

Produktion und Logistik

RESEARCH

Christoph Meyer

Operative Planung des Recyclings von Eisenhüttenschlacken



Springer Gabler

Produktion und Logistik

Reihe herausgegeben von

Bernhard Fleischmann, Augsburg, Deutschland
Martin Grunow, München, Deutschland
Stefan Helber, Hannover, Deutschland
Karl Inderfurth, Magdeburg, Deutschland
Herbert Kopfer, Bremen, Deutschland
Herbert Meyr, Stuttgart, Deutschland
Thomas S. Spengler, Braunschweig, Deutschland
Hartmut Stadtler, Hamburg, Deutschland
Horst Tempelmeier, Köln, Deutschland
Gerhard Wäscher, Magdeburg, Deutschland
Christian Bierwirth, Halle, Deutschland
Katja Schimmelpfeng, Stuttgart, Deutschland
Moritz Fleischmann, Mannheim, Deutschland
Hans-Otto Günther, Berlin, Deutschland

Diese Reihe dient der Veröffentlichung neuer Forschungsergebnisse auf den Gebieten der Produktion und Logistik. Aufgenommen werden vor allem herausragende quantitativ orientierte Dissertationen und Habilitationsschriften. Die Publikationen vermitteln innovative Beiträge zur Lösung praktischer Anwendungsprobleme der Produktion und Logistik unter Einsatz quantitativer Methoden und moderner Informationstechnologie.

Kontakt

Professor Dr. Thomas S. Spengler
Technische Universität Braunschweig
Institut für Automobilwirtschaft
und Industrielle Produktion
Mühlenpfordtstraße 23
38106 Braunschweig

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/12449>

Christoph Meyer

Operative Planung des Recyclings von Eisenhüttenschlacken

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Thomas S. Spengler



Springer Gabler

Christoph Meyer
Technische Universität Braunschweig
Braunschweig, Deutschland

Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2018

Produktion und Logistik

ISBN 978-3-658-26238-9

ISBN 978-3-658-26239-6 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-26239-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Gabler

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Gabler ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Geleitwort

Vor dem Hintergrund der verstärkten Diskussion um eine nachhaltig wirtschaftende Industrie werden in Deutschland vielfältige Anstrengungen unternommen, um Ressourcenverbräuche durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen nachhaltig zu gestalten. Im Rahmen der Eisen- und Stahlerzeugung entsteht eine Vielzahl an Kuppelprodukten, aus denen sich Sekundärrohstoffe gewinnen lassen. Hierbei nehmen Eisenhüttenschlacken als Kuppelprodukte eine zentrale Rolle ein. Sie sind für metallurgische Prozesse unabdingbar, fallen in großen Mengen an und weisen je nach Erzeugungsverfahren unterschiedliche Eigenschaften auf. In der Folge haben sich verschiedene Recyclingalternativen zur Verwertung von Eisenhüttenschlacken in unterschiedlichen Einsatzbereichen entwickelt. Die Nutzbarkeit dieser Recyclingalternativen unterliegt jedoch einer Vielzahl von simultan zu berücksichtigenden technologischen, ökonomischen und ökologischen Faktoren, die hohe Anforderungen an eine operative Recyclingplanung stellen und nicht von vorhandenen Planungskonzepten erfüllt werden. Eine wesentliche Forschungslücke besteht in der Modellierung mechanisch-verfahrenstechnischer Zusammenhänge als Grundlage für einen betriebswirtschaftlich fundierten Recyclingplanungsansatz. So ist beispielsweise die Berücksichtigung von Korngrößenverteilungen zur Beschreibung von Recyclingalternativen erforderlich, da diese gezielt für jeden Sekundärrohstoff in Abhängigkeit von dessen Einsatzzweck eingestellt werden. Vor diesem Hintergrund setzt sich Herr Meyer in seiner Dissertation das Ziel der Konzeption und Ausgestaltung einer operativen Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken. Die besonderen Herausforderungen der Zielsetzung bestehen in der Berücksichtigung mengen- und wertbezogener Wechselwirkungen der Recyclingprozesse und der hieraus folgenden Anforderungen an ein geeignetes Planungskonzept. Neben der Auswahl geeigneter Ansätze zur produktionswirtschaftlichen Modellierung des Schlackenrecyclings erweisen sich die Bestimmung von Betriebspunkten des Recyclingsystems, deren betriebswirtschaftliche Bewertung und die Berücksichtigung der vielfältigen Zusammenhänge als anspruchsvoll.

Die von Herrn Meyer vorgelegte Dissertation stellt sich diesen Herausforderungen. Nach einer aussagekräftigen Einleitung werden in Kapitel 2 die Grundlagen, Aufgaben und Rahmenbedingungen des Recyclings von Eisenhüttenschlacken umfassend dargestellt. Hierbei zeigt Herr Meyer detailliert die technologischen, ökonomischen und ökologischen Einflussgrößen sowie die Notwendigkeit ihrer Berücksichtigung in der operativen Recyclingplanung auf. Darauf aufbauend analysiert Herr Meyer in Kapitel 3 kritisch bestehende Recyclingplanungsansätze. Hieraus leitet er überzeugend die Erkenntnis ab, dass die Anforderungen an eine Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken in Gänze von keinem bestehenden Ansatz erfüllt werden und damit grundsätzlicher Forschungsbedarf besteht. Hierbei sind die bislang fehlende Berücksichtigung mechanisch-verfahrenstechnischer Charakteristika sowie zeit- und mengenabhängiger Erlöse maßgeblich. In Kapitel 4 entwickelt Herr Meyer eine umfassende Planungskonzeption für die operative Recyclingplanung von Eisenhüttenschlacken. Er greift auf eine aktivitätsanalytische Modellierung zurück, die auf einer Flowsheet-Simulation aufsetzt. Hierbei werden die Potentiale dieser Ansatzkombination aufgezeigt. So eröffnet die Flowsheet-Simulation die Möglichkeit, beliebige Recyclingsysteme nachzubilden und belastbare Aussagen über technische Größen wie die resultierenden Korngrößenverteilungen zu gewinnen. Die Simulationsergebnisse gehen mittels aggregierter Recyclingaktivitäten in eine ma-

thematische Modellformulierung ein, die unter Berücksichtigung verschiedener, praxisrelevanter Erlösfunktionen eine Deckungsbeitragsoptimierung für Sekundärrohstoffe über mehrere Perioden hinweg ermöglicht. Die Modellformulierung wird nachfolgend empirisch und strukturell validiert sowie in geeigneten Softwaresystemen implementiert. Kapitel 5 ist der fallstudienbasierten Validierung der entwickelten Planungsmethodik gewidmet. Hierzu wird zunächst auf die verwendete, realitätsnahe Datenbasis eingegangen, die genutzt wird, um eine Beispielkonfiguration eines Recyclingsystems zu entwickeln. Zur Beantwortung sieben repräsentativer Leitfragen, die eine große Bandbreite entscheidungsrelevanter Größenentwicklungen abdecken, wird die Beispielkonfiguration in entsprechenden Szenarien sukzessive in komplexere Systemkonfigurationen überführt. Die für die Szenarien ermittelten deckungsbeitragsoptimalen Recyclingpläne werden in der Folge überzeugend validiert. Die Fallstudie zeigt nochmals die methodische Stringenz im Vorgehen von Herrn Meyer auf und verbindet anschaulich die praktische Problemstellung mit der geleisteten Forschungsarbeit. Die Arbeit erfährt in Kapitel 6 eine umfassende Würdigung, die neben einer kritischen Analyse der Arbeitsmethodik und Ergebnisse Handlungsempfehlungen für die Praxis und einen vielversprechenden Ausblick einschließt. Eine prägnante Zusammenfassung in Kapitel 7 schließt die vorliegende Arbeit.

Die vorliegende Dissertation deckt eine sowohl unter theoretischen als auch praktischen Gesichtspunkten hochgradig aktuelle und anspruchsvolle Thematik ab. Die operative Recyclingplanung ist eine der wesentlichen Herausforderungen auf dem Weg zu einer wirtschaftlichen und nachhaltigen Behandlung von Kuppelprodukten. Die Problemstellung der vorliegenden Dissertation ist gekennzeichnet durch ein hohes Maß an technischer Komplexität und wirtschaftliche Relevanz. Es ist Herrn Meyer in überzeugender Weise gelungen, ein problemadäquates Entscheidungsmodell zu entwickeln, das die komplexen Zusammenhänge umfassend abbildet. Hierbei beschreitet Herr Meyer insbesondere in der Kombination verschiedener Methodenkomplexe der Betriebswirtschaftslehre, der Ingenieurwissenschaften und des Operations Research wissenschaftliches Neuland. Dies findet konkret Ausdruck in der methodischen Verbindung zwischen Aktivitätsanalyse, Kosten- und Erlösfunktionen, Flowsheet-Simulation sowie gemischt-ganzzahliger Optimierung. Eine besondere Würdigung verdient die mathematische Präzision der Arbeit sowohl in der Entwicklung einer Flowsheet-Simulation als auch der gemischt-ganzzahligen Modellierung des Planungsproblems. Die Arbeit besticht darüber hinaus durch eine breite praxisnahe Fallstudie, in der die Wirkung einer Vielzahl exogener Einflussfaktoren auf die Planung des Recyclings von Eisenhüttenschlacken untersucht wird. Ich wünsche dem vorliegenden Buch eine weite Verbreitung in Wissenschaft und Praxis.

Univ.-Prof. Dr. Thomas Stefan Spengler

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand am Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion (AIP) der Technischen Universität Braunschweig. Ich habe während dieser Zeit viele wertvolle Erfahrungen gesammelt und möchte mich für die Unterstützung bedanken, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Professor Dr. Thomas S. Spengler, der mich bei der Erstellung der Arbeit begleitet, konstruktive Anregungen gegeben, und mir vertrauensvoll Verantwortung in vielfältigen Bereichen der Forschung und Lehre übertragen hat. Seine interdisziplinäre Arbeitsweise und die von ihm gelebte Verbindung zwischen Wissenschaft und Praxis haben meine Herangehensweise an neue Fragestellungen nachhaltig geprägt. Ebenfalls bedanke ich mich bei Professor Dr. Heinz Ahn und Professor Dr. David Woisetschläger für die Übernahme des Korreferates und des Vorsitzes in der Prüfungskommission.

Für die stets hervorragende Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre möchte ich mich auch bei meinen Kollegen bedanken. Hier gilt mein Dank insbesondere Dr. Matthias Wichmann, der mir in vielfältigen fachlichen Diskussionen wertvolle Anregungen gegeben und durch seine positive Grundeinstellung auch in den letzten Zügen der Arbeit zu ihrer Fertigstellung beigetragen hat. Dafür, dass ich meine Zeit am AIP immer in guter Erinnerung behalten werde, danke ich auch meinen Kollegen Dr. Anna Breitenstein, Maren Gäde, Dr. Martin Grunewald, Dr. André Hintsches, Dr. Isa von Hoesslin, Dr. Claas Hoyer, Dr. Christian Huth, Christoph Johannes, Dr. Karsten Kieckhäfer, Dr. Jenny Kranich, Dr. Niklas Labitzke, Dr. Andreas Matzke, Dr. Christoph Müller, Dr. Karen Puttkammer, Dr. Ina Schlei-Peters, Dr. Kerstin Schmidt, Natalia Stepien, Christian Thies, Professor Dr. Thomas Volling, Dr. Katharina Wachter, Dr. Kai Wittek und Dr. Philipp Zeise. Für die Unterstützung in allen administrativen Belangen möchte ich mich auch herzlich bei Birgit Haupt bedanken.

Neben der Arbeit am Institut war meine Promotionszeit auch stark durch die Zusammenarbeit mit der Salzgitter Flachstahl GmbH im Rahmen einer Forschungs Kooperation geprägt. So hat neben vielen interessanten Forschungsprojekten auch das Thema der vorliegenden Arbeit seinen Ursprung in einer praktisch motivierten Fragestellung, die aus der Kooperation hervorging. An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Herrn Jan Oppermann bedanken, der mir die Möglichkeit gegeben hat, praktische Problemstellungen detailliert mit neuen Forschungsansätzen zu untersuchen. Seine Unterstützung und sein offenes Ohr für interessante Forschungsthemen haben vielfältige Impulse für die Verbindung zwischen Wissenschaft und Praxis im Rahmen unserer Forschung gegeben. Mein Dank gilt auch Dr. Joachim Fest, der mir in vielen Projekten mit Rat und Tat zur Seite stand. Wie am AIP, so konnte ich mich auch bei der Salzgitter Flachstahl GmbH stets über die sehr gute Zusammenarbeit und Arbeitsatmosphäre freuen. Stellvertretend sei hierfür Anton Bolz, Carsten Fabian, Mike Molzberger, Charlotte Rettberg, Oliver Seefried, Jörg Seidel und Sandra Weltzien gedankt.

Da die Erstellung der Arbeit nicht nur fachlich, sondern auch für mein Durchhaltevermögen eine Herausforderung war, gilt mein Dank auch meiner Familie und meinen Freunden, die mir in schwierigen Phasen den nötigen Rückhalt gegeben haben. Meinen Eltern Britta Weutschihofski-Meyer und Ralf Meyer möchte ich dafür danken, dass sie mich auf meinem Weg immer unterstützt haben. Sie haben mir die Möglichkeit gegeben, meine eigenen Erfahrungen zu sammeln und unabhängig davon, welchen Weg ich eingeschlagen habe, immer an mich

geglaubt. Meiner Schwester Lea Meyer danke ich dafür, dass sie der ehrlichste Mensch ist, den ich kenne und sie mich damit oft zum Lachen bringt. Weiterhin möchte mich auch bei Sigrid, Hellmut, Fred und Dirk Meyer für ihre Unterstützung von Kindesbeinen an bedanken. Meinen Schwiegereltern Margret und Friedrich Thon möchte ich dafür danken, dass ich immer auf sie zählen kann. Meinem Schwager Marcus Thon und seiner Frau Mareike danke ich für viele entspannende Momente in stressigen Phasen. Dafür, dass sich trotz aller Arbeit auch Gelegenheiten zum Durchatmen und Lachen fanden, sei auch meinen Freunden gedankt. Stellvertretend möchte ich mich hierfür besonders bei Philipp Schnetter und Marco Peter bedanken, die mich auf meinem Weg nun seit über 20 Jahren begleiten.

Den größten Dank möchte ich meiner wundervollen Frau Simone Meyer aussprechen. Ohne ihr Verständnis und ihren Zuspruch hätte ich die vorliegende Arbeit nicht fertiggestellt. Ihr habe ich es zu verdanken, dass ich auch in schwierigen Phasen nicht das Ziel aus den Augen verloren habe.

Christoph Meyer

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
Einheitenverzeichnis	XXI
Symbolverzeichnis	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	2
2 Grundlagen, Aufgaben und Rahmenbedingungen der Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken	5
2.1 Grundlagen der Entstehung und des Recyclings von Eisenhüttenschlacken	5
2.1.1 Grundlagen der Entstehung von Eisenhüttenschlacken	5
2.1.2 Grundlagen des Recyclings von Eisenhüttenschlacken	8
2.2 Aufgaben der Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken.....	13
2.3 Einflussgrößen der Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken	20
2.3.1 Technische Einflussgrößen.....	20
2.3.1.1 Quellen von Eisenhüttenschlacken.....	20
2.3.1.2 Recyclingprozesse zur Herstellung von Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken	28
2.3.1.3 Senken für Sekundärrohstoffe aus Eisenhüttenschlacken	37
2.3.2 Ökonomische Einflussgrößen.....	40
2.3.2.1 Kosten des Recyclings von Eisenhüttenschlacken	40
2.3.2.2 Erlöse aus dem Verkauf von Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken	43
2.3.3 Ökologische Einflussgrößen.....	48
2.4 Anforderungen an die operative Planung des Recyclings von Eisenhüttenschlacken	52
3 Bestehende Ansätze zur Recyclingplanung	55
3.1 Festlegung eines produktionswirtschaftlichen Bezugsrahmens	55

3.2	Technologische und produktionstheoretische Beschreibungsmittel zur Modellierung	60
3.2.1	Aktivitätsanalyse	61
3.2.2	Produktionsfunktionen	64
3.2.3	Simulationsbasierte Ansätze.....	68
3.3	Erfolgstheoretische Beschreibungsmittel zur Modellierung	72
3.3.1	Kosten und Erlöse als erfolgstheoretische Zielgrößen	72
3.3.2	Ermittlung und Abgrenzung entscheidungsrelevanter Kosten und Erlöse.....	74
3.3.3	Beschreibung von Kosten und Erlösen mittels Erfolgskonzeptionen.....	77
3.4	Techno-ökonomische Entscheidungsunterstützungsansätze zur Recyclingplanung.....	80
3.5	Analyse bestehender Ansätze im Vergleich mit den abgeleiteten Anforderungen.....	87
4	Konzeption und Implementierung eines Ansatzes zur operativen Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken.....	93
4.1	Konzeption des Mengengerüsts auf Basis der Aktivitätsanalyse und Flowsheet-Simulation.....	93
4.2	Konzeption des Wertgerüsts auf Basis der Kosten- und Erlösrechnung sowie Erfolgskonzeptionen.....	103
4.3	Berücksichtigung unsicherer Größen mittels Szenarioanalyse	105
4.4	Formulierung des Entscheidungsmodells.....	107
4.5	Empirische und strukturelle Validierung des Planungsansatzes	113
4.6	Softwaretechnische Implementierung des Planungsansatzes	116
4.6.1	Modellierung in der Flowsheet-Simulationsumgebung Aspen Plus	116
4.6.2	Modellierung in der Optimierungsumgebung LINGO.....	119
4.7	Schematische Darstellung der Ansatzkonzeption und -implementierung.....	120
5	Fallstudienbasierte Anwendung und Validierung des entwickelten Planungsansatzes	123
5.1	Festlegung einer exemplarischen Recyclingnetzwerkstruktur und Datenbasis.....	123
5.2	Formulierung von Leitfragen und Ableitung von Szenarien.....	131
5.3	Szenariobasierte Anwendung des entwickelten Ansatzes.....	132
5.3.1	Szenarioübersicht und Anwendungsvorgehen	132
5.3.2	Zerkleinerungsprozesse mit fixierten Betriebspunkten.....	136

5.3.3	Zerkleinerungsprozesse mit verschiedenen Betriebspunkten (Basisszenario)...	138
5.3.4	Absatz eines neuen Produktes	143
5.3.5	Zusätzliche Recyclingprozesse.....	146
5.3.6	Minimale Absatzmengen.....	150
5.3.7	Fallende Absatzerlöse.....	153
5.3.8	Steigende Beseitigungskosten	156
5.4	Komplexität des entwickelten Ansatzes und praktischer Probleminstanzen	160
5.5	Entscheidungsvalidierung des entwickelten Ansatzes	161
6	Würdigung und Ausblick	169
6.1	Würdigung.....	169
6.1.1	Abgeleitete Anforderungen und Analyse bestehender Ansätze	169
6.1.2	Konzeption und Implementierung des Entscheidungsunterstützungsansatzes... 169	
6.1.3	Anwendung des Entscheidungsunterstützungsansatzes	173
6.2	Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	174
6.3	Ausblick.....	176
7	Zusammenfassung.....	179
	Literaturverzeichnis.....	183

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der Vorgehensweise	4
Abbildung 2: Grobfließbild der Stahlherstellung.....	8
Abbildung 3: Begriffshierarchie ausgehend von der Entsorgung.....	10
Abbildung 4: Entsorgungsübersicht zu Eisenhüttenschlacken	12
Abbildung 5: Exemplarisches Recyclingnetzwerk	15
Abbildung 6: Schema einer SCP-Matrix	17
Abbildung 7: Längsschnitt durch einen Hochofen	21
Abbildung 8: Längsschnitt durch einen Konverter	23
Abbildung 9: Längsschnitt durch einen Elektrolichtbogenofen	25
Abbildung 10: Schema der Nassgranulation.....	31
Abbildung 11: Schema des Zerkleinerns und Trennens mittels Brechen und Sieben	32
Abbildung 12: Exemplarische Korngrößenverteilung	36
Abbildung 13: Rotorschleuderbrecher – Zerkleinerungsgrad bei veränderlicher Massenaufgabe und Rotorumfangsgeschwindigkeit	37
Abbildung 14: Verschiedene Einsatzbereiche für Sekundärrohstoffe aus Eisenhüttenschlacken im Straßenkörper	38
Abbildung 15: Exemplarische Korngrößenverteilung mit zulässigem Bereich.....	39
Abbildung 16: Rotorschleuderbrecher – Energieaufnahme bei veränderlicher Massenaufgabe und Rotorumfangsgeschwindigkeit	43
Abbildung 17: Volumenindex des Auftragseingangs im Bauhauptgewerbe für den Tiefbaubereich	44
Abbildung 18: Bundesdeutscher Zementversand	44
Abbildung 19: Geografische Verteilung von Hüttensandanbietern und -nachfragern	47
Abbildung 20: Übersicht zu Zuordnungswerten gemäß LAGA-Mitteilung 20.....	51
Abbildung 21: Produktionssystem als Regelkreis	56
Abbildung 22: Schema zur Bildung von Entscheidungsmodellen.....	58
Abbildung 23: Entscheidungsorientierte Produktionstheorie	60
Abbildung 24: Überblick über Simulationsansätze	69
Abbildung 25: Zwecke der Kosten- und Erlösrechnung.....	74
Abbildung 26: Exemplarische Verläufe von Kostenfunktionen	78
Abbildung 27: Berücksichtigung fixer und sprungfixer Kosten in Kostenfunktionen	79
Abbildung 28: Berücksichtigung von Preisdifferenzierungen in Erlösfunktionen	79

Abbildung 29: Schematische Darstellung des Brechraumes in einem Backenbrecher	97
Abbildung 30: Beispielverläufe der Whiten-Selektionsfunktion.....	98
Abbildung 31: Beispielverläufe der Whiten-Klassifikationsfunktion	100
Abbildung 32: Exemplarische Eingangs- und Ergebniskorngrößenverteilung.....	101
Abbildung 33: Konzept des Mengengerüstes	103
Abbildung 34: Beispielverläufe für Erlösfunktionen.....	105
Abbildung 35: Erlösfunktion bei stückweise- konstanten Stückerlösen.....	110
Abbildung 36: Schematische Darstellung des Planungsansatzes	120
Abbildung 37: Recyclingnetzwerk für LD-Schlacke in der Fallstudie – Stationärer Anteil	124
Abbildung 38: Recyclingnetzwerk für LD-Schlacke in der Fallstudie – Mobiler Anteil.....	125
Abbildung 39: Eingangskorngrößenverteilung von LD-Schlacke in der Fallstudie.....	127
Abbildung 40: Zerkleinerungsprozesse mit fixierten Betriebspunkten – Lagerbestandsentwicklung für hergestellte Sekundärrohstoffe	138
Abbildung 41: Zerkleinerungsprozesse mit verschiedenen Betriebspunkten – Betriebspunkte im Zeitverlauf.....	141
Abbildung 42: Zerkleinerungsprozesse mit verschiedenen Betriebspunkten – Lagerbestandsentwicklung für hergestellte Sekundärrohstoffe	142
Abbildung 43: Absatz eines neuen Produktes – Betriebspunkte im Zeitverlauf	145
Abbildung 44: Absatz eines neuen Produktes – Lagerbestandsentwicklung für hergestellte Sekundärrohstoffe	145
Abbildung 45: Zusätzliche Recyclingprozesse – Betriebspunkte im Zeitverlauf.....	149
Abbildung 46: Zusätzliche Recyclingprozesse – Lagerbestandsentwicklung für hergestellte Sekundärrohstoffe	150
Abbildung 47: Minimale Absatzmengen – Betriebspunkte im Zeitverlauf.....	152
Abbildung 48: Minimale Absatzmengen – Lagerbestandsentwicklung für hergestellte Sekundärrohstoffe.....	153
Abbildung 49: Fallende Absatzerlöse – Betriebspunkte im Zeitverlauf.....	155
Abbildung 50: Fallende Absatzerlöse – Lagerbestandsentwicklung für hergestellte Sekundärrohstoffe.....	156
Abbildung 51: Steigende Beseitigungskosten – Betriebspunkte im Zeitverlauf	158
Abbildung 52: Steigende Beseitigungskosten – Lagerbestandsentwicklung für hergestellte Sekundärrohstoffe	159
Abbildung 53: Beispielverläufe für Eingangskorngrößenverteilungen	163

Abbildung 54: Beispielverläufe der King-Selektionsfunktion für verschiedene Parametrierungen	165
Abbildung 55: Korngrößenverteilung eines Produktes in der Fallstudie.....	166

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammensetzung von Hochofenschlacken	22
Tabelle 2:	Zusammensetzung von LD-Schlacken	24
Tabelle 3:	Zusammensetzung von Elektroofenschlacken.....	26
Tabelle 4:	Typische Basizitätswerte für Eisenhüttenschlacken.....	27
Tabelle 5:	Zulässige Aktivitätsniveaus bei unterschiedlichen Technologien	62
Tabelle 6:	Übersicht zu herangezogenen Literatur-Reviews	81
Tabelle 7:	Überblick über techno-ökonomische Entscheidungsunterstützungsansätze	83
Tabelle 8:	Vergleich der Anforderungen mit bestehenden Ansätzen	89
Tabelle 9:	Zerkleinerungsgesetze	102
Tabelle 10:	Marktformenübersicht	104
Tabelle 11:	Analyse von LD-Schlacke in der Fallstudie	126
Tabelle 12:	Parametrierung von Unit Operations für Brecher in der Fallstudie.....	127
Tabelle 13:	Betrachtete Produktkorngruppen in der Fallstudie	129
Tabelle 14:	Beispiel-Recyclingkostensatz in der Fallstudie	130
Tabelle 15:	Übersicht über Leitfragen in der Fallstudie	132
Tabelle 16:	Übersicht über Szenarien in der Fallstudie	133
Tabelle 17:	Zerkleinerungsprozesse mit fixierten Betriebspunkten – Absatzmengen und Erlöse	137
Tabelle 18:	Zerkleinerungsprozesse mit verschiedenen Betriebspunkten – Absatzmengen und Erlöse	139
Tabelle 19:	Zerkleinerungsprozesse mit verschiedenen Betriebspunkten – Betriebspunktübersicht	140
Tabelle 20:	Absatz eines neuen Produktes – Absatzmengen und Erlöse.....	143
Tabelle 21:	Absatz eines neuen Produktes – Betriebspunktübersicht	144
Tabelle 22:	Zusätzliche Recyclingprozesse – Absatzmengen und Erlöse	147
Tabelle 23:	Zusätzliche Recyclingprozesse – Betriebspunktübersicht.....	148
Tabelle 24:	Minimale Absatzmengen – Absatzmengen und Erlöse	151
Tabelle 25:	Minimale Absatzmengen – Betriebspunktübersicht	152
Tabelle 26:	Fallende Absatzerlöse – Absatzmengen und Erlöse.....	154
Tabelle 27:	Fallende Absatzerlöse – Betriebspunktübersicht	155
Tabelle 28:	Steigende Beseitigungskosten – Absatzmengen und Erlöse.....	157

Tabelle 29:	Steigende Beseitigungskosten – Betriebspunktübersicht	158
Tabelle 30:	Auswirkungen verschiedener Eingangskorngrößenverteilungen	163
Tabelle 31:	Auswirkungen verschiedener Parametrierungen der King- Selektionsfunktion	165

Abkürzungsverzeichnis

BWI	Bond-Work-Index
CLSCM	Closed-Loop-Supply-Chain-Management
DRI	Direct Reduced Iron
DüMV	Düngemittelverordnung
EPF	Engineering Production Function
ErsatzbaustoffV-E	Ersatzbaustoffverordnung
HBI	Hot Briquetted Iron
KER	Kosten- und Erlösrechnung
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LD	Linz-Donawitz
MantelV-E	Mantelverordnung
MILP	Mixed-Integer-Linear-Problem
OC	Open Circuit
OP	Operating Point
REDR	Relative Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung
RL	Reverse Logistics
RRSB	Rosin, Rammler, Sperling und Bennett
SCM	Supply-Chain-Management
SCP	Supply Chain Planning
SPC	Slag Pot Carrier
TL Gestein-StB	Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau

Einheitenverzeichnis

€	Euro
°C	Grad Celsius
µm	Mikrometer
h	Stunde
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
m	Meter
mm	Millimeter
M.-%	Massenprozent
s	Sekunde
t	Tonne

Symbolverzeichnis

Chemische Elemente und Verbindungen

Al_2O_3	Aluminiumoxid
CaO	Calciumoxid
CO_2	Kohlenstoffdioxid
MgO	Magnesiumoxid
MnO	Manganoxid
Fe	Eisen
FeO	Eisen(II)-oxid
Fe_2O_3	Eisen(III)-oxid
SiO_2	Siliciumdioxid

Aktivitätsanalyse: Indizes

i	Aktivitäten
j	Objektarten
m	Input-Objektarten
n	Output-Objektarten

Aktivitätsanalyse: Größen

\vec{z}_i	Aktivitätsvektor
$z_{i,j}$	Objektartkomponente j in \vec{z}_i
$x_{i,j}$	Input-Objektartkomponente j in \vec{z}_i
$y_{i,j}$	Output-Objektartkomponente j in \vec{z}_i
T	Technologiemenge
λ_i	Aktivitätsniveau

Mengengerüst: Indizes

p	Korngrößenintervall des Brechproduktes
a	Korngrößenintervall des Brechgutes

Mengengerüst: Größen

F_n	Brechprodukt-Massenstrom
$F_{n,p}$	Brechprodukt-Massenstrom im Korngrößenintervall p
F_m	Brechgut-Massenstrom
$F_{m,a}$	Brechgut-Massenstrom im Korngrößenintervall a

$F_{m,p}$	Brechgut-Massenstrom im Korngrößenintervall p
S_a	Selektionsfunktion in Bezug auf Korngrößenintervall a
S_p	Selektionsfunktion in Bezug auf Korngrößenintervall p
$b_{a,p}$	Zerkleinerungsfunktion in Bezug auf die Korngrößenintervalle a und p
d_a	Oberer Grenzdurchmesser des Korngrößenintervalls a
d_p	Oberer Grenzdurchmesser des Korngrößenintervalls p
OSS	Open Side Setting eines Backenbrechers als Parameter der Whiten-Selektionsfunktion
CSS	Closed Side Setting eines Backenbrechers als Parameter der Whiten-Selektionsfunktion
n_w	Parameter der Whiten-Selektionsfunktion
$B_{a,p}$	Kumulative Darstellung der Zerkleinerungsfunktion $b_{a,p}$
β, γ, ϕ	Parameter der Austin-Zerkleinerungsfunktion
$F_{n,g}$	Grobgut-Massenstrom
K_p	Klassifikationsfunktion in Bezug auf Korngrößenintervall p
α	Parameter der Whiten-Klassifikationsfunktion
d_c	Trennkorngröße als Parameter der Whiten-Klassifikationsfunktion
$F(x)$	Verteilungsfunktion
α_r	Formparameter der RRSB-Verteilung
β_r	Skalierungsparameter der RRSB-Verteilung
w	Spezifischer Energiebedarf gemäß Zerkleinerungsgesetz
W_i	Bond-Work-Index
A_{80}	Korndurchmesser der Eingangskorngrößenverteilung bei einem Massenanteil von 80 %
P_{80}	Korndurchmesser der Ergebniskorngrößenverteilung bei einem Massenanteil von 80 %

Wertgerüst: Größen

c_i	Kostensatz für Aktivität i
$c_{i,j}$	Kosten für Objektartquantität j in Aktivität i

Entscheidungsmodell: Indizes

t	Perioden innerhalb des Planungshorizontes
k	Senken
j	Objektarten
i	Verfügbare Aktivitäten
m_i	Mögliche Betriebspunkte für Aktivität i
φ_k	Angenommene Preisniveaus und Mengenintervalle für Senke k

Entscheidungsmodell: Variablen

$z_{k,t}$	Sekundärrohstoffmenge, die in Periode t an Senke k abgesetzt wird
$z_{j,k,t}$	Menge von Objektart j , die in Periode t an Senke k abgesetzt wird
z_{k,t,φ_k}	Sekundärrohstoffmenge, die in Periode t an Senke k zum Preisniveau φ_k abgesetzt wird
$s_{j,t}$	Lagermenge von Objektart j in Periode t
$\lambda_{i,m_i,t}$	Aktivitätsniveau von Aktivität i in Betriebspunkt m_i in Periode t
b_{k,t,φ_k}	Auswahl von Preisniveau φ_k für Senke k in Periode t
$y_{j,t}$	Menge von Objektart j , die in Periode t verbraucht oder erzeugt wird

Entscheidungsmodell: Parameter

c_j^s	Lagerkostensatz für Objektart j
c_{i,m_i}^r	Recyclingkostensatz für Aktivität i in Betriebspunkt m_i
ρ_{k,t,φ_k}	Angenommener Preis für Sekundärrohstoffe, die an Senke k in Periode t im Mengenintervall φ_k abgesetzt werden
ζ_{k,t,φ_k}	Maximale Sekundärrohstoffmenge, die an Senke k in Periode t zum Preisniveau φ_k abgesetzt werden kann
d_{k,t,φ_k}	Ordinatenabschnitt des linearen Segments φ_k der Gesamterlöse, die durch den Verkauf von Sekundärrohstoffen an Senke k in Periode t entstehen
$z_{k,t}^{max}$	Maximale Sekundärrohstoffmenge, die an Senke k in Periode t abgesetzt werden kann
$z_{k,t}^{min}$	Minimale Sekundärrohstoffmenge, die an Senke k in Periode t abgesetzt werden muss
$a_{j,k}$	Technischer/ökologischer Kompatibilitätsparameter, der festlegt, ob Objektart j an Senke k als Sekundärrohstoff abgesetzt werden kann

S_j^{max}	Lagerkapazität für Objektart j
$x_{j,t}$	Zu recycelnde Input-Menge von Objektart j in Periode t
v_{i,j,m_i}	Recyclingkoeffizient, der die verbrauchte oder erzeugte Menge von Objektart j durch Aktivität i in Betriebspunkt m_i festlegt
u_{i,m_i}	Kapazitätsbelastungsfaktor für Aktivität i in Betriebspunkt m_i
U_i^{max}	Kapazität von Aktivität i