

---

# Produktion und Logistik

## **Reihe herausgegeben von**

- B. Fleischmann, Augsburg, Deutschland
- M. Grunow, München, Deutschland
- S. Helber, Hannover, Deutschland
- K. Inderfurth, Magdeburg, Deutschland
- H. Kopfer, Bremen, Deutschland
- H. Meyr, Stuttgart, Deutschland
- T. S. Spengler, Braunschweig, Deutschland
- H. Stadtler, Hamburg, Deutschland
- H. Tempelmeier, Köln, Deutschland
- G. Wäscher, Magdeburg, Deutschland
- C. Bierwirth, Halle, Deutschland
- K. Schimmelpfeng, Stuttgart, Deutschland
- M. Fleischmann, Mannheim, Deutschland
- H.-O. 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>

---

Anna Breitenstein

# Strategische Planung von Landfill-Mining- Vorhaben

Konkretisiert für  
Deponien in Deutschland

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

 Springer Gabler

Anna Breitenstein  
Braunschweig, Deutschland

Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2017

Produktion und Logistik  
ISBN 978-3-658-21941-3                      ISBN 978-3-658-21942-0 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-21942-0>

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 2018

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

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

Landfill Mining – der Rückbau von Deponien mit anschließender Behandlung der rückgebauten Materialien zur Wertstoffrückgewinnung – stellt für rohstoffarme Industrienationen wie Deutschland eine Möglichkeit dar, Sekundärrohstoffe im eigenen Land zu gewinnen und hierdurch einen Beitrag zur Sicherung der Rohstoffverfügbarkeit zu leisten. Studien zufolge ist davon auszugehen, dass in den seit 1975 in Deutschland deponierten Abfällen Eisen, Kupfer und Aluminium im Wert von ca. 9 Mrd. € und heizwertreiche Fraktionen im Wert von ca. 60 Mrd. € enthalten sind. Zudem bietet Landfill Mining die Chance, Grundstücksfläche bzw. Deponievolumen zurückzugewinnen sowie Umweltgefährdungen und Kosten für Deponiestillegung und -nachsorge zu reduzieren bzw. zu vermeiden. Technologien zur effizienten Deponatbehandlung mit dem Ziel einer möglichst umfassenden Wertstofferschließung befinden sich derzeit in der Entwicklung. Inwiefern Landfill Mining gegenüber der derzeit in der Praxis hauptsächlich gewählten Handlungsalternative „Deponiestillegung und -nachsorge“ ökonomisch vorteilhaft ist und wie Landfill-Mining-Prozesse unter Berücksichtigung spezifischer Rahmenbedingungen zu gestalten sind, damit für Deponiebetreiber ein Anreiz besteht, ein Landfill Mining durchzuführen, ist dabei noch weitestgehend ungeklärt. Vielfältige Abhängigkeiten zwischen den Eigenschaften des zu behandelnden Deponats, der Wahl und Kombination geeigneter Behandlungstechnologien, der Stoffstromführung und der Quantität und Qualität der rückzugewinnenden Stoffe erschweren die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Landfill-Mining-Vorhaben, was eine fundierte Entscheidungsunterstützung unerlässlich macht.

Dieser Aufgabe stellt sich Frau Breitenstein. Das Ziel der von ihr vorgelegten Dissertation besteht in der Entwicklung eines Modells zur stoffstrombasierten ökonomischen Bewertung alternativer Landfill-Mining-Prozesse im Vergleich mit der Deponiestillegung und -nachsorge, um hiermit fundierte Analysen vorzunehmen und Handlungsempfehlungen hinsichtlich der strategische Planung von Landfill-Mining-Vorhaben in Deutschland für Deponiebetreiber, politische Entscheidungsträger und potentielle Investoren abzuleiten. Nach einer umfassenden Darstellung der technischen Grundlagen des Landfill-Mining, welche unter anderem die abfallrechtlichen Rahmenbedingungen, den Ablauf eines Landfill-Mining sowie Technologien und Prozesse zur Be-

handlung von Abfällen umfasst, werden betriebswirtschaftliche Fragestellungen von Landfill-Mining-Vorhaben herausgearbeitet und die damit einhergehenden Herausforderungen der strategischen Planung beschrieben. Darauf aufbauend leitet Frau Breitenstein Anforderungen an einen Ansatz zur strategischen Planung von Landfill-Mining-Vorhaben ab, ordnet die Thematik in die Betriebswirtschaftslehre ein und diskutiert, inwiefern bestehende Ansätze der Technologieplanung die zuvor aufgestellten Anforderungen erfüllen. Da bisher keiner der vorliegenden Ansätze die Analyse des Einflusses unterschiedlicher Wertstoffgehalte in Deponien sowie unterschiedlich komplexer LFM-Prozesse auf die Profitabilität von Landfill-Mining-Vorhaben erlaubt, entwickelt Frau Breitenstein ein Entscheidungsunterstützungsmodell zur Technologieplanung, welches eine stoffstrombasierte ökonomische Bewertung alternativer LFM-Prozesse im Vergleich mit der Deponiestilllegung und -nachsorge aus Sicht eines Deponiebetreibers ermöglicht. Das Modell wird im Anschluss genutzt, um umfangreiche Analysen anzustellen und Handlungsempfehlungen für die Akteure abzuleiten.

Frau Breitenstein greift mit ihrer Dissertation einen Themenkomplex auf, der von hoher praktischer Relevanz und Aktualität sowie gleichermaßen theoretischem Anspruch gekennzeichnet ist. Die vorliegende Dissertation leistet einen betriebswirtschaftlich bedeutenden Forschungsbeitrag zum Themenkomplex der Erschließung von Sekundärrohstoffpotenzialen, insbesondere zum Landfill-Mining. Das von Frau Breitenstein entwickelte Modell zur stoffstrombasierten ökonomischen Bewertung alternativer Landfill-Mining-Prozesse verknüpft problemadäquat etablierte Methoden und Ansätze aus der Literatur und ist zielgerichtet an den Anforderungen der Praxis ausgerichtet. Mit dem Modell liegt ein neuartiges Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung hinsichtlich der Technologiewahl im Rahmen der strategischen Planung von Landfill-Mining-Vorhaben vor, welches auf Basis einer detaillierten aktivitätsanalytischen Stoffstrommodellierung und -simulation die komplexen Interdependenzen zwischen Inputzusammensetzung, Prozessgestaltung und resultierenden Wert- und Reststoffen abbilden kann. Erst hierdurch wird die Analyse des Einflusses der Deponiezusammensetzung auf die Wirtschaftlichkeit alternativer Landfill-Mining-Prozesse mit unterschiedlicher Prozesskomplexität möglich.

Univ.-Prof. Dr. Thomas Stefan Spengler

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Produktion und Logistik des Instituts für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion der Technischen Universität Braunschweig. Meine Zeit am Lehrstuhl wird mir immer in positiver Erinnerung bleiben, auch wenn mancher Weg steinig war und manche Herausforderung unüberwindbar schien. Am Ende wurde alles gut und so blicke ich auf fünf lehrreiche Jahre zurück, an denen ich gewachsen bin. Gesäumt wurde mein Weg von vielen schönen Momenten und positiv bestätigenden Erfahrungen, die maßgeblich auf die Menschen zurückzuführen sind, die mich in dieser Zeit begleitet haben. Dafür möchte ich „Danke“ sagen.

Ein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Thomas S. Spengler für all die Erfahrungen, die er mir ermöglicht hat, die herausfordernden Ziele, die er mir gesteckt hat, für sein Vertrauen in mich, für die konstruktive Kritik, für seinen Rat und seine Lösungsvorschläge. Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie für die sehr angenehme Zusammenarbeit im Forschungsprojekt „TönsLM“. Seine Erläuterungen, Ideen und sein Feedback im Rahmen des „TönsLM“-Projektes haben definitiv Eingang in meine Dissertation gefunden. Prof. Dr. David M. Woisetschläger sei für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission gedankt. Birgit Haupt danke ich für die administrative Unterstützung und die vielen guten Tipps.

Die positiven Erinnerungen an meine Promotionszeit sind maßgeblich auf das Lehrstuhlteam zurückzuführen. Meinem Teamleiter Karsten Kieckhäfer danke ich für die konstruktiven Diskussionen, sein Zeitmanagement, seine Verlässlichkeit, seine fachlichen Ideen und Hinweise. Ein besonderer Dank gilt Isa von Hoesslin und Christian Thies für ihre großartige Unterstützung, insbesondere auf den letzten Metern: Ihre offenen Ohren, ihre aufmunternden und motivierenden Worte, ihre Ratschläge sowie die vielen Diskussionen zu Inhalt oder Vorgehensweise haben mir sehr geholfen. Vielen lieben Dank allen weiteren (ehemaligen) Kollegen: Maren Gäde, Martin Grunewald, Claas Hoyer, Christian Huth, Christoph Hüls, Christoph Johannes, Andreas Matzke, Christoph Meyer, Christoph Müller, Karen Puttkammer, Ina Schlei-Peters, Kerstin Schmidt, Natalia Stepien, Thomas Volling, Katharina Hibbeln, Christian Weckenborg,

Matthias Wichmann, Sönke Wieczorrek und Kai Wittek. Gemeinsam haben wir viel gelacht, wissenschaftlich oder auch unwissenschaftlich diskutiert, spannenden oder langweiligen Vorträgen gelauscht, Nächte durchgemacht – wegen der Arbeit oder zum Vergnügen, getanzt, gefeiert, gute Gespräche geführt, Berge erklommen, Wein probiert und noch vieles mehr. Danke für die tolle Zeit.

Meine Dissertation ist eng mit dem vom BMBF geförderten Forschungsprojekt „TönsLM“ verbunden. Ich danke den Projektpartnern Dr. Michael Krüger, Bernd Becker, Prof. Dr.-Ing. Klaus Fricke, Dr.-Ing. Kai Münnich, Sebastian Wanka, Prof. Dr.-Ing. Norbert Dichtl, Karsten Fülling, Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz, Anja Maul, Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker, Martin Rotheut, Florian Knappe, Joachim Reinhardt, Stefanie Theis und Günter Dehoust für die gute Zusammenarbeit, die Einblicke in die Techniken der Abfallbehandlung, in die Kreislaufwirtschaft und in die ökologische Bewertung, für die umfangreichen Daten, die konstruktiven Diskussionen und ihr Feedback.

Meiner Familie, insbesondere Bettina, Guido, Christian, Claudia, Nele, Gisela, Jürgen, Sabine, Alfred und Guni, danke ich für Rat, Tat und Unterstützung in allen Lebenslagen, für sowohl aufbauende als auch mahnende Worte, fürs Zuhören und dafür, dass sie schon seit so langer Zeit immer für mich da sind. Meinen Freunden danke ich für die nötige Zerstreuung bei schönen Unternehmungen oder gemütlichen Abenden.

Von ganzem Herzen möchte ich meinem Ehemann Boris danken – sowohl fachlich, für den Grundkurs in mechanischer und thermischer Abfallbehandlung sowie für sein wertvolles Feedback zu all meinen Veröffentlichungen, als auch menschlich, für seine Unterstützung und Zuversicht, sein Verständnis, seine motivierenden, anspornenden, tröstenden Worte, für die vielen schönen gemeinsamen Erlebnisse, für den Halt, den er mir gibt, und vor allem für seine uneingeschränkte Liebe.

Anna Breitenstein



# Inhaltsverzeichnis

Geleitwort.....	V
Vorwort.....	VII
Inhaltsverzeichnis .....	IX
Abbildungsverzeichnis .....	XIII
Tabellenverzeichnis .....	XVII
Symbolverzeichnis.....	XXI
Abkürzungsverzeichnis .....	XXVII
Einheitenverzeichnis .....	XXIX
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage und Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	4
<b>2 Grundlagen des Landfill Mining.....</b>	<b>11</b>
2.1 Begriffsbestimmungen und abfallrechtliche Rahmenbedingungen des Landfill Mining.....	12
2.1.1 Begriffsbestimmungen.....	12
2.1.2 Abfallrechtliche Rahmenbedingungen.....	25
2.2 Landfill Mining zur Wertstoffrückgewinnung aus Deponien.....	33
2.2.1 Sekundärrohstoffpotenzial von Siedlungsabfalldponien in Deutschland.....	33
2.2.2 Ablauf eines Landfill Mining.....	37
2.2.3 Technologien zur Behandlung von Abfällen bzw. Deponat .....	39
2.2.4 Landfill-Mining-Prozesse zur Wertstoffrückgewinnung.....	43

2.2.5	Wertstoffe und Reststoffe beim Landfill Mining .....	46
2.2.6	Landfill-Mining-Akteure .....	47
2.3	Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit von Landfill-Mining-Vorhaben .....	50
2.4	Herausforderungen bei der strategischen Planung von Landfill-Mining-Vorhaben .....	55
<b>3</b>	<b>Strategische Planung von Landfill-Mining-Vorhaben.....</b>	<b>57</b>
3.1	Anforderungen an einen Ansatz zur strategischen Planung von Landfill-Mining-Vorhaben .....	57
3.2	Einordnung der Landfill-Mining-Planungsaufgaben in die Betriebswirtschaftslehre .....	60
3.2.1	Einordnung.....	60
3.2.2	Bewertungsmethoden.....	65
3.2.3	Bestimmung des Wertgerüsts .....	71
3.2.4	Bestimmung des Mengengerüsts.....	76
3.3	Ansätze zur Technologieplanung und -bewertung von Landfill-Mining-Vorhaben .....	78
3.4	Beurteilung der Ansätze für die Technologieplanung und -bewertung von Landfill-Mining-Vorhaben.....	81
<b>4</b>	<b>Modell zur stoffstrombasierten ökonomischen Bewertung alternativer Landfill-Mining-Prozesse .....</b>	<b>87</b>
4.1	Konzeption .....	87
4.1.1	Vorgehen zur Technologiebewertung .....	87
4.1.2	Bestimmung des Wertgerüsts .....	91
4.1.3	Bestimmung des Mengengerüsts.....	93
4.1.4	Analyse des Einflusses veränderter Rahmenbedingungen .....	100
4.2	Mathematische Modellierung.....	101
4.3	Implementierung mit Hilfe von Softwaretools .....	110

---

4.4	Validierung .....	116
<b>5</b>	<b>Analyse und Bewertung von Landfill Mining in Deutschland.....</b>	<b>119</b>
5.1	Fragestellungen und Untersuchungsdesign .....	119
5.2	Untersuchte Landfill-Mining-Prozesse .....	120
5.3	Landfill Mining – eine wirtschaftliche Option für die Deponie „Pohlsche Heide“?.....	131
5.3.1	Rahmenbedingungen und Charakteristika der Deponie „Pohlsche Heide“ .....	132
5.3.2	Parametrierung des stoffstrombasierten ökonomischen Bewertungsmodells für die „Pohlsche Heide“ – Deponie- und LFM-spezifische Einstellungen .....	135
5.3.3	Ergebnisse der Technologiebewertung für die Deponie „Pohlsche Heide“ .....	150
5.4	Analysen zum Landfill Mining in Deutschland .....	160
5.5	Ableitung von Handlungsempfehlungen .....	168
<b>6</b>	<b>Kritische Würdigung und Ausblick .....</b>	<b>175</b>
6.1	Kritische Würdigung .....	175
6.2	Ausblick .....	181
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>183</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>187</b>
	<b>Verzeichnis der Rechtsquellen .....</b>	<b>199</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>201</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prinzipskizze des Multibarrierenkonzeptes .....	14
Abbildung 2:	Deponielebenszyklus .....	19
Abbildung 3:	Abgrenzung der Begrifflichkeiten Deponierückbau, Landfill Mining, Enhanced Landfill Mining und Deponieumlagerung .....	25
Abbildung 4:	Durchschnittliche Zusammensetzung einer Standard Deponie, aus 60 Landfill-Mining-Projekten berechnet .....	34
Abbildung 5:	Ablauf eines Landfill Mining .....	38
Abbildung 6:	Wechselseitige Abhängigkeiten zwischen Input, LFM-Prozessgestaltung und Output .....	43
Abbildung 7:	Beispielhafter LFM-Prozess mit geringem Behandlungsaufwand .....	45
Abbildung 8:	Monetäre Größen zur Ermittlung des ökonomischen Erfolgs .....	52
Abbildung 9:	Supply-Chain-Planning-Matrix .....	61
Abbildung 10:	Aufgaben, Entscheidungen und Methoden in der Technologiebewertung .....	64
Abbildung 11:	Genauigkeit der Ergebnisse verschiedener Investitionsschätzungsverfahren .....	74
Abbildung 12:	Technologiebewertungsvorgehen.....	91
Abbildung 13:	Fließbildausschnitt zur Veranschaulichung der aktivitätsanalytischen Stoffstrommodellierung .....	94
Abbildung 14:	Prinzip der aktivitätsanalytischen Modellierung (links) und der Simulation (rechts) im Vergleich .....	97
Abbildung 15:	Konzept zur stoffstrombasierten ökonomischen Bewertung alternativer LFM-Prozesse im Vergleich mit der Deponiestillegung und -nachsorge.....	99

Abbildung 16:	Struktur, Funktionsweise und Zusammenwirken des Umberto- und Excel-Tools .....	115
Abbildung 17:	LFM-Prozesse 1a und 1b .....	123
Abbildung 18:	Vorkonditionierung mit geringem Aufwand (Variante A).....	125
Abbildung 19:	LFM-Prozesse 2a und 2b.....	125
Abbildung 20:	Nass-mechanische Feinkornaufbereitung .....	126
Abbildung 21:	Vorkonditionierung mit mittlerem Aufwand (Variante D).....	127
Abbildung 22:	LFM-Prozess 3a.....	128
Abbildung 23:	Vorkonditionierung mit hohem Aufwand (Variante C).....	129
Abbildung 24:	LFM-Prozess 3b .....	130
Abbildung 25:	Vorkonditionierung mit mittlerem Aufwand (Variante B) .....	131
Abbildung 26:	Korngrößenanteile des Deponats der Deponie „Pohlsche Heide“ [Ma. %] .....	134
Abbildung 27:	Zusammensetzung der Deponie „Pohlsche Heide“ nach Materialarten, inkl. detaillierter Aufschlüsselung der Fraktion < 25 mm [Ma. %] .....	134
Abbildung 28:	Kapitalwert und zugehörige Zahlungskategorien der sechs LFM-Prozesse im Vergleich mit dem Kapitalwert der Deponiestillegung und -nachsorge für die „Pohlsche Heide“ für den Fall des Grundstücksverkaufs.....	151
Abbildung 29:	Kapitalwert und zugehörige Zahlungskategorien der sechs LFM-Prozesse im Vergleich mit dem Kapitalwert der Deponiestillegung und -nachsorge für die „Pohlsche Heide“ für den Fall der Nutzung rückgewonnener Deponiekapazitäten.....	151
Abbildung 30:	Veränderung der Kapitalwertdifferenz für die sechs LFM-Prozesse bei Variation des Deponierungspreises für den Fall des Grundstücksverkaufs.....	153

---

Abbildung 31:	Veränderung der Kapitalwertdifferenz für die sechs LFM-Prozesse bei Variation des Grundstückspreises .....	154
Abbildung 32:	Veränderung der Kapitalwertdifferenz für die sechs LFM-Prozesse bei Variation des Deponievolumenwertes.....	155
Abbildung 33:	Veränderung der Kapitalwertdifferenz für die sechs LFM-Prozesse bei Variation der Nachsorgedauer .....	156
Abbildung 34	Veränderung der Kapitalwertdifferenz für die sechs LFM-Prozesse bei Variation des MVA-Materialpreises .....	157
Abbildung 35:	Veränderung der Kapitalwertdifferenz für die sechs LFM-Prozesse bei Variation des EBS-Preises .....	157
Abbildung 36	Veränderung der Kapitalwertdifferenz für die sechs LFM-Prozesse bei Variation des Preises der Fe-Fraktion.....	158
Abbildung 37:	Veränderung der Kapitalwertdifferenz für die sechs LFM-Prozesse bei Variation des Preises der NE-Fraktion .....	159
Abbildung 38:	Veränderung der Kapitalwertdifferenz für die sechs LFM-Prozesse bei Variation des Kiespreises.....	159

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Leitfragen der Adressaten und Eingliederung innerhalb dieser Arbeit.....	9
Tabelle 2:	Sekundärrohstoffpotenzial deutscher Siedlungsabfalldeponien nach Rettenberger .....	35
Tabelle 3:	Abgleich der Ansätze zur Technologieplanung und -bewertung von LFM-Vorhaben mit den Anforderungen an einen strategischen Planungsansatz .....	83
Tabelle 4:	Entscheidungsrelevante, monetäre Größen beim Landfill Mining.....	90
Tabelle 5:	Beispielhafte aktivitätsanalytische Modellierung des Ausschnitts eines LFM-Prozesses .....	95
Tabelle 6:	Schritte der Validierung .....	116
Tabelle 7:	Übersicht LFM-Prozesse .....	121
Tabelle 8:	Charakteristika des Deponats der „Pohlschen Heide“ .....	135
Tabelle 9:	Gesamtenergie- und -stoffstrombilanzen der sechs LFM-Prozesse für die Zusammensetzung der Deponie „Pohlsche Heide“, normiert auf eine Tonne rückgebautes Deponat (Umweltvektoren $z^{UW, spezifisch, l}$ ) – negative Vorzeichen kennzeichnen Inputs, positive Vorzeichen kennzeichnen Outputs.....	137
Tabelle 10:	Maschinendurchsätze (Aktivitätsniveau $\lambda_{Masch}^{l,s,m}$ ), normiert auf eine Tonne rückgebautes Deponat.....	138
Tabelle 11:	Durchsatz pro Prozessschritt $\lambda_{Schritt}^{l,s}$ , normiert auf eine Tonne rückgebautes Deponat.....	139
Tabelle 12:	Transportentfernungen [km] .....	139

Tabelle 13:	Transportleistung $x_i^{Transp\_spezifisch}$ , normiert auf eine Tonne rückgebautes Deponat.....	139
Tabelle 14:	Energie- und Stoffstrompreise – positive Preise stehen für einen positiven, negative Preise für einen negativen Marktwert .....	141
Tabelle 15:	LFM-spezifische Einstellungen.....	142
Tabelle 16:	Maschinenpreis bei angegebener Basiskapazität – Grundlage für die Investitionsschätzung mittels Faktormethode .....	143
Tabelle 17:	Zuschlagsfaktoren zur Ermittlung der Investitionen der verschiedenen LFM-Prozesse auf Basis der Maschinenpreise .....	145
Tabelle 18:	Art und Anzahl der Mitarbeiter pro Prozessschritt für die verschiedenen LFM-Prozesse bei Basiskapazität sowie die damit einhergehenden jährliche Zahlungen je Mitarbeiter.....	146
Tabelle 19:	Deponiespezifische Einstellungen .....	147
Tabelle 20:	Zuschlagsfaktoren für die Berechnung der fixen, investitionsabhängigen Zahlungen.....	147
Tabelle 21:	Allgemeine Einstellungen.....	148
Tabelle 22:	Kostensätze für Deponiebetrieb, -stilllegung und -nachsorge .....	149
Tabelle 23:	Zusammensetzung fiktiver Deponien mit hohem und mit niedrigem Wertstoffgehalt im Vergleich zur „Pohlschen Heide“ (mittlerer Wertstoffgehalt).....	161
Tabelle 24:	Break-Even-Werte der untersuchten Parameter, für die die zugehörigen LFM-Prozesse im Vergleich zur Deponiestilllegung (10 Jahre) und -nachsorge (30 Jahre) ökonomisch vorteilhaft werden.....	164
Tabelle A. 1	Umweltvektoren $z^{UW,spezifisch,l}$ der sechs LFM-Prozesse für die Zusammensetzung einer Deponie mit niedrigem Wertstoffgehalt, normiert auf eine Tonne rückgebautes Deponat	



	– negative Vorzeichen kennzeichnen Inputs, positive Vorzeichen kennzeichnen Outputs.....	201
Tabelle A. 2:	Transportleistung $x_i^{Transp\_spezifisch}$ für eine Deponie mit niedrigem Wertstoffgehalt, normiert auf eine Tonne rückgebautes Deponat.....	202
Tabelle A. 3:	Maschinendurchsätze (Aktivitätsniveau $\lambda_{Masch}^{l,s,m}$ ) für eine Deponie mit niedrigem Wertstoffgehalt, normiert auf eine Tonne rückgebautes Deponat.....	203
Tabelle A. 4:	Umweltvektoren $z^{UW,spezifisch,l}$ der sechs LFM-Prozesse für die Zusammensetzung einer Deponie mit hohem Wertstoffgehalt, normiert auf eine Tonne rückgebautes Deponat – negative Vorzeichen kennzeichnen Inputs, positive Vorzeichen kennzeichnen Outputs.....	204
Tabelle A. 5:	Maschinendurchsätze (Aktivitätsniveau $\lambda_{Masch}^{l,s,m}$ ) für eine Deponie mit hohem Wertstoffgehalt, normiert auf eine Tonne rückgebautes Deponat.....	205
Tabelle A. 6:	Transportleistung $x_i^{Transp\_spezifisch}$ für eine Deponie mit hohem Wertstoffgehalt, normiert auf eine Tonne rückgebautes Deponat.....	206

# Symbolverzeichnis

## Indizes

$i$	Index der Teilstoffströme ( $i = 1, \dots, I$ )
$k$	Index der Objektarten ( $k = 1, \dots, \kappa$ )
$l$	Index der LFM-Prozesse ( $l = 1, \dots, L$ )
$m$	Index der Maschinen ( $m = 1, \dots, M$ )
$p$	Index der Personalart ( $p = 1, \dots, P$ ); die Personalart gibt Auskunft über das Qualifikationsniveau des jeweiligen Mitarbeiters
$\rho$	Index der Aktivitäten ( $\rho = 1, \dots, \pi$ )
$s$	Index der Prozessschritte ( $s = 1, \dots, S$ )
$t$	Index der Perioden ( $t = 1, \dots, T$ ), wobei $T$ dem Planungszeitraum bzw. der Dauer des LFM-Vorhabens entspricht

## Variablen und Parameter

Größe	Einheit	Beschreibung
$A_{Grund}$	$m^2$	Grundstücksfläche bzw. Deponiegrundfläche
$A_t^{Restfläche}$	$ha$	Restgrundfläche der noch nicht zurückgebauten Deponie in Periode $t$
$b_s^{Bauw}$	%	Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der Auszahlungen für Bauwerke (neuer Prozess auf bestehendem Fabrikgelände)
$b_s^{Elek}$	%	Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der Auszahlungen für Elektrik (installiert)
$b_s^{Eng}$	%	Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der Auszahlungen für Engineering und Überwachung
$b_{t,s,m}^{Fix,RWI}$	%/a	Faktor zur Berechnung der jährlichen fixen Auszahlungen für Reparatur, Wartung und Instandhaltung der Maschine $m$ des Prozessschrittes $s$ in Periode $t$
$b_{t,s}^{Fix,V\&S}$	%/a	Faktor zur Berechnung der jährlichen fixen Auszahlungen für Versicherung und Steuern des Prozessschrittes $s$ in Periode $t$
$b_s^{Geb}$	%	Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der Auszahlungen für Gebühren
$b_s^{Gelän}$	%	Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der Auszahlungen für die Geländerschließung
$b_s^{Geneh}$	%	Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der Auszahlungen für Genehmigungsverfahren

$b_s^{Inst}$	%	Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der Auszahlungen für die Installation der Apparate und Maschinen
$b_s^{Land}$	%	Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der Auszahlungen für den Grundstückserwerb
$b_s^{MSR}$	%	Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der Auszahlungen für Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (installiert)
$b_s^{Neben}$	%	Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der Auszahlungen für Betriebseinrichtungen u. Nebenanlagen
$b_s^{Ov}$	%	Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der zahlungsgleichen Errichtungsgemeinkosten (Overhead)
$b_s^{Rohr}$	%	Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der Auszahlungen für Rohrleitungen (installiert)
$b_s^{RW}$	%	Faktor zur Ermittlung des Restwertes der Betriebsmittel des Prozessschrittes $s$
$b_s^{Schritt,direkt}$	%	Sammel-Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der direkten Investitionen eines Prozessschrittes $s$
$b_s^{Schritt,indirekt}$	%	Sammel-Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der Gesamtinvestitionen einer Anlage / eines Prozessschrittes
$b_s^{Unvorh}$	%	Zuschlagsfaktor zur Ermittlung der Auszahlungen für Unvorhergesehenes
$b_{Verwaltung}$	%/a	Faktor zur Berechnung der jährlichen Zahlungen für Verwaltungspersonal bezogen auf die jährlichen Auszahlungen für Personal
$C_{t,l}^{Fix}$	€/a	Fixe, investitionsabhängige Auszahlungen des LFM-Prozesses $l$ in Periode $t$
$C_{t,l}^{Personal}$	€/a	Auszahlungen für Betriebspersonal in Periode $t$ des LFM-Prozesses $l$
$C_{t,l}^{Prozess}$	€/a	Prozessbedingte Auszahlungen des LFM-Prozesses $l$ in Periode $t$
$C_{t,l}^{RW1}$	€/a	Auszahlungen für verschleißbedingte Reparatur, Wartung und Instandhaltung in Periode $t$ des LFM-Prozesses $l$
$C_{t,l}^{Stoff}$	€/a	Energie- und stoffstrombedingte Ein- und Auszahlungen des LFM-Prozesses $l$ in Periode $t$
$C_t^{Umweltüberwachung}$	€/a	Auszahlungen für die Umweltüberwachung der noch nicht zurückgebauten Deponieabschnitte während des Deponierückbaus in Periode $t$
$C_{t,l}^{Verwaltung}$	€/a	Auszahlungen für Verwaltungspersonal in Periode $t$ des LFM-Prozesses $l$
$D_{Abfall}$	$t/m^3$	Einbaudichte des abgelagerten Abfalls
$D_{FK}$	$t/m^3$	Einbaudichte des wieder abgelagerten Feinkorns < 60 mm
$\delta_i^p$		Behandlungswirkungsgrad der Aktivität $p$ für den Teilstoffstrom $i$
$i$	%/a	Kalkulationszinssatz
$I_{0,l}$	€	Gesamtinvestitionen bzw. kumulierte Anfangsauszahlungen des LFM-Prozesses $l$ bis zu seiner Inbetriebnahme ( $t = 0$ )
$I_{0,l}^{Betriebsmittel}$	€	Investitionen, die zur Errichtung aller Anlagen der verschiedenen

		Prozessschritte eines bestimmten LFM-Prozesses $l$ bis zur Inbetriebnahme (in $t = 0$ ) zu tätigen sind
$I_0^{\text{Genehmigung}}$	€	Auszahlungen für Genehmigungen des Deponierückbaus sowie des LFM-Vorhabens insgesamt
$I_0^{\text{Machbarkeit}}$	€	Auszahlungen für das Durchführen der Machbarkeitsstudie
$I_0^{\text{Planung}}$	€	Alle Auszahlungen, die für die Planung und Vorbereitung des Deponierückbaus sowie für die Koordination der verschiedenen Prozessschritte bis zur Inbetriebnahme eines LFM-Vorhabens (in $t = 0$ ) getätigt werden müssen
$I_{0,l,s}^{\text{Schritt,ges.}}$	€	Summe aller Investitionen des Prozessschrittes $s$ des LFM-Prozesses $l$ , die bis zur Inbetriebnahme zu tätigen sind
$I_{0,l,s}^{\text{Schritt,direkt}}$	€	Summe der direkten Investitionen des Prozessschrittes $s$ des LFM-Prozesses $l$ , die bis zur Inbetriebnahme zu tätigen sind
$I_0^{\text{Sicherheit}}$	€	Auszahlungen für die Erstellung eines Sicherheitskonzeptes
$I_0^{\text{Stabilisierung}}$	€	Auszahlungen für die aerobe Stabilisierung der Deponie, falls erforderlich
$I_0^{\text{Vorerkundung}}$	€	Auszahlungen für die Durchführung der Vorerkundungen (historische Erkundung & Deponieerkundung)
$Kapa_{s,m}^{\text{Masch}}$	$\frac{t}{h}$ pro Stück	Basiskapazität der Maschine $m$
$KW_l^{\text{LFM}}$	€	Kapitalwert des LFM-Prozesses $l$
$KW^{\text{DSN}}$	€	Kapitalwert der Deponiestilllegung und -nachsorge
$L_{t,l}$	€	Liquidationsein- und -auszahlungen des LFM-Prozesses $l$ in der Periode $t = T$
$L_T^{\text{Dep.Kapa}}$	€	Liquidationseinzahlungen durch den Verkauf des frei gewordenen Deponievolumens bzw. durch die Wiederverfüllung der gewonnenen Deponiekapazitäten
$L_T^{\text{Grund}}$	€	Liquidationseinzahlungen durch den Verkauf des rückgewonnenen Grundstücks
$L_T^{\text{Rück.Umwelt}}$	€	Liquidationsauszahlungen für Rückbau der Anlagen und Infrastruktur zur Umweltüberwachung
$L_{T,l}^{\text{RW}}$	€	Liquidationseinzahlungen durch den Verkauf der Betriebsmittel zu Zeit- bzw. Restwert
$\lambda^{\rho}$	$t$	Aktivitätsniveau (Durchsatz) der Aktivität $\rho$
$\lambda_{\text{Masch}}^{l,s,m}$	$\frac{t}{t \text{ Deponat}}$ pro Stück	spezifischer Durchsatz der Maschine $m$ des Prozessschrittes $s$ und des LFM-Prozesses $l$ , normiert auf 1 $t$ rückgebautes Deponat
$\lambda_{\text{Schritt}}^{l,s}$	$\frac{t}{t \text{ Deponat}}$	spezifischer Durchsatz des Prozessschrittes $s$ des LFM-Prozesses $l$ , normiert auf 1 $t$ rückgebautes Deponat
$p_t^{\text{DepGas}}$	€/m <sup>2</sup>	Kostensatz für Deponiegasfassung und -behandlung pro Quadratmeter verbleibende Grundfläche der im Rückbau befindlichen Deponie in Periode $t$
$p_t^{\text{Dep.Kapa}}$	€/m <sup>3</sup>	Wert des frei gewordenen Deponievolumens bzw. der Deponiekapazität pro Kubikmeter

$p_t^{Grund}$	$\text{€}/m^2$	Deponiegrundstückspreis pro Quadratmeter
$p_{s,m,t}^{Masch}$	$\frac{\text{€}}{\text{Stück}}$	Listenpreis der Maschine $m$ in Periode $t$ für eine bestimmte Basiskapazität $Kapa_m^{Masch}$
$p_{p,t}^{Personal}$	$\text{€}/a$	Gehalt (Arbeitgeber Brutto) pro Mitarbeiter der Personalart $p$ in Periode $t$
$p_{s,t}^{RW1}$	$\text{€}/t$	Kostensatz pro Tonne behandeltes Material für verschleißbedingte Reparatur, Wartung und Instandhaltung der Betriebsmittel des Prozessschrittes $s$ in Periode $t$
$p_t^{Sickerw}$	$\text{€}/a$	Auszahlungen für Sickerwasserfassung und -behandlung in Periode $t$
$p_t^{Sonst}$	$\text{€}/m^2$	Kostensatz für sonstige Maßnahmen zur Umweltüberwachung (Monitoring, Dokumentation etc.) pro Quadratmeter verbleibende Grundfläche der im Rückbau befindlichen Deponie in Periode $t$
$p_{k,t}^{Stoff}$	$\text{€}/t$	Preis der Objektart $k$ in Periode $t$ ; ein positives Vorzeichen kennzeichnet erwünschte (Wertstoff), ein negatives Vorzeichen unerwünschte Objektart (Reststoff)
$p_t^{Transp}$	$\frac{\text{€}}{t \cdot km}$	Transportkostensatz
$T_s^{Betrieb}$	$h/a$	Jährliche Betriebsstunden des Prozessschrittes $s$
$T_s^{Abschreibung}$	$a$	Abschreibungszeitraum der Betriebsmittel des Prozessschrittes $s$
$T^{Personal}$	$h/a$	Verfügbare Arbeitsstunden eines Mitarbeiters pro Jahr (Urlaubs- und Krankheitstage sind bereits abgezogen)
$V^{Dep}$	$m^3$	Volumen des insgesamt abgelagerten Abfalls bzw. rückzubauenden Deponats vor LFM-Beginn
$V_t^{Dep,Kapa}$	$m^3$	Durch Rückbau frei gewordenes Deponievolumen, welches der neu gewonnen Deponiekapazität entspricht
$V^{Rück}$	$m^3/a$	Pro Jahr zurückzubauendes Deponatvolumen bzw. -menge
$\chi^{Rück}$	$t/a$	Pro Jahr zurückzubauende Deponatmenge
$\chi^{Grund}$	-	Entscheidungsvariable, die den Wert 1 annimmt, wenn das Grundstück nach Ende des LFM-Vorhabens verkauft werden soll oder den Wert 0 annimmt, wenn die Deponie weiter betrieben und die gewonnenen Deponiekapazitäten zur erneuten Verfüllung genutzt werden
$\chi_{p,s}^{Personal}$	Stück	Anzahl an Mitarbeitern der Personalart $p$ , die gleichzeitig während einer Schicht für den Prozessschritt $s$ bei Basiskapazität benötigt werden
$\chi_t^{Rest}$	$t$	Noch nicht zurückgebaute Deponatmenge in Periode $t$ während des Deponierückbaus
$\chi_{l,s}^{Schritt}$	Stück	Variable, die angibt, in welcher Anzahl der Prozessschritt $s$ für den LFM-Prozesses $l$ benötigt wird
$\chi_{l,s,m}^{Schritt,Masch}$	Stück	Variable, die angibt in welcher Anzahl die Maschine $m$ für den Prozessschritt $s$ des LFM-Prozesses $l$ benötigt wird
$\chi_l^{Transp,spezifisch}$	$t \cdot km$	Spezifische Transportleistung des LFM-Prozesses $l$ , normiert auf

---

		1 t rückgebautes Deponat
$z^\rho$	-	Aktivitätsvektor der Aktivität $\rho$
$z^{l,s,m}$	-	Aktivitätsvektor der Maschine $m$ des Prozessschrittes $s$ und LFM-Prozesses $l$
$z_k^\rho$	$t$	Komponente des Aktivitätsvektors $z^\rho$ bzw. Menge der Objektart $k$ , die in die Aktivität $\rho$ eingeht bzw. diese verlässt
$z^{UW,l}$	$t$	Umweltvektor des LFM-Prozesses $l$
$z_k^{UW,l}$	$t$	Menge der Systemgrenze-überschreitenden (Input-/Output-) Objektart $k$ des LFM-Prozesses $l$
$z_k^{UW,spezifisch,l}$	$\frac{t}{t \text{ Deponat}}$	Spezifische Menge der Systemgrenze-überschreitenden (Input-/Output-) Objektart $k$ des LFM-Prozesses $l$ , normiert auf 1 t Deponat

## Abkürzungsverzeichnis

BDSV	Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V.
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
bvse	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V.
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DK	Deponieklasse
DSN	Deponiestilllegung und -nachsorge
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
EBS	Ersatzbrennstoff
ELFM	Enhanced Landfill Mining
Fe	Eisen
FK	Feinkornfraktion < 60 µm
FKA	Feinkornaufbereitung
FKZ	Förderkennzeichen
HKW	Heizkraftwerk
IFAD	Institut für Aufbereitung und Deponietechnik – TU Clausthal
ISWW	Institut für Siedlungswasserwirtschaft – Technische Universität Braunschweig
KW	Kapitalwert
KW-Diff.	Kapitalwertdifferenz
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LAGA M20	Mitteilungen Nummer 20 der LAGA zum Thema „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen“
LCA	Life Cycle Assessment
LFM	Landfill Mining

LVP	Leichtverpackung
LWI	Leichtweiß-Institut – Technische Universität Braunschweig
MBA	Mechanisch-Biologische-Abfallbehandlungsanlage
ME	Mengeneinheit
MS	Microsoft
MVA	Müllverbrennungsanlage
NE	Nichteisenmetalle
OR	Operations Research
PoH	Pohlsche Heide (Deponie)
RC	Recycling
RWI	Reparatur, Wartung und Instandhaltung
SBS	Sekundärbrennstoff
TASi	Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen
TCO	Total Cost of Ownership
TOC	Total Organic Carbon, organischer Anteil
Var.	Variante
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VK	Vorkonditionierung
VKU	Verband kommunaler Unternehmen e. V.



## Einheitenverzeichnis

€	Euro
a	Jahr
d	Tag
Gt	Gigatonnen
h	Stunde
ha	Hektar
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MJ	Megajoule
t	Tonnen
TWh	Terrawattstunden