

Technischer Aufschluss komplexer Elektronikaltgeräte

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. Mattias Gunter Berwanger

aus Troisdorf

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba

Tag der mündlichen Prüfung: 15.07.2016

*Den Wissenschaftlern geht es wie den Chaoten.
Es ist alles da, man muss es nur suchen.*

Franz Kern

Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba

Band 61

Mattias Gunter Berwanger

**Technischer Aufschluss
komplexer Elektronikaltgeräte**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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, 2016)

Lehrstuhl für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz
Wüllnerstraße 2
D - 52056 Aachen
Tel. +49(0)241 - 80-95700, Fax +49(0)241 - 8092232
E-Mail: lehrstuhl@ifa.rwth-aachen.de

Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker
Wüllnerstraße 2
D - 52056 Aachen
Tel. +49(0)241 - 80-95705, Fax +49(0)241 - 8092624
E-Mail: info@teer.rwth-aachen.de

Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba
Lochnerstraße 4 - 20
D - 52056 Aachen
Tel. +49(0)241 - 80-97246, Fax +49(0)241 - 8092635
E-Mail: amr@amr.rwth-aachen.de

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4684-7

ISSN 1617-6545

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 Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Aufbereitung und Recycling (I. A. R.) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen.

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater und Leiter des Instituts für Aufbereitung und Recycling, Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz. Seine Anleitung und sein Vertrauen haben mich nicht nur dazu befähigt, diese Arbeit zu erstellen, sondern auch die vielfältigen Aufgaben als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut erfolgreich wahrzunehmen. Das offene Arbeitsumfeld kommt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts zugute.

Mein Dank gilt ferner Herrn Prof. Dr.-Ing. Wotruba, der sich als Zweitprüfer zur Verfügung gestellt hat. Herrn Prof. Dr. Lottemoser danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich möchte ganz besonders David Rüzmann und Nils Bauerschlag dafür danken, dass sie sich die Zeit genommen haben, diese Arbeit vorab zu lesen und ihre Anregungen mit mir zu besprechen. Ihre Geduld und ihr Feedback haben mir geholfen, die Arbeit auf den jetzigen Stand zu bringen.

Für die gute, jahrelange Zusammenarbeit am I. A. R. möchte ich Herrn Dr.-Ing. Alexander Feil sowie den ehemaligen und allen aktuellen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern danken. Insbesondere den Kollegen und Kolleginnen, deren Büro-nachbar ich sein durfte, möchte ich danken.

Meiner Familie und insbesondere meinen Eltern möchte ich für ihre bedingungslose Unterstützung danken, auf die ich mich jederzeit verlassen kann. Diese Art des Rückhalts hat mich dorthin gebracht, wo ich heute stehe.

Ronja begleitet mich seit dem Studium und gibt mir sowohl Ansporn als auch Ruhe. Erfolge und Glück werden dadurch noch besser, Rückschläge und Unglück werden leichter. Dafür möchte ich mich herzlich bedanken!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Mechanische Aufbereitung komplexer Verbunde	3
2.1	Grundoperationen der mechanischen Aufbereitung	3
2.2	Charakterisierung von Verbunden	6
2.2.1	Aufschluss von Verbunden	8
2.2.2	Komplexität von Verbunden	11
2.3	Technischer Aufschluss durch Zerkleinerung	12
2.3.1	Beanspruchungsarten	13
2.3.2	Maschinelle Zerkleinerung	16
2.3.3	Demontage	18
2.4	Aufbau und Funktion ausgewählter Zerkleinerungsapparate	19
2.4.1	Rotorschere	20
2.4.2	Prallmühle	20
2.4.3	Hammermühle	21
2.5	Einfluss und Bestimmung von Dispersitätsgrößen	22
2.5.1	Bestimmung der Korngröße	22
2.5.2	Bestimmung der Kornform	25
2.5.3	Bildgebende Verfahren	26
3	Elektronikaltgeräte als komplexes Verbundsystem	28
3.1	Elektro- und Elektronikaltgeräte als komplexe Abfallstoffe	29
3.2	Mechanische Aufbereitung und Verwertungsrouten	32
3.3	Metallurgische Aufbereitung und Verwertungsrouten	34
3.3.1	Eisen und Stahl	36
3.3.2	Kupfer	37
3.3.3	Aluminium	39
3.3.4	Kritische, strategische, seltene und edle Metalle	40
4	Charakterisierung des Verbundsystems der LED-Lampen	43
4.1	LED-Lampen als komplexe Elektronikgeräte	43
4.1.1	Aufbau von LED-Chips	43
4.1.2	Aufbau von LED-Lampen	46
4.1.3	Bauformen von LED-Lampen	49
4.2	Betriebskenngrößen	52
4.3	Marktentwicklung und Prognosen	54

4.4	Stand des Wissens zur Aufbereitung von LED-Lampen.....	56
5	Material und Methoden	60
5.1	Versuchsaufbauten für den technischen Aufschluss	60
5.1.1	Manuelle Demontage.....	60
5.1.2	Maschinelle Zerkleinerung	61
5.2	Kategorisierung des Ausgangsmaterials	62
5.3	Bestimmung der Dispersitätsgrößen der Zerkleinerungsprodukte.....	62
5.3.1	Prüfsiebung.....	62
5.3.2	Bildgebende Verfahren und digitale Bildverarbeitung	63
5.4	Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung	66
5.4.1	Stoffgruppenkatalog für die stoffliche Zusammensetzung > 2 mm	66
5.4.2	Chemische Untersuchung des Feinguts < 2 mm	71
5.5	Versuchsdurchführung	71
5.6	Auswertungsmethodik und Darstellungsform	73
5.6.1	Korngröße.....	73
5.6.2	Kornform.....	74
5.6.3	Untersuchung funktionaler Zusammenhänge	74
5.6.4	Routenpotenziale.....	75
6	Ergebnisse der Versuche	77
6.1	Kategorisierung und stoffliche Zusammensetzung von LED-Lampen	77
6.2	Dispersitätsgrößen maschinell erzeugter Zerkleinerungsprodukte.....	82
6.2.1	Korrelation mechanisch und optisch bestimmter Korngrößen	82
6.2.2	Verteilung der Korngrößen.....	86
6.2.3	Verteilung der Kornformen.....	90
6.3	Stoffliche Zusammensetzung	94
6.3.1	Stoffliche Zusammensetzung der Zerkleinerungsprodukte > 2 mm	94
6.3.2	Metallkonzentrationen im Feingut < 2 mm	96
7	Auswertung und Interpretation der Versuche	97
7.1	Technischer Aufschluss	97
7.1.1	Bewertung der Dispersitätsgrößen Korngröße und Kornform.....	99
7.1.2	Aufschluss und stoffliche Zusammensetzung	99
7.2	Routenpotenziale	103
7.2.1	Berechnung der Routenpotenziale	103
7.2.2	Vergleich der Szenarien für die Jahre 2020 und 2030	104

7.3 Zusammenfassende Erkenntnisse	108
8 Zusammenfassung	110
9 Literaturverzeichnis	113
Kurzzusammenfassung	122
Abstract	123
Lebenslauf.....	124