

Kilian Gisbertz

Metallurgische Herausforderungen beim pyrometallurgischen Recycling von sensorgestützt sortierten Leicht- und Schwermetallfraktionen aus Müllverbrennungsrostasche

**„Metallurgische Herausforderungen beim pyrometallurgischen
Recycling von sensorgestützt sortierten Leicht- und
Schwermetallfraktionen aus Müllverbrennungsrostasche“**

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. Kilian Gisbertz

Berichter: Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. (UA) Karl Bernhard Friedrich
Herr apl. Prof. Dr.-Ing. Georg Rombach
Herr Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. mont. Stefan Steinlechner

Tag der mündlichen Prüfung: 25.03.2022

Schriftenreihe des IME

Band 81

Kilian Gisbertz

**Metallurgische Herausforderungen beim
pyrometallurgischen Recycling von sensorgestützt
sortierten Leicht- und Schwermetallfraktionen aus
Müllverbrennungsrosta**

Shaker Verlag
Düren 2023

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 978-3-8440-8973-8

ISSN 1610-0727

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 entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am *IME* Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen University. Für die Finanzierung der Forschungsarbeiten im Rahmen des Verbundvorhabens „Verlustminimiertes Metallrecycling aus Müllverbrennungsrostaschen durch sensorgestützte Sortierung – VeMRec“ (Förderkennzeichen 033R081G) danke ich dem Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Ich bedanke mich recht herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. (UA) Bernd Friedrich nicht nur als mein Doktorvater, sondern insbesondere für die Möglichkeit zur Promotion am *IME*. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Georg Rombach und Herrn Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. mont. Stefan Steinlechner für die Übernahme des Koreferats sowie für die kritischen Fragen zur Verbesserung der Arbeit. Den WM's und NWM's des *IME*, allen voran Horst Leuchter und Leo Klinkenberg bin ich für die vielen Erfahrungswerte sowie die gemeinsame Umsetzung experimenteller Ideen zu tiefstem Dank verpflichtet.

Eine Bereicherung über die Projektzeit war die intensive Zusammenarbeit mit den VeMRec-Kooperationspartnern des *I.A.R.*, vertreten durch Professor Pretz, Stefan Heinrichs und David Rößmann, der MAV, vertreten durch Christian Kneppergerges sowie den weiteren Industriepartnern pbo, Steinert, UmiCore und Hydro. Die Betreuung diverser Abschlussarbeiter hat mir stets Freude bereitet. Simon Hilgendorf und Tobias Schür möchte ich für ihren besonders wertvollen Beitrag und die nachhaltige Unterstützung zur Fertigstellung dieser Arbeit hervorheben.

Bei meinen Freunden und Kollegen – Ann-Kathrin, Benni, Christoph, Fabian, Frank, Florian, Hanno, Jelena, Marco, Marek, Sebastian, Siran, Songül, Steffi – möchte Ich mich für die wundervolle gemeinsame Zeit am *IME* und den unverwechselbaren Teamgeist danken.

Für die bedingungslose und fortwährende Unterstützung – ohne die es nicht möglich gewesen wäre, diese Arbeit fertigzustellen – möchte ich mich bei meiner Frau Annika und meiner Familie bedanken.

Inhalt

Abbildungen	III
Tabellen.....	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Recycling von Müllverbrennungsrostasche.....	3
2.1 Charakterisierung des Müllverbrennungsprozesses.....	3
2.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen des Rostaschenrecyclings	5
2.3 Aufbereitung von Rostaschen	5
2.3.1 Rostaschenauslagerung.....	7
2.3.2 NE-Metallabtrennung mittels konventionellen Aufbereitungsmethoden	8
2.3.3 Sensorgestützte Sortierung von NE-Metallkonzentraten.....	14
2.4 Schlussfolgerungen für eigene Arbeiten	19
2.4.1 Ausgangsbedingungen nach Aufbereitung.....	19
2.4.2 Pyrometallurgisches Recyclingkonzept.....	21
3 Grundlagen des Leichtmetallrecyclings – Stand der Technik und Recycling-Möglichkeiten von Leichtmetallschrotten aus MV-Rostasche	24
3.1 Aluminiumrefining von Leichtmetallkonzentraten	24
3.1.1 Schmelzsalzsysteme	28
3.1.2 Kennzahlen des Aluminiumrefinings.....	30
3.1.3 Verfahrenstechnik (Ofen- und Brennertechnologie).....	31
3.1.4 Wechselwirkungen zwischen Salzkomponenten, Oxidhäuten und metallischen Bestandteilen.....	35
3.1.5 Absetzverhalten von Metalltropfen in einer Salzschmelze	38
3.2 Anwendbarkeit des Al-Refiningprozesses auf sensorgestützt sortierte Leichtmetallfraktionen aus MV-Rostasche.....	40
4 Labor- und demonstrationstechnische Evaluierung des metallurgischen Recyclings von sensorgestützt sortierten Leichtmetallkonzentraten.....	41
4.1 Probenahme.....	41
4.2 Materialcharakterisierung	41
4.3 Übersicht der durchgeführten Versuchskampagnen	43
4.4 Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab.....	43
4.4.1 Aufbau der Labor- und Technikumsversuche	43
4.4.2 Durchführung und Beobachtung der Labor- und Technikumsversuche	46
4.4.3 Ergebnisse der Labor- und Technikumsversuchsreihen	46
4.5 Untersuchung im Demonstrations-Kipptrommelofen	58
4.5.1 Aufbau der Demonstrationsversuche	58
4.5.2 Durchführung und Beobachtung der Demonstrationsversuche	60
4.5.3 Ergebnisse der Demonstrationsversuche	61
4.6 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse der Al-Refiningversuche.....	64

5	Grundlagen des Schwermetallrecyclings – Stand der Technik und Recycling-Möglichkeiten von Schwermetallschrotten aus MV-Rostasche	66
5.1	Sekundärkupferroute mit Badschmelzverfahren.....	66
5.2	Anwendbarkeit der Vakuumdestillation auf sensorgestützt sortierte Schwermetallfraktionen aus MV-Rostasche	69
6	Grundlagen der Vakuumdestillation.....	71
6.1	Thermochemische Grundlagen	71
6.1.1	Thermochemische Modellierung der Zinkverdampfung aus einer sensorgestützt sortierten Schwermetallfraktion aus MV-Rostasche	75
6.1.2	Thermochemische Modellierung der Bleiverdampfung aus einer sensorgestützt sortierten Schwermetallfraktion aus MV-Rostasche	76
6.2	Kinetische Grundlagen	77
6.2.1	Einfluss der Verfahrenstechnik auf die Verdampfungskinetik	79
6.2.2	Kinetische Modellierung der Zinkverdampfung aus einer sensorgestützt sortierten Schwermetallfraktion im Pilot-Destillationsofen.....	80
7	Labor- und Pilottechnische Evaluierung der Vakuumdestillation von sensorgestützt sortierten Schwermetallkonzentraten	82
7.1	Probenahme.....	82
7.2	Materialcharakterisierung	82
7.3	Übersicht der durchgeführten Versuchskampagnen	84
7.4	Untersuchungen im Labormaßstab	85
7.4.1	Aufbau der Laborversuche	85
7.4.2	Durchführung und Beobachtung der Laborversuchsreihen	86
7.4.3	Ergebnisse der Laborversuchsreihen	89
7.5	Untersuchungen im Pilot-Destillationsofen	103
7.5.1	Aufbau der Pilotversuche.....	103
7.5.2	Durchführung und Beobachtung der Pilotversuche.....	104
7.5.3	Ergebnisse der Pilotversuche.....	107
7.6	Gegenüberstellung theoretisch erwartbarer und empirisch ermittelter Zinkverdampfungsgeschwindigkeiten	111
7.7	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse der Vakuumdestillationsversuche.....	119
8	Zusammenführung und Gesamtbewertung.....	122
	Literaturnachweise	XXXI
	Anhang	XLV
	Anhang – Weiterführende Untersuchungen.....	LXIX