr, Ti -Verschlackungsgeschwindigkeit im Widerstandsbeheizten Ofen	68
7.2.1	Versuchsdurchführung und Beobachtung	69
7.2.2	Ergebnisse und Diskussion	72
7.2.3	Sauerstofftransport durch die Schlackenphase	76
8	Feuerfestmaterialien im Kontakt mit Cr-haltigen Legierungen	81
8.1	Gleichgewichtsversuche im Induktionsofen	81
8.2	Ergebnisse und Diskussion	87
9	Experimentelle Validierung im Technikums- und Produktionsmaßstab	100
9.1	Technikumsversuche bis 10 kg	100
9.2	Industrielle Übertragung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	104
9.2.1	Recycling chromhaltiger Kupferlegierungen im Produktionsmaßstab	104
9.2.2	Großversuche mit zugesetzten Schlackenkomponenten	105
10	Gesamtbewertung	110
10.1	Einsparpotenzial über Schlackeneinsatz	110
10.2	Zusammenfassung und Ausblick	112
Literaturverzeichnis		XXXII
Anhang		XXXIX