Berichte aus der Betriebswirtschaft

Martin Ploog

Operative Planung in Recyclingunternehmen für Elektro(nik)altgeräte

Shaker Verlag
Aachen 2004

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2004
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2758-X
ISSN 0945-0696

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Ein Buch zu verfassen ist eine schwierige Aufgabe, und insbesondere gilt diese Tatsache auch für eine wissenschaftliche Arbeit. Deshalb gilt mein Dank allen Personen, die mir dabei zur Seite standen.

Das vorliegende Werk entstand in der Zeit von 1999 - 2004, in der ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Produktionswirtschaft der TU Braunschweig tätig war. Dem Leiter dieser Abteilung und meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Thomas Stefan Spengler, danke ich herzlich für die Betreuung meiner Bemühungen. Sein Anteil beschränkt sich nicht nur auf die konstruktiven Diskussionen und fachlichen Anregungen, sondern besteht vor allem auch in der Schaffung einer familiären, aber zugleich produktiven Arbeitsatmosphäre, die zudem noch durch einige Highlights versüßt wurde. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Jürgen Hesselbach vom Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig danke ich für die Bereitschaft, trotz umfangreicher Verpflichtungen im Rahmen der Erneuerung der Hochschullandschaft mit mir meine Arbeit zu diskutieren und das Zweitgutachten zeitnah zu erstellen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes-Heinrich Kirchner aus der Abteilung Arbeitswissenschaft danke ich für das straffe Management der Prüfungskommision.

Die Untersuchung des Recyclingprozesses ist ein wesentlicher Schwerpunkt der Abteilung Produktionswirtschaft, so dass ich meine Arbeit in einer Umgebung umfassender fachlicher Kompetenz anfertigen konnte. Meinen Kollegen Frau Dr. Grit Walther, Herrn Dipl.-Oek. Marcus Schröter, Herrn Dipl.-Oec. Dipl.-Kfm. Oliver Seefried, Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Stefan Rehkopf, Frau Dipl.-Wirtsch.-Ing. Wiebke Stölting und Frau Dipl.-Bw. Dolores Queiruga möchte ich herzlich für die hervorragende Zusammenarbeit danken. Herr Cand.-Inf. Daniel Herzberg, Herr Cand.-Wirtsch.-Inf. Marvin Schulze-Quester und Herr Dipl. Wirtsch.-Inf. Carsten Munnecke waren mir im Hinblick auf die informationstechnische Umsetzung der Arbeit wertvolle Ansprechpartner.

Ein wesentlicher Grund für das Gelingen meines Vorhabens ist die Tatsache, dass die Belange der operativen Recyclingplanung im Rahmen des BMBF-Forschungsprojekts „Stoffstrombasiertes Supply Chain Management in der Elektronikindustrie zur Schließung von Materialkreisläufen (STREAM)“ dankenswerterweise eine wesentliche Förderung erfuhren. Dies ermöglichte es mir insbesondere auch, meine Ideen mit Herrn Dipl.-Ing. Kai Kramer und Herrn Dipl.-Ing. Thomas Henze aus Sicht der Praxis in Recyclingunternehmen zu diskutieren. Darüber hinaus eröffneten mir die Gespräche mit Herrn Dipl.-Ing. René Graf vom Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig einen völlig anderen Blickwinkel auf

das Recycling. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Dr. Joachim Crone und Herrn Dipl.-Ing. Georg Karl für die interessanten Anregungen im Bereich der Bereitstellung von recyclingrelevanten Informationen aus Sicht eines produzierenden Unternehmens bedanken. Ich denke, alle diese Gespräche haben einen bedeutenden Beitrag zu dieser Arbeit geleistet.

Diese kompetente fachliche Unterstützung wäre allerdings nur sehr wenig wert gewesen, wenn ich nicht auf der privaten Seite den Rückhalt gefunden hätte, der für ein derart langes Projekt notwendig ist. Daher möchte ich meinen Eltern Christa und Klaus Ploog danken, die mit gutem Rat und mit dem notwendigen Vertrauen in die Richtigkeit meiner Entscheidungen meinen Weg ins Leben begleitet haben. Unter den größten Beeinträchtigungen durch die Anfertigung dieser Arbeit hatten meine Frau Iris Bülow und mein Sohn Johannes Kasimir zu leiden. Das große Verständnis, mit dem sie Nachtschichten und gelegentliche geistige Abwesenheit erduldeten, hat die Entstehung erst möglich gemacht. Ihnen gilt daher mein spezieller Dank.

Inhalt

1 Einleitung **1**
1.1 Ausgangslage und Problemstellung 1
1.2 Zielsetzung und Lösungsweg 2
2 Rahmenbedingungen des Elektronikschrottrecyclings **5**
2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen des Elektronikschrottrecyclings 5
2.1.1 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz 5
2.1.2 Untergesetzliches Regelwerk 7
2.1.3 EU-Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte 10
2.2 Analyse des Leistungsprozesses 13
2.2.1 Beschaffung 17
2.2.2 Behandlung 22
2.2.2.1 Demontage 24
2.2.2.2 Verfahrenstechnische Aufbereitung 28
2.2.3 Absatz 34
2.3 Ökonomische Rahmenbedingungen 35
3 Operative Planung in Recyclingunternehmen **39**
3.1 Einordnung des untersuchten Recyclingsystems 40
3.2 Rahmenbedingungen für die Planung in Recyclingunternehmen 45
3.2.1 Planungsrelevante Besonderheiten des Recyclings 45
3.2.2 Anforderungen an die Planung in Recyclingunternehmen 48
3.2.3 Ansätze der Produktionsplanung 50
3.3 Planungsaufgaben in Recyclingunternehmen 52
3.3.1 Isolierte Betrachtung der Planungsaufgaben 53
3.3.1.1 Planung des Inputs 53
3.3.1.2 Planung der Lagerprozesse 54
3.3.1.3 Planung der Demontageprozesse 56
3.3.1.4 Planung der verfahrenstechnischen Aufbereitung 60
3.3.1.5 Planung des Outputs 63
3.3.2 Integrierte Planung von Recyclingprozessen 64

Inhalt (Fortsetzung)

4 Stoffstrommodellierung von Recyclingprozessen **69**
4.1 Modellierungsansätze für Recyclingprozesse 69
4.1.1 Recycling als Kuppelproduktionsprozess 69
4.1.2 Aktivitätsanalyse zur Abbildung vernetzter Produktionssysteme 73
4.2 Abbildung von Recyclingprozessen 75
4.2.1 Abbildung der Demontage 76
4.2.2 Abbildung stofflicher Recyclingprozesse 81
4.2.3 Abbildung von Lagern und Marktprozessen 86
4.3 Stoffstrommodell für integrierte Recyclingunternehmen 87
4.4 Ableitung relevanter Parameter für die Modellierung 90
4.4.1 Bestimmung der Demontageaktivitäten 90
4.4.2 Bestimmung der Zusammensetzung 95
4.4.3 Bestimmung der Vollständigkeit 96
5 Bewertung von Recyclingprozessen **99**
5.1 Stoffstromkosten und -erlöse 100
5.1.1 Preise für die Beschaffung von Altgeräten 101
5.1.2 Preise für den Absatz demontierter Bauteile 102
5.1.3 Preise für aufbereitete Fraktionen 105
5.1.3.1 Preise für Stahlschrott 106
5.1.3.2 Preise für Shreddermischmetalle 107
5.1.3.3 Preise für Kupferfraktionen 108
5.1.4 Verrechnungspreise 109
5.2 Entscheidungsrelevante Kosten der Behandlung 112
5.2.1 Entscheidungsrelevante Kosten der Demontage 112
5.2.2 Entscheidungsrelevante Kosten der verfahrenstechnischen Aufbereitung 114
5.3 Lagerkosten und -erlöse 117
6 Konzeption einer hierarchischen Recyclingplanung **119**
6.1 Planungsebenen in integrierten Recyclingunternehmen 119
6.2 Losgrößenplanung 127
6.3 Feinplanung 136
6.4 Steuerung 142

Inhalt (Fortsetzung)

7 Praktische Umsetzung **149**

7.1 Konzeption und Implementierung eines EDV-gestützten Planungssystems für operative Entscheidungen 149

7.2 Fallstudien 155

7.2.1 Fallstudie zur Losgrößenplanung 155

7.2.2 Fallstudie zur Feinplanung 160

7.2.3 Fallstudie zur Steuerung der verfahrenstechnischen Aufbereitung 166

7.3 Würdigung der Fallstudien 171

8 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen **173**

7.1 Schlussfolgerungen 149

7.2 Forschungsbedarf 175

9 Zusammenfassung **177**

Literatur **181**

Rechtliche Normen **197**

Industrienormen **198**

Anhang 1: Ganzzahligkeit von Nebenbedingungen **199**

Anhang 2: Modifiziertes Modell zur Feinplanung **202**

Anhang 3: Screenshots zum Softwaretool **207**

Anhang 4: Fallstudie Losgrößenplanung **208**

Anhang 5: Fallstudie Feinplanung **213**

Abbildungen

Abbildung 2-1	Begriffshierarchie der Güter in Recyclingunternehmen	15
Abbildung 2-2	Leistungsprozess in integrierten Recyclingunternehmen	16
Abbildung 2-3	Organisatorische Gliederung eines Recycling-unternehmens	17
Abbildung 2-4	Jährliches Potenzial an Altgeräten aus Haushalten in verschiedenen Kategorien [nach Angaben aus Ivisic 2000]	21
Abbildung 2-5	Behandelte jährliche Massen an Altgeräten [berechnete Massen nach Halstrick-Schwenk 2000]	22
Abbildung 2-6	Layout eines integrierten Recyclingunternehmens [nach Fraunhofer IML 2000]	23
Abbildung 2-7	Materialfluss in Elektronikschrottrecyclingunternehmen [nach Ploog und Spengler 2002; übersetzt]	24
Abbildung 2-8	Demontagebereich eines integrierten Recyclingunter-nehmens für Elektronikschrott	27
Abbildung 2-9	Schematische Darstellung eines Shredders [Schubert 1983]	30
Abbildung 2-10	Aufschlussgrad für ausgewählte im Ne-Vorkonzentrat einer Stahlschrott-Shredderanlage enthaltene Metalle [nach Schäfer und Höffl 1988]	31
Abbildung 2-11	Fließbild der mechanischen Aufbereitungsanlage eines integrierten Recyclingunternehmens	33
Abbildung 2-12	Größenstruktur von Recyclingunternehmen für Elektronikschrott [nach Angaben von Halstrick-Schwenk 2000]	36
Abbildung 3-1	Wirtschaftlicher Verlauf des Leistungsprozesses beim Recycling eines Fernsehers	42
Abbildung 3-2	Wirtschaftlicher Verlauf des Leistungsprozesses beim Recycling einer Telefonanlage	43
Abbildung 3-3	Portfoliodarstellung für die Einordnung verschiedener Altgeräte hinsichtlich Orientierung und Markt-koordination	44
Abbildung 3-4	Grundstruktur eines Advanced Planning Systems [nach Meyr et al. 2000]	52

Abbildungen (Fortsetzung)

Abbildung 4-1	Typologie der Kuppelproduktion nach ausbringungsbezogenen Merkmalen [Oenning 1997]	71
Abbildung 4-2	Demontagegraph eines einfachen Beispiels [nach Spengler 1994]	76
Abbildung 4-3	Modellierung der Abtrennung in Prozessstufe *k* in einem Fließsystem mit *K* Prozessstufen	85
Abbildung 4-4	Allgemeines Stoffstrommodell eines Recyclingunternehmens	88
Abbildung 4-5	Auszug aus einem Musterrecyclingpass für einen Computer [Spengler et al. 2003b]	93
Abbildung 4-6	Mögliche Recyclingoperationen für das Mustergerät	93
Abbildung 4-7	Einfaches Aufbereitungssystem für das Rechenbeispiel in Tabelle 4-1	96
Abbildung 5-1	Erlöse für Kupferfraktion in Abhängigkeit der Sortenreinheiten von Kupfer und Gold	109
Abbildung 5-2	Benötigte Zeit für die definierte Demontage von Telefonen in Abhängigkeit von der Masse	114
Abbildung 6-1	Abstimmungsmechanismen in der hierarchischen Planung [Steven 2002; vgl. auch Stadtler 1996 und Schneeweiß 1999]	120
Abbildung 6-2	Hierarchischer Planungsansatz für ein integriertes Recyclingunternehmen	121
Abbildung 6-3	Zeitliche Gliederung der Planungsebenen	125
Abbildung 6-4	Stoffstrommodell zur Losgrößenplanung mit Quellen- und Senkenbedienung	130
Abbildung 6-5	Stoffstrommodell zur Feinplanung	137
Abbildung 6-6	Stoffstrommodell Steuerung der verfahrenstechnischen Aufbereitung	144

Abbildungen (Fortsetzung)

Abbildung 7-1	Rechnergestützte Planungsunterstützung für ein Recyclingunternehmen	149
Abbildung 7-2	Klassendiagramm zur Umsetzung des Teilbereichs Demontage [nach Herzberg et al. 2003; modifiziert]	151
Abbildung 7-3	Klassendiagramm zur Umsetzung des Teilbereichs verfahrenstechnische Aufbereitung in der Feinplanung [nach Herzberg et al. 2003; modifiziert]	151
Abbildung 7-4	Ableitung von Schrotttypen aus einem webbasierten Recyclingpass	153
Abbildung 7-5	Ableitung von Demontageaktivitäten aus einem webbasierten Recyclingpass	154
Abbildung 7-6	Produktstruktur des Telefongerätes „Typ A“	156
Abbildung 7-7	Absatzplan als Ergebnis der Losgrößenplanung für Gerät „Typ A“	158
Abbildung 7-8	Absatzplan für konkurrierende Bauteile „Hörer“ und „Lautsprecher“	160
Abbildung 7-9	Fließbild und Modell der verfahrenstechnischen Aufbereitung	162
Abbildung 7-10	Vollständigkeit der Abtrennung in der Dichtesortierung [nach Böhme 1989]	168
Abbildung 7-11	In der Prozesssimulation hinterlegter Preis für die Kupferfraktion	168
Abbildung 8-1	Advanced Planning System für Recyclingunternehmen	176
Abbildung I	Stoffstrommodell Feinplanung modifiziert	202
Abbildung II	Eingabemaske zum Anlegen einer Demontageaktivität	207
Abbildung III	Eingabemaske zum Anlegen eines Angebots	207

Tabellen

Tabelle 2-1	Elektro(nik)altgeräte im Europäischen Abfallverzeichnis; mit (*) gekennzeichnete Geräte gelten als schadstoffhaltig und damit als besonders überwachungsbedürftig [nach AVV]	9
Tabelle 2-2	Stoffliche Zusammensetzung von verschiedenen elektrischen und elektronischen Geräten [eigene Zusammenstellung nach verschiedenen Quellen: Schlögl 1995; LFU 1995; Hafkesbrink et al. 1998]	19
Tabelle 2-3	Kalkulationsschema für das Recycling von Elektronikschrott	35
Tabelle 2-4	Technisch-wirtschaftliche Daten zu integrierten Recyclingunternehmen für Elektronikschrott in Deutschland [eigene Zusammenstellung – vgl. auch Salhofer et al. 1999 und Röck 2002]	37
Tabelle 3-1	Klassifizierung der beteiligten Recyclingprozesse	41
Tabelle 4-1	Bestimmung der Vollständigkeit u_{klm} für ein einfaches Aufbereitungssystem für die Materialkomponente Kupfer (Rechenbeispiel für 1.000 kg Mischelektronik)	97
Tabelle 5-1	Annahmepreise für Altgeräte nach Marktbericht für Elektronikschrott [EUWID 2002; EUWID 2003a] und in verschiedenen Unternehmen [eigene Erhebung im Jahre 2002]; teilweise in Massenpreise umgerechnet	101
Tabelle 5-2	Bei eBay erzielte Preise für Altbauteile [eigene Erhebung für ca. 2 Jahre alte Teile]	103
Tabelle 5-3	Abgabepreise für gewonnene Bauteile zum Materialrecycling [eigene Erhebung]	104
Tabelle 5-4	Preise für Primärmetalle und Sekundärmetalle [nach EUWID 2001; EUWID 2003b; teilweise in € umgerechnet]	105
Tabelle 5-5	Abgabepreise für verschiedene Stahlschrottsorten in Abhängigkeit der Kupferanhaftungen [nach Henze 2002; die Preise sind von der Entwicklung der Schrottmärkte abhängig]	106

Tabellen (Fortsetzung)

Tabelle 5-6	Abgabepreise für verschiedene Shreddermischmetalle (SMM) bei Schwimm-Sink-Anlagen in Abhängigkeit des Al-Gehalts [nach Henze 2002]	107
Tabelle 5-7	Nennleistungen für Anlagenbestandteile [nach Koch und Kasper 1995a,b; ergänzt]	116
Tabelle 5-8	Typische Verschleißteile in Shreddern [nach Schubert 1983; geschätzte Ersatzkosten für einen Shredder mit der Kapazität 5 t/h]	117
Tabelle 6-1	Vereinfachungen der Planungsmodelle	124
Tabelle 6-2	Planungsebenen in der hierarchischen Planung für ein integriertes Recyclingunternehmen	127
Tabelle 7-1	Input-Output-Matrix für Schrotttypen in den Demontageaktivitäten der Losgrößenplanung für „Typ A“	157
Tabelle 7-2	Verfügbare und verarbeitete Muttergeräte	158
Tabelle 7-3	Bedienung von Bestellungen für Bauteile aus knappen Muttergeräten	159
Tabelle 7-4	Input-Output-Matrix für Schrotttypen in den Demontageaktivitäten	163
Tabelle 7-5	Lösung der Feinplanung – ausgeführte Demontage-aktivitäten	164
Tabelle 7-6	Vergleich unterschiedlicher Lösungsverfahren für die Fallstudie Feinplanung	165
Tabelle 7-7	Technisch-wirtschaftlich Daten zum aufgegebenen Gemisch	169
Tabelle 7-8	Ergebnisse der Fallstudie Steuerung: simultane Berechnung	170
Tabelle 7-9	Ergebnisse der Fallstudie Steuerung: sukzessive Berechnung	170

Tabellen (Fortsetzung)

Tabelle I	Demontageaktivitäten in der Losgrößenplanung	208
Tabelle II	Verfügbare Altgeräte in der Losgrößenplanung	209
Tabelle III	Technisch-wirtschaftliche Schrotttypdaten in der Losgrößenplanung	209
Tabelle IV	Preise der einzelnen Senken in der Losgrößenplanung	210
Tabelle V	Erfüllungszeiträume für Bestellungen in der Losgrößenplanung	210
Tabelle VI	Bestellungen für Bauteile in der Losgrößenplanung	211
Tabelle VII	Auslieferungen von Bauteilen in der Losgrößenplanung	212
Tabelle VIII	Input-Output-Matrix für Schrotttypen in den Demontageaktivitäten	213
Tabelle IX	Materialfraktionen in der Aufbereitung	214
Tabelle X	Koeffizienten u_{km} und Preise e_{km}^{V} (andere $u_{km} = 0$)	214
Tabelle XI	Schrotttypdaten und -ergebnisse in der Feinplanung	215
Tabelle XII	Entscheidungsvariable x_j (Anzahl der Ausführungen der Demontageaktivitäten)	216
Tabelle XIII	Kostensätze und -kapazitäten in der Aufbereitung	216
Tabelle XIV	Vergleich unterschiedlicher Lösungsverfahren für die Fallstudie Feinplanung	217
Tabelle XV	Sensitivitätsanalyse bezüglich der Preise in der Feinplanung	218
Tabelle XVI	Sensitivitätsanalyse bezüglich der Restriktionen in der Feinplanung	219

Verwendete Indizes, Funktionen, Variablen und Parameter

Indizes

i	Schrotttypen $i \in \{1,...,I\}$
j	Demontageoperation $j \in \{1,...,J\}$
k	Prozessschritt $k \in \{1,...,K\}$
κ	Laufindex für Prozessschritt, falls k schon belegt $\kappa \in \{1,...,K\}$
l	Materialkomponente $l \in \{1,...,L\}$
λ	Laufindex für Materialkomponente, falls l schon belegt $\lambda \in \{1,...,L\}$
m	Materialfraktion $m \in \{1,...,M\}$
q	Quelle $q \in \{1,...,Q\}$
s	Senke $s \in \{1,...,S\}$
t	Periode $t \in \{1,...,T\}$
v	Verschleißteil $v \in \{1,...,V\}$

Funktionen, Variablen und Parameter

A	Matrix des Nebenbedingungssystems eines Optimierungsproblems
a_{il}	Zusammensetzungsfaktor für den Anteil von Materialkomponente l in Schrotttyp i
a_{im}	Zusammensetzungsfaktor für den Anteil von Materialfraktion m in Schrotttyp i
$ÄZ_i$	Äquivalenzziffer zur Kostenumlage auf Bauteil i
b	Vektor der Restriktionen eines Optimierungsproblems
b_l	Sortenreinheit bezüglich der Materialkomponente l
b_{klm}	Sortenreinheit der in Prozessschritt k abgetrennten Materialfraktion m bezüglich der Materialkomponente l
b_{klm}^{F}	Sortenreinheitsanforderung der Klasse F für die in Prozessschritt abgetrennte Materialfraktion m bezüglich der Materialkomponente l
$b_{klm}^{Abzug,F}$	Abzüge für Materialverluste bezüglich der Sortenreinheit der Materialkomponente l der in Prozessschritt k abgetrennten Materialfraktion m beim Absatz in Metallhütten
$c_{klm}^{Bearbeitung,F}$	Bearbeitungsgebühr für in Prozessschritt k abgetrennte Materialfraktion m bezüglich der Materialkomponente l beim Absatz in Metallhütten [€/kg]
c^{E}	Arbeitspreis für Energieverbrauch [€/kWh]
C^{L}	Entscheidungsrelevante Kosten im Lager [€]
c_i^{L}	Kostensatz für die Lagerung des Schrotttyps i über eine Periode [€/(kg)]
c^{P}	Kostensatz für verfahrenstechnische Aufbereitungsanlage [€/kg]
C^{P}	Entscheidungsrelevante Kosten in der verfahrenstechnischen Aufbereitung [€]
c_k^{P}	Kostensatz für Prozessschritt k in der verfahrenstechnischen Aufbereitungsanlage [€/kg]
c_k^{PE}	Kostensatz für Energieverbrauch in Prozessschritt k [€/kg]
C_{kv}^{PI}	Wiederbeschaffungskosten für die einzelnen Verschleißteile v im Prozessschritt k [€/Austausch]
c_k^{PI}	Kostensatz für Instandhaltung in Prozessschritt k [€/kg]
c_k^{PS}	Kostensatz für sonstige Kosten in Prozessschritt k [€/kg]
c_{ist}^{Straf}	Kostensatz für die verspätete Bedienung des Auftrags s für den Schrotttyp i in der Periode t [€/kg]

C^Z	Entscheidungsrelevante Kosten in der Demontage [€]
c^Z	Kostensatz für Demontage [€/h]
DB	Deckungsbeitrag [€]
$e_{klm}^{Abzug,F}$	Abzüge für Verwertungskosten für in Prozessschritt k abgetrennte Materialfraktion m bezüglich der Materialkomponente l beim Absatz in Metallhütten [€/kg]
e_i^A	Verrechnungssatz für den internen Bezug von Schrotttyp i [€/kg]
e_i^{Ein}	Kosten-(-) oder Erlös-(+)Faktor für den Bezug von Schrotttyp i [€/kg]
e_{iq}^{Ein}	Kosten-(-) oder Erlös-(+)Faktor für den Bezug von Schrotttyp i von Quelle q [€/kg]
e_i^{Ex}	Kosten-(-) oder Erlös-(+)Faktor für das externe Recycling von Schrotttyp i [€/kg]
e_{is}^{Ex}	Kosten-(-) oder Erlös-(+)Faktor für das externe Recycling von Schrotttyp i zu Senke s [€/kg]
e_i^L	Verrechnungspreis des Schrotttyps i [€/kg]
$E\left(y_{klm}^V; e_{klm}^V\right)$	Kosten-(-) oder Erlös-(+)Funktion für den Absatz der in Prozessschritt k abgetrennten Materialfraktion m in Abhängigkeit von den Materialkomponenten l [€]
E^S	Saldierter Erlös für die Annahme und Abgabe von Recyclingobjekten [€]
e_{klm}^V	Kosten-(-) oder Erlös-(+)Faktor für den Absatz der in Prozessschritt k abgetrennten Materialkomponente l in Materialfraktion m [€/kg]
e_{km}^V	Kosten-(-) oder Erlös-(+)Faktor für den Absatz der in Prozessschritt k abgetrennten Materialfraktion m [€/kg]
e_m^V	Kosten-(-) oder Erlös-(+)Faktor für den Absatz der abgetrennten Materialfraktion m [€/kg]
$e_{km}^{V,Max}$	Erreichbarer Maximalpreis für Schrottfraktion m aus Prozessschritt k [€/kg]
L_i	Masse des Lagerbestands vom Schrotttyp i [kg]
L_{it}^{Ein}	Masse des Lagerbestands im Beschaffungslager vom Schrotttyp i zum Ende der Periode t [kg]
$L_i^{Ein,Max}$	Maximale Masse des Lagerbestands im Beschaffungslager vom Schrotttyp i [kg]
L_{it}^{Aus}	Masse des Lagerbestands im Absatzlager vom Schrotttyp i zum Ende der Periode t [kg]
$L_i^{Aus,Max}$	Maximale Masse des Lagerbestands im Absatzlager vom Schrotttyp i [kg]

λ	Prozesszustandsvektor
m_i	Masse eines Objektes vom Schrotttyp i [kg/Stck.]
p_m^F	Abminderungsfaktor in Abhängigkeit der Qualitätsklasse F für Materialfraktion m
r_i	Anteil der intakten Objekte des Schrotttyps i
t_q^A	Frühestes Lieferdatum von Quelle q
t_s^A	Frühestes Lieferdatum an Senke s
t_q^E	Spätestes Lieferdatum von Quelle q
t_s^E	Spätestes Lieferdatum an Senke s
T^{Max}	Maximum der Demontagearbeitszeit [h]
T_t^{Max}	Maximum der Demontagearbeitszeit in der Periode t [h]
t_j^Z	Arbeitszeit für eine Durchführung der Demontageaktivität j [h/act]
TM	Technologiemenge mit den verfügbaren Aktivitäten $TM = \{v_j \mid j = 1,...,J\}$
u_{km}	Vollständigkeit der Abtrennung: Abgetrennter Anteil der Materialfraktion m in Prozessschritt k
u_{klm}	Vollständigkeit der Abtrennung: Abgetrennter Anteil der Materialkomponente l in der Materialfraktion m in Prozessschritt k
$u_{klm}(\lambda)$	Vollständigkeit der Abtrennung: Abgetrennter Anteil der Komponente l in der Materialfraktion m in Prozessschritt k in Abhängigkeit des Prozesszustands λ
u_{lm}	Vollständigkeit der Abtrennung: Abgetrennter Anteil der Materialkomponente l in der Materialfraktion m
V	Technologiematrix $V = (v_{ij})_{\substack{i=1,...,I \\ j=1,...,J}}$
v_{ij}	Demontagekoeffizient zur Angabe von Input-(-) oder Output-(+)Massen der Schrotttypen i bei der Anwendung einer Demontageaktivität j [kg/act]
v_j	Aktivitätsvektor für transformierte Massen $v_j^T = (v_{1j},...,v_{ij},...,v_{Ij}) \in IR^I$
w_{ij}	Demontagekoeffizient zur Angabe von Input-(-) oder Output-(+) Anzahl der Schrotttypen i bei der Anwendung einer Demontageaktivität j [Stck./act]
w_j	Aktivitätsvektor für transformierte Anzahlen $w_j^T = (w_{1j},...,w_{ij},...,w_{Ij}) \in IR^I$
W_k	In Prozessschritt k verbrauchte Energie [kWh]
x	Vektor der Anzahl der Anwendungen der verfügbaren Demontageaktivitäten [act]
x_j	Anzahl der Anwendungen der Demontageaktivität j [act]

x_{jt}	Anzahl der Anwendungen der Demontageaktivität *j* in der Periode *t* [act]
ζ	Vektor aller Variablen eines Optimierungsproblems
y	Masse [kg]
y_l	Masse der Materialkomponente *l* [kg]
y^A	Ausgangszustandsvektor
y_i^A	Masse des Schrotttyps *i*, die der Verarbeitung zugeführt wird [kg]
y_{it}^A	Masse des Schrotttyps *i* in der Periode *t*, die aus dem Beschaffungslager der Verarbeitung zugeführt wird [kg]
$y_i^{A,Max}$	Grenze der im Beschaffungslager verfügbaren Masse von Schrotttyp *i* [kg]
y_{it}^{Aus}	Masse des Schrotttyps *i* in der Periode *t*, die aus der Demontage dem Absatzlager zugeführt wird [kg]
y^D	Demontagezustandsvektor
y_i^D	Masse des Schrotttyps *i* nach der Demontage [kg]
y_{it}^D	Massen des Schrotttyps *i* nach der Demontage in der Periode *t* [kg]
y_i^{Ein}	Masse des Schrotttyps *i*, die dem Recyclingunternehmen zugeführt wird [kg]
y_{iqt}^{Ein}	Masse des Schrotttyps *i*, die aus Quelle *q* dem Beschaffungslager in der Periode *t* zugeführt wird [kg]
$y_{iq}^{Ein,Max}$	Grenze (bei unverbindlicher Anfrage) bzw. abgenommene Menge (bei Entsorgungsvertrag) der an Quelle *q* zu beschaffenden Masse von Schrotttyp *i* [kg]
y_i^{Ex}	Extern recycelte Masse des Schrotttyps *i* [kg]
y_{ist}^{Ex}	Masse des Schrotttyps *i* in der Periode *t*, die aus dem Absatzlager der Senke *s* zugeführt wird [kg]
$y_i^{Ex,Max}$	Grenze für die extern abzugebende Masse von Schrotttyp *i* [kg]
$y_{is}^{Ex,Max}$	Grenze (bei unverbindlicher Anfrage) bzw. abgenommene Menge (bei Liefervertrag) für die an der Senke *s* abzusetzende Masse von Schrotttyp *i* [kg]
y_i^{In}	Intern recycelte Masse des Schrotttyps *i* [kg]
y_{it}^{In}	Intern recycelte Masse des Schrotttyps *i* in der Periode *t* [kg]
y_k^P	Masse des in Prozessschritt *k* verarbeiteten Materialgemischs [kg]
y_{km}^P	Masse der in Prozessschritt *k* verarbeiteten Materialfraktion *m* [kg]
y_{kl}^P	Masse der in Prozessschritt *k* verarbeiteten Materialkomponente *l* [kg]

y_{klt}^{P}	Masse der in Prozessschritt k verarbeiteten Materialkomponente l in der Periode t [kg]
$y_{k}^{P,Max}$	Grenze für die in Prozessschritt k zu verarbeitende Masse [kg]
$y_{k}^{P,Max}(\lambda)$	Grenze für die in Prozessschritt k zu verarbeitende Masse in Abhängigkeit des Prozesszustands λ [kg]
y_{l}^{P}	Masse der in der Inputfraktion vorhandenen Materialkomponente l [kg]
$y_{t}^{P,Max}$	Grenze für die intern zu recycelnde Masse in der Periode t [kg]
y_{kv}^{PI}	Nutzungsvorrat für die einzelnen Verschleißteile v im Prozessschritt k [kg/Austausch]
y_{klm}^{V}	Masse der Materialkomponente l in der in Prozessschritt k abgetrennten Materialfraktion m [kg]
y_{klmt}^{V}	Masse der Materialkomponente l in der in Prozessschritt k abgetrennten Materialfraktion m in der Periode t [kg]
y_{km}^{V}	Abgegebene Masse der in Prozessschritt k abgetrennten Materialfraktion m
$y_{km}^{V,Max}$	Grenze für die extern abzusetzende Masse der in Prozessschritt k abgetrennten Materialfraktion m [kg]
y_{mt}^{V}	Masse der in der verfahrenstechnischen Aufbereitung abgetrennten Materialfraktion m in der Periode t [kg]
$y_{mt}^{V,Max}$	Grenze für die extern abzusetzende Masse der Materialfraktion m in der Periode t [kg]
z	Kalkulatorischer Zinssatz für die Verzinsung über eine Periode
z^{A}	Vektor der Anzahlen aller in den Demontageprozess eingeführten Schrotttypen
z_{i}^{A}	In den Demontageprozess eingeführte Anzahl des Schrotttyps i [Stck.]
Z^{D}	Menge aller technisch möglichen Demontagevarianten
z^{D}	Vektor der Anzahlen aller Schrotttypen nach dem Demontagebereich
z_{i}^{D}	Anzahl des Schrotttyps i nach dem Demontagebereich [Stck.]

Verwendete Abkürzungen

ABS	Acrylnitril/Butadien/Styrol (Kunststoff)
ABS/PC	Acrylnitril/Butadien/Styrol-Polycarbonat (Kunststoff)
Al	Aluminium
Cu	Kupfer
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ERP	Enterprise Resource Planning
Fe	Eisen
FR	Flame Retardant (Flammschutzmittel)
HIPS	High Impact Polystyrol (Kunststoff)
MRP	Materials Requirement Planning
MRP II	Manufacturing Resource Planning
Ne-Metalle	Nichteisenmetalle
PCB	Polychlorierte Biphenyle (Dielektrikum)
PE	Polyethylen (Kunststoff)
PPS	Produktionsplanungs- und -steuerungssystem
PVC	Polyvinylchlorid (Kunststoff)
R	Reststoff
UML	Unified Modeling Language (grafische Modellierungssprache zur objektorientierten Softwareentwicklung)
WSS	Wirbelstromscheider

Einheiten

a	Jahr	Zeiteinheit
act	Aktivität	Einheit für die Durchführungen einer Demontageaktivität
€	Euro	Währungseinheit
g	Gramm	Masseneinheit
h	Stunde	Zeiteinheit
kg	Kilogramm	Masseneinheit
kW	Kilowatt	Einheit für (elektrische) Leistung
s	Sekunde	Zeiteinheit
Stck.	Stück	Einheit für die Anzahl von Recyclingobjekten
t	Tonne	Masseneinheit
Woche	Woche	Zeiteinheit