

Julia Gerth

**Produktionswirtschaftliche Beschreibungs- und
Optimierungsmodelle für die Wertstoffsartierung**

**Produktionswirtschaftliche
Beschreibungs- und
Optimierungsmodelle für die
Wertstoffsartierung**

Julia Gerth



Universitätsverlag Ilmenau
2014

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Diese Arbeit hat der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 2. Juli 2013

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Rainer Souren
(Technische Universität Ilmenau)
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Udo Bankhofer
(Technische Universität Ilmenau)

Tag der Verteidigung: 6. November 2013

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISBN 978-3-86360-097-6 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013000703

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XIV
Abkürzungsverzeichnis	XV
Symbolverzeichnis	XVI
1 Einführung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau und Vorgehensweise der Untersuchung	5
I Konzeptionelle Grundlagen	9
2 Abgrenzung wichtiger Begriffe und ihre Einordnung in den ökonomischen und technischen Kontext	11
3 Charakteristika verschiedener technischer Sortierverfahren	23
3.1 Vorbereitende Prozesse	24
3.2 Klassierverfahren	27
3.2.1 Siebklassierung	27
3.2.2 Stromklassierung und Dichtesortierung	29
3.3 Sortierverfahren	32
3.3.1 Magnetfeldsortierung	32
3.3.2 Flotation	37
3.3.3 Klaubung	37

3.4	Beispielkonzept einer Wertstoffsortieranlage	41
3.5	Leergutsortierung	44
4	Operationalisierung von Vermischung	48
4.1	Begriffsabgrenzungen und Klassifikation von Gemischen	49
4.2	Eindimensionale Vermischung	52
4.2.1	Intuitive Vorüberlegungen zur Vermischung anhand eines einfachen Beispiels	52
4.2.2	Wirkungszusammenhänge und Erhebungsprobleme	58
4.2.3	Messung der verschiedenen Merkmale durch Kennzahlen	65
4.2.3.1	Fraktionsanzahlorientierter Vermischungsgrad (FVG)	65
4.2.3.2	Anteilorientierter Vermischungsgrad (AVG)	65
4.2.3.3	Wechselorientierter Vermischungsgrad (WVG)	68
4.2.3.4	Konzentrationsorientierter Vermischungsgrad (KVG)	71
4.2.3.5	Abstands- bzw. Zwischenraumorientierter Vermischungsgrad (ZVG)	73
4.2.3.6	Integrierter Vermischungsgrad (IVG)	77
4.3	Diskussion mehrdimensionaler Vermischung	79
4.3.1	Intuitive Vorüberlegungen zu zwei- und dreidimensionaler Vermischung	79
4.3.2	Konzeptionelle Messvorschriften für mehrdimensionale Vermischung	90
4.4	Zwischenresümee	92
II	Strukturanalyse und Konstruktion eines ökonomischen Entscheidungsmodells für Sortierprozesse	95
5	Prozessstrukturen	97
5.1	Darstellung einfacher (einstufiger) Sortierprozesse mittels Input/Output-Graphen	97
5.1.1	Einfacher I/O-Graph eines Sortierprozesses	97
5.1.2	Technikformen	99
5.1.2.1	Lineare und elementare Techniken	99

5.1.2.2	Einstufige Techniken	101
5.1.2.3	In Grenzen frei variierbare Produktion	105
5.1.3	Erweiterung der Darstellung durch Komponentenmodellierung	106
5.2	Vergleich mit strukturähnlichen Prozessen	115
6	Grundüberlegungen zur Modellierung und Gestaltung der Nebenbedingungen	121
6.1	Entscheidungsvariablen und Massenbilanzen als strukturelle Basis der Modellformulierung	121
6.2	Übersicht über erforderliche Erweiterungen der Nebenbedingungen	130
6.3	Strukturell-formale Nebenbedingungen	131
6.3.1	Parallele Aussortierung mehrerer Wertstoffe	131
6.3.2	Mehrstufige Prozesse	132
6.3.3	Sortiergutstromverzweigung	137
6.3.4	Ausbringung diskreter Quantitäten	141
6.4	Praxisbezogene Erweiterungen der Nebenbedingungen	141
6.4.1	Kapazitierung	142
6.4.2	Modellierung von Verlusten	145
6.4.3	Blockierung von Verbindungen	146
6.4.4	Ergiebigkeits- und Reinheitsrestriktionen	147
7	Gestaltung der Zielfunktion	151
7.1	Strukturelle Analyse	151
7.1.1	Zielsetzungen des Sortiermodells	151
7.1.2	Elemente und Formulierung einer Ausgangszielfunktion für das Sortiermodell	153
7.1.3	Abhängigkeiten der Zielfunktionselemente und Interdependenzen der Entscheidungsvariablen	155
7.2	Optimierung der Wertfunktion durch Abtrennungsgrad und Sortenreinheit	161
7.2.1	Optimierung bei konstanter Sortenreinheit und variablem Abtrennungsgrad	161
7.2.2	Optimierung unsauberer Abtrennungsprozesse	166

7.2.3	Simultane Optimierung von Abtrennungsgrad und Sortenreinheit	169
7.2.4	Kritische Würdigung	170
7.3	Direkte Auswirkungen durch Anpassung der Bandgeschwindigkeit . .	171
7.4	Vermischungsgrade als Einflussfaktoren auf die Prozesskosten	177
7.4.1	Prozesskostenbestandteile und weitere Annahmen	177
7.4.2	Direkte Beeinflussung durch Vermischung	180
7.4.3	Vermischungsgradbasierte Parameteranpassungen zur Prozesskosten- senkung	186
7.4.3.1	Nutzung von Bündelungseffekten	187
7.4.3.2	Vermischungsabhängige Variation der Bandgeschwin- digkeit	190
7.5	Gestaltung der Annahmegerühr	193
7.5.1	Vermischungsabhängige Preisgestaltung	194
7.5.2	Unabhängige Preisgestaltung	196
7.5.3	Sonderfälle	197
8	Zwischenresümee: Ein deterministisches Gesamtmodell	199
III	Einsatz- und Erweiterungsmöglichkeiten	205
9	Theoretische Modellevaluation und Problemidentifikation	207
10	Konzeptionelle Überlegungen zur Integration stochastischer Einfü- se	214
10.1	Beschreibung und Analyse potenzieller Stochastizitäten bei Sortierpro- zessen	215
10.2	Erster Ansatz eines formalen stochastischen Sortiermodells	220
10.3	Zum Umgang mit stochastischen Modellen	228
10.3.1	Ein allgemeines Schema der stochastischen Optimierung	228
10.3.2	Informationsmodelle	231
10.3.3	Entscheidungsmodelle	233
10.4	Zwischenresümee	240

Inhaltsverzeichnis	IX
11 Resümee und Ausblick	243
Anhang	249
Anhang A Bilderübersicht der Kartenspiele	251
Anhang B Berechnung der KVGe für ein Beispiel mit 12 Karten	257
Literaturverzeichnis	260
Stichwortverzeichnis	272

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau und Gang der Untersuchung	8
2.1	Die Einordnung der Sortierung (und Klassierung) in die mechanischen Grundoperationen für festdisperse Stoffsysteme	17
2.2	Übersicht technischer Verfahren zur Abfalltrennung	20
3.1	Zwei Verfahren der Siebklassierung	28
3.2	Schematische Darstellung der Schwimm-Sink-Sortierung	32
3.3	Schematische Darstellung der verschiedenen Magnetscheiderbauformen	33
3.4	Schematische Darstellung eines Wirbelstromscheiders	35
3.5	Prinzipskizzen unterschiedlicher Elektroscheideverfahren	36
3.6	Mögliche Bauarten für Sortierarbeitsplätze	38
3.7	Sensorgestützte Sortierung mit Multisensorik und Druckluftaustrag	40
3.8	Fließbild einer Beispielsortieranlage	43
4.1	Überblick über die Zusammenhänge von Stoffen und Gemischen	50
4.2	Differenzierung von Gemischen nach den Merkmalen Diskretheit und Dimensionalität	51
4.3	Skatblatt mit 32 Karten in einer eindimensionalen Anordnung	52
4.4	Drei Teilgemische mit abnehmender Vermischung	53
4.5	Unterschiedliche Anordnungen von vier Buben	54
4.6	Unterschiedlich vermishtes Kartenspiel mit vier einzelnen Buben	55
4.7	Vermischung von vier gleichen Karten einer Fraktion mit unterschiedlichen Gruppengrößen	56
4.8	Vermischung von acht gleichen Karten einer Fraktion	56
4.9	Unvermischtheit aller Fraktionen	57

4.10	Maximalabstände verschiedener Fraktionen	57
4.11	Vermischung mit gleichmäßigen Abständen aller Fraktionen	58
4.12	Beispiel für die Zählung der Wechsel	62
4.13	Lorenzkurve als Basis zur Messung des anteilsorientierten Vermischungsgrades	66
4.14	Beispiel 1 für die Berechnung des KVG	72
4.15	Anordnungsfolge für die maximale Vermischung eines Beispiels mit 10 Karten und vier Fraktionen unterschiedlicher Größe	76
4.16	Vollständiges Beispiel zum ZVG	77
4.17	Beispiel zur Vereinfachung eines zweidimensionalen LVP-Gemischs	80
4.18	Extreme Vermischungszustände des Getränkekastens (nach intuitiver Einschätzung)	82
4.19	Vergleich zweier unvermischter Kästen bei gleichen Fraktionsanteilen	83
4.20	Weitere unvermischte Kästen	83
4.21	Abzählung der Kontaktstellen (rot markiert) einer Fraktion für mehrere Beispielkästen	85
4.22	Beispiele zu den Gruppenabständen	87
5.1	Einfacher I/O-Graph eines Sortierprozesses	98
5.2	I/O-Graph einer divergierenden Produktion	100
5.3	Verfahrenswahl am Beispiel eines Getränkekastens	103
5.4	I/O-Graph einer völlig flexiblen Technik	105
5.5	I/O-Graph einer Sortierung mit Komponentenmodellierung	107
5.6	I/O-Graph des Verfahrenswahlproblems der Getränkekastensortierung	109
5.7	I/O-Graph der determinierten Technik zum Beispiel des Getränkekastens	111
5.8	I/O-Graph zur Verfahrenswahl am Beispiel eines Getränkekastens	112
5.9	Zweistufiger Sortierprozess eines Getränkekastens	113
5.10	Komponentenmodellierung einer völlig flexiblen Technik	114
5.11	I/O-Graph eines Altfahrzeugdemontageprozesses	115
5.12	Modellierung der Demontage als Verfahrenswahl am Beispiel des Fahrzeugrecyclings	116
5.13	Graph eines klassischen Transportproblems mit 3 Anbietern und 4 Nachfragern	117

5.14	Kompakter I/O-Graph der flexiblen Komponentenmodellierung eines Sortierprozesses	118
5.15	Graphisches Beispiel zum Vergleich von Transport- und Sortierprozessen sowie den unterschiedlichen Betrachtungsebenen	119
6.1	Übersicht über die unterschiedlichen Modellierungsoptionen der Nebenbedingungssysteme von Sortierprozessen	130
6.2	I/O-Graph der parallelen Ausbringung mehrerer Wertstoffe sowie einer Reststofffraktion	132
6.3	Beispiel für einen mehrstufigen Sortierprozess mit drei Komponenten und drei Outputobjektarten	133
6.4	Drei Formen der Sortiergutstromverzweigung	139
6.5	Beispielhafter I/O-Graph für einen verzweigten Sortierprozess mit zwei Sortiergutströmen	139
7.1	Einflussstrukturen auf die Zielfunktion	156
7.2	Übersicht der Einflüsse auf einzelne Elemente der Zielfunktion und Darstellung der strukturellen Zusammenhänge mit Kapitel 6 und 8	160
7.3	Qualitative Verläufe der einzelnen Wertbestandteile und der Gesamtwertfunktion jeweils in Abhängigkeit vom Abtrennungsgrad der Wertstoffobjektart	165
7.4	Beispielhafte Wertstofflerlösverläufe bei konstantem Abtrennungsgrad und variabler Sortenreinheit	167
7.5	Wertbestandteilsverläufe und Gesamtwertverlauf in Abhängigkeit von der Wertstoffsortenreinheit	169
7.6	Wertgebirge über Abtrennungsgrad und Sortenreinheit	170
7.7	Prozesskosten in Abhängigkeit vom Prozessparameter mit erhöhten Kosten bei Abweichung von den effizienten Intensitäten	175
7.8	Exemplarischer Wertstofflerlösverlauf in Abhängigkeit von ρ bei händischer Sortierung	176
7.9	Exemplarischer Verlauf der Reststoffentsorgungskosten in Abhängigkeit von ρ	177
7.10	Konstanter Prozesskostenverlauf mit Kostensprung	180
7.11	Möglicher Verlauf der variablen Prozesskosten in Abhängigkeit vom FVG bzw. WVG	182
7.12	Prozesskostenverlauf mit effizientem WVG- bzw. ZVG-Intervall	184

7.13 Wertgebirge des Zusammenwirkens von WVG und Bandgeschwindigkeit ρ auf die Prozesskosten	192
7.14 Exemplarischer Annahmepreisverlauf abhängig vom FVG (mit maximal 10 Fraktionen)	195
7.15 Exemplarische Verläufe des Annahmepreises in Abhängigkeit vom AVG	196
8.1 Fließbild des Beispielprozesses	202
10.1 I/O-Graph eines einfachen Sortierprozesses mit Quantitäts- und Wertrelationen	216
10.2 Ein allgemeines Schema der stochastischen linearen Optimierung . . .	229

Tabellenverzeichnis

4.1	Übersicht der Wirkungszusammenhänge von Vermischungsmerkmalen	59
4.2	Häufigkeitstabelle zur Berechnung des Gini-Koeffizienten bzw. AVG .	68
4.3	Berechnungsbeispiele für den WVG	70
4.4	Häufigkeitstabellen für Beispiel 1	72

Abkürzungsverzeichnis

AVG.....	Anteilsorientierter Vermischungsgrad
EMG.....	Entmischungsgrad
FVG.....	Fraktionsorientierter Vermischungsgrad
I/O-Graph....	Input/Output-Graph
IVG.....	Integrierter Vermischungsgrad
KrWG.....	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KVG.....	Konzentrationsorientierter Vermischungsgrad
LVP.....	Leichtverpackungen
MBA.....	Mechanisch-biologische Behandlungsanlage
MK.....	Mischkunststoffe
NIR.....	Nahinfrarot
PE.....	Polyethylen
PET.....	Polyethylenterephthalat
PGA.....	Papier/Getränkekartons/Aluminium bzw. Papier/Glas/Aluminium
PPK.....	Pappe/Papier/Karton
PS.....	Polystyrol
VerpackV.....	Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen
WVG.....	Wechselorientierter Vermischungsgrad
ZVG.....	Zwischenraumorientierter Vermischungsgrad
ZWR.....	Zwischenraum

Symbolverzeichnis

$\mathcal{V}(i), \mathcal{N}(i)$...	Menge der Vorgänger- bzw. Nachfolgerknoten von Knoten i
\mathbf{A}	Menge der Pfeile im Mehrgüterflussmodell
\mathbf{V}	Menge der Knoten im Mehrgüterflussmodell bzw. Umlademodell
a	Inputkoeffizient
a, b	Positionswert (Koordinate)
a_i	Angebotsquantität im Transportmodell
a_j	Merkmalsausprägungen
B	Budget für die Kapazitätserweiterung
b	Outputkoeffizient
b_j	Nachfragequantität im Transportmodell
\hat{C}_j	relative kumulierte Häufigkeit mit $C_j = \sum_{i=1}^j \frac{h_i}{n}$
c_{ij}	Transportkostensatz
d	Distanz
e_j	Absatzerlös der Objektart j
F	Anzahl Fraktionen
f	Fraktionen $f = 1, \dots, F$
G	Gini-Koeffizient
GA^f	Gruppenanzahl der Fraktion f
GA_{ges}	Gesamtgruppenanzahl
h_j	absolute Häufigkeit der Merkmalsausprägung j
i	Index der Inputobjektart/Angebotsorte bzw. Laufvariable
j	Index der Outputobjektart/Nachfrageorte
j	Laufindex der Merkmalsausprägungen $j = 1, \dots, k$ (Kapitel 4)
k	Komponente $k = 1, \dots, K$
l	Index für Objektarten
m	Maschinenindex
n_f	Anzahl Objekte der Fraktion f
n_{fmax}	Anzahl Objekte der größten Fraktion
p	Konstante, die im Modell mit Wahrscheinlichkeitsrestriktionen der vorgegebenen Wahrscheinlichkeit entspricht (Kapitel 10)
p_i	Preis der Objektart i
Q_{ij}	obere Schranke der gemeinsamen Kapazität der Verbindung (i, j)
q_{kij}	güterspezifische Kapazität der Verbindung (i, j)
R_{ij}	untere Schranke der gemeinsamen Kapazität der Verbindung (i, j)
r_{kij}	untere Schranke der güterspezifischen Kapazität der Verbindung (i, j)

S_j	relative Summe der Beobachtungswerte bis zur Merkmalsausprägung j
t	Throughputquantität
u	Ausbringungsquantität
v	Einsatzquantität
W_f	Anzahl Wechsel der Fraktion f
x	Input
y	Output
Z	Zielfunktionswert
z	Index für die Zusatzinputobjektart
α	Abtrennungsgrad
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	Gewichtungsfaktoren (Kapitel 4)
β	Sortenreinheit
ϵ	Zusatzkapazität
κ	Kostensatz je Einheit Zusatzkapazität
λ	Produktionsniveau
Λ	maximale Kapazität einer Verschiebeverbindung
λ_{ij}	Verschiebequantität von der Objektart i in die Objektart j
ρ	Prozessparameter bzw. Prozess ($\rho = 1, \dots, \pi$)
φ	Konstante für das Maß der Risikoaversität
ξ	Verlustparameter
\tilde{e}_i	e_i ist eine Zufallsvariable

Kapitel 1

Einführung

1.1 Motivation und Zielsetzung

In vielen Bereichen unternehmerischer Tätigkeit ist es erforderlich, Gegenstände voneinander zu trennen und zu sortieren. Dazu zählt z. B. die Postsortierung, bei der die Sendungen nach ihrem jeweiligen Empfangsort eingeteilt werden, die Sortierung von Gemüse, z. B. Spargel, in verschiedene Güteklassen oder die Trennung wertvoller Mineralien vom übrigen Gestein. Ein spezieller Bereich, der sehr stark mit Sortierprozessen assoziiert wird, ist das Recycling. Hier wird im Rahmen der **Kreislaufwirtschaft** eine Trennung von Abfällen vorgenommen, mit dem Ziel, diese einer weiteren Nutzung zuzuführen und schädigende Einflüsse auf die Umwelt zu minimieren.¹

Noch vor dreißig Jahren führte die Entsorgungswirtschaft ein geduldetes Dasein als notwendiges Übel. Ihre Tätigkeit beschränkte sich im Allgemeinen auf die Sammlung von Abfällen und deren Ablagerung auf Deponien. Verschiedene Faktoren wie z. B. ein gesteigertes Umweltbewusstsein, die Erkenntnis der Rohstoffbegrenztheit und möglichen Marktpotenzials von Sekundärrohstoffen sowie letztlich eine veränderte Gesetzgebung trugen neben anderem dazu bei, dass sich eine eigenständige Recycling- und Sekundärrohstoffindustrie entwickelt hat. Während schon früh die Durchführbarkeit und Chancen der Aufbereitung von Metall, Glas und Papier wahrgenommen und industriell umgesetzt wurden, erfolgte in Deutschland ein tiefgreifender Einschnitt in das Entsorgungsverhalten und den Umgang mit Abfällen durch die Einführung des **Dualen Systems** und des Grünen Punkts.² Unternehmen und Haushalte waren nun

¹ Vgl. Willing (1999), S. 79.

² Vgl. Souren (2002), S. 2.

angehalten, Verpackungsabfälle getrennt von sonstigen Abfällen zu sammeln, also ihren Müll zu sortieren.

Die gesetzlichen Vorgaben der Verpackungsverordnung (VerpackV) sahen vor, die bereits getrennt gesammelten Verpackungsabfälle noch präziser zu sortieren und einer Aufbereitung zuzuführen. Allerdings waren die Qualitäten der sortierten Verpackungen zu Beginn noch zu schlecht, um erfolgreich als Sekundärrohstoffe eingesetzt zu werden. Seither hat eine starke technische Entwicklung stattgefunden. Es wurden neue Maschinen und Patente entwickelt, um bessere Sortierqualitäten zu erzielen. Bestehende Verfahren wurden immer weiter verfeinert und somit die Sortierqualität stark verbessert. Infolgedessen nahm der Einsatz von Sekundärrohstoffen in der Produktion ebenfalls deutlich zu. In der technischen Literatur wird eine Vielzahl von Apparaten und Methoden beschrieben, Verpackungsabfälle nahezu sortenrein zu trennen, sodass aus technischer Sicht das Sortierproblem zu einem großen Teil bereits gelöst ist.³

In der betriebswirtschaftlichen Forschung hat die Entsorgungswirtschaft in den vergangenen Jahren ebenfalls vermehrt Aufmerksamkeit erfahren. In den neunziger Jahren fand zunächst Grundlagenforschung statt, dabei wurde u. a. ein theoretisches Modell zum geschlossenen Produktkreislauf entwickelt und die Reduktionstheorie im Einklang mit der Produktionstheorie geschaffen. Auch Demontageprozesse zur Teilegewinnung wurden betrachtet.⁴ Zudem hat sich im Teilbereich Logistik eine eigene, als ‚Reverse Logistics‘ bezeichnete Sparte herausgebildet, die sich mit Standort- und Transportproblemen der Produktrückführung beschäftigt.⁵ Mit Abfallsortierprozessen haben sich die Forschungen bisher jedoch nur am Rande beschäftigt.⁶ Die wenigen Arbeiten behandeln dann auch fast ausschließlich das Ergebnis der Sortierung und dessen Qualität, insbesondere die Qualitätsmessung.⁷ Ein betriebswirtschaftliches Modell, das Sortierprozesse – insbesondere aus produktionswirtschaftlicher Per-

³ Diese Aussage bezieht sich in erster Linie auf die Verpackungsabfälle. Andere Sortierprobleme wie z. B. die Restmüllsortierung sind allerdings erst zum Teil gelöst und bedürfen noch weiterer technischer Entwicklungen. Vgl. zu Beschreibungen technischer Abfallsortierverfahren exemplarisch Bilitewski/Hardt/Marek (2000), Pascoe (2000) und Schubert (2003b) sowie Kapitel 3 dieser Arbeit.

⁴ Stellvertretend seien die Forschungsarbeiten von Dyckhoff (1996), Souren (1996b) und Spengler (1994) genannt.

⁵ Vgl. z. B. Dekker et al. (2004).

⁶ Als einer der wenigen Beiträge des internationalen Schrifttums sei Sodhi/Young/Knight (1999) genannt, die im Rahmen einer Reihenfolgeplanung für Materialseparationen im Schüttgutrecycling auch Überlegungen zu Sortierprozessen integrieren.

⁷ Vgl. hierzu z. B. Souren (1996b).

spektive – betrachtet, gibt es bisher nur in ersten Ansätzen.⁸ Auch der Einsatzfaktor von Sortierung, hier ist es das Verpackungsabfallgemisch, wurde bislang noch nicht aus ökonomischer Sicht analysiert.

Nur BEHRENS hat sich bisher aus betriebswirtschaftlicher Perspektive mit Stoffgemischen beschäftigt.⁹ Der Schwerpunkt seiner Arbeit lag jedoch vornehmlich auf der Durchmischung von (flüssigen) Stoffen sowie der Entwicklung eines Formelapparates zu ihrer Erfassung und Bewertung. Des Weiteren bezieht BEHRENS die Trennung, als Gegenstück zur Durchmischung, in seine Überlegungen zwar mit ein, bezieht sich aber auch hier einzig auf die Flüssigkeitstrennung. Eine exklusive Betrachtung von (Abfall-)Sortierprozessen erfolgte dabei auch nicht. Er spricht zwar die Vermischung von Kunststoffen an, charakterisiert sie sogar als stark, quantifiziert sie aber nicht. Hier existiert noch eine Forschungslücke. Seine weitere Argumentation, dass Kunststoffabfälle (noch) keine wirtschaftliche Bedeutung besitzen und aufgrund schlechter Sortierverfahren nicht als Einsatzfaktoren genutzt werden können, ist inzwischen nicht mehr zutreffend.¹⁰ Dies zeigen die 2010 von der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung veröffentlichten Zahlen der 2008 in Deutschland verwerteten Kunststoffabfälle. Denen zufolge wurden rund 45 % werkstofflich verwertet; gemeinsam mit der energetischen Verwertung wird sogar eine Verwertungsquote von etwa 96 % erreicht.¹¹ Auf einen annähernd gleichen Wert für Deutschland von rund 95 % kommt auch ein EU-weiter Vergleich der Kunststoffabfallverwertung von 2008, wobei der EU-Durchschnitt nur bei etwa 54 % liegt.¹²

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der bei der zumeist technischen Betrachtungsweise von Abfallsortierung ausgespart wurde, sind Unsicherheiten und Zufallseinflüsse. Auch in der modellhaften Denkweise der Betriebswirtschaft werden Stochastizitäten häufig ausgegrenzt oder durch vereinfachende Modellannahmen eliminiert; in der Realität sind sie aber der Normalfall. So auch bei der Abfallsortierung, bei der der Prozessinput in seiner Vielfalt der Abfallfraktionen und ihrer mengenmäßigen Zusammensetzung eine Unbekannte ist, die sich mit jeder neuen Anlieferung verändert. Hieraus

⁸ Vgl. Souren (2012), S. 334ff.

⁹ Vgl. Behrens (1998).

¹⁰ Vgl. Behrens (1998), S. 47.

¹¹ Vgl. Schüler (2010), S. 20.

¹² Vgl. Mudgal et al. (2011), S. 73f. MUDGAL ET AL. ermittelten allerdings nur einen Recyclinganteil – damit sind nur zur Herstellung neuer Produkte verwendete Abfälle gemeint – von 34 % im Vergleich zu den von SCHÜLER angeführten 45 %, was wohl den unterschiedlichen Definitionen werkstofflicher Verwertung und Recycling in der deutschen und englischen Sprache geschuldet ist.

eröffnet sich ein neues Forschungsfeld, dass eben diese stochastischen Einflüsse mit berücksichtigen und untersuchen sollte.

Ziel dieser Arbeit ist es, Sortierprozesse als Teilbereich der Entsorgungswirtschaft bzw. Reduktion im Stoffkreislauf zu untersuchen. Die Ausarbeitungen sind so angelegt, die Lücke zwischen bereits entwickelten und optimierten technischen Verfahren und der ihnen noch nicht nachgefolgten Ökonomie ein Stück weit zu schließen. Die Arbeit ist dabei für den interessierten Betriebswirtschaftler konzipiert, der sich über die Grundlagen nachhaltiger Unternehmensführung hinaus noch tiefer mit diesem speziellen Ausschnitt der Thematik befassen möchte. Der inhaltliche Schwerpunkt liegt dabei auf konzeptionellen Überlegungen zu Sortierprozessen aus ökonomischer Sicht sowie auf der Entwicklung eines ersten OR-Modells für Sortierprozesse, das in einem weiteren Schritt um stochastische Einflüsse erweitert wird. Nachfolgend wird verdeutlicht, auf welche Weise dies erreicht werden soll und welche weiteren Unterziele in dieser Arbeit eine Rolle spielen:

- Es soll eine Definition formuliert werden, die den allgemeinen Sortierbegriff hinreichend weit auf die Sortierung von Redukten eingrenzt und dennoch alle in der Arbeit behandelten Sortierbeispiele erfasst. Dabei wird eine Synthese aus technischem und ökonomischem Verständnis angestrebt. Im Rahmen dieser Definition findet auch eine Einordnung der Sortierung in das ökonomische Stoffkreislaufmodell statt.
- Es sollen Kriterien identifiziert werden, anhand derer die Vermischungszustände unterschiedlicher Abfallfraktionen unterschieden werden können. Dies wird anhand eines Kartenspiels illustriert. Es wird dabei untersucht, ob ein einzelnes Kriterium zur vollständigen Beschreibung des Vermischungszustands ausreicht oder dies nur durch mehrere unterschiedliche Kriterien erreicht werden kann. Auf Basis der Kriterien sollen dann Kennzahlen entwickelt werden, die die Vermischung operationalisieren. Für diese Vermischungskennzahlen soll zudem untersucht werden, welche Auswirkungen die durch sie gemessenen, unterschiedlichen Vermischungszustände auf die Sortierkosten und -erlöse in einer ökonomischen Zielfunktion haben.
- Es sollen auf Basis der Aktivitätsanalyse die Prozessstrukturen und Besonderheiten von Sortierprozessen sowie Ähnlichkeiten zu anderen Prozesstypen, wie Transportprozessen, untersucht werden. Mit den Erkenntnissen aus dieser Analyse soll dann ein neuartiges, formales OR-Modell für Sortierprozesse mit einer Zielfunktion und einem Nebenbedingungssystem aufgestellt werden. Es

ist nicht das Ziel, dieses Modell konkret zu lösen oder ein Lösungsverfahren zu entwickeln. Vielmehr ist beabsichtigt, die unterschiedlichen Facetten von Sortierprozessen formal abzubilden und grundsätzliche Wirkungszusammenhänge offenzulegen. Anschließend soll das Sortiermodell aus praktischer Sicht auf Einsatzmöglichkeiten und mögliche Probleme hin analysiert werden. Im Wesentlichen soll dabei offengelegt werden, an welchen Punkten im Modell möglicherweise Zufallseinflüsse wirken können. Diese Stochastizitäten gilt es dann im formalen Modell zu berücksichtigen.

1.2 Aufbau und Vorgehensweise der Untersuchung

Die vorliegende Arbeit gliedert sich neben der Einführung und dem Resümee in die drei Teile I, II und III.

In **Teil I** werden **konzeptionelle Grundlagen** erarbeitet, die als Basis für den weiteren Aufbau der Arbeit und das grundlegende Verständnis von Sortierprozessen dienen. In **Kapitel 2** werden wichtige Begriffe, wie z. B. Reduktion, Sortierung und Klassierung, eingeführt. Zudem wird dargestellt, wie diese Begriffe und die mit ihnen verbundenen Konzepte in den produktionswirtschaftlichen Kontext eingebunden sind. Des Weiteren wird (Abfall-)Sortierung auch aus dem technisch-definitiven Blickwinkel betrachtet, sodass schließlich eine geeignete Arbeitsdefinition für ‚Sortierung‘ entwickelt werden kann. **Kapitel 3** behandelt die verfahrenstechnische Sortierung, mit den Schwerpunkten Abfall- und Leergutsortierung. Hier soll dem technisch interessierten Betriebswirtschaftler die Funktionsweise spezifischer technischer Sortierverfahren näher gebracht werden. Besonders im Fokus stehen dabei ökonomisch relevante und vor allem *beeinflussbare* Prozessparameter. Den Abschluss von Teil I bildet **Kapitel 4**, in dem eine Auseinandersetzung mit Gemischen und Vermischung, dem Input eines Sortierverfahrens, erfolgt. Zu klärende Fragestellungen in diesem Kapitel sind: Was ist ein Gemisch? Anhand welcher Parameter lässt sich Vermischung charakterisieren? Wie kann Vermischung gemessen werden?

In **Teil II** wird ein grundlegendes ökonomisches Erklärungs- und Optimierungsmodell für Sortierprozesse entwickelt. Dazu werden in **Kapitel 5** zunächst die Prozessstrukturen einfacher Sortierprozesse untersucht. Als Methode zur Darstellung von Prozessen, ihrer Eigenschaften und Besonderheiten wird aktivitätsanalytisches Instrumentarium, wie Input/Output-Graphen, eingesetzt. Diese Darstellung wird durch die Komponentenmodellierung erweitert und zusätzlich verfeinert. Außerdem werden Sortierprozesse mit strukturähnlichen Prozessen, wie z. B. Transportprozessen, verglichen.

In **Kapitel 6** werden die Restriktionen des Sortiermodells herausgearbeitet, denen die Optimierung eines Sortierprozesses genügen muss. In einem ersten Schritt werden die Entscheidungsvariablen des Modells identifiziert. Die Nebenbedingungen können in strukturell-formale und praxisrelevante Ausprägungen unterschieden werden. Ihre Vorstellung erfolgt sowohl detailliert als auch in einer zusammenfassenden Übersicht. Neben einer verbalen Erläuterung umfasst die Darstellung auch die Überführung der Restriktionen in ein formales Modell. Die Modellentwicklung wird in **Kapitel 7** mit der Gestaltung der Zielfunktion fortgesetzt. Dabei wird zunächst der Frage nachgegangen, welche vorwiegend ökonomischen Ziele ein Sortiermodell besitzen kann. Anschließend wird eine formale Zielfunktion für das Sortiermodell erarbeitet. In der nachfolgenden Analyse der Zielfunktionsterme steht insbesondere der Einfluss einzelner Prozessparameter sowie ein gemeinsamer Einfluss mehrerer Parameter auf den Erlös- bzw. Kostenverlauf im Vordergrund. Ein kurzes Zwischenresümee in **Kapitel 8** führt die Modellteile Zielfunktion und Nebenbedingungen zusammen. Dieses Modell bildet die Grundlage für den dritten Teil der Arbeit.

Eine Modellevaluation, die Potentiale und Probleme aufzeigen soll, sowie die Anpassung des Modells für den Praxiseinsatz sind Gegenstand von **Teil III** der Arbeit. In **Kapitel 9** wird das Sortiermodell aus Teil II evaluiert. Dabei wird als gravierende Lücke des Modells aufgezeigt, dass es (noch) keine zufälligen Schwankungen berücksichtigt. Infolgedessen beschäftigt sich **Kapitel 10** mit Zufallseinflüssen auf die Sortierung. Dabei soll die Frage, welche Zufallseinflüsse überhaupt auf einen Sortierprozess wirken, beantwortet werden. Das Sortiermodell soll dann – in einem ersten Ansatz – um diese Zufallsvariablen erweitert werden. Anschließend erfolgt eine Übersicht, wie der Anwender, z. B. ein Sortierunternehmen, sein Modell prinzipiell lösen und zur Entscheidungsfindung einsetzen könnte.

Die Arbeit schließt mit einem Resümee in **Kapitel 11**. Hier werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit nochmals zusammengefasst und die in der Einführung gestellten Leitfragen – ohne sie jedoch explizit noch einmal aufzuführen – beantwortet. Zudem erfolgt ein Ausblick auf Forschungslücken, die Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen bieten.

Abbildung 1.1 auf Seite 8 gibt einen Überblick über die Struktur der Arbeit. Zudem sind die wichtigsten Fragestellungen der einzelnen Kapitel, denen im Folgenden nachgegangen werden soll, aufgeführt. Für einen optimalen Lesefluss empfiehlt sich eine lineare Abfolge der Kapitel. Der technisch bereits kundige Leser mag Kapitel 3 überspringen, in dem die Funktionsweisen der technischen Abfallsortierung dargestellt werden. Zudem wäre ein Überspringen von Kapitel 8 möglich, welches als Zwischen-

ergebnis das Sortiermodell noch einmal gesamthaft festhält. Anhand der in Abbildung 1.1 auf Seite 8 formulierten Leitfragen kann der Leser auch selbst entscheiden, welche Kapitel für ihn besonders interessant sind.

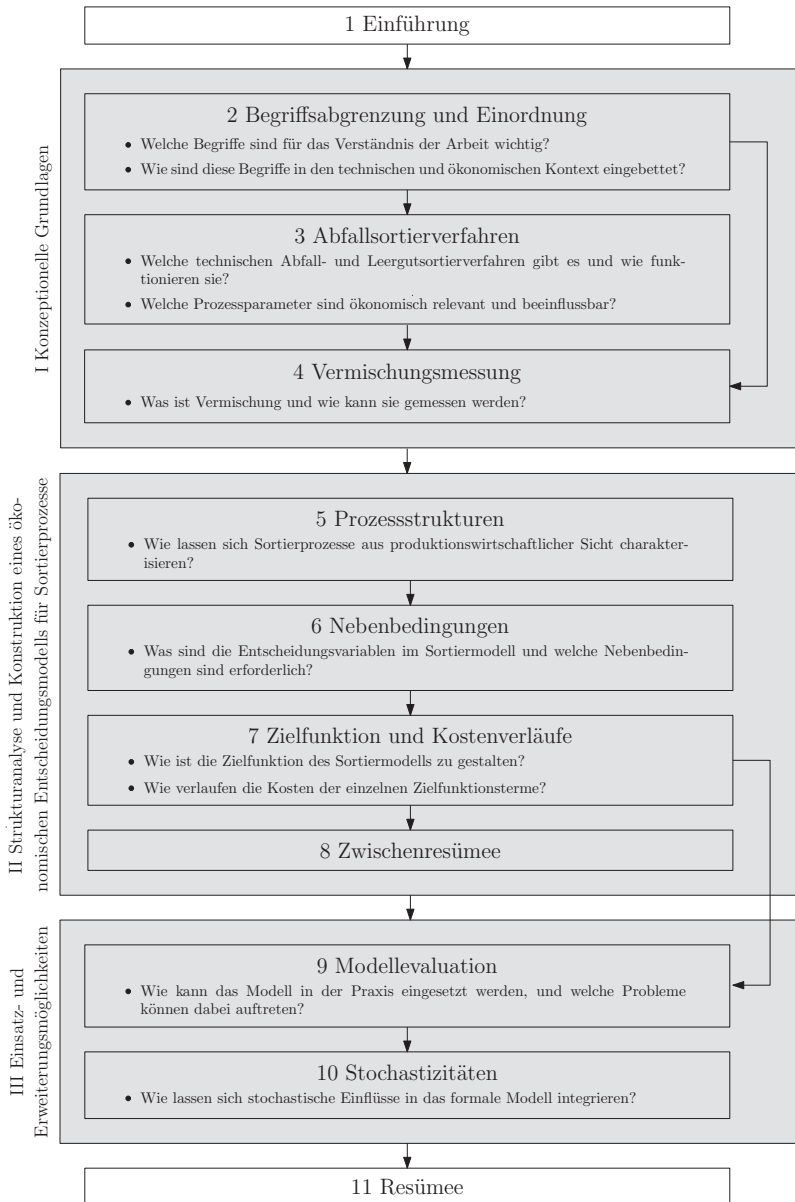


Abbildung 1.1: Aufbau und Gang der Untersuchung

Teil I

Konzeptionelle Grundlagen

Kapitel 2

Abgrenzung wichtiger Begriffe und ihre Einordnung in den ökonomischen und technischen Kontext

Nach der grundlegenden Einführung in diese Arbeit erscheint es zweckmäßig, zunächst auf die erforderlichen Begrifflichkeiten detaillierter einzugehen. Im Vordergrund stehen dabei insbesondere die Verwendung des Terminus ‚Sortierung‘ in den Fachgebieten Ökonomie und Technik sowie weitere verwandte Begriffe. Es soll keine grundlegend neue Definition von Sortierung durch die Diskussion bereits existierender Definitionen und durch die Verknüpfung mit weiteren neuartigen Erkenntnissen erarbeitet werden. Ziel ist stattdessen, ein Verständnis der Begrifflichkeiten als Basis für die Arbeit aufzubauen und schließlich eine Arbeitsdefinition abzuleiten.

Sortierung bezeichnet allgemein das Ordnen nach Arten und Wertgruppen.¹ Neben dem Vorgang selbst wird auch sein Ergebnis zuweilen Sortierung genannt. Synonym wird für die Vorgangsbeschreibung auch der Ausdruck ‚das Sortieren‘ verwendet. Dieser Begriff leitet sich vom Verb ‚sortieren‘ ab, dessen Ursprung im Italienischen liegt und im 16. Jahrhundert zur Bezeichnung der Einteilung bzw. Einordnung in (Güte-)Klassen ins Deutsche übernommen wurde.²

Diese Arbeit beschäftigt sich im Folgenden nicht mit dem Sortieren allgemein, sondern speziell mit der Sortierung von Objekten, die im Rahmen einer **Kreislaufwirt-**

¹ Vgl. o. V. (2006), S. 553.

² Das italienische Wort ‚sortire‘, selbst dem Lateinischen entlehnt, bedeutet auswählen, vgl. <http://www.duden.de/rechtschreibung/sortieren> bzw. o. V. (1989), S. 683, Stichwort ‚Sorte‘.

schaft nach ihrer Verwendung durch einen Konsumenten zurückgeführt werden.³ Bei diesen Objekten handelt es sich zumeist um Abfälle. Abfälle sind nach dem **Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)** „alle beweglichen Sachen, ... deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss.“⁴ Dieser Definition zufolge umfasst der Begriff ‚Abfall‘ eine sehr breite Palette unterschiedlichster Objekte, deren vollständige Betrachtung in dieser Arbeit weder möglich ist noch sinnvoll erscheint. Daher erfolgt eine Einschränkung auf **Leichtverpackungen (LVP)**⁵ sowie stoffgleiche Nichtverpackungen, die im Rahmen der **Wertstoffsammlung**⁶ in Deutschland über die Gelben Säcke bzw. Gelben Tonnen entsorgt werden. Die LVP gehören – neben Glas sowie Pappe, Papier und Karton – zu den (Einweg-) **Verkaufsverpackungen** und sind für eine Sortieranalyse aufgrund ihrer verschiedenartigen Inhaltsbestandteile von besonderem Interesse.⁷

Einen kleinen Anteil an der gesamten Sortierleistung der Wertstoffsartierung vollbringt jeder Konsument bereits bei sich zu Hause, indem er die Leichtverpackungen getrennt von den weiteren Abfallarten, Hausmüll, Bioabfällen, Pappe, Papier, Karton und Glas, in Gelben Säcken⁸ sammelt. Es wird daher auch von Müll- bzw. Abfalltrennung gesprochen. Die eigentliche Sortierung der Verpackungsabfälle findet jedoch beim Entsorgungsunternehmen mit dem Ziel statt, ein höherwertiges Wertstoffprodukt zu erhalten, das sich als **Sekundärrohstoff** vermarkten lässt.⁹ Zur Wertstoffsartierung werden verfahrenstechnische Maschinen und Anlagen eingesetzt.¹⁰

³ Unter Kreislaufwirtschaft wird hier der Objektfluss nach dem allgemeinen Kreislaufmodell verstanden. Es besteht nach KIRCHGEORG bzw. DYCKHOFF und SOUREN aus sechs Phasen. Die ersten drei Phasen, Produktion, Distribution und Konsumtion, umfassen die klassische Supply Chain und bilden den Hinweg des Modells. Der Rückweg besteht aus den Phasen Kollektion, Reduktion und Induktion, vgl. Souren (2002), S. 19, Dyckhoff/Souren (2008), S. 55ff., und Kirchgeorg (1999), S. 81.

⁴ § 3 (1) des KrWG (2012).

⁵ Vgl. zu LVP Christiani (2004), S. 1.

⁶ Bereits der Wortteil ‚Wert‘ impliziert, dass ein als Wertstoff bezeichnetes Objekt auch nach seinem Gebrauch noch einen gewissen Restwert besitzt und daher in der Mehrzahl der Fälle eine weitere Nutzung erfährt, vgl. Martens (2011), S. 2. Das Gegenstück zum Wertstoff ist der (unerwünschte und zu meidende) Störstoff, vgl. Uhlig/Bremerstein (1997), S. 7.

⁷ Rechtlich geregelt wird diese Form der Entsorgung auf nationaler Ebene durch die Verpackungsverordnung (VerpackV). Definitionen spezieller Verpackungsformen finden sich dort in § 3 VerpackV (2010) sowie bei Souren (2002) in Kapitel 3, S. 29–52.

⁸ Der Einsatz von Gelben Säcken oder Gelben Tonnen hängt vom jeweiligen Entsorgungsunternehmen ab. Gelbe Tonnen kommen vorrangig in Ballungsgebieten zum Einsatz oder bei einer Kopplung an zusätzliche Leistungen, wie z. B. Gelbe Tonne plus (vgl. Langen et al. (2008)), über die noch weitere Abfallarten mit entsorgt werden können. Wenn im Folgenden von Gelben Säcken gesprochen wird, ist damit zugleich auch die Gelbe Tonne gemeint, die den gleichen Zweck erfüllt.

⁹ Vgl. Kuyumcu (1999b), S. 370.

¹⁰ Die Vorstellung praktischer Verfahren zur Sortierung von Abfällen erfolgt in Abschnitt 3.

Eine weitere Objektart, die nach der Konsumphase auf ihrem kreislaufwirtschaftlichen Rückweg gewöhnlich eine Sortierung durchläuft, sind mit wiederbefüllbaren Getränkeflaschen bestückte Getränkekästen (sog. Crates). Diese Getränkekästen sind ein Bündel aus zwei unterschiedlichen Sorten von **Mehrwegverpackungen**, den Getränkeflaschen einerseits und dem Getränkekasten andererseits.¹¹ Der Unterschied zu den LVP-Abfällen besteht darin, dass die zurückkommenden Getränkekästen nicht als nutzlose Wirtschaftsgüter angesehen und einer **Verwertung** zugeführt werden, sondern für den gleichen Zweck **wiederverwendet** werden.¹² Mehrwegverpackungen behalten demzufolge auch während und nach der Sortierung ihre Form und Eigenschaften.¹³ Sie repräsentieren somit eine weitere interessante Objektart, die im Folgenden als zweiter Betrachtungsgegenstand neben den LVP im Fokus steht.

Das Sortierproblem des Kastens besteht darin, dass die Bestückung des Getränkekastens bei seiner Rückgabe in den meisten Fällen nicht mehr vollständig aus Flaschen der gleichen (und erwünschten) Sorte besteht bzw. Lücken aufweist. Für die Wiederverwendung des Getränkekastens in der Abfüllung eines Getränkeherstellers muss vorab durch Sortierung sichergestellt werden, dass ausschließlich die richtigen Flaschen enthalten sind. Dazu werden spezielle Sortiermaschinen eingesetzt, die sich von denen der LVP-Sortierung unterscheiden.¹⁴

Einordnung der Sortierung in das allgemeine Kreislaufmodell

Anhand der beiden beschriebenen Beispielobjektarten LVP und Getränkekästen ist bereits offenkundig, dass es sich um sehr unterschiedliche Ausprägungen von Sortierung handeln muss, wengleich aus betriebswirtschaftlicher Sicht beide auf dem Objektückweg durchgeführt werden. Bislang gibt es noch keinen Konsens darüber, welcher Phase des Rückwegs, Kollektion oder Reduktion, die Sortierung zugeordnet werden kann und ob überhaupt eine eindeutige Zuordnung möglich ist. Daher erscheint es sinnvoll, zumindest einen kurzen Blick auf die Einordnung der Sortierung in das Kreislaufmodell mit sechs Phasen zu werfen.

¹¹ Vgl. Souren (2002), S. 175.

¹² Recycling wird im deutschen Sprachraum gemeinhin in vier Formen unterteilt: Wieder- und Weiterverwendung sowie Wieder- und Weiterverwertung. Die Vorsilben geben an, ob ein Objekt in seinem aktuellen Kreislauf verbleibt (wieder-) oder ihn verlässt (weiter-). Verwendung bedeutet, dass die betrachteten Objekte in der Reduktion weitestgehend unverändert bleiben, wohingegen sie bei der Verwertung materiell zu neuen Objekten umgewandelt werden, vgl. zu einem Überblick über die Recyclingformen Pitz (2000), S. 7ff., sowie Berg (1979), S. 201f.

¹³ Vgl. Souren (2002), S. 56f.

¹⁴ Siehe hierzu ebenfalls Abschnitt 3.

Relativ unstrittig dürfte in der Diskussion sein, dass die Sortierung nicht zur **Induktionsphase** gehört. Diese letzte Phase schließt den Kreislauf, indem aufbereitete Sekundärrohstoffe bzw. zur Wiederverwendung aufbereitete Objekte an die Produktion zurückgeführt werden sowie nicht rezyklierbare Abfälle aus dem Kreislauf heraus geschleust werden.¹⁵ Eine intuitive Zuordnung von Sortierung zu einer der beiden verbleibenden Phasen Kollektion und Reduktion ist indes nicht ohne Weiteres möglich, da sowohl Argumente für die Kollektion als auch für die Reduktion vorliegen.

Die allgemeine Beschreibung der **Kollektion**(-sphase) besagt, dass hier die aus dem betrachteten Kreislaufobjekt entstandenen Abfälle beim Konsumenten eingesammelt und zu den Reduktionsanlagen transportiert werden. In der **Reduktion**(-sphase) werden diese Abfälle dann zu Sekundärrohstoffen umgewandelt.¹⁶ Die Kollektion besteht demnach in erster Linie aus **raum-zeitlichen Transformationen**, die gewöhnlich der eigenständigen Teildisziplin Logistik zugeordnet werden, während in der Reduktionsphase vorwiegend **materielle** Umwandlungsprozesse ablaufen.¹⁷ Reduktionsprozessen wird dabei ebenso wie der Produktion eine Wertsteigerung der eingesetzten Objekte durch ihre Transformation unterstellt.¹⁸

Um die Sortierung nun zuordnen zu können, sollte auch sie kurz in betriebswirtschaftlichem Sinne charakterisiert werden. Dazu ist es erforderlich zu beschreiben, was hierbei mit den Kreislaufobjekten, also dem Abfall und den Getränkekästen, auf prozessualer Ebene geschieht.

Die Abfälle werden nach ihrer Einsammlung dem Eingangslager der Sortierung zugeführt. Dies ist ein logistischer Vorgang und damit unzweifelhaft noch Teil der Kollektionsphase. Der Sortiervorgang selbst nimmt Zeit in Anspruch und erfolgt nicht schlagartig.¹⁹ Darüber hinaus kann es zwischen einzelnen Sortierschritten und im Anschluss an die Sortierung bis zur Weitergabe der sortierten Wertstoffe an Verwertungsunternehmen zu Lagerungsprozessen kommen. Somit findet hier ebenfalls eine zeitliche Transformation statt. In gleicher Weise kann ein räumlicher Prozess unterstellt werden, da bei der Sortierung auch (meist innerbetriebliche) Transporte durchgeführt werden. In der Hauptsache finden bei der Sortierung aber **mengenmä-**

¹⁵ Zur Vervollständigung der Induktion gehört noch die Zufuhr von Primärrohstoffen in den Kreislauf, vgl. Souren (2002), S. 21f., Dyckhoff/Souren (2008), S. 57.

¹⁶ Vgl. Souren (2003), S. 95, Dyckhoff/Souren (2008), S. 57.

¹⁷ Vgl. Vahrenkamp (2007), S. 8, und Souren (1996b), S. 58.

¹⁸ Sie ist also streng genommen eine spezielle Form der Produktion, vgl. Souren (2003), S. 98.

¹⁹ Ein Beispiel für schlagartige Vorgänge, die auf der Unterstellung einer unendlichen Produktionsgeschwindigkeit beruhen, ist z. B. in der Produktionswirtschaft im klassischen Losgrößenmodell zu finden, bei dem das Lager schlagartig wieder gefüllt wird, vgl. Harris (1913) sowie zum Lagerbestandsverlauf Günther/Tempelmeier (2012), S. 210.

rige Transformationen statt, in deren Verlauf die angelieferten Abfälle bzw. Flaschen und Kästen separaten Materialfraktionen zugeordnet werden.

Diese Charakterisierung der Sortierung als raum-zeitlicher sowie mengenmäßiger Transferprozess ist vergleichbar mit der Definition logistischer Prozesse, wonach die richtigen Objekte in der richtigen **Menge** am richtigen **Ort** zum richtigen **Zeitpunkt** (in der richtigen Qualität für den richtigen Kunden und zu richtigen Kosten) bereit-zustellen sind.²⁰ Demzufolge wäre auch die Sortierung ein logistischer Prozess und nach DYCKHOFF der Kollektionsphase im Kreislaufmodell zuzuordnen.²¹

SOUREN sieht die Sortierung dagegen als Teil der Reduktion.²² Die vorwiegend mengenmäßigen Transformationen bei der Sortierung werden durch seine Definition von Reduktionsprozesstypen auf Basis der **Komponentenmodellierung** erfasst.²³ Diese Reduktionsprozesstypen beschreiben verschiedene Formen der Komponententransformation, u. a. die Komponentenverteilung, bei der es zu einer Übertragung von Quantitäten kommt, z. B. von LVP-Abfällen aus dem ursprünglichen Abfallgemisch oder Getränkeflaschen aus den Kästen in separate Fraktionen. An anderer Stelle führt SOUREN eine detaillierte Analyse der Prozesse innerhalb der Reduktionsphase durch.²⁴ Hier wird die Sortierung als eigener, vorbereitender Entbündelungsprozess der eigentlichen materiellen Umwandlung von Einwegverpackungsabfällen zu Sekundärrohstoffen und nicht weiter verwertbaren Reststoffen vorangestellt. Sie ist dabei so eng mit der materiellen Umwandlung verknüpft, dass SOUREN sie trotz ihrer Eigenständigkeit als Prozess als Element der Reduktionsphase sieht.

Einige Sortierprozesse setzen voraus, dass die zu sortierenden Objekte eine festgelegte maximale Größe besitzen bzw. die umhüllenden Behältnisse geöffnet und entfernt werden. Dazu sind vor oder während der Sortierung Zerkleinerungs- bzw. Sacköffnungsprozesse erforderlich, wie z. B. bei der Elektronikschrottsortierung bzw. der Leichtverpackungssortierung des Gelben Sacks. Diese mechanischen Prozesse bewirken eine physische Veränderung der ursprünglichen Gestalt des Sortierguts und wandeln die

²⁰ Dies sind die sog. sechs ‚r‘ der Logistik, vgl. z. B. Isermann (1999), S. 68, oder Koether (2011), S. 21. Wobei ISERMANN als sechstes ‚r‘ den richtigen Kunden, KOETHER hingegen die richtigen Kosten angibt, sodass insgesamt auch von sieben ‚r‘ gesprochen werden könnte.

²¹ Vgl. Dyckhoff/Souren (2008), S. 57. Erwähnenswert ist zudem der Zuordnungswechsel. In Entstehungszeit der betrieblichen Reduktionstheorie zählte DYCKHOFF die Sortierung zunächst zu den Reduktionsprozessen, vgl. Dyckhoff (1996), Sp. 1461 und 1464. Erst nach neuem Erkenntnisstand veränderte sich diese Position.

²² Vgl. Souren (1996b), Teil B.

²³ Zu Komponentenmodellierung vgl. Souren (1996b), Teil B, sowie Abschnitt 5.1.3, S. 106, dieser Arbeit. Zur Definition der Reduktionsprozesstypen vgl. Souren (1996b), S. 82 und 116ff.

²⁴ Die Untersuchung stellt die Situation speziell von Einwegverpackungen, zu denen auch die Leichtverpackungen gehören, dar, vgl. hierzu und im Folgenden Souren (2003), S. 105.

Objekte somit materiell um. In diesem Fall umfasst die Sortierung die für Reduktionsprozesse erforderliche Bedingung der materiellen Transformation und kann eindeutig der Reduktionsphase im Kreislaufmodell zugeordnet werden.²⁵

Die Diskussion zeigt, dass die Sortierung anhand ihrer Charakteristika sowohl der Kollektions- als auch der Reduktionsphase zugeordnet werden kann. Dies ist in erster Linie davon abhängig, welche Objekte sortiert werden sollen. Bei Objekten, die ihre ursprüngliche Gestalt beibehalten, wie z. B. Mehrwegflaschen und Kästen in der Getränkeindustrie, erscheint die Kollektionsphase als die passende Kreislaufphase. Bei Sortiergut wie dem Gelben Sack, der bei der Entpackung seine Gestalt verliert, stellt sich eher die Reduktionsphase als adäquat heraus. Darüber hinaus sind jedoch auch Situationen denkbar, in denen Sortierung beiden Phasen zugeschrieben werden kann, weil sie die Charakteristika beider Phasen erfüllt.²⁶ Demzufolge erscheint es zweckmäßig, Sortierung **phasenübergreifend** an der Nahtstelle von Kollektion und Reduktion einzuordnen.²⁷

Verfahrenstechnische Definitionen und Einordnung technischer Verfahren

In der Verfahrenstechnik werden die Verfahren, die zur Abfalltrennung eingesetzt werden, allgemein als **Trennverfahren** oder **Trennprozesse** bezeichnet.²⁸ Der Begriff **Sortierung** wird hier nur für einen kleinen Bereich spezieller Trennverfahren verwendet. Nach CHRISTIANI bündelt der Ausdruck Sortierung „in der aufbereitungs-technischen Nomenklatur die verfahrenstechnischen Grundoperationen einer ... Trennung von Materialien nach Stoffeigenschaften.“²⁹ Die relevante Stoffeigenschaft, nach der getrennt wird, wird auch als **Trennmerkmal** bezeichnet. Es entstehen durch die Sortierung mindestens zwei getrennte Fraktionen unterschiedlicher Zusammensetzung, wobei die stoffliche Zusammensetzung und der sog. Dispersitätszustand der sortierten Objekte, d. h. ihre Objektform und -größe etc., unverändert erhalten bleiben.³⁰

²⁵ Den Vorgang der Stoffumwandlung bei der Sortierung untermauert auch die Begriffswahl in der Verfahrenstechnik, vgl. Kuyumcu (1999a), S. 2.

²⁶ Als Beispiel ist auch hier die Sortierung von Leichtverpackungen aus Gelben Säcken zu nennen.

²⁷ Diese Auffassung wird durch Schug et al. (2007), S. 7, gestützt.

²⁸ Vgl. Schubert (2003b), S. 499. Als weiteres Synonym wird auch der Begriff Aufbereitung genannt, vgl. Willing (1999), S. 78. Nach Ansicht des Autors ist dieser Begriff jedoch sehr weit gefasst und bezieht häufig noch weitere Verfahrensschritte, u. a. auch die Objektumwandlungen zu weiteren Zwecken, ein, sodass seine Verwendung zur Umschreibung der Abfallsortierung nicht zweckmäßig ist.

²⁹ Christiani (2006), S. 1.

³⁰ Vgl. Kuyumcu (1999a), S. 1, Pretz (2010), S. 159.

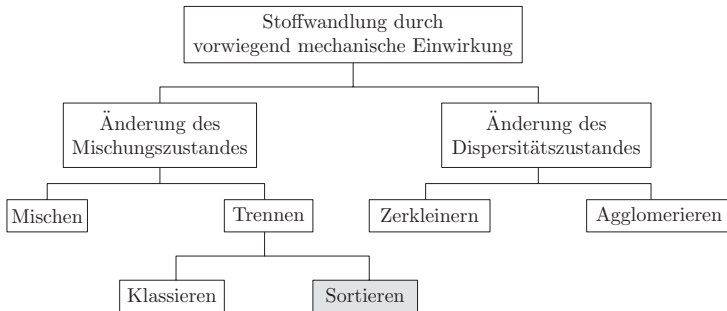


Abbildung 2.1: Die Einordnung der Sortierung (und Klassierung) in die mechanischen Grundoperationen für festdisperse Stoffsysteme (Kuyumcu (1999a), S. 2)

Die zweite relevante Gruppe der Trennverfahren im Rahmen der Abfalltrennung ist die **Klassierung**, eine Trennung nach der Objektgröße (sog. Korngröße) bzw. der Gestalt der Objekte (sog. Kornform).³¹ Eine Einordnung beider Trennverfahren in die verfahrenstechnischen Grundoperationen stellt Abbildung 2.1 dar. Um dem Leser einen Eindruck von der Abfallsortierung in der Praxis zu vermitteln, erfolgt in diesem Abschnitt zunächst eine weitere, detailliertere Übersicht über die technischen Verfahren und im nachfolgenden Kapitel dann ihre Vorstellung mit einer Erläuterung ihrer Funktionsweisen.³² Dazu zählt auch die Leergutsortierung. Mit ihr beschäftigt sich ein eigener Abschnitt (3.5), weil sie auf eigens dafür gestalteten technischen Anlagen durchgeführt wird.

Der Abfalltrennung müssen für eine effektive Durchführung verschiedene vorbereitende Prozesse vorgeschaltet werden. In Gelben Säcken gebündelter Abfall muss vor der Sortierung entpackt werden. Dazu werden automatisierte **Sacköffnungsverfahren** eingesetzt.³³ Damit einher geht in manchen Fällen auch eine **Zerkleinerung** des Sortierguts. Alternativ kann die Zerkleinerung auch getrennt von der Sacköffnung, aber immer noch im Rahmen der vorbereitenden Prozesse, ablaufen. Die Zerkleinerung

³¹ Vgl. Schubert (2003b), S. 506. Nach dem Sortierhandbuch gibt es im Rahmen der LVP-Sortierung eine eigenständige Sortierung nach der Kornform, die aber aufgrund ihres nur noch gelegentlichen Einsatzes hier nicht betrachtet wird, vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 15f.

³² Nicht alle nachfolgend vorgestellten Verfahren müssen auch zwingend in einer Sortieranlage vorhanden sein und zum Einsatz kommen. Sie beschreiben gewissermaßen die mögliche Maximalausstattung.

³³ Vgl. zu Sacköffnungsverfahren und der einhergehenden Zerkleinerung z.B. Duales System Deutschland (2004), S. 2f.

dient dazu, die Größe des Aufgabematerials zu verringern. Das Ziel der Zerkleinerung ist es, Verbunde und Stoffe sortierbar zu machen, indem sie aufgeschlossen und freigelegt, auf eine maximale Größe gebracht oder gezielt aus ihnen sogar erwünschte Korngrößenverteilungen bzw. Kornformen erzeugt werden. Ihr Ausmaß, Grob-, Mittel- oder Feinzerkleinerung, muss an die nachfolgenden Prozessschritte angepasst sein. Die Wahl des geeigneten Zerkleinerungsverfahrens wird durch die physikalischen Materialeigenschaften des zu zerkleinernden Materials bestimmt. Aufgrund der vielfältigen Materialarten im Abfallgemisch muss die gewählte Zerkleinerungsanlage auf das vollständige Spektrum ausgerichtet sein.³⁴

Die nächste Prozessstufe ist die **Klassierung**. Sie folgt gewöhnlich auf die vorbereitenden Verfahren und wird zum Teil selbst auch als eine Form der Vorkonditionierung des Aufgabeguts zur eigentlichen Sortierung aufgefasst. Bei der Klassierung wird der Sortiergutstrom nach geometrischen Feinheitsmerkmalen, häufig nach der Größe, getrennt. Dadurch erhält man zunächst zwei Fraktionen, das Grob- und das Feingut.³⁵ Diese beiden Fraktionen unterscheiden sich zwar hinsichtlich der Objektgröße, können aber immer noch aus den gleichen Materialien bestehen.³⁶ Da ein einziger Durchlauf der Klassierung vielfach noch nicht das gewünschte Trennergebnis erzielt, können mehrere Klassiervorgänge nacheinander durchlaufen werden.³⁷

In der Abfalltrennung werden durch Klassiervorgänge zu kleine und daher nicht sortierbare Objekte, wie Sand (Feinkorn), bzw. sehr große oder mit anderen Verfahren nur schwierig sortierbare Objekte, wie Folien, gezielt ausgeschleust.³⁸ Wie dieses Beispiel zeigt, ist mit der Klassierung in gewissen Grenzen auch eine qualitative Trennung des Sortierguts erzielbar, insbesondere wenn bekannt ist, dass eine ausgewählte Fraktion nur eine ganz bestimmte Größe oder Kornform aufweist.³⁹ Verfahren der Klassierung sind die **Siebklassierung** und die **Stromklassierung**.⁴⁰

Der Klassierung schließt sich die Sortierung nach Stoffeigenschaften an. Sie umfasst ein breites Spektrum unterschiedlicher Verfahren. Ihr Output ist das Gesamtergebnis der Abfalltrennung – die Fraktionen der gewünschten Stoffe und fast immer ein nicht weiter separierbarer Rest. Relevante Trennmerkmale, nach denen die Sortierung durchgeführt wird, sind Form, Masse, Korngröße, Stoffdichte, magnetische Sus-

³⁴ Vgl. Pretz (2010), S. 138ff., Martens (2011), S. 17ff.

³⁵ Vgl. Stieß (2009), S. 261, sowie Müller (2010), S. 94.

³⁶ Dies wird auch als Teilung bezeichnet, vgl. Pretz (2010), S. 137.

³⁷ Vgl. Stieß (2009), S. 272–277.

³⁸ Vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 4.

³⁹ Vgl. Pretz (2010), S. 151.

⁴⁰ Vgl. Thomé-Kozmiensky (1995), S. 74.

zeptibilität⁴¹, elektrische Leitfähigkeit, Lichtabsorption sowie Farbe und weitere optische Eigenschaften.⁴² Die zur Abfallsortierung eingesetzten Verfahren sind **Flotation**, **Magnetfeldsortierung**, **Elektrosortierung**, sensorgestützte **automatische Klaubung** und **Handklaubung**, wobei die Magnetfeldsortierung ein Sammelbegriff für Magnetscheidung und Wirbelstromsortierung ist.⁴³ Die sensorgestützte Sortierung wird nach den im Erkennungssystem eingesetzten Sensoren und ihrem Spektralbereich ebenfalls noch weiter unterteilt in Nahinfrarot (**NIR**), Röntgen und optoelektronische Identifikation.⁴⁴ Die genannten Verfahren stehen nicht separat nebeneinander, sondern werden zur Erreichung eines möglichst guten Sortierergebnisses zu einem komplexen Aggregat kombiniert. Abbildung 2.2 auf der nachfolgenden Seite fasst die technischen Klassier- und Sortierverfahren in einer Übersicht zusammen.

⁴¹ Suszeptibilität gibt die Magnetisierbarkeit in einem externen magnetischen Feld an, vgl. Haase/Garbe/Gerth (2009), S. 197.

⁴² Vgl. hierzu z. B. Pretz (2010), S. 159. Einteilungen der Sortierverfahren nach Trennmerkmalen findet sich bei Heilmann (2000), S. 39, sowie Christiani (2006), S. 2.

⁴³ Vgl. z. B. Heilmann (2000), S. 39, Christiani (2006), S. 2, sowie Duales System Deutschland (2004).

⁴⁴ Vgl. Faist/Ragossnig (2008), S. 39.

Einige Verfahren lassen sich dabei nicht exklusiv der Klassierung oder Sortierung zuordnen, da sie die Voraussetzungen beider Formen erfüllen (vgl. gestrichelte bzw. gepunktete Verbindung in Abbildung 2.2).⁴⁵ Dies betrifft in erster Linie die **Dichtesortierung**. Sie nutzt einerseits die Dichteigenschaften von Feststoffen, die je nach Material unterschiedlich sind (Sortierung nach Stoffeigenschaft). Andererseits wird aber auch die Tatsache nutzbar gemacht, dass unterschiedlich große Objekte gleichen Materials oftmals auch ein unterschiedliches Gewicht haben sowie flache Objekte häufig andere Verhaltenseigenschaften aufweisen als kompakte Objekte (Klassierung nach Korngröße bzw. Kornform).⁴⁶ Technisch werden diese Trennungen durch **Sichten**, **Schwimm-Sink-Sortierung** und **Setzen** ermöglicht.⁴⁷

Besondere Formen der Sortierung

In der technischen Sortierung werden unterschiedliche Vorgehensweisen abgegrenzt. Zunächst gilt es, die **Teilsortierung** von der **Totalsortierung** zu unterscheiden. Bei der Teilsortierung werden nur ausgewählte Fraktionen gezielt aus dem Gemisch abgetrennt. Die Totalsortierung beschreibt die vollständige Trennung des Gemischs in alle enthaltenen Fraktionen.⁴⁸ Eine derartige Trennung aller Fraktionen findet beispielsweise bei der Batteriesortierung statt. Eine nahezu totale Sortierung erfolgt bei der Mehrwegflaschensortierung. Bekannte Flaschen werden nach ihrem individuellen Trennmerkmal sortiert, unbekannte Flaschen in eine gemeinsame Restfraktion ausgeschleust. In der Leichtverpackungssortierung ist die Totalsortierung hingegen nicht möglich, da es durch die Restfeuchte des Verpackungsabfalls bzw. bedingt durch deren vormaligen Inhalt zu Anhaftungen kommt, die dann fälschlicherweise mit aussortiert werden, oder die Objekte sind schlicht zu klein, um noch sortiert werden zu können.⁴⁹ Es liegt demnach eine Teilsortierung vor.

Des Weiteren ist zwischen **Positiv-** und **Negativsortierung** zu unterscheiden.⁵⁰ Im Rahmen der Positivsortierung werden die gewünschten Fraktionen gezielt abgetrennt. Nicht erwünschte Fraktionen verbleiben im Gemisch und werden als Reste ausgetra-

⁴⁵ Vgl. Heilmann (2000), S. 38, und zum Sortieren durch Klassieren vgl. z. B. Christiani (1997), S. 64, wobei CHRISTIANI sich weitestgehend auf Trommelsiebung bezieht.

⁴⁶ Vgl. z. B. Pretz (2010), S. 151.

⁴⁷ Beim Sichten gibt es eine weitere Überschneidung in der Zuordnung zu Dichtesortierung und Stromklassierung, vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 10 (Stromklassierung), und Pretz (2010), S. 167 (Dichtesortierung).

⁴⁸ Vgl. hierzu und im Folgenden Knudsen/Nowak (2008), S. 11.

⁴⁹ Vgl. Christiani (2006), S. 5.

⁵⁰ Vgl. hierzu und auch im Folgenden Duales System Deutschland (2004), S. 22.

gen, um ein möglichst reines Sortierergebnis zu erzielen. Bei der Negativsortierung werden dagegen die unerwünschten Objekte aus dem Gemisch entfernt. Sie wird gewöhnlich dann angewendet, wenn eine hohe Outputquantität gefordert ist. Aufgrund der zumeist schnelleren Durchführung der Negativsortierung ist die Sortierqualität schlechter als bei der Positivsortierung.⁵¹ Die verfahrenstechnischen Bezeichnungen dieser Sortierformen sind **Anreicherung** und **Abreicherung**.⁵²

Arbeitsdefinition

In der abschließenden **Arbeitsdefinition** seien im Folgenden unter Sortierung alle Kollektions- und Reduktionsprozesse verstanden, die dazu dienen, zurückgeführte Objekte (aus einem Gemisch⁵³ oder Bündel) nach festgelegten Trennmerkmalen, zu denen neben Stoffeigenschaften auch die Objektgröße zählt, in separate Fraktionen zu trennen.

⁵¹ Vgl. Jansen/Pretz (2011), S. 71.

⁵² Vgl. Schubert (2003a), S. 1, sowie Pretz (2010), S. 136.

⁵³ Eine genauere Charakterisierung von Gemischen und Vermischung erfolgt in Kapitel 4.

Kapitel 3

Charakteristika verschiedener technischer Sortierverfahren

Bereits vor rund dreißig Jahren begann ein rudimentäres Abfallrecycling mithilfe einfacher technischer Verfahren. Die dazu verwendete Technik entstammte weitestgehend der klassischen mineralischen Aufbereitung. Jedoch wurde bald erkannt, dass diese Aufbereitungsverfahren den spezifischen Eigenschaften von Abfallgemischen nicht ausreichend Rechnung trugen. So kam es nachfolgend zu einer eigenständigen Entwicklung spezialisierter Verfahren, die auf die Schüttfähigkeiten und -dichten sowie die uneinheitlichen Kornformen im Abfallgemisch angepasst waren. Dazu wurden auch die Kenntnisse verwandter Gebiete wie der Nahrungsmitteltechnik genutzt.¹

Bei der Einführung der Wertstoffsortierung im Rahmen des Dualen Systems 1991 existierten neben der Handsortierung lediglich grobe Siebe, die nur eine geringe Sortierqualität erbrachten. Eine Magnetscheidung zur Abtrennung von Weißblech wurde 1993 in den Sortierprozess eingefügt. 1994 folgten Windsichter und Wirbelstromabscheider. Ein erster Infrarot-Detektor kam ab 1996 zum Einsatz. Ihm folgte ein Jahr später die automatische Sacköffnung. Gegen Ende der neunziger Jahre wurden die Trennmerkmale der Sortierung von den Verpackungsarten und -formen zunehmend auf die Materialarten umgestellt.² Inzwischen arbeiten die Sortieranlagen überwiegend vollautomatisch, wobei die Handklaubung in weiten Teilen, aber noch nicht vollständig, durch sensorgestützte Klaubungssysteme ersetzt wurde.³

¹ Vgl. Pretz/Julius (2008), S. 105, sowie Friedlaender (2010), S. 2.

² Vgl. Boeckh (2001), S. 31.

³ Vgl. Pretz/Julius (2008), S. 105.

In diesem Kapitel werden die technischen Verfahren zur Sortierung von LVP-Abfall beschrieben. Neben der Funktionsweise wird vor allem ein Blick auf die **Parameter** der einzelnen Verfahren geworfen, die ein Sortierunternehmen beeinflussen kann. Es gibt zum einen Parameter, die vorab bei der Planung der Anlage festgelegt werden müssen und für eine lange Zeit fixiert werden. Sie sind gewöhnlich nicht oder nur mit sehr großem finanziellen Aufwand veränderbar, z. B. die Kapazität. Zum anderen gibt es Prozessparameter, die auch im laufenden Betrieb angepasst werden können, so die Notwendigkeit dazu besteht. Sie werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit von besonderem Interesse sein. Im Folgenden werden in den Abschnitten 3.1 bis 3.3 die vorbereitenden Klassier- und Sortierverfahren vorgestellt. Ihr Zusammenwirken in einer Gesamtanlage wird in Abschnitt 3.4 verdeutlicht. Abschnitt 3.5 beschäftigt sich abschließend mit der Leergutsortierung.

3.1 Vorbereitende Prozesse

Der Einsatz vorbereitender Prozesse ist von den Anforderungen nachfolgender Verfahrensschritte abhängig. Hier ist eine genaue Abstimmung auf die gesamte Verfahrenskette erforderlich, da das Sortierergebnis wesentlich durch die Wahl geeigneter Vorverfahren beeinflusst wird.⁴ Zu den vorbereitenden Verfahren zählen die Gebindeöffnung und die Zerkleinerung.⁵

Gebindeöffnung

Häufig werden LVP in Gelben Säcken durch ein Holsystem⁶ gesammelt. In den Sammelfahrzeugen werden die Säcke verpresst, damit pro Fahrt mehr LVP transportiert werden können. Nach der Ankunft in der Sortieranlage müssen die Abfälle aufgabe- und sortierfähig gemacht werden. Dazu müssen die Säcke geöffnet und ihr Inhalt aufgelockert werden. Dies erfolgt maschinell im Verfahrensschritt Gebinde- oder Sacköffnung.⁷

⁴ Vgl. Pretz (2010), S. 151.

⁵ Zum Teil wird das Verständnis, was ein vorbereitendes Verfahren ist, auf weitere Verfahren ausgeweitet, vgl. z. B. Jansen/Pretz (2011), die beschreiben wie ein Abfallgemisch vor seiner (sensorgestützten) Sortierung durch weitere Verfahren angereichert, also vorsortiert, wird.

⁶ Zusätzlich bieten viele Entsorger inzwischen auch ein Bringsystem an, indem Abfälle bei Bedarf zu einer zentralen Sammelstelle, einem Recyclinghof, gebracht und dort in große Container eingeworfen werden können, vgl. z. B. aha (2004).

⁷ Vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 2.

Die **Gebindeöffnung** ist dem Sortierzweck anzupassen. Wird, wie es früher und auch heute zum Teil noch üblich ist, nach Artikeln (z. B. Flaschen, Joghurtbecher, Getränkepackungen etc.) sortiert, so sollten diese die Gebindeöffnung möglichst zerstörungsfrei passieren. Wird stattdessen nach Materialart getrennt und sind die Sortieranlagen in der Lage kleine Partikel zu erfassen, kann die Gebindeöffnung mit einer Zerkleinerungseinrichtung kombiniert werden, die nicht nur die Säcke öffnet, sondern gleichzeitig auch deren Inhalt zerkleinert. Darüber hinaus ist eine gleichzeitige Kombination mit einer Dosiereinrichtung zur Aufgabe auf ein Förderband möglich.⁸

Im Sortierhandbuch des DSD werden drei mechanische Beanspruchungsarten genannt, die für die Sacköffnung infrage kommen: Schneiden, Schlagen und Reißen.⁹ Die **Schneidbeanspruchung** kann durch zwei gegenläufige Schneidkanten oder mit umlaufenden Schneidmessern ausgeübt werden, durch die der Gelbe Sack geöffnet wird. Eine **reißende Beanspruchung** wird erzeugt, indem der Sack fixiert und durch die Bewegung des Reißwerkzeugs zerrissen wird. Die Fixierung muss dabei einerseits so stark sein, dass der Sack gehalten und die Hülle aufgerissen wird, andererseits darf der Sack aber auch nicht zu fest an das Reißwerkzeug gepresst werden, sodass auch sein Inhalt zerkleinert wird. Beim **Schlagen** wird ein schnell laufendes, stumpfes Werkzeug gegen den Sack eingesetzt, sodass er geöffnet wird.¹⁰

Bei der Planung der Anlagen müssen **Parameter** wie die Breite der Schneidspalte, die Fixierungsart sowie Form und Größe der Werkzeuge für den zu verrichtenden Zweck – die Öffnung der Gelben Säcke – geeignet gewählt werden. Da die Werkzeuge auch zu Wartungs- und Reinigungszecken entnehmbar gestaltet werden, besteht hier in Grenzen eine Flexibilität, die eine Anpassung bzw. einen Austausch der Werkzeuge an veränderte Anforderungen in der Sortierung gestattet.

Zerkleinerung

Für maschinelle Sortierverfahren, wie z. B. automatische Kläubung nach Materialart, ist oftmals eine Zerkleinerung der Abfälle notwendig.¹¹ Die Zerkleinerung sorgt für einen Aufschluss von zu gesamthafter Verpackungen verbundenen Materialien.¹²

⁸ Vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 2. Für weitere Ausführungen zu unterschiedlichen Bauarten von Gebindeöffnern sei auf das Sortierhandbuch vom DSD verwiesen, vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 3f.

⁹ Vgl. hierzu und im Folgenden Duales System Deutschland (2004), S. 2f.

¹⁰ Vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 2f.

¹¹ Vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 11.

¹² Vgl. Thomé-Kozmiensky (1995), S. 70. Zu Verpackungen verbundene Materialien sind von den Verbundstoffen zu unterscheiden. Eine Verbindung zweier Materialarten ist beispielsweise ein

Außerdem unterstützt sie die Erzeugung definierter Größenverteilungen der entstehenden Partikel.¹³ Die Zerkleinerungsverfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Beanspruchungsart, durch die die Zerkleinerung bewirkt wird. Es wird zwischen Druck-, Schlag-, Prall-, Schneid-, Reibe- sowie reißender Beanspruchung unterschieden.¹⁴ Die Beanspruchungsarten treten in den Anlagen zur Abfallzerkleinerung nicht immer in ihrer Reinform auf, sondern oftmals gemeinsam oder überlagert. Diese Überlagerung kann sich als unerwünschter Nebeneffekt negativ auf das Prozessergebnis auswirken. Zum Einsatz kommen in der Kunststoffabfallzerkleinerung bei grober bis mittlerer Zerkleinerung z. B. Rotorscheren und Schraubenmühlen sowie bei mittlerer bis feiner Zerkleinerung z. B. Hammer- und Schneidmühlen.¹⁵

Rotorscheren sind langsam laufende Zerkleinerungsmaschinen mit schneidender Beanspruchung. In ihnen drehen sich zwei mit Schneiden versehene Wellen gegeneinander, wobei die einzelnen Schneiden jeweils zwischen zwei Schneiden der gegenüberliegenden Welle eingreifen. Der Abfall wird in die Schneidspalte eingeogen und in Längs- und Querrichtung, überwiegend streifenförmig, zerkleinert.¹⁶ **Schneidmühlen** enthalten einen Rotor, der mit einem flexibel tauschbaren Messersatz bestückt ist. Im Gehäuse sind zudem justierbare Statormesser verbaut. Schneidmühlen laufen mit höheren Geschwindigkeiten als Rotorscheren. Der schwerkraftbasierte Aufgabemechanismus erfordert eine gleichmäßige Aufgabe, damit sich keine Teile verkanten.¹⁷ **Parameter** des Schneidprozesses, die durch den Sortierer festzulegen sind, sind die Anzahl Messer sowie ihr Abstand voneinander, der die Partikel- bzw. Streifenbreite bestimmt.¹⁸

Eine durch Schlag- und Prallbeanspruchung induzierte Zerkleinerung erfolgt in **Hammermühlen**.¹⁹ Diese besitzen einen schnell drehenden horizontalen oder vertikalen

Joghurtbecher aus Polystyrol mit einem Deckel aus Aluminiumfolie. Die Zerkleinerung trennt den Deckel vom Becher ab. Verbundstoffe hingegen sind manuell bzw. mechanisch nicht trennbar. Ihre Trennung erfordert weitere Aufbereitungsverfahren. Nichtsdestoweniger kann nach Verbundarten sortiert werden, z. B. Getränkekartons bzw. deren Partikeln.

¹³ Mit der Erzeugung von Korngrößenverteilungen beschäftigt sich z. B. Stief (2009).

¹⁴ Vgl. hierzu und im Folgenden Pretz (2010), S. 139f. Nachfolgend werden nur die für die Abfallaufbereitung relevanten Verfahren erläutert. Für alle weiteren Zerkleinerungsverfahren sei auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen, z. B. Schubert (2003b), S. 299–371, oder Bittner/van Marvik/Wolters (1997), S. 54–66.

¹⁵ Eine detaillierte Zuordnung der Verfahren zur Zielkorngröße findet sich bei Pretz (2010), S. 140.

¹⁶ Das Prinzip der Rotorschere wird bereits an einem einfachen Aktenvernichter deutlich. Vgl. zu Rotorscheren Pretz (2010), S. 140f.

¹⁷ Vgl. Pretz (2010), S. 140–145.

¹⁸ Vgl. Thomé-Kozmiensky (1995), S. 72.

¹⁹ Es kann eine Kombination mit weiteren Beanspruchungsarten, z. B. Scherbeanspruchung, in Abhängigkeit vom Aufgabematerial, z. B. Metall, auftreten.

Rotor, an dem die Hämmer beweglich befestigt sind. Durch die Rotordrehung werden die Hämmer radial ausgerichtet und zerkleinern das zugeführte Aufgabegut. Die Hämmer können durch Nachgeben schwer zerkleinerbaren Teilen ausweichen. Eine bekannte Ausführung von Hammermühlen ist der Shredder beim Schrott- und Altautorecycling.²⁰ **Schraubenmühlen** hingegen bestehen aus zwei langsam drehenden Walzen mit schraubenförmigen Zerkleinerungswerkzeugen (sog. Schnecken). Die gegenläufig und mit unterschiedlicher Drehzahl rotierenden Schnecken ziehen das Aufgabegut ein und zerkleinern es durch Reißen, Quetschen und Scheren. Die mittig darunter sitzende Kastenwalze sorgt zusammen mit starren Gehäusemessern für die Nachzerkleinerung.²¹

3.2 Klassierverfahren

Auf die vorbereitenden Verfahren folgt die Klassierung des Sortierguts in Größenklassen. Verfahrensformen der Klassierung sind die Siebklassierung und die Stromklassierung. Letztere überschneidet sich bei einigen Verfahren mit denen der Dichtesortierung. Daher werden diese Verfahren gemeinsam in einem Abschnitt behandelt und bilden das Bindeglied zu den stofforientierten Sortierverfahren.

3.2.1 Siebklassierung

Bei der Siebklassierung wird die **Abfalltrennung in Größenklassen** dadurch erreicht, dass die Objekte über einen mit Öffnungen versehenen Siebboden bewegt werden. Dabei verbleiben die Partikel, die größer als der Sieblochdurchmesser sind, auf dem Siebboden (sog. Siebüberlauf). Alle Partikel, die kleiner sind, fallen durch die Öffnungen hindurch (sog. Siebunterlauf oder Durchgang).²² **Sieblochform** und **-weite** sind die zwei vom Sortierer festzulegenden **Parameter** für den Siebungsprozess und determinieren gleichzeitig das Trennmerkmal, die Korngröße. Die Siebeläge können aus Blechen mit Rund-, Quadrat- bzw. Rechtecklochungen hergestellt sein oder aus mehr oder weniger dichtem Drahtgewebe bestehen.²³ Die Wahl der geeigneten Siebmaschine hängt von den stofflichen Eigenschaften des Abfalls ab.²⁴ PRETZ nennt

²⁰ Vgl. Pretz (2010), S. 147ff., sowie Thomé-Kozmiensky (1995), S. 70ff.

²¹ Vgl. Pretz (2010), S. 145ff.

²² Vgl. Pretz (2010), S. 151, Duales System Deutschland (2004), S. 5.

²³ Vgl. Pretz (2010), S. 154f., Duales System Deutschland (2004), S. 7, Stieß (2009), S. 261.

²⁴ Eine Übersicht über Siebklassiergeräte findet sich bei Schubert (1996a), S. 147.

hier als Einflussgrößen u. a. die Schüttdichte, die Kornform, den Grenzkornanteil²⁵ sowie den Feuchtigkeitsanteil.²⁶ Der Sieberfolg wird mit zwei Kennzahlen gemessen, dem **Siebdurchsatz** und dem **Siebgütegrad**.²⁷

Mögliche **Siebbauarten** sind z. B. Trommelsiebe, Linear- bzw. Kreisschwingsiebe, Plansiebe, Taumelsiebe, Spannwellensiebe, Scheibensiebe und bewegte Roste.²⁸ Für die LVP-Klassierung werden typischerweise **Trommelsiebe** eingesetzt. Sie bestehen aus einem nahezu horizontal gelagerten, sich drehenden Zylinder, in dessen Mantel sich die Sieböffnungen befinden. Durch die Drehung der Trommel wird das Aufgabegut an den Innenwänden mit hochgehoben und gleitet aus einer bestimmten Höhe wieder nach unten. Aufgrund einer leichten Neigung des Zylinders wird das Sortiergut neben der Rotationsbewegung auch vorwärts transportiert, wobei die Geschwindigkeit vom Neigungswinkel abhängt (vgl. Abbildung 3.1a).²⁹

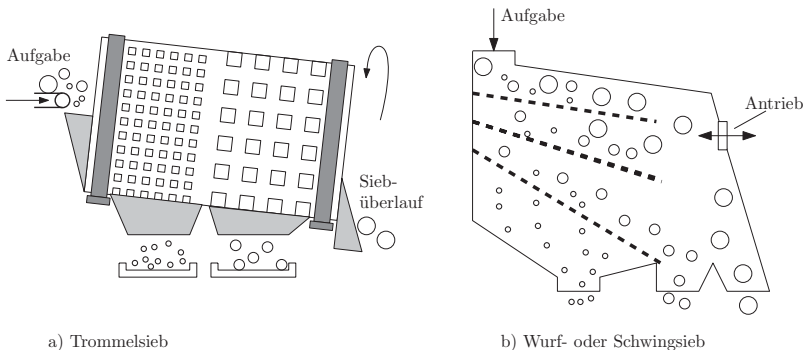


Abbildung 3.1: Zwei Verfahren der Siebklassierung (Martens (2011), S. 24, Uhlig/Bremerstein (1997), S. 48.)

²⁵ Als Grenzkorn werden Partikel bezeichnet, deren Größe etwa der Sieblochgröße entspricht und die daher leicht in den Öffnungen verankert, vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 5.

²⁶ Vgl. Pretz (2010), S. 152.

²⁷ Der Siebdurchsatz ergibt sich aus der Aufgabemenge pro Siebfläche und der Siebgütegrad gibt an, welcher Anteil des Feinkorns im Aufgabegut tatsächlich abgesiebt worden ist, vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 5, Stieß (2009), S. 293f. Damit ist der Siebgütegrad eine Variante des Abtrennungsgrads, vgl. hierzu Abschnitt 6.1.

²⁸ Vgl. Pretz (2010), S. 152. Dort findet sich auch eine Liste mit den zugehörigen Trennkorngrößen. Vgl. zur Übersicht der Siebklassierungsverfahren Duales System Deutschland (2004), Kapitel 2.

²⁹ Vgl. Pretz (2010), S. 153. Als Transporthilfsmittel werden auch sog. Mitnehmer in der Trommel montiert, vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 7.

Als Vorteile von Trommelsieben werden ihr ruhiger Lauf, eine gute Homogenisierungswirkung und die Trennung zusammenhaftenden Aufgabeguts genannt.³⁰ Sie sind auch gut dazu geeignet, großflächige Bestandteile, wie sie häufig im LVP-Abfall enthalten sind (z. B. Folien), auszutragen, die bei anderen Siebarten eine Versperrung der Sieblöcher verursachen. Der Erfolg des Siebvorgangs kann erhöht werden, wenn mehrere Siebmaschinen hintereinander geschaltet und die Sieblochgrößen zunehmend fein abgestuft werden (vgl. Abbildung 3.1a). Probleme treten häufig bei sehr grobem Aufgabegut auf, das die Siebbeläge verstopfen kann. Außerdem werden Blockaden durch lange, wickelbare Objekte, wie z. B. Kassettenbänder, Folien und Textilien, verursacht, sodass es zu vermehrten Fehlausträgen kommt und ein großer Anteil Feingut im Überlauf zurückbleibt.³¹

Ersatzweise können statt der Trommelsiebe auch Linear- bzw. Kreisschwingsiebe aus der Gruppe der **Wurfsiebe** zur Abfalltrennung eingesetzt werden (vgl. Abbildung 3.1b). Beide Siebarten haben als Siebbelag eine stabil gerahmte, gelochte Fläche, die durch einen Motor linear in Förderrichtung bzw. kreisförmig bewegt wird.³² Das Aufgabegut wird durch diese Bewegungen gelockert und transportiert.³³ Die Länge des Siebs bestimmt die Güte des Siebvorgangs. Die gleichzeitige Siebung mehrerer Fraktionen ist mit sog. Doppeldeckern, bei denen zwei oder mehr Siebbeläge übereinander angeordnet sind, möglich (vgl. nochmals Abbildung 3.1b). Probleme entstehen durch große Folien oder Papier, die die Sieblöcher verdecken, sowie größere Objekte, die nur geringe Wurfweiten erreichen. Durch eine vorherige Abtrennung dieser problematischen Fraktionen kann eine gleichwertige Qualität der Trennung wie bei Trommelsieben erzielt werden.³⁴

3.2.2 Stromklassierung und Dichtesortierung

Zwischen Stromklassierung und Dichtesortierung existieren vielerlei Ähnlichkeiten der Verfahren, die eine eindeutige Abgrenzung voneinander erschweren. Einzelne Verfahren wie das Sichten werden oft beiden Verfahrensklassen zugeordnet. So erscheint es

³⁰ Vgl. hierzu und im Folgenden Pretz (2010), S. 153f., sowie Duales System Deutschland (2004), S. 6f.

³¹ Vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 6.

³² Die kreisförmige Schwingbewegung erfordert für einen guten Materialtransport eine Neigung des Siebs, vgl. Pretz (2010), S. 155.

³³ Vgl. hierzu und im Folgenden Pretz (2010), S. 155f.

³⁴ Vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 9. Für weitere Siebbauarten sei auf die Fachliteratur verwiesen, z. B. Pretz (2010), S. 151–158, Duales System Deutschland (2004), S. 4–9.

aufgrund der weitreichenden Überschneidungen sinnvoll, die Verfahren dieser beiden Klassen in einem gemeinsamen Abschnitt vorzustellen.³⁵

Die **Stromklassierung** trennt den Abfall mithilfe eines strömenden Mediums in Größenklassen. Das Medium kann Luft, Wasser oder eine spezielle Trennflüssigkeit sein. Die Partikel passieren dieses Medium und werden durch die unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten bzw. Bewegungsbahnen der verschiedenen Korngrößen voneinander getrennt. Diese sind neben der Größe der Partikel oftmals aber auch von den unterschiedlichen Dichteigenschaften der einzelnen Materialien abhängig, die in der **Dichtesortierung** als stoffliches Trennmerkmal für unterschiedliche Materialien genutzt werden.³⁶

Sichten

Beim (**Wind-)Sichten** in der Abfalltrennung werden leichte Bestandteile wie Kunststoffe (Folien), Papier u. a. abgetrennt.³⁷ Als Trennmerkmal wird die stationäre Sinkgeschwindigkeit³⁸ genutzt, auf die Dichte, Kornform und Korngröße einen Einfluss ausüben.³⁹ Das Aufgabegut wird in einen Kanal geführt, der von einem quer oder entgegen der Aufgabe gerichteten Luftstrom durchströmt wird (sog. Quer- und Auf- bzw. Gegenstromsichter).⁴⁰ Die leichten und flugfähigen Teile, das Leichtgut, werden vom Luftstrom ausgelenkt und in einen Behälter ausgetragen. Schwere Teile (Schwergut) fallen nach unten und werden dort über ein Fördersystem abtransportiert.⁴¹

Sichten ist Teil der **Klassierung**, wenn bei gleicher Dichte und Kornform durch den Sichtvorgang eine Einteilung in Größenklassen erfolgt. Liegt hingegen bei gleicher Kornform und Korngröße eine unterschiedliche Materialdichte oder bei gleicher Korngröße und Dichte eine abweichende Kornform vor, so wird das Sichten als **Sortierverfahren** genutzt. Die Güte des Sichtprozesses wird von den vorangestellten Verfahren beeinflusst, z. B. durch das vorherige Absieben bestimmter Fraktionen.⁴²

³⁵ Eine derartige Vorgehensweise sieht z. B. auch das Sortierhandbuch des DSD vor, vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 4 und 10.

³⁶ Vgl. Pretz (2010), S. 151, Duales System Deutschland (2004), S. 4.

³⁷ Vgl. Martens (2011), S. 27. Dabei wird selten in mehr als zwei Klassen getrennt, vgl. Stieß (2009), S. 305.

³⁸ Hierunter wird die Geschwindigkeit eines freifallenden Teilchens verstanden, wenn die Erdanziehungskraft mit den Widerstandskräften der Luftreibung im Gleichgewicht ist.

³⁹ Vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 10.

⁴⁰ Vgl. Stieß (2009), S. 306.

⁴¹ Vgl. Pretz (2010), S. 167.

⁴² Vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 10f.

Ein vom Sortierer beeinflussbarer **Prozessparameter** ist die Geschwindigkeit des Luftstroms. Sie steuert die Trennung der unterschiedlichen Materialien abhängig von ihrer spezifischen Dichte. Dabei ist die rasche Geschwindigkeitsabnahme der Luft nach ihrem Austritt aus der Zufuhrdüse zu berücksichtigen.⁴³ Auch ist der Durchsatz von Windsichtmaschinen je nach Bauart begrenzt. Das Aufgabegut sollte gleichmäßig im Sichtraum verteilt und die Maschine nicht überladen werden.⁴⁴

Setzen

Beim **Setzen** wird eine Schichtung der Abfallpartikel nach ihrer Dichte durch ein von unten nach oben strömendes Fluid, meistens Wasser, gelegentlich auch Luft, erreicht.⁴⁵ Das Sortiergut wird auf einen durchlässigen Träger, einen Rost oder Siebboden, aufgegeben. Die spezifisch leichteren Objekte sammeln sich über den spezifisch schwereren Partikeln. Beeinflusst wird dieses Verfahren durch Kornform und -größe. Körper- bzw. kugelförmige Objekte lassen sich durch Setzen einfacher sortieren als flache. Prozessstörungen können sehr schnell bereits durch geringe Quantitäten von z. B. Draht, der die Schichtung behindert, hervorgerufen werden.⁴⁶ In der jüngeren Literatur werden Setzprozesse als Sortierverfahren für LVP-Abfälle nur noch gelegentlich in kurzen Absätzen erwähnt. Über ihren praktischen Einsatz in modernen Sortieranlagen wird so gut wie keine Aussage getroffen. Dies legt den Schluss nahe, dass Setzprozesse zur Abfallsortierung möglich sind, aber nur (noch) selten eingesetzt werden.

Schwimm-Sink-Sortierung

Die **Schwimm-Sink-Sortierung** gehört zur nassen Dichtentrennung. Hier werden die einzelnen Kunststoffsorten nach ihrer Stoffdichte getrennt. Dazu wird das Sortiergut in einen Behälter mit stehender oder bewegter Trennflüssigkeit (z. B. Wasser oder Salzlösung) gegeben (vgl. Abbildung 3.2).⁴⁷ Objekte mit geringerer Dichte als die Trennflüssigkeit schwimmen auf, während schwere Objekte mit höherer Dichte absinken. Im Fall statischer Schwimm-Sink-Sortierung, wenn das Fluid nicht bewegt

⁴³ Vgl. *Duales System Deutschland* (2004), S. 12.

⁴⁴ PRETZ gibt hierzu 0,35 kg Feststoff pro Kubikmeter Sichtluft und Stunde an, vgl. Pretz (2010), S. 168.

⁴⁵ Vgl. hierzu und im Folgenden Martens (2011), S. 27, sowie Schubert (2003b), S. 634ff.

⁴⁶ Vgl. Schubert (1996a), S. 180ff.

⁴⁷ Vgl. Schubert (1996a), S. 172, Willenberg (1996), S. 210.

wird, kann das Trennergebnis durch die Kornform und -größe sowie Anhaftungen von Luftblasen und Schmutz an den Partikeln verfälscht werden.⁴⁸

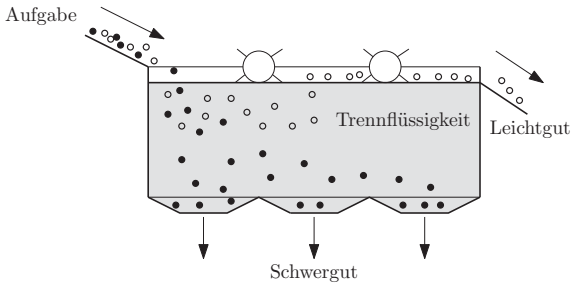


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Schwimm-Sink-Sortierung (Martens (2011), S. 26)

Alternative Verfahren in der nassen Dichtesortierung sind **Hydrozyklone** und **Sortierzentrifugen**, die zerkleinerte Kunststoffe mithilfe geeigneter Trennflüssigkeiten und eines auf verschiedene Weise erzeugten Zentrifugalfeldes trennen.⁴⁹

3.3 Sortierverfahren

Nachdem das Sortiergut vorbereitet und in Größenklassen getrennt wurde, schließt sich die Sortierung nach stofflichen Merkmalen an. Dazu zählen, neben der bereits vorgestellten Dichtesortierung, Magnetfeldsortierung, Flotation und Klaubeverfahren.

3.3.1 Magnetfeldsortierung

Magnetscheidung

Mit der **Magnetscheidung** werden ferromagnetische Objekte aus dem Sortiergutstrom entfernt, z. B. Weißblechdosen. Dazu wird das Aufgabegut durch ein starkes magnetisches Feld geführt, durch das die eisenhaltigen Objekte ausgetragen werden. Die Magnetscheidung dient nicht nur der gezielten Sortierung von eisenhaltigen Fraktionen, sondern oftmals auch als Verfahren zur Entfernung von Objekten, die

⁴⁸ Vgl. Pretz (2010), S. 170.

⁴⁹ Vgl. Pretz (2010), S. 171f.

in weiteren Verfahrensschritten zu Störungen oder Beschädigungen führen können oder die gewünschte Zielfraktion verunreinigen würden.⁵⁰ Die verschiedenen Bauarten sind Überbandmagnetscheider, Trommelmagnetscheider und Bandrollenmagnetscheider (vgl. Abbildung 3.3).

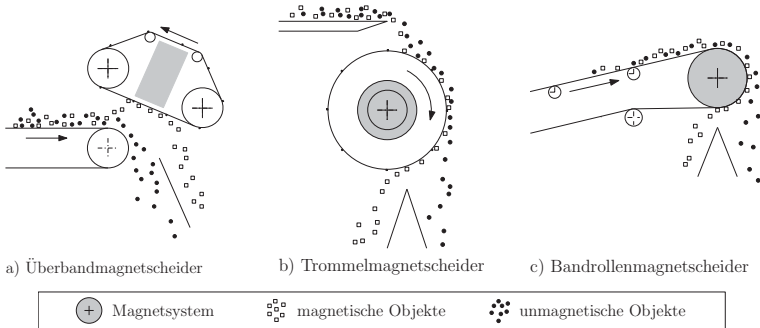


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der verschiedenen Magnetscheiderbauformen (in Anlehnung an Pretz (2010), S.163ff.)

Überbandmagnetscheider bestehen aus einem Magnetsystem, das von einem Gurtförderer umbaut ist (siehe Abbildung 3.3a). Dieses Aggregat wird in festgelegtem Abstand über dem Sortiergutband montiert. Der Magnet zieht die eisenhaltigen Objekte an, der Gurtförderer trägt die Teile weiter, wobei sie dann an der Position, an der das Magnetfeld nachlässt oder abgeschirmt wird, in einen Sammelbehälter fallen.⁵¹ Ein **Trommelmagnetscheider** besteht hingegen aus einer amagnetischen Trommel, die ein feststehendes Magnetsystem umschließt (vgl. Abbildung 3.3b). Das Sortiergut wird oftmals von oben im Scheitelpunkt der Trommel aufgegeben. Die ferromagnetischen Objekte bleiben an der drehenden Trommel haften und werden ausgetragen, während alle übrigen Objekte durch das Magnetfeld unbeeinflusst an der Trommel vorbei in einen Behälter fallen. Nach dem gleichen Prinzip der Magnettrommel funktionieren auch **Bandrollenmagnetscheider** (vgl. Abbildung 3.3 c). Hier ist das Magnetsystem in das Kopfstück eines Bandförderers eingebaut. Bedingt durch eine gewisse Abschirmungswirkung des Bands ist für dieses Verfahren ein stärkerer Magnet als beim Trommelmagnetscheider notwendig.⁵²

Die Fördermittel unterhalb des Magnetsystems müssen aus nicht magnetisierbaren Materialien bestehen, da sich andernfalls die Magnetfelder überlagern würden und

⁵⁰ Vgl. Pretz (2010), S. 162.

⁵¹ Vgl. Pretz (2010), S. 162.

⁵² Vgl. Pretz (2010), S. 164f.

das Verfahren nicht sachgemäß funktioniert. Weitere Probleme bei der Magnetscheidung ergeben sich, wenn die eisenhaltigen Objekte unter anderen, nicht magnetischen Abfällen liegen, z. B. eine Folie über einer Weißblechdose. Dadurch werden sie entweder abgeschirmt und nicht ausgetragen oder die magnetische Anziehung erfolgt durch das verdeckende Objekt hindurch, sodass dieses fälschlicherweise mit abgetrennt wird. Um einen derartigen Fehler zu vermeiden, muss hier unbedingt auf eine einschichtige Aufgabe des Sortierguts geachtet werden. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass der Magnet eine ausreichende Kraft erzeugt, die auch schwere Objekte ausheben kann.⁵³ Insofern sind hier die Möglichkeiten der **Parameterwahl** für den Sortierer stark eingeschränkt. Die Zusammensetzung des Sortierguts sowie die gewünschte Zielfraktion determinieren die Einstellung der Magnetparameter.

Wirbelstromscheidung

Eisenhaltige Metalle werden über die Magnetscheider aus dem Sortiergut entfernt. Alle übrigen Metalle, z. B. Kupfer oder Aluminium, sind jedoch auch nach der Magnetscheidung noch enthalten. Um sie ebenfalls abzutrennen, wurden Nichteisen-Metallscheider, die **Wirbelstromscheider**, entwickelt. Sie basieren auf dem Prinzip, durch magnetische Wechselfelder in elektrisch leitfähigem Material eine Spannung zu induzieren, die wiederum Wirbelströme erzeugt. Diese Wirbelströme erzeugen ein eigenes Magnetfeld, das dem Erregermagnetfeld entgegen gerichtet ist. Hierdurch entsteht ein Abstoßungseffekt, der eine Auslenkung der betreffenden Objekte zur Folge hat. Sie können nun in einem separaten Behälter aufgefangen werden (vgl. Abbildung 3.4).⁵⁴

Über eine Schwingrinne wird das Sortiergut einschichtig auf einen Gurtförderer aus Kunststoffmaterial aufgegeben (vgl. Abbildung 3.4). Im Kopf des Gurtförderers sitzt ein Polrad, das mit Permanentmagneten versehen ist und das magnetische Wechselfeld erzeugt. In den metallhaltigen Objekten (helle Quadrate) wird damit der Wirbelstrom erzeugt, und sie werden aus der Wurfbahn des Sortiergutstroms ausgelenkt (vgl. Abbildung 3.4 rechts). Jedes Material hat dabei eine spezifische Auslenkung. Ein verstellbares Trennblech kann somit den Trennerfolg in Abhängigkeit vom Aufgabematerial zusätzlich steuern.⁵⁵

⁵³ Für kleine Korngrößen kann dabei auf Permanentmagnete zurückgegriffen werden, größere Korngrößen erfordern Elektromagneten, vgl. Pretz (2010), S. 162f.

⁵⁴ Vgl. Pretz (2010), S. 165ff. Damit der Abstoßungseffekt nicht beeinflusst wird, besteht das Fördersystem aus Kunststoffen.

⁵⁵ Vgl. Pretz (2010), S. 166. Für weitere, spezifische Bauarten von Wirbelstromscheidern sei auf die Fachliteratur verwiesen.

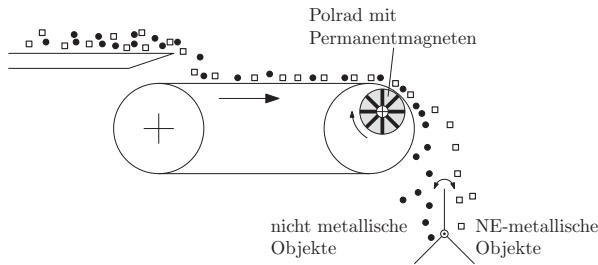


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung eines Wirbelstromscheiders (in Anlehnung an Pretz (2010), S. 166)

Geeignet ist die Wirbelstromscheidung für Partikel zwischen 1 und 150 mm.⁵⁶ Längliche und flächige Objekte wie Draht und Folien sowie sehr kleine und sehr große Partikel sind nur schlecht abtrennbar. Die Sortierqualität kann durch eine geeignete Vorklassierung und eine einschichtige Aufgabe entscheidend beeinflusst werden.⁵⁷ Des Weiteren kann ein Sortierunternehmen die Sortierqualität durch weitere **Prozessparameter** wie die Stärke und Reichweite des magnetischen Wechselfelds – hier ist eine möglichst dichte Vorbeiführung des Sortierguts erforderlich – sowie seine Frequenz steuern. Eine selektive Trennung einzelner Materialien in separate Boxen ausschließlich durch ihr individuelles Auslenkverhalten ist jedoch nicht möglich. Hier ist der Einfluss von Korngröße und Kornform sehr groß.⁵⁸

Elektrosortierung

Die dritte Form der Sortierung im Magnetfeld ist die **Elektrosortierung**. Sie ist besonders zur Trennung von Metallen und Kunststoffen sowie für die (paarweise) Separation verschiedener Kunststoffarten voneinander geeignet.⁵⁹ Hierzu wird das Sortiergut zunächst statisch aufgeladen, anschließend in einem elektrischen Feld ausgelenkt und in bis zu drei separate Behälter ausgetragen. Die unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeiten, die jeweilige Dielektrizitätskonstante sowie die Oberflächenbeschaffenheit der Partikel bilden das Trennmerkmal.

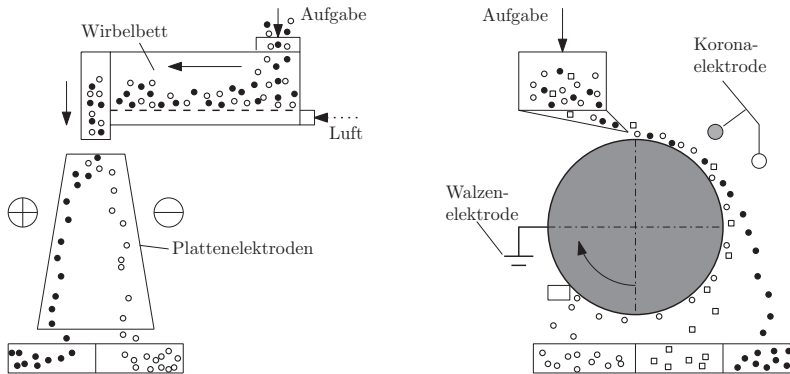
⁵⁶ Vgl. Pretz (2010), S. 165.

⁵⁷ Vgl. Pretz (2010), S. 165f.

⁵⁸ Vgl. Pretz (2010), S. 165ff.

⁵⁹ Die paarweise Sortierung setzt ein Vorhandensein bzw. eine präzise Vorkonditionierung des Sortierguts in ein Zwei-Komponenten-Gemisch voraus. Vgl. zur Verfahrensweise der Elektrosortierung im Folgenden Martens (2011), S. 30f.

Die Sortiermaschinen werden eingeteilt nach der Art, wie sie die elektrostatische Ladung erzeugen. Drei Verfahren sind möglich: Polarisation, Reibung (Triboaufladung) und Aufladung im Koronafeld.⁶⁰ Abbildung 3.5 zeigt die prinzipiellen Funktionsweisen eines Elektrostatischen Scheiders mit Triboaufladung (a) und einen Koronawalzenscheider (b).



a) Elektrostatischer Scheider mit Triboaufladung

b) Koronawalzenscheider

Abbildung 3.5: Prinzipskizzen unterschiedlicher Elektroscheideverfahren (Martens (2011), S. 31.)

Bei der **Scheidung mit Triboaufladung** wird das Sortiergut in einer Vorkammer durch Verwirbelung aufgeladen. Dann erfolgt die Aufgabe zwischen zwei Plattenelektroden, die die jeweils materiell bedingt unterschiedlich geladenen Partikel anziehen und in getrennte Container abscheiden (siehe Abbildung 3.5a).⁶¹ Beim **Koronawalzenscheider** erfolgt die Aufgabe, ähnlich der Magnet- und Wirbelstromscheidung, von oben auf eine Walze. Durch das erzeugte Koronafeld (Koronaelektrode sowie statische Feldelektrode, in Abbildung 3.5 grau hinterlegt) wird das Sortiergut elektrostatisch aufgeladen. Partikel mit gut leitender Oberfläche geben ihre Ladung sehr schnell wieder an die Walze ab und werden durch deren Drehmoment weggeschleudert (dunkle Partikel in Abbildung 3.5b). Schlecht oberflächenleitende Partikel bleiben länger geladen und an der Walze haften (Zwischenprodukt, eckige Partikel in

⁶⁰ Vgl. Martens (2011), S. 30, Schubert (1996a), S. 198ff. Für die Erläuterung der physikalischen Effekte sei auf die Fachliteratur verwiesen, z. B. Polarisation in Hering/Martin/Stohrer (2012), S. 340ff.

⁶¹ Vgl. Oberrauner/Flachberger/Weiß (2009), S. 141ff.

Abbildung 3.5b). Nichtleiter werden schließlich durch eine Neutralisierungselektrode oder eine Bürste entfernt (weiße, runde Partikel).⁶²

3.3.2 Flotation

Für die Trennung verschiedener Kunststoffarten voneinander kann prinzipiell nach MARTENS auch die **Flotation** eingesetzt werden.⁶³ Sie ist für die Trennung sehr feiner Partikel unterschiedlicher Fraktionen geeignet.⁶⁴ Die Abfallpartikel werden in ein Fluid gegeben. Durch die Zuführung von Luft in das Fluid lagern sich Luftblasen an den Partikeln an.⁶⁵ Diese schwimmen in unterschiedlicher Form in einem sog. Dreiphasenschaum⁶⁶ auf und können dann abgeschöpft werden.⁶⁷ Als Trennmerkmal wird hier die Oberflächenbeschaffenheit genutzt und ihre spezifische Adsorptionsfähigkeit durch die Wahl des Fluids manipuliert. Trotz seiner Eignung wird dieses Verfahren zur LVP-Abfalltrennung praktisch nicht eingesetzt.

3.3.3 Klaubung

Handklaubung

Die einfachste und am längsten eingesetzte Form der Sortierung, nicht nur in der Abfallsortierung, ist die **Handklaubung**.⁶⁸ In der industriellen Form wird das Sortiergut auf ein Förderband aufgeben und an einer Reihe von Arbeitern vorbeigeführt. Diese entnehmen nach einem visuellen Identifikationsprozess Objekte definierter Fraktionen vom Band und geben sie in einen Sammelbehälter. Als Trennmerkmale werden ausschließlich visuelle Eigenschaften, wie Farbe oder Form, verwendet.⁶⁹ Damit ein Mensch Objekte gemäß dieser Trennmerkmale unterscheiden kann, muss der Abfall

⁶² Vgl. zur Beschreibung der Funktionsweise eines Koronascheiders: Elektrostatischer Separator auf <http://www1.fh-amberg-weiden.de/fachbereiche/mbut/labore/recycling/recyclingtechnik/korona.htm>.

⁶³ Ein Einsatzgebiet in der Abfallwirtschaft ist jedoch in erster Linie die Behandlung von Altpapier, insb. das Deinking, vgl. Martens (2011), S. 31, sowie Schubert (2003b), S. 715f.

⁶⁴ Vgl. zur Feinheit der Partikel Schubert (2003b), S. 738f.

⁶⁵ Nach SCHUBERT können es statt Fluidblasen auch Öltropfen sein, vgl. Schubert (2003b), S. 715.

⁶⁶ Zum Begriff der Phase vgl. auch den nachfolgenden Abschnitt 4.1.

⁶⁷ Vgl. Martens (2011), S. 31.

⁶⁸ Vgl. hierzu und im Folgenden Schubert (1996b), S. 455.

⁶⁹ Vgl. Uhlig/Bremerstein (1997), S. 23.

sehr aufgelockert in einer Schicht aufgegeben sein.⁷⁰ Abbildung 3.6 zeigt verschiedene Varianten der Bauarten von Sortierarbeitsplätzen.

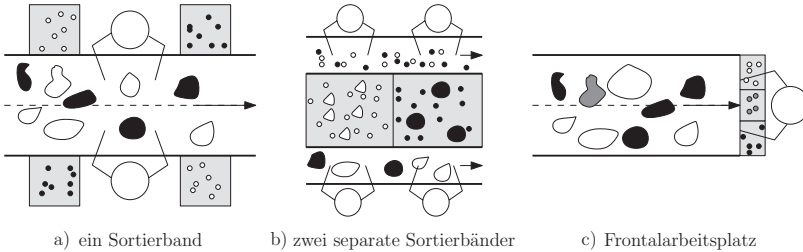


Abbildung 3.6: Mögliche Bauarten für Sortierarbeitsplätze (Duales System Deutschland (2004), S. 25, 26 und 27)

In Teilbild a) von Abbildung 3.6 ist ein Klaubeband dargestellt, an dem sich die Sortierkräfte gegenüberstehen. Sie werfen die geklaubten Fraktionen in seitlich positionierte Sammelbehälter.⁷¹ Das Sortierband darf hier nur so breit sein, dass die Arbeiter zusammen von beiden Seiten alle Orte auf dem Band erreichen können. Teilbild b) zeigt eine andere Bauart, bei der zwei Bänder um mittig positionierte Abwurfchächte gebaut sind, in die die Fraktionen geworfen werden. Da die komplette Bandtiefe nur von einer Sortierkraft bearbeitet wird, darf das Band nur etwa halb so tief sein wie bei beidseitiger Klaubung. Für diese Bauart muss der Sortiergutstrom entweder geteilt werden oder es können an den zwei Bändern unterschiedliche Größenklassen der gleichen Abfallmischung sortiert werden.⁷² Im dritten Teilbild, Abbildung 3.6c), ist ein Frontalarbeitsplatz zu sehen. Das Sortiergut läuft auf die Sortierkraft zu und sie schiebt die Objekte auf dem Band, sodass diese am Bandende in Sammelbehälter fallen. Nachteil dieser Bauart ist die Erzeugung eines separaten Teilstroms für jeden Sortierer.⁷³

⁷⁰ Vgl. Schubert (2003b), S. 740. Für die Sichtbarkeit einzelner Objekte ist die Beleuchtung der meist abgeschlossenen Sortierarbeitsplätze von entscheidender Bedeutung, vgl. Gall et al. (1998).

⁷¹ Da eine Sortierkraft nicht viel mehr als zwei Fraktionen sortieren sollte, ist eine Reihung mehrerer Arbeitskräfte erforderlich um alle Fraktionen abzudecken.

⁷² Der Begriff *Teilung* beschreibt einen Trennprozess nach dem ausschließlichen Merkmal Menge, wobei die Teilmengen hinsichtlich aller weiteren Merkmale denjenigen des ursprünglichen Sortierguts entsprechen, vgl. Stief (2009), S. 262f.

⁷³ Diese Bauart ist demzufolge auch mit höheren Kosten für Fördertechnik und Wartung verbunden, vgl. Duales System Deutschland (2004), S. 27.

Modifizierbare **Parameter** bei der Handklaubung sind die Bandbreite und -geschwindigkeit, die Arbeitsplatzbreite sowie die Anzahl Mitarbeiter.⁷⁴ Kurzfristig lassen sich nur die Mitarbeiteranzahl, die Anzahl Fraktionen, die ein Mitarbeiter sortiert, und die Bandgeschwindigkeit verändern. Für eine erfolgreiche Handklaubung sollte das Sortiergut unzerkleinert sein, da sonst die Erkennung erschwert wird und eine größere Zahl Greifvorgänge seitens der Sortierarbeiter vonnöten sind.⁷⁵ Nachteile der Handklaubung aus Sicht des Sortierunternehmens sind hohe Lohnkosten bei begrenztem Durchsatz, sinnvoller Einsatz erst ab einer relativ großen Objektgröße von ca. 90 mm, keine Erkennung stofflicher Zusammensetzung sowie Abhängigkeit des Trennergebnisses von Qualifikation, Einstellung und Tagesform des Personals.⁷⁶ Von Arbeitnehmerseite wird die Arbeit auch unter besten Bedingungen als eintönig und unangenehm empfunden.⁷⁷ Inzwischen wird die Handklaubung immer seltener eingesetzt.⁷⁸ Sie ist aber zur Kontrolle des Wertstoffprodukts unverzichtbar.⁷⁹

Sensorgestützte Klaubung

Die Weiterentwicklung der Handklaubung ist die **sensorgestützte Sortierung** oder automatische Klaubung. Sie wird als „Einzelkornsortierung anhand äußerlich identifizierbarer, berührungslos mittels Sensorik messbarer Trennmerkmale“⁸⁰ definiert. Sensorgestützte Sortierung ist ein mehrstufiger Prozess: Zuführung über ein schnell laufendes Förderband, Einzelobjekterkennung über geeignete Sensorik, Auswertung der Informationen, Ansteuern und Auslösen der Auswurfvorrichtung (vgl. nachfolgende Abbildung 3.7).⁸¹ Für die fehlerfreie Durchführung sind als vorbereitende Prozesse die Reinigung des Sortierguts sowie die Vereinzelung der Partikel unerlässlich. Zusätzlich wird die automatische Klaubung durch eine enge Klassierung vorab unterstützt.⁸²

⁷⁴ Oftmals liegt die Bandbreite bei rund einem Meter bis 1,2 m (60 cm Arbeitstiefe). Das Band bewegt sich dabei mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,1 bis 0,2 m/s. Ein Sortierer bearbeitet auf ca. 1,5 m Arbeitsplatzbreite lediglich ein bis zwei Fraktionen, sonst kommt es zu ungenauer Abtrennung, vgl. *Duales System Deutschland* (2004), S. 23ff., Schubert (1996b), S. 455.

⁷⁵ Vgl. *Duales System Deutschland* (2004), S. 11.

⁷⁶ Vgl. Pretz (2010), S. 174, Schubert (1996b), S. 455.

⁷⁷ Vgl. die Umfrageergebnisse in Gall et al. (1998), S. 22.

⁷⁸ Schätzungen geben einen Rückgang der manuellen Sortiertätigkeit von bis zu 80% innerhalb des vergangenen Jahrzehnts an, vgl. Schug et al. (2007), S. 21.

⁷⁹ Vgl. Pretz (2010), S. 174, *Duales System Deutschland* (2004), S. 22.

⁸⁰ Pretz (2010), S. 174.

⁸¹ Die Förderbandgeschwindigkeit beträgt ca. 2,5 m/s, vgl. Habich (2010), S. 1. Ein Vergleich zur Geschwindigkeit bei Handklaubung findet sich bei Pretz (2006), S. 10f.

⁸² Vgl. Martens (2011), S. 32f., Pretz (2010), S. 174f., Schubert (1996b), S. 456.

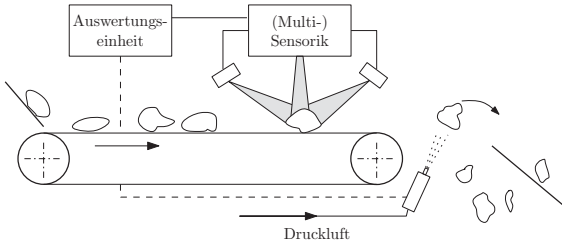


Abbildung 3.7: Sensorgestützte Sortierung mit Multisensorik und Druckluftaustrag
(in Anlehnung an Martens (2011), S. 34.)

Die Erkennungseinheit ermittelt für die Auswurfentscheidung zwei notwendige Informationen für jedes Objekt: die Art des Materials und seine Position auf dem Band.⁸³ Zur Materialerkennung stehen inzwischen eine Vielzahl unterschiedlicher Sensorsysteme zur Verfügung.⁸⁴ Die nachstehende Auflistung gibt einen Überblick über die Erkennungsverfahren und ihre Funktionsweise bezogen auf das Trennmerkmal:⁸⁵

- **Nahinfrarotanalyse (NIR):** Messung der Oberflächenreflexion bzw. -transmission und Spektralverteilung
- **optoelektronische Identifikation:** Messung optischer Merkmale wie Farbe, Transparenz, Fluoreszenz, Glanz, geometrische Abmessungen durch Farbzeilenkameras, visuelle Spektrometrie (VIS) und Fluoreszenzmessung
- **elektromagnetische Induktion:** Bestimmung der Leitfähigkeit (hauptsächlich zur Metallidentifikation)
- **Röntgentransmissionsmessung:** Messung der spezifischen Materialdichte und geometrischen Abmessungen

Um die Erkennung der Abfallpartikel zu verfeinern und einen erheblich besseren Trennerfolg komplexer Abfallgemische zu erzielen, werden mehrere Erkennungsverfahren in einem Modul zusammengeschaltet (sog. Multisensorik, vgl. Abbildung

⁸³ Vgl. Pretz/Julius (2008), S. 107.

⁸⁴ Die Sensoren können als Punkt-, Zeilen- oder Flächensensoren realisiert werden, vgl. Killmann (2008), S. 25.

⁸⁵ Vgl. Übersichten zu Sensorbauarten bei Martens (2011), S. 32, Pretz (2010), S. 175f., und Wotruba (2008), S. 223f.

3.7).⁸⁶ In der LVP-Sortierung werden häufig NIR-Sensoren mit elektromagnetischen oder VIS-Sensoren kombiniert.⁸⁷

Die ermittelten Informationen werden in Sekundenbruchteilen in einer Auswertungseinheit mit gespeicherten Spektralprofilen abgeglichen. Bei positiver Zuordnung eines Partikels gibt die Steuerung ein Signal an die Auswurfseinheit weiter (vgl. die gestrichelte Linie in Abbildung 3.7).⁸⁸ Zur Austragung der Objekte werden Druckluftdüsen, mechanische Stößel oder Klappen eingesetzt, die einzeln, der Objektposition entsprechend, angesteuert werden. Bei einer Freifallsortierung wird ausschließlich Druckluft zum Auslenken der einzelnen Objekte aus dem Strom verwendet.⁸⁹ Die Druckluftstöße werden an die schwersten Partikel angepasst. Daher kann es z. B. bei leichten, flächigen Folien zu Fehlausträgen kommen. Abhilfe könnte eine individuelle Anpassung der Druckluft an jedes einzelne Objekt schaffen, die aber technisch nur schwer umsetzbar ist.⁹⁰

Durch die sensorgestützte Sortierung können bis zu drei Materialströme in einem Prozess erzeugt werden.⁹¹ Eine Abtrennung weiterer Materialarten erfordert das Durchlaufen mehrerer Sortiervorgänge. Das Sortierunternehmen kann als **Prozessparameter** die Zusammensetzung der Multisensorik und deren Leistung beeinflussen sowie die Datenbanken zur Auswertung der Sensorinformationen dem Sortierproblem anpassen und so das Trennergebnis steuern. Problematisch beim Einsatz von NIR-Sensoren ist die Trennung dunkler Materialien voneinander. Sie besitzen nur schlechte Reflexionseigenschaften und werden durch den Sensor nicht erkannt.⁹²

3.4 Beispielkonzept einer Wertstoffsortieranlage

In der Wertstoffsortierung werden die vorgestellten Verfahren sinnvoll zu einer Gesamtanlage kombiniert. Die Reihenfolge der Grundoperationen ist dabei zumeist Vorbereiten, dann Klassieren und schließlich Sortieren.⁹³ Die Auswahl der Verfahren ist abhängig von der Zusammensetzung des Abfallgemischs sowie vom gewünschten Sor-

⁸⁶ Vgl. Pretz/Julius (2008), S. 106.

⁸⁷ Vgl. Martens (2011), S. 33.

⁸⁸ Vgl. Pretz (2010), S. 175f., *Duales System Deutschland* (2004), S. 28, Killmann (2008), S. 28.

⁸⁹ Vgl. Martens (2011), S. 34. Drucklufterjektion ist das insgesamt vorherrschende Austragungsverfahren, vgl. Schubert (1996b), S. 457.

⁹⁰ Vgl. Killmann (2008), S. 33.

⁹¹ Vgl. Faist/Ragossnig (2008), S. 42.

⁹² Vgl. zu Problemen der NIR-Sortierung Pretz (2010), S. 176, Faist/Ragossnig (2008), S. 43.

⁹³ Vgl. hierzu und im Folgenden Pretz (2010), S. 178f.

tieroutput, insbesondere dessen Reinheit und Quantität. Bei der maschinellen Sortierung werden in einem Verfahren nur zwei bis drei verschiedene Fraktionen erzeugt. Somit muss bei der Auslegung der Anlagen eine mehrfache Hintereinanderschaltung oder Parallelschaltung gleicher Verfahren bedacht werden.⁹⁴ SODHI, YOUNG und KNIGHT empfehlen darüber hinaus, eine wirtschaftlich optimale Reihenfolge der Trennverfahren bezogen auf die zu gewinnenden Wertstoffe einzusetzen.⁹⁵ Daher ist es zweckmäßig, zur Verfahrensauswahl und -steuerung die stofflichen Eigenschaften des Mülls zu untersuchen und zu berücksichtigen.⁹⁶

Unter Berücksichtigung dieser Empfehlungen ergibt sich ein Konzept, wie es Abbildung 3.8 auf S. 43 illustriert. Es handelt sich hierbei um eine beispielhafte Sortieranlage der Firma SUTCO, wie sie in ähnlicher Konfiguration z. B. in Bochum oder Soltau betrieben wird.⁹⁷ Sortierverfahren sind als Kästen dargestellt, die erzielten Fraktionen als Kreise. In diesem Beispiel werden zunächst die Gebinde, d. h. die Gelben Säcke, geöffnet. Ein Trommelsieb trennt den Abfall in zwei noch sehr grobe Größenklassen. Die Abfälle im Überlauf werden im Windsichter in Leicht- und Schwergut getrennt. In der nachgeschalteten Handsortierung werden Folien aus dem Leichtgut abgetrennt. Das Schwergut aus dem Windsichter durchläuft vor der Handklaubung noch einen Magnetscheider (Überbandmagnet), der die eisenhaltigen Objekte aus dem Strom entfernt.

Der Siebunterlauf aus dem Trommelsieb durchläuft eine weitere Siebklassierung im Trommelsieb. Das Grobgut aus diesem Überlauf wird gesichtet, wobei anschließend das Schwergut an einen Überbandmagnetscheider weitergeführt wird, während das Leichtgut eine automatische Klaubestufe mit NIR-Sensor durchläuft. Die NIR-Sortierung erzeugt eine nicht weiter sortierbare Mischkunststofffraktion (MK) sowie eine Papier, Glas und Aluminium-Mischung (PGA), die wiederum einem Windsichter zugeführt wird. Das Leichtgut aus diesem Prozess wird der oben bereits angesprochenen händischen Foliensortierung zugeführt, das Schwergut einem weiteren automatischen Klaubeprozess.

⁹⁴ Vgl. z. B. Stieß (2009), S. 272.

⁹⁵ Sie empfehlen sogar für unterschiedliche Gemische eine angepasste Reihenfolge der Trennverfahren, je nach Wert und Volumen der enthaltenen Wertstoffe, vgl. Sodhi/Young/Knight (1999), S. 2243. Dies mag bei kleineren, flexiblen, mobilen Anlagen möglich und sinnvoll sein, ist jedoch für eine Anlage im ständigen Fließbetrieb nicht umsetzbar. Hier muss vorab die Reihenfolge der Trennverfahren festgelegt werden; Änderungen sind nur mit großem Aufwand möglich.

⁹⁶ Dies sollte nicht nur bei der Planung der Anlagen berücksichtigt werden. Die Abfallzusammensetzung kann sich auch durch regionale und saisonal Einflüssen ändern, vgl. Uhlig/Bremerstein (1997), S. 77.

⁹⁷ Vgl. hierzu die Referenzen in http://sutco.de/fileadmin/datenblaetter/Anlagenblatt_VP_DE_02SEP2010.pdf, S. 4.

Der Siebunterlauf der zweiten Siebstufe wird ein drittes Mal gesiebt, dabei wird nicht weiter sortierbares Feingut im Unterlauf abgetrennt. Der Überlauf wird der gleichen Magnetscheidung zugeführt wie das Schwergut des zweiten Windsichtungsprozesses. Der um Eisenmetalle bereinigte Sortiergutstrom durchläuft zusammen mit dem Schwergut aus der PGA-Fraktion eine automatische Klaubung. Hier wird der Verbundstoff Tetra abgetrennt und anschließend händisch in eine Tetra- und eine Restfraktion nachsortiert. Alle übrigen Objekte werden einer Wirbelstromscheidung unterzogen. Hier werden zwei Fraktionen generiert, eine Nichteisenmetallfraktion und eine Nichtmetallfraktion. Die abgetrennten Nichteisenmetalle werden mithilfe eines NIR-Sensors weiter in eine Aluminiumfraktion und nochmals Tetra sortiert.

Die Nichtmetalle gehen zunächst an eine automatische Klaubestation, die eine Papiermischfraktion abtrennt, die dann in der Folge ein weiteres Mal eine Sensorsortierung durchläuft. Im Ergebnis entstehen hier eine Pappe, Papier, Karton-Fraktion (PPK) und Sortierreste. Der verbleibende Sortiergutstrom kommt in den Ballistikseparator⁹⁸. Die dort abgetrennte flächige Fraktion wird händisch in Reste und PPK nachsortiert. Die körperförmigen Objekte durchlaufen drei weitere sensorgestützte Klaubestufen, in denen Mischkunststoffe, Polystyrol (PS), Polyethylen (PE) und Polyethylenterephthalat (PET) von den Reststoffen getrennt werden.

3.5 Leergutsortierung

Im Gegensatz zur Wertstoffsartierung weist die Mehrweg-Leergutsortierung nicht dieselbe Fülle unterschiedlicher Verfahrensprinzipien auf. Sie besitzt dennoch einige Kriterien, anhand derer sich unterschiedliche Vorgehensweisen abgrenzen lassen. Zunächst gibt es drei Verfügungsbereiche, in denen die Sortierung erfolgen kann: direkt bei der Rücknahme im Handel, erst nach der Rückführung beim Getränkehersteller oder von einem externen Dienstleister.⁹⁹ Falls beim Hersteller sortiert wird, ist entweder eine Inline-Sortierung direkt in der Zuführung zur Abfüllung oder eine von der Produktion entkoppelte Sortierung möglich. Angemerkt sei, dass die Unternehmen oft nur unmittelbaren Sortierbedarf sehen, wenn ein Kasten zwei oder mehr Fremd-

⁹⁸ Ein Ballistikseparator ist im weiteren Sinne ein bewegter Siebpaddel. Das Sortiergut wird durch Wurfbewegungen gleichzeitig in drei Fraktionen getrennt, eine Siebfraktion im Unterlauf sowie je eine Leicht- und Schwergutfraktion bzw. flächige und körperförmige Objekte an den beiden Enden des Überlaufs, vgl. http://www.brt.info/images/pdf/FotoblaetterDE/produktinformation_sort-o-mat-ballistik-separator.pdf.

⁹⁹ Vgl. Spiegelmacher (2008), S. 16, Brosch (2008), S. 102, sowie Hofbauer (2006), S. 12f. Der externe Dienstleister kann dabei auch gleichzeitig die Funktion einer Clearingstelle wahrnehmen und unterschiedliche Flaschen- und Kastentypen an die jeweiligen Hersteller zurückgeben.

flaschen enthält.¹⁰⁰ Händler oder Drittanbieter sortieren vollständig sortenrein.¹⁰¹ Die Durchführung kann manuell, maschinell oder in einer Kombination erfolgen.¹⁰²

In allen Fällen wird der ankommende Kasten zuerst inspiziert. Hierbei erkennt die menschliche Arbeitskraft oder auch die technische Erkennungseinheit den Inhalt der einzelnen Fächer des Kastens.¹⁰³ Zur maschinellen Erkennung werden z. B. Farbkameras und Ultraschallsensoren eingesetzt.¹⁰⁴ **Trennmerkmale** des Kastens sind Format, Farbe und Logo. Die Flaschen werden anhand der Flaschenhöhe, ihrer Farbe sowie verschiedener Formen des Halses (Flaschengeometrie) unterschieden.¹⁰⁵ Probleme bereiten in diesem Verfahrensschritt Verschmutzungen und Tropfen in den Flaschen, die Reflexionen verursachen, Verformungen (bei Plastikflaschen) sowie die seit mehreren Jahren immer weiter zunehmende Vielfalt der Flaschensorten.¹⁰⁶ Mit der Information über Gut-, Fremd- und Fehlflaschen werden die Kästen in Gut- und Schlechtkästen¹⁰⁷ sortiert. Für die Schlechtkästen werden die nachfolgend beschriebenen Sortierschritte angestoßen, wobei mehrere Strategien durchführbar sind.

Sowohl bei manueller als auch maschineller Leergutsortierung ist einerseits die **Entnahme aller Flaschen**, also eine vollständige Trennung von Kästen und Flaschen, möglich.¹⁰⁸ Maschinelle Saugnapfgreifsysteme haben dabei eine Kapazität zum Greifen von Flaschen aus bis zu fünf Kästen gleichzeitig (100 bis 120 Flaschen).¹⁰⁹ Ein Mitarbeiter kann bei einem Greifvorgang hingegen nur eine vergleichsweise geringe

¹⁰⁰ Vgl. Hofbauer (2006), S. 11. Hierzu gehören fast zwei Drittel aller Kästen mit insgesamt bis zu 30 % Fremdflaschen, vgl. Dietz (2005), S. 39, sowie Brosch (2010), S. 179, und Hofbauer (2009), S. 14. Fremdflaschen aus Gutkästen mit nur maximal einer Fremdflasche werden Inline auf dem Weg zur Abfüllung entfernt.

¹⁰¹ Vgl. Irrgang (2010), S. 27.

¹⁰² Die menschliche Arbeitskraft ist selbst bei maschineller Leergutsortierung noch nicht vollständig substituierbar. Die Sortierung entnommener Fremdflaschen bleibt oftmals menschlichen Arbeitskräften vorbehalten, vgl. Dietz (2005), S. 39, und Spiegelmacher (2010), S. 67.

¹⁰³ Auch Verschmutzungen durch Deckel, Bänder, Papier oder Kronkorken werden erkannt. Sie müssen vor der Sortierung entfernt werden, vgl. Dietz (2005), S. 39.

¹⁰⁴ Vgl. Brosch (2009), S. 957.

¹⁰⁵ Vgl. Hofbauer (2006), S. 14, sowie Brosch (2009), S. 957. Neuronale Netze in der Erkennungssoftware sind in der Lage, Änderungen spezifischer Trennmerkmale durch teach-in zu lernen.

¹⁰⁶ Vgl. zu Problemen der Flaschenerkennung z. B. Spiegelmacher (2010), S. 66f. Zur Flaschenvielfalt vgl. Dietz (2005), S. 39, Klee/Giss/Kraus (2009), S. 1398.

¹⁰⁷ Wie bereits oben beschrieben, enthält ein Gutkasten nur maximal eine Fremdflasche, während Schlechtkästen mehr Fremdflaschen oder weitere Verschmutzungen enthalten.

¹⁰⁸ Vgl. Klee/Giss/Kraus (2009), S. 1398. Auch bei Brosch (2010), S. 179f. findet sich diese Vorgehensweise; bei dem hier beschriebenen Verfahren werden während des Entpackvorgangs bereits die Gutflaschen von den Fremdflaschen getrennt.

¹⁰⁹ Vgl. o. V. (2005), S. 718.

Anzahl Flaschen entnehmen, die i. d. R. nur einen Teil des Kasteninhalts umfasst.¹¹⁰ Anschließend werden die einzelnen Flaschen nach ihrer Sorte auf unterschiedliche Bänder geschoben und wieder den richtigen Kästen zugeführt.¹¹¹ Fehlflaschen bereiten keinerlei Probleme. Da ein Kasten erst wieder befüllt wird, wenn genügend Flaschen vorhanden sind, entstehen keine leeren Gefache, und zuvor leere Gefache werden mit aufgefüllt. Fremdflaschen werden in der Einzelflaschensortierung von den richtigen Flaschensorten separiert. Echte Fremdflaschen sind bei dieser Sortierform diejenigen Flaschen, die letztlich keinem Kasten zugeordnet werden können. Dies ist z. B. der Fall, wenn Einweggetränkeflaschen oder sehr seltene Spezialformflaschen vom Verbraucher zurückgegeben werden.¹¹²

Andererseits ist aber auch nur eine **selektive Entnahme von Fremdflaschen** mit anschließender Auffüllung der freigewordenen sowie von vornherein nicht belegten Gefache mit Gutflaschen durchführbar.¹¹³ Hierbei müssen zunächst die Kastenart und dann die Flaschen einzeln identifiziert werden. Falls erforderlich, werden Fremdflaschen anschließend durch manuelles Greifen oder einen automatischen Saugnapfgreifer entfernt. Die entnommenen Flaschen werden durch Mitarbeiter oder Roboter in die passenden, weiterführenden Flaschenbahnen zur Wiederbestückung der Kästen oder zum Entsorgungscontainer gelenkt.¹¹⁴ Um alle Fehl- und Fremdflaschen zu ersetzen, ist zudem das Bereithalten eines Pools Gutflaschen der unterschiedlichen Flaschensorten vonnöten.¹¹⁵

Der Sortierer muss für die Auslegung seiner Leergutsortierung eine Entscheidung treffen, wie personalintensiv er diese gestalten möchte. Viel Personal bedeutet höhere laufende Kosten, aber flexiblere Sortierung. Der Aufbau einer vorwiegend starren, maschinellen Sortierung ist hingegen mit hohen Investitionskosten verbunden.¹¹⁶ Auch wenn dann zumeist weniger Mitarbeiter erforderlich sind, kann auf Sortierpersonal nicht vollständig verzichtet werden. Ein wesentlicher Grund für die Anschaffung auto-

¹¹⁰ Angenommen der Mitarbeiter kann mit jedem Fingerzwischenraum eine Flasche greifen, so kann er bei einem Greifvorgang mit beiden Händen acht Flaschen entnehmen. Auch bei einem Sammelgriff mit der gesamten Hand dürfte es schwierig sein, deutlich mehr als fünf Flaschen pro Hand zu erfassen. Dabei können sicher mehr PET- als Glasflaschen mit einem Griff gehalten werden.

¹¹¹ Vgl. Hofbauer (2009), S. 11.

¹¹² Diese Flaschen werden dann über Glascontainer und Kunststoffsammlerbehälter der Verwertung zugeführt, vgl. Dietz (2005), S. 39, oder o. V. (2005), S. 718.

¹¹³ Vgl. Spiegelmacher (2008), S. 17. Da bei dieser Form der Leergutsortierung die unerwünschten Objekte entnommen werden, ist diese Leergutsortierung eine Negativsortierung.

¹¹⁴ Vgl. Dietz (2005), S. 39, sowie Hofbauer (2006), S. 11.

¹¹⁵ Vgl. z. B. Hofbauer (2009), S. 11.

¹¹⁶ Vgl. Brosch (2008), S. 104f.

matisierter Sortiereinrichtungen bzw. zumindest technischer Erkennungsverfahren ist die Kopplung der Leergutsortierung mit der gleichzeitigen Bestimmung des Pfandwertes für Kästen und Flaschen, der zwischen Händlern und Herstellern verrechnet wird. Die Planung der Anlage erfolgt auf Basis der Daten zum Leergutaufkommen und oftmals auch mit ausreichend Puffer zur kurzfristigen Erweiterung des Durchsatzes.

Kapitel 4

Operationalisierung von Vermischung

Ziel dieses Kapitels ist es, die Vermischung von Abfallgemischen näher zu charakterisieren.¹ Durch sie wird die Qualität des Sortierprozessinputs bestimmt und somit eine wesentliche Einflussgröße auf die Prozessgestaltung und seine wertmäßigen Auswirkungen beschrieben. Im Folgenden werden zunächst grundlegende Begriffe definiert und anschließend einige intuitive Vorüberlegungen zur Vermischung von Stoffgemischen vorgestellt. Hierbei werden zunächst nur diskrete, eindimensionale Stoffgemische analysiert. Ausgehend von den Vorüberlegungen werden in Abschnitt 4.2.2 die Wirkungszusammenhänge von sechs Merkmalen zur Kennzeichnung der Vermischung (Fraktionsanzahl und -anteile, Wechsel- und Gruppenanzahl, Gruppengrößen und -abstände) und Probleme bei ihrer Erhebung vorgestellt. In Abschnitt 4.2.3 werden dann fünf Kennzahlen (fraktionsanzahl-, anteils-, wechsel-, konzentrations- und abstandsorientierter Vermischungsgrad) zur Messung der Stoffvermischung definiert; abschließend wird diskutiert, ob sie sich zu einer gesamthaften Kennzahl aggregieren lassen. Eine Erweiterung der Diskussion auf mehrdimensionale Gemische schließt sich in Abschnitt 4.3 an.

¹ Erste grundlegende ökonomische Überlegungen zur Vermischung von (insbesondere stetigen) Stoffgemischen finden sich bei Behrens (1998). Dieses Kapitel entspricht dem bereits erschienenen Arbeitsbericht Baltzer/Souren (2010), der überarbeitet und um den Abschnitt 4.3 ergänzt wurde.

4.1 Begriffsabgrenzungen und Klassifikation von Gemischen

Materie lässt sich unterteilen in reine Stoffe und Stoffgemische, deren charakteristische Eigenschaften jeweils unabhängig von der äußeren Form sind.² Reine Stoffe sind einzelne chemische Elemente (z. B. Fe: Eisen) oder chemische Verbindungen (z. B. H₂O: Wasser).³ Ein Stoffgemisch (auch Stoffgemenge oder Konglomerat) setzt sich hingegen aus mindestens zwei verschiedenen Stoffen⁴ zusammen. Im Weiteren sollen als Bezeichnung für die Bestandteile eines Gemisches die Ausdrücke ‚Komponenten‘ oder ‚Fraktionen‘ verwendet werden. Die Komponenten eines Gemisches können einzelne Stoffe, aber ihrerseits auch wieder Stoffgemische sein.

Stoffgemische lassen sich unterteilen in **homogene** und **heterogene** Gemische. Homogene Gemische weisen in allen Teilen die gleiche Beschaffenheit auf.⁵ Die einzelnen Komponenten des Gemisches haben sich gleichmäßig miteinander vermischt, und eine (optische) Abgrenzung einzelner Komponenten ist somit nicht möglich.⁶ Heterogene Gemische bestehen dagegen aus mindestens zwei sogenannten Phasen. Eine Phase ist ein optisch identifizierbarer Teil eines Gemisches, der in sich homogen ist. Zwischen zwei Phasen liegt eine eindeutige Trennung entlang der Grenzflächen vor.⁷ Abbildung 4.1 auf der folgenden Seite fasst die bisher vorgestellten Begriffe in einer Gesamtschau zusammen. Sie verdeutlicht zudem, dass Gemische mittels physikalischer Trennverfahren in ihre Komponenten zerlegt werden können. Hierbei bleiben die chemischen

² Vgl. Falbe/Regitz (1999), S. 4261.

³ Vgl. Lautenschläger/Schröter/Teschner (2002), S. 5.

⁴ In der Chemie wird für den Terminus ‚Stoff‘ auch der Begriff ‚Substanz‘ verwendet, der einerseits für unvermischte jeweils reine Stoffe, andererseits aber auch für eine definierte Vermischung von Reinstoffen stehen kann, vgl. Behrens (1998), S. 2f.

⁵ Vgl. Falbe/Regitz (1999), S. 1747.

⁶ Vgl. Lautenschläger/Schröter/Teschner (2002), S. 4f.

⁷ Die Begriffe ‚Phase‘ und ‚Komponente‘ können die gleiche Bedeutung haben. Das ist dann der Fall, wenn jede Phase aus einer Komponente besteht. In der Regel ist eine Phase aber auch ein Gemisch und umfasst mehrere Komponenten. Eine Torte ist beispielsweise ein heterogenes Gemisch; es wechseln sich die unterschiedlichen Lagen (= Phasen) aus Tortenboden und Cremefüllung ab. Eine Untergruppe von Stoffen in einem Gemisch kann auch als Fraktion bezeichnet werden, vgl. Behrens (1998), S. 3f.

Ein weiteres Beispiel für heterogene Gemische stellen die sogenannten Verbunde dar. Verbunde oder Verbundstoffe sind Verpackungsmaterialien, die aus mehreren, vollflächig verbundenen Materialien (= Phasen) bestehen und manuell nicht mehr trennbar sind. Ein typischer Verbundstoff ist der Getränkekarton, der schichtweise aus Karton, Polyethylen und Aluminium besteht, vgl. Souren (1997), S. 33; Uhlig/Bremerstein (1997), S. 12; Duales System Deutschland GmbH.

Verbindungen der innerhalb einer Komponente enthaltenen Stoffe erhalten. Diese lassen sich jedoch durch chemische Trennprozesse in die einzelnen Elemente zerlegen.⁸

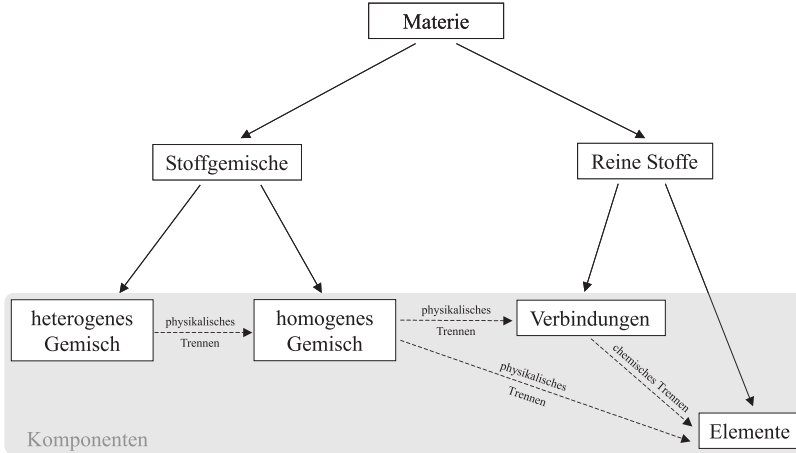


Abbildung 4.1: Überblick über die Zusammenhänge von Stoffen und Gemischen (in Anlehnung an Lautenschläger/Schröter/Teschner, S. 7)

Stoffe können in drei Aggregatzuständen vorliegen: fest, flüssig oder gasförmig. Gemische können ebenfalls diese drei Zustände aufweisen. So stellt Bauschutt oder der Inhalt eines Gelben Sacks eine Vermischung fester Komponenten dar.⁹ Ein Gemisch kann aber auch eine Kombination von Stoffen mehrerer unterschiedlicher Zustände umfassen. In einem flüssigen Gemisch können also auch feste Bestandteile enthalten sein; z. B. besteht Schlamm aus in Wasser (flüssig) gelösten Erd- und Gesteinspartikeln (fest).

Im Folgenden werden ausschließlich heterogene Gemische betrachtet, deren Komponenten Stückgüter sind, die jeweils in festem Aggregatzustand vorliegen. Zwar sind sie selbst oft auch Gemische¹⁰, sie werden aber – zumindest in den betrachteten Sortierprozessen – nicht mehr weiter zerteilt und können somit als kleinste Bestandteile, d. h. nicht mehr weiter separierbare Komponenten, aufgefasst werden.

Neben der Homo- bzw. Heterogenität gibt es noch zahlreiche weitere Merkmale, anhand derer sich Stoffgemische klassifizieren lassen. Für die Analyse und Gestaltung

⁸ Vgl. Lautenschläger/Schröter/Teschner (2002), S. 2.

⁹ Vgl. Lautenschläger/Schröter/Teschner (2002), S. 2.

¹⁰ So besteht ein Getränkekarton, als Komponente des Gemisches ‚Gelber Sack‘, aus Pappe und verschiedenen Kunststoff- oder Aluminium-Schichten. Vgl. hierzu auch Behrens (1998), S. 48.

von Sortierprozessen besonders relevant sind die Diskretheit und die Dimensionalität (vgl. Abbildung 4.2), die nachfolgend kurz erläutert werden.

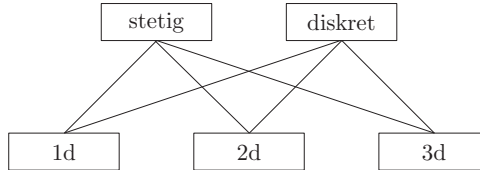


Abbildung 4.2: Differenzierung von Gemischen nach den Merkmalen Diskretheit und Dimensionalität

In **diskreten** Gemischen sind die einzelnen Komponenten in abzählbarer Anzahl vorhanden, was immer dann der Fall ist, wenn die Komponenten, wie hier im Weiteren stets unterstellt, als Stückobjekte vorliegen. Der relative (Stück-)Anteil einer Komponente lässt sich dann dadurch ermitteln, dass ihre Anzahl ins Verhältnis zur Gesamtstückzahl aller Komponenten gesetzt wird.¹¹ **Stetige** Gemische stellen dagegen nach außen für den Betrachter eine homogene Masse dar, die allerdings nicht unbedingt auch homogen vermischt sein muss. Beispiele für stetige, aber heterogene Gemische sind Flüssigkeiten, die sich einem Betrachter als homogene Masse präsentieren, aber stellenweise eine deutlich unterschiedliche Konzentration der Komponenten aufweisen (zu beobachten etwa bei Fruchtsaftgemischen, die sich noch nicht völlig vermischt haben). Unabhängig von der Homogenität des Gemisches ist bei stetigen Gemischen die Anzahl bzw. Häufigkeit der verschiedenen Komponenten nicht abzählbar, sondern bedarf anderer Analyseverfahren.

Das zweite Merkmal, welches zur Unterscheidung hauptsächlich diskreter Gemische dienen soll, ist die räumliche Ausdehnung des Gemisches und seiner Komponenten, wie sie für die Analyse und Gestaltung der Sortierprozesse relevant ist. In **eindimensionalen** (1d) Gemischen sind die Komponenten des Gemisches in einer Richtung horizontal bzw. vertikal aneinander gereiht. Auch wenn die Komponenten mehrdimensional sind, z. B. Getränkeflaschen unterschiedlicher Form und Farbe auf dem Förderband einer Sortieranlage, spielt für die Sortierung ausschließlich die Anordnung entlang der ‚Sortierrichtung‘ eine Rolle.

Bei **zweidimensionalen** (2d) Gemischen liegt eine in zwei Richtungen ausgedehnte Vermischung vor. Als Beispiel ist hier ein Getränkekasten zu nennen, in dem die

¹¹ Alternativ lassen sich auch Massen- oder Volumenanteile bestimmen, indem die Masse bzw. das Volumen aller Stücke einer bestimmten Komponentenart ins Verhältnis zur Masse bzw. Volumen aller Komponentenarten gesetzt wird.

Flaschen aus der Draufsicht in mehreren Zeilen und Spalten platziert sind. Die **drei-dimensionale** (3d) Vermischung stellt eine beliebige Anordnung der Komponenten im Raum dar. Ein Beispiel ist der Gelbe Sack als Objekt dreidimensional angeordneter Stückgüter.

Untersuchungsgegenstand sind zunächst ausschließlich eindimensionale, diskrete Gemische, für die nachfolgend Überlegungen zur Vermischung angestellt werden sollen. Erweiterungen auf mehrdimensionale Gemische folgen in Abschnitt 4.3.¹²

4.2 Eindimensionale Vermischung

4.2.1 Intuitive Vorüberlegungen zur Vermischung anhand eines einfachen Beispiels

Zur graphischen Veranschaulichung eines eindimensionalen, diskreten Gemisches und seiner Komponenten soll im Folgenden ein Kartenspiel dienen, weil es die beschriebenen Sachverhalte besonders anschaulich macht. Eine Übertragung auf reale, eindimensionale Stoffgemische ist problemlos möglich; so lässt sich das in Abbildung 4.3 dargestellte 32-er-Skat-Kartenspiel¹³ mit 32 Flaschen auf einem Sortierband vergleichen, bei denen jeweils 4 Stück von 8 Flaschentypen vermischt aufgereiht sind.



Abbildung 4.3: Skatblatt mit 32 Karten in einer eindimensionalen Anordnung

Das Kartenspiel wurde in einer Reihe nebeneinander ausgelegt, die als abgeschlossen betrachtet wird.¹⁴ Die insgesamt 32 Objekte des Kartenspiels lassen sich nach dem jeweiligen Symbol oder Wert einer Karte, unabhängig von ihrer Spielfarbe, in acht

¹² Wie bereits oben beschrieben, erscheinen stetige Gemische einem Betrachter als eine homogene Masse. Da dies bei den im Weiteren fokussierten Vermischungen nicht der Fall ist, wird eine Betrachtung stetiger Gemische nicht weiter verfolgt. Für weitere Ausführungen hierzu sei nochmals auf das Werk von Behrens (1998) verwiesen.

¹³ Zur besseren Übersicht und Vergleichbarkeit der einzelnen Fälle sind alle Abbildungen der Kartenspiele in Anhang 11 noch einmal zusammengefasst. Zum Design der Spielkarten vgl. Bellot (2008).

¹⁴ Es besteht die Möglichkeit, die Reihe auch als unendliches Förderband anzulegen. Aber auch ein solches Förderband hätte einen Anfangspunkt, frühestens den Start-of-Production, und einen vorläufigen Endpunkt, den aktuellen Zeitpunkt. Es verändert sich bei dieser Betrachtung

Fraktionen einteilen. Das bedeutet, es gibt die Fraktionen ‚7er‘, ‚8er‘, ‚9er‘ und ‚10er‘-Karten sowie ‚Buben‘, ‚Damen‘, ‚Könige‘ und ‚Asse‘. Jede dieser Fraktionen umfasst vier Karten, die innerhalb einer Fraktion als gleichwertig angesehen werden.¹⁵ An dieser Stelle wird bereits das Problem der subjektiven Bestimmung der Fraktionen deutlich. Durch eine andere Einteilung der Fraktionen, beispielsweise nach den Spiel Farben (vier Fraktionen mit je acht gleichwertigen Karten) ergäben sich auch andere Ergebnisse bei der Messung der Vermischung. Die Untersuchung der Vermischung ist demgemäß immer von der individuellen Wahl der relevanten Eigenschaften, nach denen sortiert wird, abhängig.¹⁶

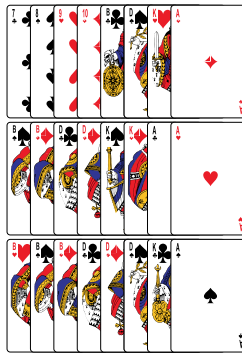


Abbildung 4.4: Drei Teilgemische mit abnehmender Vermischung

Nachfolgend sollen einige Anordnungen des gesamten Kartenspiels oder kleinerer Teilgemische gegenüber gestellt werden, um zunächst rein intuitiv Unterschiede bzgl. der Vermischung zu visualisieren und Charakteristika von Stoffgemischen zu identifizieren. Abbildung 4.4 zeigt drei Kartenstapel mit jeweils acht Karten, deren Vermischung betrachtet von oben nach unten abnimmt. Während der obere Kartenstapel alle acht verschiedenen Kartenwerte, d. h. acht unterschiedliche Komponenten beinhaltet, bestehen die beiden unteren Kartenstapel nur aus vier verschiedenen Kartenwerten (Bube, Dame, König, Ass). Die beiden unteren Kartenstapel wiederum unterscheiden sich dadurch, dass der obere je zwei Karten der vier Werte beinhaltet, während der untere je drei Buben und Damen und nur einen König und ein Ass aufweist. Bei rein intuitiver Betrachtung der drei Kartenstapel kann festgehalten werden, dass

lediglich die Grundgesamtheit und ihre Aufteilung auf die einzelnen Fraktionen. Daher kann die Betrachtung einer ‚unendlichen Reihe‘ analog zu der hier vorgestellten Vorgehensweise erfolgen.

¹⁵ Es spielt also keine Rolle, ob es sich bei einem Buben um den Kreuzbuben oder Herzbuben handelt, nur das Merkmal ‚Bube‘ ist entscheidend.

¹⁶ Vgl. zu Trennmerkmalen Schubert (2003b), S. 612.

sowohl die **Anzahl verschiedener Fraktionen** als auch die absoluten und relativen **Häufigkeiten der einzelnen Fraktionen** die Vermischung kennzeichnen. Ein komplettes 32er-Kartenspiel ist demgemäß durch acht Fraktionen zu je vier Karten charakterisiert. Das Gemisch besteht zu je $4/32 = 1/8$ bzw. zu einem Anteil von 12,5 % aus jeder Fraktion.

Intuitive Überlegungen zur Vermischung einer einzelnen Fraktion

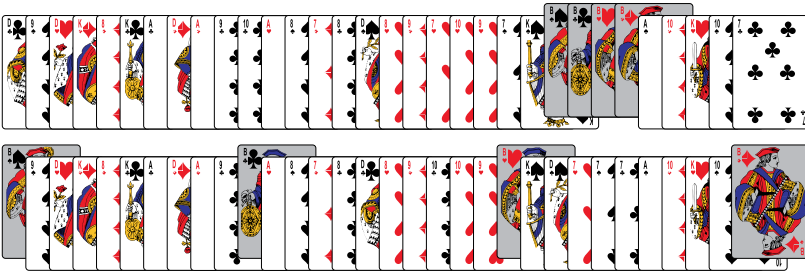


Abbildung 4.5: Unterschiedliche Anordnungen von vier Buben

Abbildung 4.5, in der zwei komplette 32er-Kartenspiele dargestellt sind, macht deutlich, dass weitere Kriterien zur Beschreibung der Vermischung notwendig sind. So unterscheiden sich die beiden Kartenstapel z. B. durch die **Anordnung** der graphisch hervorgehobenen Buben-Karten, deren Anteil in beiden Fällen 12,5 % beträgt. Die Buben können im ausgelegten Kartenspiel direkt nebeneinander liegen (vgl. Abbildung 4.5 oben) oder jede Bubenkarte liegt einzeln durch andere Karten von den übrigen Buben getrennt (vgl. Abbildung 4.5 unten).¹⁷

Rein intuitiv ist davon auszugehen, dass ein Kartenspiel, bei dem die Buben direkt nebeneinander liegen, weniger vermischt ist, als ein Spiel, bei dem die Buben jeweils einzeln liegen, zumindest bezüglich der Buben. Bei der Anordnung in Abbildung 4.5 oben handelt es sich bezüglich der Buben um die geringst mögliche Vermischung, da eine engere Anordnung der Karten hinsichtlich des Merkmals ‚Buben‘ nicht möglich ist. Die **Gruppenanzahl** beträgt 1. Das Einzige, was an dieser Anordnung noch variabel ist, ist die Position des Stapels Buben innerhalb der 28 Karten des Restgemisches. Dies erscheint aber für die Vermischung der Buben an sich nicht relevant.

¹⁷ Eine ähnliche Schlussfolgerung, jedoch ohne Herleitung, findet sich bei Behrens (1998), S. 104f.

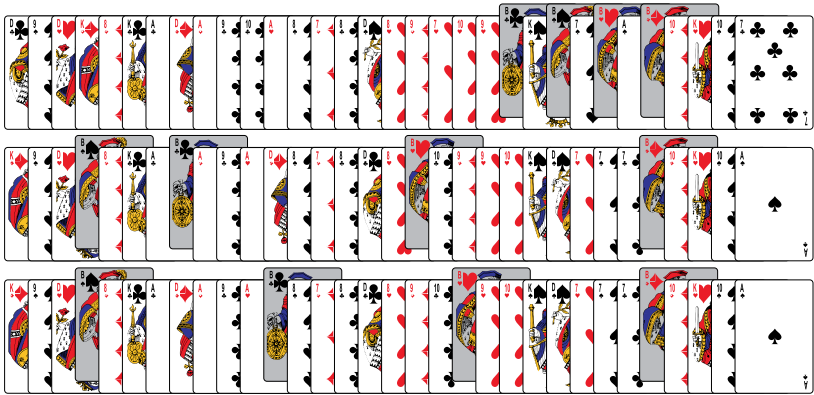


Abbildung 4.6: Unterschiedlich vermischtes Kartenspiel mit vier einzelnen Buben

Nachdem die geringste Vermischung einer Fraktion mit einem Restgemisch identifiziert wurde, stellt sich die Frage nach einer oder mehreren Anordnungen, die die maximal mögliche Vermischung darstellen. Für diesen Fall können alle Anordnungen ausgeschlossen werden, bei denen zwei oder mehr Buben direkt nebeneinander liegen. Wenn zwei Buben nebeneinander lägen, ließe sich die Vermischung dadurch erhöhen, dass man diese beiden Karten voneinander trennt und damit die Gruppenanzahl erhöht. Es kann daher für die maximale Vermischung nur eine Konstellation von vier einzelnen Buben in Frage kommen. Solche Konstellationen zeigt Abbildung 4.6. Werden weiterhin nur die Buben näher betrachtet, so zeigen sich jedoch auch in diesen drei Alternativen Unterschiede, die schon intuitiv verschiedene Vermischungen offenbaren. Während im oberen Teil der Abbildung die vier Buben jeweils nur durch eine Karte voneinander getrennt sind, liegen analog zu Abbildung 4.5 unten die Buben im unteren Kartenstapel durch jeweils sieben Karten anderer Werte getrennt. Der **Abstand** der Komponentengruppen scheint also auch eine Rolle bei der Beurteilung der Vermischung zu spielen. Liegen die vier Buben sehr weit auseinander, so liegt eine höhere Vermischung vor, als wenn die Spanne zwischen den äußeren beiden Buben recht gering ist. Fraglich bleibt hier aber zunächst, ob die Anordnung der vier Buben gemäß Abbildung 4.6 unten eine höhere Vermischung aufweist als die Anordnung in der Mitte der Abbildung, bei der zwischen den beiden äußeren Buben ebenfalls einen Gesamtabstand von 21 Karten (ohne die beiden Buben) besteht, die Abstände zwischen den vier Buben aber nicht dreimal sieben, sondern einmal 3 und zweimal 9 Karten betragen.

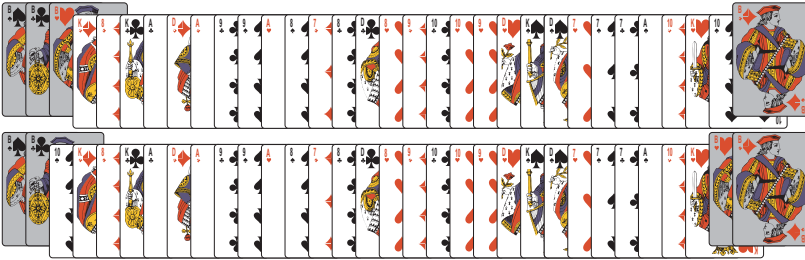


Abbildung 4.7: Vermischung von vier gleichen Karten einer Fraktion mit unterschiedlichen Gruppengrößen

Zudem ist es weiterhin möglich, dass bestimmte Anordnungen mit gleicher Gruppenanzahl und gleichem Abstand existieren, die optisch von der Positionierung der Karten eindeutig unterschiedlich sind. Abbildung 4.7 zeigt wiederum bezogen auf die Buben solche Fälle, die sich nicht bezüglich Gruppenanzahl und Abstand, wohl aber bezüglich der **Gruppengrößen** unterscheiden. Es bleibt allerdings unklar, welche der beiden Kartenstapel bzgl. der Buben eine höhere Vermischung aufweist (1 Gruppe à 3 Buben und 1 separater Bube oder 2 Gruppen à 2 Buben).

Dass es sich aber in jedem Fall um unterschiedlich stark vermischte Kartenspiele handelt (bzw. handeln sollte) wird noch deutlicher, wenn größere Fraktionen betrachtet werden, z. B. wenn wie in Abbildung 4.8 statt der Kartenwerte die Kartenfarbe als Unterscheidungsmerkmal dient und dann eine Alternative mit einer Gruppe à 7 Karten und einer separaten Karte einer Alternative mit zwei Gruppen à 4 Karten gegenübersteht.

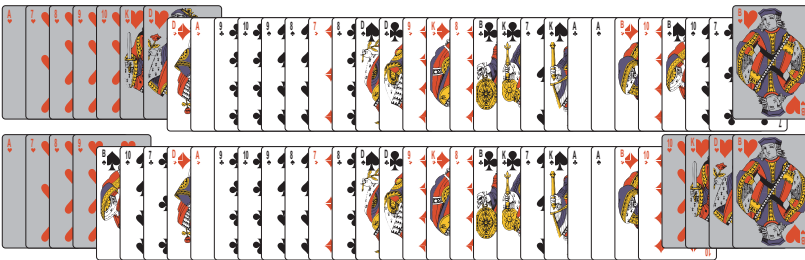


Abbildung 4.8: Vermischung von acht gleichen Karten einer Fraktion

Intuitive Überlegungen zur Vermischung mehrerer Fraktionen

Für den Fall, dass nicht nur eine, sondern alle im Gemisch enthaltenen Fraktionen betrachtet werden sollen, liegt die geringste Vermischung vor, wenn die Objekte jeder Fraktion direkt nebeneinander angeordnet sind (vgl. Abbildung 4.9).¹⁸

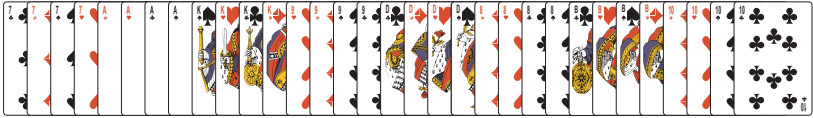


Abbildung 4.9: Unvermischtheit aller Fraktionen¹⁹

Die größte Vermischung liegt entsprechend dann vor, wenn die einzelnen Objekte jeder Fraktion vereinzelt und mit möglichst großem Abstand voneinander angeordnet sind. In jedem Fall sollte somit jede Fraktion in vier Gruppen à einer Karte angeordnet sein. Wenn davon ausgegangen wird, dass die größte Vermischung bei sich abwechselnden Fraktionen erreicht wird, könnten diese **Fraktionswechsel** auch als Indikator der Vermischung eingesetzt werden.

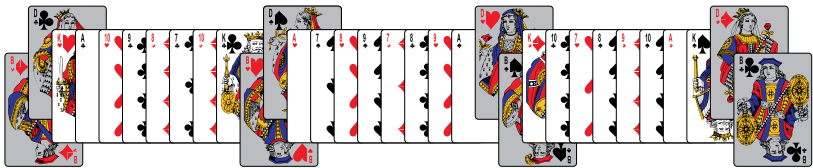


Abbildung 4.10: Maximalabstände verschiedener Fraktionen

Anders als bei der ausschließlichen Betrachtung einer einzelnen Fraktion sind Aussagen über die Vermischung aufgrund der Abstände bei Betrachtung aller Fraktionen nicht so einfach zu treffen. Der Grund hierfür ist, dass die Abstände der einzelnen Fraktionen sich gegenseitig beeinflussen. So kann der Gesamtabstand zwischen den beiden äußeren Karten nur für eine Fraktion $28 (= 9 + 10 + 9)$ betragen, nämlich

¹⁸ Solange keine Bewertung der einzelnen Fraktionen vorliegt, beispielsweise nach ihrer Erwünschtheit (im Beispiel etwa der Kartenwert) oder einer kostengünstigen Reihenfolge in einem Produktions- oder Recyclingprozess, ist die Position der einzelnen Fraktionenstapel im Gemisch unerheblich. Ein Beispiel für eine kostengünstige Reihenfolge in einem Produktionsprozess ist die Farbfolge bei der PKW-Lackierung. Dabei werden zunächst Autos in einer hellen Farbe lackiert; nachfolgende Autos können dann in der gleichen oder einer dunkleren Farbe lackiert werden, ohne dass die Anlage zwischendurch gereinigt werden muss.

¹⁹ Unvermischtheit bedeutet hier, dass alle Karten einer Fraktion nebeneinander liegen.

dann, wenn je eine Karte der Fraktion am linken und rechten Rand des Kartenstapels liegt (vgl. die Buben in Abbildung 4.10). Für eine weitere Fraktion (vgl. die Damen in Abbildung 4.10) kann der Gesamtabstand im Kartenspiel dann nur noch 26 ($= 8 + 10 + 8$) betragen. Werden die Gesamtabstände aller Fraktionen addiert, so ergibt sich ein Wert von 168 (vgl. Abbildung 4.10: $28\text{Bube} + 26\text{Dame} + 24\text{König} + 22\text{Ass} + 20\text{Zehn} + 18\text{Neun} + 16\text{Acht} + 14\text{Sieben} = 168$; angegeben sind jeweils die Gesamtabstände für die verschiedenen Kartenwerte).



Abbildung 4.11: Vermischung mit gleichmäßigen Abständen aller Fraktionen

Die Summe der Gesamtabstände über alle Fraktionen ist jedoch als zusätzliches Maß für die Vermischung wenig hilfreich, da sie für jede beliebige Verteilung der Fraktionen, bei denen alle Objekte aller Fraktionen vereinzelt liegen, stets gleich hoch, im Beispiel des 32er-Kartenspiel also immer gleich 168 ist. So gilt dies auch für den in Abbildung 4.11 dargestellten Fall, bei dem sich die einzelnen Karten der Fraktionen immer in der gleichen Reihenfolge abwechseln. Für jede Fraktion beträgt die Gesamtspanne 21 Karten. Im Gegensatz zur Betrachtung von nur einer Fraktion mit einem nicht näher definierten Restgemisch weist also die ‚Randlösung‘ nicht zweifelsfrei die größte Vermischung auf.

4.2.2 Wirkungszusammenhänge und Erhebungsprobleme

In Abschnitt 4.2.1 wurden mit Fraktionsanzahl, Fraktionsanteilen, Gruppenanzahl, Gruppengrößen und -abständen bereits fünf Merkmale identifiziert, mittels derer sich die Vermischung charakterisieren lässt. Tabelle 4.1 beschreibt in der ersten Zeile die Wirkungsrichtung dieser Merkmale und zeigt in den beiden weiteren Zeilen, auf welche Weise sie zur Charakterisierung der Vermischung Verwendung finden können.

Tabelle 4.1: Übersicht der Wirkungszusammenhänge von Vermischungsmerkmalen

	Häufigkeitsmerkmale		Anordnungsmerkmale			
	Fraktionsanzahl	Fraktionsanteile	Wechselanzahl	Gruppenanzahl	Konzentration	Entfernung
Wirkungsrichtung ²⁰ : je ... desto vermischter ist das Stoffgemisch	größer die	gleichmäßiger die Verteilung der	größer die	größer die	kleiner und gleichmäßiger die	Gruppen- abstände größer und un- gleichmäßiger die
separate Aussagen zur Vermischung einzelner Fraktionen	nicht möglich	möglich, aber nicht sinnvoll			möglich und sinnvoll	
Vorgehen zur Beur- teilung des Stoffge- mischtes	simultane Beurteilung aller Fraktionen in einem einigen Vorgang					separate Beurteilung der Vermischung einzelner Fraktionen und anschließende Aggregation zur Ge- samtbeurteilung

²⁰ Lesebeispiel: Je größer die Fraktionsanzahl desto vermischter ist das Stoffgemisch.

Häufigkeitsmerkmale

Fraktionsanzahl und **Fraktionsanteile** sind Häufigkeitsmerkmale, die zur Charakterisierung der Vermischung eines Stoffgemisches beitragen können.²¹ Mit steigender Anzahl Fraktionen nimmt die Vermischung *ceteris paribus* (*c. p.*) zu. Ist eine maximal mögliche Anzahl Fraktionen bekannt, so lässt sich auch eine relative Einordnung konkreter Stoffgemische vornehmen. Dies ist etwa in Sortieranlagen für Leichtstoffverpackungen der Fall, wo i. d. R. ca. 10 verschiedene Fraktionen separiert werden (u. a. Weißblech, Aluminium, Verbundkartons und diverse Kunststofffraktionen).²² Anhand der Fraktionsanzahl des LVP-Gemischs kann dann eine Aussage über seine Vermischung getroffen werden: Befinden sich nur wenige Fraktionen im Verhältnis zur insgesamt möglichen Anzahl Fraktionen darin, ist das Gemisch bezüglich der Fraktionen relativ unvermischt bzw. sortenrein.

Für die Fraktionsanteile spielt die Gleichmäßigkeit der Verteilung die entscheidende Rolle. Ein Stoffgemisch mit ausgewogenen Anteilen verschiedener Fraktionen weist demgemäß *c. p.* eine höhere Vermischung auf als ein Stoffgemisch, bei dem eine oder einige wenige Fraktionen in ihren Anteilen überwiegen.

Es liegt in der Charakteristik von Häufigkeitsmerkmalen begründet, dass sie keine separate Aussage über die Vermischung einer einzelnen Fraktion erlauben. Während die Fraktionsanzahl schon per definitionem mehrere Fraktionen betrifft, lässt sich der Anteil einer einzelnen Fraktion zwar ermitteln, er besitzt aber keinen separierbaren Aussagegehalt über die Vermischung der Fraktion an sich, sondern wirkt nur im Zusammenspiel mit den Anteilen anderer Fraktionen. Aus dieser Charakteristik der Häufigkeitsmerkmale folgt, dass fraktionsanzahl- und fraktionsanteilbezogene Kennzahlen nur ermittelt werden können, wenn alle Fraktionen simultan berücksichtigt werden.

Anordnungsmerkmale

Neben die Häufigkeitsmerkmale treten als zweite Gruppe von Charakteristika der Stoffgemische die Anordnungsmerkmale **Gruppenanzahl**, **Gruppengrößen** und **Gruppenabstände**, die gemeinsam beschreiben, wie sich die verschiedenen (dis-

²¹ Auch in der Partikeltechnologie werden Partikelgemische anhand dieser Merkmale gemessen, vgl. Stieß (2009), S. 29ff.

²² Eine eindimensionale Vermischung von LVP liegt z. B. bei der automatischen Klaubung vor. Ein weiteres Beispiel ist die Definition von zu sortierenden Flaschensorten in der Leergutsortierung von Getränkemehrweggebinden, vgl. Abschnitt 3.5 sowie Hofbauer (2009), S. 13.

kreten) Objekte einer jeden Fraktion bzw. Komponente im Stoffgemisch verteilen. Wie die intuitiven Überlegungen in Abschnitt 4.2.1 bereits gezeigt haben, ist bei diesen Merkmalen eine separate Betrachtung einzelner Fraktionen möglich. Auch wenn sich die Merkmalsausprägungen einzelner Fraktionen u. U. gegenseitig beeinflussen, können anordnungsbezogene Kennzahlen sukzessive bestimmt werden, d. h. zunächst Werte für die einzelnen Fraktionen ermittelt und diese dann anschließend aggregiert werden.

Gruppenanzahl und **Gruppengrößen** kennzeichnen gemeinsam die **Konzentration** einer Fraktion innerhalb des Stoffgemisches. Für eine bestimmte Anzahl von Objekten einer Fraktion gibt sie **unabhängig von ihrer konkreten Lage** im Gemisch an, ob und wenn ja wie stark sie miteinander verbunden sind. Die beiden Merkmale Gruppenanzahl und Gruppengröße sind voneinander abhängig. So liegen für das 32er-Kartenspiel mit bekannter Grundgesamtheit (8 Fraktionen à 4 Karten) vier Fälle mit zusammen fünf Ausprägungen der Merkmalskombination für eine Fraktion (hier nachfolgend die Buben) vor:

- 1. Fall: Von den Buben liegt nur eine Gruppe vor, die dann alle vier Buben enthält.
- 2. Fall: Ist die Fraktion in zwei Gruppen zerlegt, dann gibt es zwei Möglichkeiten, wie sich die vier Buben auf die Gruppen aufteilen:
 - drei Buben in einer Gruppe und einer in der zweiten Gruppe bzw.
 - zwei Buben in jeder Gruppe.
- 3. Fall: Bei drei Gruppen bestehen stets eine Gruppe aus zwei und die beiden anderen Gruppen aus je einem Buben.
- 4. Fall: Es gibt vier Gruppen, die aus je einem Buben bestehen.

Eine größere Vermischung liegt c. p. bei größerer Gruppenanzahl und kleineren Gruppengrößen vor. Damit lassen sich die oben genannten vier Fälle unterschiedlicher Konzentration der Buben in eine Rangfolge zunehmender Vermischung (von 1 nach 4) einordnen. Überdies wird hier als Konvention vorausgesetzt, dass die Vermischung auch mit gleichmäßigerer Verteilung der Gruppengrößen ansteigt. Der zweite Unterfall zu Fall 2 (2 Gruppen mit je 2 Buben) ist demgemäß stärker vermischt als der erste Unterfall (1 Gruppe mit 3 Buben und 1 Gruppe mit 1 Buben).

Wie bereits erwähnt, lässt sich die Vermischung des gesamten Gemisches bzgl. der beiden Konzentrationsmerkmale sukzessive bestimmen, in dem zunächst für jede Frak-

tion die Gruppenanzahl und -größen bestimmt werden und anschließend ein Gesamtwert daraus bestimmt wird. Wie dann eine Kennzahl gebildet werden kann, ist erst Gegenstand des entsprechenden Abschnitts in Kapitel 4.2.3. Hier soll nachfolgend aber noch eine andere Option vorgestellt werden, die analog zur Bestimmung der Gruppenanzahl genutzt werden kann. Denn statt die Gruppenanzahlen der verschiedenen Fraktionen zu bestimmen und anschließend zu addieren, kann auch simultan die **Wechselanzahl** verschiedener Fraktionen ermittelt werden.²³ Ein Wechsel liegt immer dann vor, wenn zwei nebeneinander liegende Objekte bezüglich des Unterscheidungsmerkmals der Fraktionen unterschiedlich sind. Die Zählung der Wechsel erfolgt in zuvor festgelegter Betrachtungsrichtung und beschränkt sich somit nur auf Übergänge **nach** einem Objekt zum nächsten.²⁴

In einem abgeschlossenen Kartenspiel mit 32 Karten liegen insgesamt 31 Kartenübergänge vor, wenn die Ränder nach außen nicht betrachtet werden. Durch das Symbol W_f wird die Anzahl der Wechsel von Fraktion f symbolisiert. Falls nun sämtliche Buben, als ausgewählte Beispielfraktion, direkt nebeneinander liegen (vgl. Abbildung 4.5 bzw. Abbildung 4.12), wird innerhalb dieser Gruppe kein Wechsel der Fraktion gezählt, da alle Karten zur selben Fraktion gehören. Erst durch die Einbeziehung vor- bzw. nachgelagerter anderer Karten können Fraktionswechsel registriert werden. Liegt in der Reihe zuerst eine Karte einer beliebigen anderen Fraktion, z. B. eine 8, dann die vier Buben und nach den Buben wieder eine Karte einer anderen Fraktion, z. B. eine Dame, so wird nach der 8er-Karte ein Fraktionswechsel für die 8er-Fraktion gezählt, da die nachfolgende Karte ein Bube ist (vgl. Abbildung 4.12).



Abbildung 4.12: Beispiel für die Zählung der Wechsel

Dem Buben folgen noch drei weitere Buben, für die kein Wechsel gezählt wird, da es sich um Objekte der gleichen Fraktion handelt. Erst nach dem letzten Buben in der Gruppe wird ein Fraktionswechsel für die Buben gezählt, da die nachfolgende

²³ Eine sukzessive Ermittlung für jede Fraktion ist möglich, jedoch nicht sinnvoll, da das Kartenspiel für jede Fraktion extra ausgewertet werden müsste. Für acht Fraktionen wären acht Auszählungen erforderlich.

²⁴ Im Folgenden soll die Betrachtungsrichtung für alle wechselbezogenen Abbildungen von links nach rechts verlaufen. Ein möglicher Wechsel wird am rechten Rand der betrachteten Karte gezählt.

Karte zur Fraktion ‚Dame‘ gehört. Für die Fraktion ‚Bube‘ liegt also die Wechselzahl $W_{Bube} = 1$ vor, ebenso wie für die Fraktion ‚Ser‘: $W_8 = 1$; $W_{Dame} = 0$. Daraus folgt: $W_{ges} = 2$. Wie anhand aller hier visualisierter Beispiele einfach nachzuvollziehen ist, entspricht die Wechselanzahl stets der um eins verminderten Gesamtgruppenanzahl (GA_{ges}), wodurch die starke Analogie zwischen Wechselzahl und Gruppenanzahl auch formal deutlich wird: $W_{ges} = GA_{ges} - 1$.²⁵

Mit steigender Wechselanzahl nimmt die Vermischung des Stoffgemisches zu. Die minimale Vermischung für das Kartenspiel mit 8 Fraktionen hat die in Abbildung 4.9 dargestellte Anordnung: jede Fraktion bildet eine Gruppe aus vier Karten, die alle Objekte der Fraktion umfasst, und alle Gruppen sind nacheinander angeordnet. Für das Beispiel minimaler Vermischung ergibt sich in Summe für alle Fraktionen eine minimale Wechselanzahl von $W_{ges} = 7$. Allgemein gilt für die minimale Vermischung $W_{ges}^{min} = \text{Fraktionsanzahl} - 1$. Die maximale Wechselanzahl ergibt sich, wenn im Kartenspiel die Karten jeder Fraktion vereinzelt durch Karten anderer Fraktionen getrennt liegen. Da dann nach jeder Karte die Fraktion gewechselt wird und die Wechsel aufsummiert werden, ergeben sich für 32 Karten insgesamt 31 Wechsel. Allgemein gilt: $W_{ges}^{max} = \text{Anzahl Objekte} - 1$. Im Gegensatz zur Formel für die minimale Wechselzahl gilt diese Formel allerdings nicht uneingeschränkt. Falls eine Fraktion mehr als 50 % des Gemisches umfasst, können die Karten dieser Fraktion nicht mehr vereinzelt werden. Es gibt daher immer eine Fraktionsgruppe, in der sich mindestens zwei Karten konzentrieren, und die Ermittlung der maximalen Wechselanzahl ist somit abhängig von den Fraktionsanteilen.

Für Aussagen zur Vermischung eines Stoffgemisches ist neben der Konzentration auch die genaue Lage der verschiedenen Fraktionsgruppen relevant. Als weitere Anordnungsmerkmale sollten daher die Abstände bzw. **Entfernungen** der Gruppen berücksichtigt werden.²⁶ Dabei gilt es zunächst festzulegen, wie die Abstände gemessen werden. Eine nahe liegende Möglichkeit besteht darin, die Distanz (d) zwischen zwei Gruppen auf einer metrischen Skala, z. B. durch Maßnahmen mit einem Lineal oder Maßband zu bestimmen. Für den Fall, dass die Ausdehnung (Breite) der einzelnen Objekte für den Sortierprozess keine wesentliche Rolle spielt, sondern lediglich die Abfolge der Objekte relevant ist, besteht auch die Möglichkeit, den Objekten ihren Positionswert zuzuordnen, deren Differenz dann die Entfernung misst. Für die Distanz zweier Objekte A und B gilt dann mit den jeweiligen Positionswerten a und b :

²⁵ Würde der Wechsel des letzten Objekts und somit der Abschluss des diskreten Gemisches auch als ein Wechsel gezählt werden, so entsprächen sich Wechselanzahl und Gesamtgruppenanzahl.

²⁶ Als Gruppen werden hier wiederum auch vereinzelt liegende Objekte, also z. B. ein separater Bube, aufgefasst.

$$d_{AB} = |a - b|. \quad (4.1)$$

Ähnlich wie etwa die Leergut-Flaschen auf einem Sortierband besteht das Kartenspiel aus diskreten, gleichförmigen Objekten, für die eine Bestimmung des Abstands mittels der Positionswerte (statt zentimetergenauer Positionen) zweckmäßig erscheint. Der Abstand zwischen zwei Buben-Gruppen wird daher exemplarisch ermittelt, in dem die Karten anderer Fraktionen gezählt werden, die zwischen den Buben liegen.²⁷

Für eine einzelne Fraktion lässt sich die Vermischung durch Angabe der Abstände zwischen ihren Gruppen innerhalb des gesamten Stoffgemisches beschreiben. Je größer die Summe der Abstände ist, desto vermischer liegt diese Fraktion im Stoffgemisch vor. Entgegengesetzt zu den Überlegungen zu unterschiedlichen Gruppengrößen wird hier als Konvention festgelegt, dass bei insgesamt gleich großen Gesamtabständen der verschiedenen Gruppen einer Fraktion (vgl. nochmals die unterschiedlichen Anordnungen der Buben in Abbildung 4.6) ungleichmäßigere Verteilungen der Abstände eine größere Vermischung bedingen sollen. Dies lässt sich etwa dadurch begründen, dass unterschiedlich weite Abstände zwischen den Objekten einer Fraktion eine Ausortierung in einem speziellen Rhythmus erschweren, wohingegen gleichmäßige Abstände besser eine Struktur in der Anordnung zwischen den Objekten einer Fraktion erkennen lassen.

Zur Beurteilung des Stoffgemisches anhand aller Fraktionen können die Abstände jeder einzelnen Fraktion sukzessive bestimmt und anschließend über alle Fraktionen zu einem Gesamtwert aggregiert werden. Wie eine entsprechende Kennzahl ausgestaltet sein sollte, ist wiederum erst Gegenstand des nachfolgenden Kapitels 4.2.3. Hier soll allerdings auf mögliche Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Fraktionen hingewiesen werden, wie sie schon in den intuitiven Überlegungen angesprochen wurden. Diese betrafen die Frage nach den maximalen Gesamtabständen einer Fraktion in einem Stoffgemisch. Wie gezeigt, kann nur eine Fraktion am Rand des Stoffgemisches liegen, und somit kommt die gesamte Spanne des Stoffgemisches nur für die Entfernung einer einzelnen Fraktion als Maximalwert in Frage. Dies gilt es bei der Entwicklung einer Kennzahl zu berücksichtigen, die ein aussagekräftiges Maß für die Vermischung darstellt. Würde hingegen die Kennzahl so konstruiert, dass die gesamte Spanne parallel für alle Fraktionen denkbar ist, so würden tatsächliche Kennzahlenwerte ein falsches Bild vermitteln, da durch einen Vergleich mit einem idealen (nicht-erreichbaren) Maximalwert eine Verzerrung auftritt.

²⁷ Betont sei, dass die Abstände innerhalb einer Gruppe nicht bestimmt werden, auch wenn gemäß der Distanz-Formel innerhalb einer Gruppe Abstände zwischen den Einzelobjekten bestehen.

4.2.3 Messung der verschiedenen Merkmale durch Kennzahlen

Im vorigen Abschnitt wurden die Merkmale, anhand derer die Vermischung gemessen werden kann, vorgestellt und ihre Wirkungsrichtungen sowie einige Erhebungsprobleme aufgezeigt. Es wurde deutlich, dass keines der vorgestellten Merkmale die Vermischung alleine vollständig abbildet. In diesem Abschnitt sollen daher zunächst für die verschiedenen Merkmale einzelne Kennzahlen entworfen werden, welche die jeweiligen Aspekte erfassen. Zur Vergleichbarkeit der Werte ist es zweckmäßig, alle Kennzahlen auf den Bereich $[0,1]$ zu normieren. Abschließend wird dann noch untersucht, ob sich die Kennzahlen zu einer gemeinsamen Spitzenkennzahl kombinieren lassen, die dann einen Gesamteindruck von der Vermischung des Stoffgemisches vermittelt.

4.2.3.1 Fraktionsanzahlorientierter Vermischungsgrad (FVG)

Der **Fraktionsanzahlorientierte Vermischungsgrad** (FVG) kann für Gemische bestimmt werden, deren maximal mögliche Komponentenzahl bekannt ist. Hierbei wird aus der Anzahl der im Gemisch vorgefundenen Komponenten auf die Vermischung des Gemisches geschlossen. Zur Berechnung wird die Anzahl vorhandener Komponenten ins Verhältnis zur Anzahl möglicher Komponenten gesetzt:

$$FVG = \frac{\text{Anzahl vorhandener Komponenten} - 1}{\text{Anzahl möglicher Komponenten} - 1}. \quad (4.2)$$

Zähler und Nenner werden jeweils um 1 korrigiert, damit die Kennzahl den oben angeführten Wertebereich umfasst und bei nur einer vorhandenen Komponente ein Wert von 0 erreicht wird. Vollständige Vermischung hinsichtlich der Fraktionsanzahl ergibt sich dann, wenn alle möglichen Komponenten auch in dem Gemisch vorhanden sind. Zähler und Nenner haben in diesem Fall den gleichen Wert und es ergibt sich aus dem Quotienten $FVG = 1$.

4.2.3.2 Anteilsorientierter Vermischungsgrad (AVG)

Die Anteile einzelner Fraktionen wurden bereits als ausschließliches Maß für die Vermischung verworfen. Allerdings können die Anteile aller Fraktionen zu einer Gesamtkennzahl aggregiert werden, wobei eine gleichmäßige Verteilung einen höheren Kennzahlenwert bedingen soll als eine ungleichmäßige. Graphisch ist eine Darstellung der Vermischung bezüglich der Fraktionsanteile als Lorenzkurve möglich. Dabei werden

unter Einbeziehung der Punkte (0 %, 0 %) und (100 %, 100 %) in einem Koordinatensystem die relativen Summen der Beobachtungswerte bis zu einer bestimmten Ausprägung j über dem Anteil der einzelnen Ausprägungen an der Gesamtheit aller Ausprägungen des betrachteten Merkmals abgetragen.²⁸

Ein Beispielmisch besteht aus 100 Karten in fünf Fraktionen (10, Bube, Dame, König, Ass), von denen die Fraktion Bube 80 Karten umfasst, d. h. einen Mengenanteil von 80 % hat. Alle übrigen Fraktionen bestehen aus je 5 Karten und haben demnach je einen Anteil von 5 %. Das betrachtete Merkmal für die Konstruktion der Lorenzkurve ist die Anzahl Karten einer Fraktion mit den Ausprägungen 5 und 80. Die Ausprägungen werden aufsteigend sortiert und es ergibt sich aus ihnen der Kurvenverlauf in Abbildung 4.13. Auf der Abszisse sind dabei die relativen kumulierten Häufigkeiten (C_j) abgetragen und auf der Ordinate die relativen Summen der Beobachtungswerte bis zur Ausprägung j (S_j).

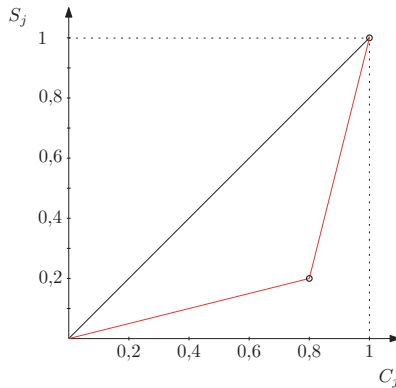


Abbildung 4.13: Lorenzkurve als Basis zur Messung des anteilsorientierten Vermischungsgrades

Im Fall der größten Vermischung bezüglich der Anteile hätten alle Fraktionen den gleichen Anteil, d. h. der Kurvenverlauf der Lorenzkurve entspräche dem Verlauf der Winkelhalbierenden. Bei der kleinsten Vermischung, einem Gemisch, das nur aus einer Fraktion besteht, hat die Kurve die größte Durchbiegung.²⁹ Um die Vermischung in

²⁸ Vgl. Bankhofer/Vogel (2008), S. 44–48.

²⁹ Hierbei ist zu beachten, dass die am größten ausgedehnte Lorenzkurve nicht dem Dreieck zwischen den Achsen und der Winkelhalbierenden entspricht. Sie hat im Fall der größten Ungleichheit ihren Knick im Punkt (1,100 %), vgl. hierzu Bankhofer/Vogel (2008), S. 46.

einer Zahl auszudrücken, bietet sich der Gini-Koeffizient³⁰ mit folgender Notation an:

F	Anzahl Fraktionen
j	Laufindex der Merkmalsausprägungen
S_j	relative Summe der Beobachtungswerte bis zur Merkmalsausprägung j
h_j	absolute Häufigkeit der Merkmalsausprägung j

$$G = 1 - \frac{1}{F} \cdot \sum_{j=1}^k (S_{j-1} + S_j) \cdot h_j. \quad (4.3)$$

Er vergleicht die Fläche zwischen der Lorenzkurve und der Winkelhalbierenden mit der maximal möglichen Fläche des Dreiecks zwischen den Achsen und der Winkelhalbierenden. Da der Gini-Koeffizient bei diesem Vergleich aufgrund des Knicks der maximalen Lorenzkurve nicht 1 werden kann, muss er um diese Abweichung korrigiert werden.³¹

$$G_{norm} = \begin{cases} \frac{F}{F-1} \cdot G & \text{für } F > 1 \\ 1 & \text{für } F = 1. \end{cases} \quad (4.4)$$

Dadurch wird eine Normierung auf das Intervall $[0,1]$ erreicht und die hier aufgestellte Anforderung an eine Kennzahl erfüllt. Es ist allerdings zu beachten, dass die Bewertung invers zur eigentlichen Interpretation des Gini-Maßes erfolgen muss. Bei einem Gini-Koeffizient von 1 liegt eigentlich die größte Konzentration auf eine Fraktion vor, d. h. per Definition Unvermischtheit. Bei einem Gini-Koeffizient von 0 liegt die kleinste Konzentration vor, eine Gleichverteilung auf alle Fraktionen, also die größte Vermischung.³² Der AVG ergibt sich daher als:

$$AVG = 1 - G_{norm}. \quad (4.5)$$

Für das vorliegende Beispiel ergibt sich unter Verwendung der Häufigkeitstabelle (vgl. Tab. 4.2) ein normierter Gini-Koeffizient G_{norm} von 0,75 ($G = 0,6$) und ein AVG von 0,25. Bezüglich der Fraktionsanteile liegt also eine Vermischung von 25 % vor.³³

a_j	Merkmalsausprägungen
h_j	absolute Häufigkeit der Merkmalsausprägung j
S_j	relative Summe der Beobachtungswerte bis zur Merkmalsausprägung j mit $S_j = \frac{1}{MS} \sum_j a_j \cdot h_j$

³⁰ Vgl. Bankhofer/Vogel (2008), S. 48.

³¹ Vgl. Bankhofer/Vogel (2008), S. 48; Bamberg/Baur/Krapp (2012), S. 25f.

³² Hier gilt es zu beachten, dass der Begriff ‚Konzentration‘ nicht die statistische Konzentration bezeichnet.

³³ Anders als bei der graphischen Darstellung der Konzentration mittels einer Lorenzkurve müssen bei der Berechnung der Gini-Koeffizienten die Ausprägungen stets aufsteigend nach ihrer Größe sortiert werden.

Tabelle 4.2: Häufigkeitstabelle zur Berechnung des Gini-Koeffizienten bzw. AVG ³⁴

a_j	h_j	$a_j \cdot h_j$	S_j
5	4	20	0,2
80	1	80	1
	5	100	

$$G = 1 - \frac{1}{5} \cdot (0,2 \cdot 4 + 1,2 \cdot 1) = 1 - \frac{1}{5} \cdot (0,8 + 1,2) = 1 - 0,4 = 0,6 \quad (4.6)$$

$$G_{norm} = \frac{5}{5-1} \cdot 0,6 = 0,75 \quad (4.7)$$

$$AVG = 1 - 0,75 = 0,25 \quad (4.8)$$

4.2.3.3 Wechselorientierter Vermischungsgrad (WVG)

Die Häufigkeit des Fraktionswechsels wurde in Kapitel 4.2.2 als eine Möglichkeit der Messung von Vermischung identifiziert, bei der eine steigende Anzahl Fraktionswechsel eine erhöhte Vermischung bedingt. Der **Wechselorientierte Vermischungsgrad** (WVG), der einen Wertebereich zwischen 0 und 1 aufweist, wird zunächst wie folgt definiert:³⁵

$$WVG = \frac{\text{Anzahl Wechsel} - (\text{Anzahl Fraktionen} - 1)}{\text{Anzahl Objekte} - \text{Anzahl Fraktionen}}. \quad (4.9)$$

Die Anzahl Wechsel bezieht sich hier auf alle Fraktionen. Eine ausschließliche Betrachtung einer Fraktion ist möglich, aber nicht zweckmäßig (vgl. Kapitel 4.2.2). Die minimale Wechselzahl in einem Gemisch ist $(\text{Anzahl Fraktionen} - 1)$. Der Zähler ergibt in diesem Fall völliger Unvermischtheit den Wert 0 und der WVG ist insgesamt 0. Für die maximale Zahl Wechsel $(\text{Anzahl Objekte} - 1)$ ergibt der Zähler den Term $(\text{Anzahl Objekte} - \text{Anzahl Fraktionen})$. Da Zähler und Nenner dann identische Werte aufweisen, ist $WVG = 1$.

Die obige Formel für den WVG besitzt allerdings nur dann die Eigenschaft, dass ein Wert von 1 erreicht werden kann, wenn keine Fraktion am Gemisch einen Anteil von mindestens 50 % + 1 Stück aufweist. Wie schon in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, besteht ansonsten keine Möglichkeit, alle Objekte einer Fraktion separat anzuordnen.

³⁴ Anders als bei der graphischen Darstellung der Konzentration mittels einer Lorenzkurve müssen bei der Berechnung der Gini-Koeffizienten die Ausprägungen stets aufsteigend nach ihrer Größe sortiert werden.

³⁵ Diese Formel gilt streng genommen nicht für den Fall, dass jede Fraktion aus nur einem Objekt besteht. Da in diesem Fall Zähler und Nenner gleich null sind und vollständige Vermischung der Objekte vorliegt, wird der WVG für diese speziellen Fall gleich eins definiert.

Begegnet werden kann diesem Problem durch eine angepasste Ermittlung der maximal möglichen Wechselzahl (Anpassung des Nenners in Formel (4.9)). Falls eine Fraktion einen Anteil von 50 % + 1 Stück oder mehr hat, ist die maximale Zahl Wechsel dieser Fraktion $W_f^{max} = n - n_f$ (mit n = Anzahl aller Objekte, n_f = Anzahl Objekte der Fraktion f). Die Anzahl der Fraktionswechsel der anderen Fraktionen kann ebenfalls maximal diesen Wert annehmen. Berücksichtigt man ferner, dass das letzte Objekt keinen Wechsel nach hinten mehr aufweist, dann ergibt sich als maximale Anzahl Wechsel insgesamt der Wert $W^{max} = (n - n_f) \cdot 2$. Dieser Term bildet den ersten Teil des Nenners in der Formel, falls eine Fraktion mindestens 50 % + 1 Stück der Objekte umfasst, und muss für die Normierung auf das Intervall $[0, 1]$ noch um die minimale Wechselanzahl korrigiert werden. Insgesamt ergibt sich somit folgende zweigeteilte Formel (mit W = Anzahl Wechsel) für den Wechselorientierten Vermischungsgrad (WVG):

$$WVG = \begin{cases} \frac{W - (F - 1)}{n - F} & \text{falls alle } n_f < 0,5 \cdot n + 1 \\ \frac{W - (F - 1)}{(n - \max_f n_f) \cdot 2 - (F - 1)} & \text{falls ein } n_f \geq 0,5 \cdot n + 1. \end{cases} \quad (4.10)$$







Tabelle 4.3 auf S. 70 verdeutlicht die Anwendung von Formel 4.10 anhand einiger einfacher Beispiele sowohl für eine gerade als auch für eine ungerade Anzahl Objekte. Das kennzeichnende Merkmal der Fraktionen ist hier im Unterschied zu den anderen Berechnungsbeispielen die Spielfarbe (Kreuz, Herz und Karo), nicht der Kartenwert.

Die Beispiele 1 und 2 in Tabelle 4.3 sind recht einfach nachvollziehbar, während die Beispiele 3 und 4 die Grenzfälle darstellen. Alle Objekte der jeweils größten Fraktion könnten in diesen beiden Fällen für die maximale Wechselzahl gerade noch separat angeordnet werden. In Beispiel 4 ist das aufgrund der ungeraden Objektanzahl auch möglich – obwohl die Kreuzfraktion mit 10 Karten bereits mehr als die Hälfte aller Objekte umfasst ($0,5 \cdot n$ sind nur 9,5). In diesen Fällen muss der erste Teil von Formel 4.10 verwendet werden. Erst wenn die größte Fraktion jeweils ein Objekt mehr umfasst – so wie in den Beispielen 5 und 6 – und damit einen Wert von $0,5 \cdot n + 1$ erreicht bzw. überschreitet³⁶, ist eine vollständige Vereinzelung der Objekte der größten Fraktion nicht mehr möglich und folglich der zweite Fall aus Formel 4.10 zu verwenden.

Erwähnt sei abschließend, dass sich statt der Wechselanzahl auch die Gruppenanzahl zur Bildung eines Vermischungsgrades heranziehen ließe, der dann als gruppenanzahlorientierter Vermischungsgrad bezeichnet werden könnte. Die Ausführungen in

³⁶ Es liegen also selbst im maximalen Vermischungsfall auf jeden Fall zwei Objekte der gleichen Fraktion nebeneinander. In Beispiel 4 überschreitet die Kreuzfraktion nun mit 11 Karten den Grenzwert von $9,5 + 1 = 10,5$.

Tabelle 4.3: Berechnungsbeispiele für den WVG

Gerade Objektanzahl ($n = 18$)	Ungerade Objektanzahl ($n = 19$)
<p>Beispiel 1</p>  <p>$\clubsuit = 6; \heartsuit = 6; \diamondsuit = 6; F = 3$</p> <p>$W = 14$</p> <p>$n_{fmax} = 6 (< 0,5 \cdot n + 1)$</p> <p>$\Rightarrow$ Formel (4.10) 1. Fall</p> $WVG = \frac{W - (F - 1)}{n - F}$ $WVG = \frac{14 - (3 - 1)}{18 - 3} = \frac{12}{15}$	<p>Beispiel 2</p>  <p>$\clubsuit = 9; \heartsuit = 5; \diamondsuit = 5; F = 3$</p> <p>$W = 14$</p> <p>$n_{fmax} = 9 (< 0,5 \cdot n + 1)$</p> <p>$\Rightarrow$ Formel (4.10) 1. Fall</p> $WVG = \frac{W - (F - 1)}{n - F}$ $WVG = \frac{14 - (3 - 1)}{19 - 3} = \frac{3}{4}$
<p>Beispiel 3</p>  <p>$\clubsuit = 9; \heartsuit = 4; \diamondsuit = 5; F = 3$</p> <p>$W = 15$</p> <p>$n_{fmax} = 9 (= 0,5 \cdot n < 0,5 \cdot n + 1)$</p> <p>$\Rightarrow$ Formel (4.10) 1. Fall</p> $WVG = \frac{W - (F - 1)}{n - F}$ $WVG = \frac{15 - (3 - 1)}{18 - 3} = \frac{13}{15}$	<p>Beispiel 4</p>  <p>$\clubsuit = 10; \heartsuit = 4; \diamondsuit = 5; F = 3$</p> <p>$W = 13$</p> <p>$n_{fmax} = 10 (< 0,5 \cdot n + 1)$</p> <p>$\Rightarrow$ Formel (4.10) 1. Fall</p> $WVG = \frac{W - (F - 1)}{n - F}$ $WVG = \frac{13 - (3 - 1)}{19 - 3} = \frac{11}{16}$
<p>Beispiel 5</p>  <p>$\clubsuit = 10; \heartsuit = 4; \diamondsuit = 4; F = 3$</p> <p>$W = 13$</p> <p>$n_{fmax} = 10 (= 0,5 \cdot n + 1)$</p> <p>$\Rightarrow$ Formel (4.10) 2. Fall</p> $WVG = \frac{W - (F - 1)}{(n - n_{fmax}) \cdot 2 - (F - 1)}$ $WVG = \frac{13 - (3 - 1)}{(18 - 10) \cdot 2 - (3 - 1)} = \frac{11}{14}$	<p>Beispiel 6</p>  <p>$\clubsuit = 11; \heartsuit = 4; \diamondsuit = 4; F = 3$</p> <p>$W = 11$</p> <p>$n_{fmax} = 11 (> 0,5 \cdot n + 1)$</p> <p>$\Rightarrow$ Formel (4.10) 2. Fall</p> $WVG = \frac{W - (F - 1)}{(n - n_{fmax}) \cdot 2 - (F - 1)}$ $WVG = \frac{11 - (3 - 1)}{(19 - 11) \cdot 2 - (3 - 1)} = \frac{9}{14}$

Kapitel 4.2.2 haben aber bereits ausreichend verdeutlicht, dass dies nur eine einfache Anpassung erfordern würde, welche die Tatsache berücksichtigt, dass die Gesamtgruppenanzahl stets gleich der Wechselanzahl plus 1 ist. Deshalb wird hierauf nach-

folgend verzichtet und stattdessen direkt eine Kennzahl vorgestellt, die neben der Gruppenanzahl auch die Gruppengröße berücksichtigt.

4.2.3.4 Konzentrationsorientierter Vermischungsgrad (KVG)

Der **Konzentrationsorientierte Vermischungsgrad** (KVG) soll messen, wie stark sich die einzelnen Objekte einer Fraktion in Gruppen konzentrieren und somit gleichzeitig Gruppenanzahl (GA^f) und Gruppengrößen berücksichtigen. Bei einer Konzentration aller Objekte der Fraktion in einer Gruppe liegt Unvermischtheit vor; die größte Vermischung besteht dann, wenn jedes Objekt eine einzelne Gruppe bildet.

Diese Form der Konzentration kann, ähnlich wie die anteilsorientierte Vermischung, mit Hilfsmitteln zur Erkennung von Konzentrationstendenzen, wie der Lorenzkurve, erfasst und mit Konzentrationsmaßen, wie dem normierten Gini-Koeffizienten, gemessen werden (vgl. Abschnitt 4.2.3.2). Zur korrekten Messung muss hier auch für den KVG der normierte Gini-Koeffizient von 1 abgezogen werden (inverse Betrachtung).

$$G^f = 1 - \frac{1}{GA^f} \cdot \sum_{j=1}^k (S_{j-1}^f + S_j^f) \cdot h_j^f \quad (4.11)$$

$$G_{norm}^f = \begin{cases} \frac{GA^f}{GA^f - 1} \cdot G^f & \text{für } GA^f > 1 \\ 1 & \text{für } GA^f = 1 \end{cases} \quad (4.12)$$

$$KVG^f = 1 - G_{norm}^f \quad (4.13)$$

Die Messung erfolgt für jede Fraktion einzeln (Index f). Die Ergebnisse müssen anschließend zu einem gesamten KVG zusammengefasst werden. Dies kann durch eine Gewichtung der Fraktionen mit ihrem Anteil am Gemisch erfolgen:

$$KVG = \sum_{f=1}^F \frac{n_f}{n} \cdot KVG^f. \quad (4.14)$$

Beispiel für die Berechnung des KVG

Abbildung 4.14 auf der nachfolgenden Seite zeigt ein Beispiel von 12 Karten (je 4 Buben, Damen und Könige), für die der KVG exemplarisch bestimmt werden soll.

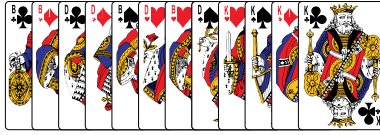


Abbildung 4.14: Beispiel 1 für die Berechnung des KVG

Tabelle 4.4: Häufigkeitstabellen für Beispiel 1 (vgl. Abbildung 4.14)

Buben				Damen				Könige			
a_j	h_j	$a_j \cdot h_j$	S_j	a_j	h_j	$a_j \cdot h_j$	S_j	a_j	h_j	$a_j \cdot h_j$	S_j
1	2	2	$\frac{1}{2}$	1	2	2	$\frac{1}{2}$	4	1	4	1
2	1	2	1	2	1	2	1				
	3	4			3	4			1	4	

$$G^{Buben} = 1 - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 2 + 1,5 \cdot 1 \right) = 1 - \frac{5}{6} = \frac{1}{6} \quad (4.15)$$

$$G_{norm}^{Buben} = \frac{3}{3-1} \cdot \frac{1}{6} = \frac{1}{4} \quad (4.16)$$

$$KVG^{Buben} = 1 - \frac{1}{4} = \frac{3}{4} \quad (4.17)$$

$$G^{Damen} = 1 - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 2 + 1,5 \cdot 1 \right) = 1 - \frac{5}{6} = \frac{1}{6} \quad (4.18)$$

$$G_{norm}^{Damen} = \frac{3}{3-1} \cdot \frac{1}{6} = \frac{1}{4} \quad (4.19)$$

$$KVG^{Damen} = 1 - \frac{1}{4} = \frac{3}{4} \quad (4.20)$$

$$G^{Könige} = 1 - \frac{1}{1} \cdot (1 \cdot 1) = 1 - 1 = 0 \quad (4.21)$$

$$G_{norm}^{Könige} = 1 \quad (4.22)$$

$$KVG^{Könige} = 1 - 1 = 0 \quad (4.23)$$

$$KVG^{Bsp.1} = \frac{1}{3} \cdot \frac{3}{4} + \frac{1}{3} \cdot \frac{3}{4} + \frac{1}{3} \cdot 0 = \frac{1}{2} \quad (4.24)$$

Drei weitere Beispielrechnungen für unterschiedliche Vermischungen finden sich in Anhang 11. Die Berechnung für den Fall der Unvermischtheit (vgl. Beispiel 4, Anhang 11) über die Standardformel ist problematisch. Weil es nur eine Ausprägung gibt und die Summe der Häufigkeiten gleich 1 ist, ergibt sich analog zu den Königen im obigen Beispiel bei der Normierung der Gini-Koeffizienten für alle Fraktionen das Problem, dass durch den Wert 0 dividiert werden müsste:

$$G_{norm} = \frac{n}{n-1} \cdot G \Rightarrow \frac{1}{1-1} \cdot 0 \Rightarrow \frac{1 \cdot 0}{0} \Rightarrow \frac{0}{0} \quad (4.25)$$

Dieses Problem lässt sich dahingehend lösen, dass im Fall von nur einer vorliegenden Gruppe ($GA^f = 1$) der normierte Gini-Koeffizient gleich 1 definiert wird. Hieraus resultiert dann $KVG = 0$.

Die Berechnungen (vgl. Anhang 11) des KVG für zwei ‚mittlere‘ Vermischungen und die Extremfälle vollständige Vermischung und Unvermischtheit eines Gemisches mit 12 Karten zeigen, dass die Anforderungen an den Wertebereich dieser Kennzahl erfüllt werden und die KVGe sich in eine sinnvolle und unter dem Vermischungsaspekt plausible Reihenfolge bringen lassen:

$$KVG^{Bsp.4}(0) < KVG^{Bsp.2}\left(\frac{1}{3}\right) < KVG^{Bsp.1}\left(\frac{1}{2}\right) < KVG^{Bsp.3}(1) \quad (4.26)$$

4.2.3.5 Abstands- bzw. Zwischenraumorientierter Vermischungsgrad (ZVG)

Der **Abstands- bzw. Zwischenraumorientierte Vermischungsgrad (ZVG)** soll die Vermischung hinsichtlich der Position der Objekte einer Fraktion im Gemisch messen. Dies geschieht über die Erfassung der Abstände aller Objekte einer Fraktion und anschließender Summation über alle Fraktionen. Der Abstand zwischen zwei Objekten der gleichen Fraktion wird als Zwischenraum (ZWR) bezeichnet und im Fall des Kartenspiels abgezählt.

Analog zu anderen Vermischungskennzahlen wird beim Zwischenraumorientierten Vermischungsgrad die Summe der tatsächlich vorliegenden Zwischenräume (ZWR^{fakt}) zu den maximal möglichen Zwischenräumen ins Verhältnis gesetzt. Nachfolgende Formel gibt den Zwischenraumorientierten Vermischungsgrad (ZVG) als Verhältnis von tatsächlicher und maximaler (ZWR^{max}) Zwischenraumsumme an:³⁷

$$ZVG = \frac{ZWR^{fakt}}{ZWR^{max}} = \frac{\sum_f \sum_i ZWR_{fi}^2}{ZWR^{max}} \quad (4.27)$$

Das Quadrat bei der Berechnung der faktischen Zwischenräume stellt sicher, dass, wie in der Konvention gefordert, eine ungleichmäßige Verteilung der Zwischenraumgrößen zu einer höheren Vermischung führt als eine Verteilung, bei der die Zwischenräume (annähernd) gleich groß sind.³⁸ Diese Kennzahl erfüllt die oben definierten Anforderungen, indem sie einen Wertebereich zwischen 0 und 1 aufspannt. Der ZVG ist 0,

³⁷ i bezeichnet hier den Laufindex für die Zwischenräume.

³⁸ Durch das Quadrieren der einzelnen Zwischenräume wird sicher gestellt, dass der größte Zwischenraum auch formal die größte Vermischung ergibt. Der Beweis hierfür kann über die Binomische Formel anhand des nachfolgenden Beispiels geführt werden. In einem Kartenspiel

wenn keine Fraktion einen Zwischenraum aufweist (Zähler ist gleich 0), die Objekte jeder Fraktion also unmittelbar nebeneinander liegen. Die Kennzahl nimmt den Wert 1 an, wenn der maximale Vermischungszustand vorliegt, Zähler und Nenner also gleich sind. Fraglich bleibt jedoch noch, wie die maximale Zwischenraumsumme bestimmt werden kann.

Gemäß den Aussagen in Kapitel 4.2.2 liegt die größte Vermischung einer einzelnen Fraktion vor, wenn die Objekte der Fraktion sehr weit auseinander liegen, also auf den beiden Randpositionen je ein Objekt dieser Fraktion positioniert ist. Die Problematik bei dieser Definition der Vermischungszustände liegt darin, dass bei einem Gemisch mit mehreren Fraktionen die vollständige Vermischung eigentlich nur für eine Fraktion vorliegen kann, da nur eine Fraktion an den äußeren Rändern des Gemisches platziert sein kann. Dies muss die Kennzahlenbestimmung berücksichtigen, da ansonsten der ideale Vermischungsgrad von 1 nie erreicht werden kann.

Entscheidend für die Messung ist der Fakt, dass zwar für jede einzelne Fraktion ein Wert bestimmt werden kann, dass aber die Werte der einzelnen Fraktionen nicht unabhängig voneinander sind. Belegt eine Fraktion (Buben) die Randpositionen, so ist der maximale Zwischenraum für sie die Anzahl aller nicht zu dieser Fraktion gehörenden Objekte ($ZWR_{Bube}^{max} = n - n_{Bube}$). Für die nachfolgend betrachtete Fraktion (Damen) ist dieser maximale Zwischenraum gleichzeitig nicht möglich. Daher muss hier von einer insgesamt geringeren Grundgesamtheit ausgegangen werden ($ZWR_{Dame}^{max} = n - n_{Bube} - n_{Dame}$). Die Einschränkung nimmt zu, je mehr Fraktionen bereits berücksichtigt wurden, bis nur noch eine Fraktion übrig ist, die keine Zwischenräume mehr aufweisen kann, weil keine weiteren Objekte vorhanden sind oder sie aus einer Karte bestehen.

Will man nun die größte Summe der Zwischenräume aller Fraktionen bestimmen, so ist hierfür die Anordnung der Fraktionen maßgeblich. Sie muss sich folgendermaßen ergeben: Um für ein gegebenes Gemisch die maximalen Zwischenräume über alle Fraktionen zu bestimmen, müssen zunächst die Mächtigkeiten der Fraktionen festgestellt werden. Fraktionen, die lediglich aus einem Objekt bestehen, können selber keinen Zwischenraum besitzen. Da sie aber einen Beitrag zu den Zwischenräumen

mit Zwischenräumen aus insgesamt 8 Karten wäre die größte Vermischung durch einen einzelnen Zwischenraum aus diesen 8 Karten gegeben. Die 8 Karten können sich aber z. B. auch auf zwei Zwischenräume mit 5 und 3 Karten aufteilen, was eine geringere Vermischung darstellt. Die erste Binomische Formel, $(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$, zeigt nun, dass das Quadrat der Summe der zwei Zwischenräume (5 + 3), die dem größten Zwischenraum mit 8 Karten entspricht, immer größer ist als die Summe der einzeln quadrierten (kleineren) Zwischenräume: $8^2 = (5 + 3)^2 = 5^2 + 2 \cdot 5 \cdot 3 + 3^2 > 5^2 + 3^2 \Rightarrow 8^2 = 64 > 5^2 + 3^2 = 25 + 9 = 34$. Dies gilt auch für eine Verteilung auf drei oder mehr Zwischenräume, z. B. 1, 2 und 5 Karten: $(1 + 2 + 5)^2 = 1^2 + 2 \cdot 1 \cdot 2 + 2 \cdot 1 \cdot 5 + 2^2 + 2 \cdot 2 \cdot 5 + 5^2 > 1^2 + 2^2 + 5^2 \Rightarrow 8^2 = 64 > 1^2 + 2^2 + 5^2 = 1 + 4 + 25 = 30$.

der weiteren Fraktionen leisten, sollten sie in der ‚Mitte des Gemisches‘ angeordnet werden.³⁹

Fraktionen mit einer Objektanzahl größer als 1 müssen nach ihrer Objektanzahl aufsteigend sortiert werden. Die Fraktion mit der kleinsten Mächtigkeit, größer als 1, wird außen angeordnet mit mindestens je einem Objekt auf den Randpositionen. Die nächstgrößere Fraktion wird innerhalb der äußersten Fraktion platziert, ebenfalls mit mindestens je einer Karte auf den für diese Fraktion noch möglichen ‚Randpositionen‘. Wie sich die Objekte auf diese beiden Positionen aufteilen, ist beliebig. In dieser Folge wird für alle Fraktionen vorgegangen, bis zum Schluss die größte Fraktion die innerste Position belegt. Diese Fraktion muss innen liegen, weil sie für die vorletzte Fraktion den größten noch möglichen Zwischenraum ergibt.

Für die resultierende Anordnung der Objekte müssen jetzt über alle Fraktionen die entsprechenden Zwischenraumgrößen mathematisch bestimmt werden. Dazu wird für jede Fraktion die Spannweite inklusive des ersten und letzten Objekts der Fraktion als diskreter Wert ermittelt:

$$\text{Spannweite} = (\text{letzte Position} - \text{erste Position}) + 1 \quad (4.28)$$

Von der Spannweite wird die Objektanzahl der Fraktion subtrahiert ($\text{Spannweite}_f - n_f$) und der resultierende Wert ist dann der Gesamtzwischenraum. Dieser wird analog zur Bestimmung der tatsächlichen Zwischenräume im Zähler ebenfalls quadriert. Dann werden die quadrierten Gesamtzwischenräume über alle Fraktionen summiert.

Diese Ermittlung des größtmöglichen Zwischenraums (ZWR^{max}) eines Gemisches lässt sich nicht durch eine einzige Formel beschreiben. Daher wird auf eine algorithmische Darstellung der Vorgehensweise als Pseudocode zurückgegriffen:

³⁹ Für eine gerade Anzahl Objekte liegt die Mitte des Gemischs genau zwischen zwei Objekten. In diesem Fall sollte das einzelne Objekt auf einer der Positionen neben der theoretischen Mitte angeordnet werden. Für eine Verdeutlichung der Vorgehensweise vgl. das Beispiel in Abbildung 4.15 auf Seite 76.

Algorithmus 1: Bestimmung des maximalen Zwischenraums eines Gemisches

Initialisierung der Zwischenraumsumme = 0;

Für alle Fraktionen f

Falls $n_f = 1$

Ordne f mittig an und entferne f aus der Menge der Fraktionen;

Ende falls;

Ende für;

Für alle Fraktionen f

Ermittle die größte der verbleibenden Fraktionen;

Ordne das erste Objekt dieser Fraktion links neben den ggf. schon

platzierten Objekten an und alle übrigen Objekte ordne rechts bzw. ordne

die Fraktion mittig an (falls keine Fraktion aus nur einer Karte besteht);

Ende für;

Setze die Menge der Fraktionen wieder auf ihren Eingangswert;

Für alle Fraktionen f

Spannweite der Fraktion = (letzte Position – erste Position) + 1

Gesamtwzwischenraum der Fraktion = Spannweite $_f$ – n_f

Gesamtwzwischenraumquadrat = Quadriere Zwischenraum der Fraktion

Zwischenraumsumme = Zwischenraumsumme + Gesamtwzwischenraumquadrat

Ende für;

Ausgabe $ZWR^{max} =$ Zwischenraumsumme.

Der Algorithmus folgt der oben angeführten Reihenfolge zur Bestimmung der maximalen abstandsorientierten Vermischung.

Beispiel für die Berechnung des ZVG

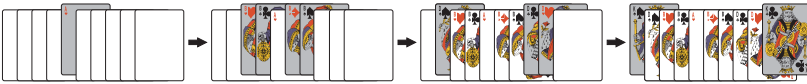


Abbildung 4.15: Anordnungsfolge für die maximale Vermischung eines Beispiels mit 10 Karten und vier Fraktionen unterschiedlicher Größe

Im Folgenden werden für ein Beispielmischung mit zehn Karten und vier Fraktionen die maximalen Abstände und damit die maximalen Gesamtwzwischenräume ermittelt. Davon hat die größte Fraktion (Buben) vier Karten, drei Karten sind Damen, zwei Könige und eine Karte ist ein Ass. Da hier eine Fraktion nur eine Karte umfasst, wird

diese zur Ermittlung der maximalen Zwischenräume dieses Gemisches in der Mitte angeordnet (vgl. Abbildung 4.15 links). Als nächste Fraktion werden die Buben als größte Fraktion um diese Karte herum angeordnet. Die Aufteilung der Karten, drei links, eine rechts oder umgekehrt bzw. zwei auf der einen und zwei auf der anderen Seite, ist beliebig. Der Zwischenraum der Buben ist immer das eine Ass. Außerhalb der Buben werden dann die Damen platziert und zum Schluss die Könige ganz außen auf den Randpositionen.

Hier ist die maximale Vermischung ZWR^{max} :

$$\underbrace{8^2}_{\text{Könige}} + \underbrace{5^2}_{\text{Damen}} + \underbrace{1^2}_{\text{Buben}} + \underbrace{0}_{\text{Ass}} = 90. \quad (4.29)$$



Abbildung 4.16: Vollständiges Beispiel zum ZVG

Wird nun ein Kartenspiel mit den obigen zehn Karten, wie in der Abbildung 4.16 gezeigt, vermischt, dann ergibt sich ein ZVG gemäß Formel (4.27) und der Berechnung von ZWR^{max} in (4.29) von:

$$ZVG = \frac{\overbrace{2^2 + 1^2 + 2^2}^{\text{Buben}} + \overbrace{3^2}^{\text{Damen}} + \overbrace{2^2}^{\text{Könige}}}{\underbrace{90}_{ZVG^{max}}} = \frac{22}{90} \approx 0,2444. \quad (4.30)$$

4.2.3.6 Integrierter Vermischungsgrad (IVG)

Die fünf entwickelten Kennzahlen können allesamt verwendet werden, um sich einen Eindruck über die verschiedenen Facetten der Vermischung eines Gemisches zu verschaffen. Fraglich ist, ob und wenn ja wie sich alle oder eine Auswahl der Kennzahlen sinnvoll zu einer Gesamtkennzahl vereinigen lassen, die den Gesamtzustand des Gemisches beschreibt. Als eine zweckmäßige Option könnte sich hierzu eine multiplikative Verknüpfung der einzelnen Kennzahlen erweisen. Dabei sollte allerdings der Wechselorientierte Vermischungsgrad (WVG) nicht zusammen mit dem Konzentrationsorientierten Vermischungsgrad (KVG) verwendet werden, da, wie gezeigt wurde, beide ähnliche Sachverhalte betreffen. Da der KVG umfassender als der WVG ist,

wird letzter nachfolgend bei den Überlegungen zu einer Gesamtkennzahl nicht weiter betrachtet.

Ein **Integrierter Vermischungsgrad** (IVG) ließe sich dann z. B. wie folgt definieren:

$$IVG = FVG^\alpha \cdot AVG^\beta \cdot KVG^\gamma \cdot ZVG^\delta \text{ mit } \alpha + \beta + \gamma + \delta = 1 \text{ und } \alpha, \beta, \gamma, \delta > 0. \quad (4.31)$$

Die Exponenten α , β , γ und δ dienen zur Gewichtung der einzelnen Teilkennzahlen. Diese Gewichtung kann abhängig von der konkreten Problemstellung, z. B. nach den prozessualen Besonderheiten eines Sortierverfahrens, gewählt werden. Die Höhe des jeweiligen Exponenten gibt das Ausmaß an, mit der die jeweilige Kennzahl einfließt. Nehmen alle Exponenten den Wert $\frac{1}{4}$ an, so sind alle vier Kennzahlen zur Bestimmung der gesamten (Un-)Vermischtheit gleich wichtig.⁴⁰

Der IVG ist wie die einzelnen Kennzahlen (theoretisch) ebenfalls auf den Wertebereich zwischen 0 und 1 normiert. Er nimmt den Wert 0 an, wenn mindestens eine Teilkennzahl den Wert 0 annimmt. Der Maximalwert $IVG = 1$ ergibt sich hingegen, wenn alle einzelnen Vermischungsgrade den Wert 1 annehmen. Unter den in dieser Arbeit getroffenen Konventionen lässt sich jedoch keine Anordnung finden, bei der dies gilt, denn zumindest die Maximalwerte für KVG und ZVG treten nicht bei der gleichen Anordnung auf. Während beim KVG ein Wert von 1 nur erzielt werden kann, wenn alle Karten separat liegen, lässt sich der ZVG immer dadurch erhöhen, dass zwei Objekte einer Fraktion zusammenrücken, bis sie eine Gruppe bilden, die dann weiter von den anderen Objekten bzw. Gruppen der Fraktion entfernt liegt (vgl. nochmals die Aussagen zur Begründung der Konvention bzgl. der Entfernungsbeurteilung in Kapitel 4.2.2).

Aufgrund der Konvention kann der Integrierte Vermischungsgrad nie den Wert 1 annehmen, weil die Beurteilung der beiden Anordnungsmerkmale (Konzentration und Entfernung) mit gegenläufigen bzw. zumindest nicht vollständig gleichläufigen Wirkungsrichtungen verbunden ist. Dies bedeutet nicht, dass der Vergleich konkreter Anordnungen nicht dennoch auf Basis des Integrierten Vermischungsgrades möglich ist. Solange die Exponenten die Wichtigkeit der Merkmale richtig widerspiegeln, ist das Gemisch mit höherem IVG auch – relativ gesehen – stärker vermischt. Lediglich die absolute Einordnung eines IVG-Wertes ist nicht möglich, da kein Referenzwert von 100 % gegeben ist.

⁴⁰ Für eine andere Kombination der Kennzahlen müsste die Definition des IVG entsprechend angepasst werden.

Dies wäre anders, wenn die Konvention bzgl. der Entfernungen dahingehend verändert würde, dass gleichmäßige Entfernungen eine stärkere Vermischung bedingen sollen und demgemäß die Bestimmung des ZVG eine unterproportionale Gewichtung der Entfernungen vornehmen würde.⁴¹ Dann würde die in Abbildung 4.11 dargestellte Anordnung einen 100 %-igen IVG aufweisen, da alle Einzelkennzahlen den Wert 100 % annehmen. Letztlich sollte dem Wunsch nach einer auf dem vollen Prozentintervall [0 %, 100 %] normierten Gesamtkennzahl aber nicht der Aussagegehalt der Einzelkennzahlen geopfert werden, zumal eine aussagekräftige Beurteilung der Vermischung ohnehin nur durch die separate Betrachtung aller Einzelkennzahlen möglich ist.

4.3 Diskussion mehrdimensionaler Vermischung

4.3.1 Intuitive Vorüberlegungen zu zwei- und dreidimensionaler Vermischung

Zur Veranschaulichung zweidimensionaler (diskreter) Vermischung soll in diesem Abschnitt das Beispiel des Kartenspiels durch einen Getränkekasten in der Draufsicht ersetzt werden.⁴² In diesem Gemisch sind die Flaschen nun nicht mehr in einer einzelnen, eindimensionalen Linie angeordnet, sondern auf einer zweidimensionalen Fläche verteilt. Besonders anschaulich ist der Getränkekasten zudem, weil er aufgrund seiner Aufteilung in fixierte, zeilen- und spaltenförmig angeordnete Gefache einen geordneten Überblick auf die einzelnen Objekte des Gemischs bietet. Das Kastenformat ist zumeist rechteckig für zwölf bzw. 20 Flaschen in drei Reihen und vier Spalten bzw. vier Reihen und fünf Spalten.⁴³ Der Transport auf einer Kastenbahn erfolgt mit der schmalen Kastenseite zuvorderst. Infolgedessen verläuft die Betrachtungsrichtung entgegen der Laufrichtung des Transportbands (in den nachfolgenden Beispielen wird daher von rechts nach links geschaut).⁴⁴

⁴¹ Dies ließe sich erreichen, indem statt des Quadrats die Wurzel der Entfernungen in die Formel und den Algorithmus zur Bestimmung des ZVG integriert würde.

⁴² Dieser Betrachtungswinkel wird auch in der praktischen Leergutsortierung bei Identifikationsverfahren genutzt, vgl. zu Anwendungsbeispielen z. B. Spiegelmacher (2010), S. 64, sowie Brosch (2008), S. 108.

⁴³ Es gibt auch Sonderformate der Kästen, z. B. für sechs Saftflaschen oder 24 Bierflaschen.

⁴⁴ Vgl. zum Kastentransport und der Kastenausrichtung in der praktischen Leergutsortierung die Abbildung in Brosch (2009), S. 956. Annahmegemäß hat die Rotation eines befüllten Kastens keine Auswirkung auf die Vermischung in den Gefachen. Zur Erzeugung einer anderen Vermischung ist die Umordnung der Flaschen erforderlich.

Relevante Fraktionen im Getränkekasten sind die Flaschensorten. Im vereinfachten Fall, wenn ein Getränkehersteller die Flaschen und Kästen sortiert, existieren nur zwei relevante Fraktionen: die eigenen Gutflaschen und Fremdfflaschen.⁴⁵ Der Kasten selbst bietet den Rahmen und ist ein Datum, das nicht der Vermischung unterliegt.⁴⁶ Ein einzelnes Gefach des Kastens kann eine Flasche enthalten, oder es kann unbefüllt sein. Somit existiert neben den stofflichen Fraktionen noch eine weitere nicht-stoffliche Fraktion ‚leeres Gefach‘. Im Folgenden sollen alle Fraktionen als gleichwertig behandelt werden, da sie alle die Vermischung beeinflussen.

Auch in der LVP-Abfallsortierung ist das Sortiergut auf dem Klaubeband als zweidimensionale Vermischung relevant. Sie lässt sich unter Anwendung einiger vereinfachender Annahmen auf die optische Form des Kastenbeispiels bringen. Genaugenommen ist das Sortierband eine Fläche mit definierter Breite und unendlicher Länge, da immer wieder neues Sortiergut aufgegeben wird. Wie bei der Reihe des Kartenspiels kann die Fläche aber eingegrenzt werden. Eine zweckmäßige Flächenbegrenzung ist z. B. der definierte Bandabschnitt, den ein Sortierer bearbeitet. Daraus ergibt sich aus Sortierersicht eine rechteckige Fläche von etwa 0,6 m Tiefe multipliziert mit 1,5 m Breite.⁴⁷ Auf dieser Fläche liegt das Sortiergut ungeordnet in einer Schicht. Die Objekte haben unterschiedliche Entfernungen voneinander; einige berühren sich möglicherweise. Sie liegen nicht notwendigerweise in Zeilen und Spalten geordnet. Ihre ‚chaotische‘ Anordnung lässt sich jedoch in eine vereinfachte Pseudoordnung überführen, indem auf die Fläche ein virtuelles Gitternetz mit Zeilen und Spalten projiziert wird (vgl. Abbildung 4.17).

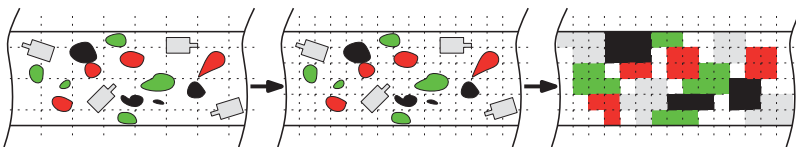


Abbildung 4.17: Beispiel zur Vereinfachung eines zweidimensionalen LVP-Gemischs

Bei einem sehr groben Gitter besteht die Möglichkeit, dass mehrere Objekte einem virtuellen Gefach zugewiesen werden und somit als ein Objekt erscheinen (vgl. Abbildung 4.17 links). Zu einer eindeutigen Feststellung der Vermischung einzelner Objekte

⁴⁵ Die Vermischung der verschiedenen Sorten Fremdfflaschen ist für den Getränkehersteller nicht weiter von Bedeutung. Sie werden gesondert (evtl. extern) auf einer reinen Flaschensortieranlage in einer eindimensionalen Linie in die richtigen Kästen sortiert.

⁴⁶ Dies ist erst bei der Betrachtung einer (eindimensionalen) Kastenreihe der Fall.

⁴⁷ Vgl. Abschnitt 3.3.3.

aus verschiedenen Fraktionen sollte das Gitternetz daher solange in weitere, dem ursprünglichen Gitter selbstähnliche Gitterstrukturen verfeinert werden, bis jedes ‚Gefach‘, wie im Getränkekasten auch, nur noch durch ein Objekt einer Fraktion belegt wird (vgl. Abbildung 4.17 Mitte).⁴⁸ Ein Nebeneffekt dieser Vorgehensweise ist einerseits die Erzeugung zusätzlicher leerer ‚Gefache‘ dort, wo keine Objekte liegen. Diese treten im Getränkekasten aber auch auf und stellen definitionsgemäß sogar eine eigene Fraktion dar. Andererseits wird bei der Vermeidung einer Doppelbelegung eines Gefachs durch zwei Objekte unterschiedlicher Fraktion das Gitter immer feiner und würde schließlich, wenn die Trennung der Objekte in zwei getrennte Gefache erreicht ist, die Größenproportionen nicht mehr korrekt abbilden (ein Objekt, ein Gefach)⁴⁹. Dennoch sollte die Gitterverfeinerung fortgeführt werden, bis kein Gefach mehr von zwei Objekten unterschiedlicher Fraktionen belegt ist.⁵⁰ Zur Erhaltung der Größenverhältnisse ist es möglich, dass ein einzelnes Objekt mehrere virtuelle Gefache belegen kann (vgl. Abbildung 4.17 rechts).⁵¹ Somit ließe sich das LVP-Vermischungsproblem auf den Getränkekasten zurückführen.

Intuitive Einschätzungen zweidimensionaler Vermischung

Rein intuitiv erscheint ein Getränkekasten zunächst unvermischt, wenn er nur eine einzige Flaschensorte (z. B. weiße Gutflaschen) enthält (vgl. Abbildung 4.18, S. 82, Kasten 1). Er ist sortenrein. Genauso wirkt ein Kasten eher unvermischt, wenn bei zwei enthaltenen Fraktionen die eine Flaschensorte die Gefache in der linken Hälfte des Kastens belegt und die andere Flaschensorte die rechtsseitigen Gefache (vgl. Abbildung 4.18, Kasten 2). Dieser Kasten ist nicht mehr sortenrein und bezogen auf die Anzahl Fraktionen vermischter als Kasten 1. Wie bei der eindimensionalen Vermischung bereits festgestellt wurde, ist also auch hier die **Fraktionsanzahl** ein (Häufigkeits-)Merkmal für Vermischung. Je mehr Fraktionen enthalten sind, umso vermischter ist ein Kasten.

⁴⁸ Selbstähnliche, sog. fraktale, Gebilde werden auch zur Beschreibung von Partikelkollektiven in der Verfahrenstechnik genutzt, vgl. Ripperger (2009), S. 23f.

⁴⁹ Dieses Problem ist in Abbildung 4.17 sehr gut für das am weitesten links gelegene grüne Objekt erkennbar. Es belegt vier Felder des Gitters – da es auf einer Kreuzung des Gitternetzes liegt –, obwohl seine tatsächliche Fläche kleiner als ein Gitterfeld ist. Diese Ungenauigkeit muss hingenommen werden, es sei denn, es wird ein noch kleineres – möglicherweise nicht mehr sinnvolles – Gitter erzeugt.

⁵⁰ Dabei wird der Idealfall angenommen, dass die Objekte nur noch nebeneinander und nicht übereinander liegen.

⁵¹ Bei der Messung der Vermischung würden diese Gefache als eine Gruppe wahrgenommen und die Vermischung kann im Weiteren korrekt ermittelt werden.

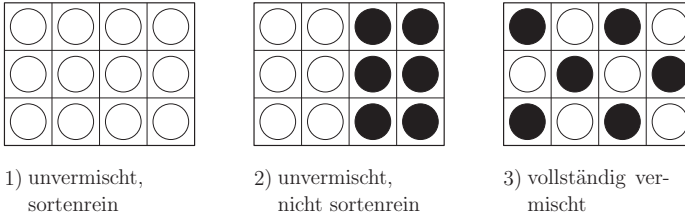


Abbildung 4.18: Extreme Vermischungszustände des Getränkekastens (nach intuitiver Einschätzung)

Kasten 3 in Abbildung 4.18 ist gegenüber den beiden anderen Kästen offensichtlich stärker vermischt. Rein intuitiv lässt sich aus dieser Anordnung der Objekte keine stärkere Vermischung erzeugen, da bereits kein Objekt einer Fraktion neben einem weiteren Objekt gleicher Fraktion positioniert ist. Unter nebeneinander liegend werden hier und im Folgenden zwei Gefache angesehen, die sich eine Gefachseite als Abgrenzung teilen. Zwei Gefache, die mit gleichartigen Flaschen belegt sind und sich diagonal gegenüber liegen, d. h. nur an einer Ecke berühren, sind somit keine direkten Nachbarn. Die Vermischung von Kasten 3 ist demnach maximal und das Gegenteil zu Kasten 2.⁵²

Zweites Häufigkeitsmerkmal von Vermischung sind die **Fraktionsanteile**.⁵³ Die Anteile der schwarzen und weißen Fraktionen betragen sowohl in Kasten 2 als auch in Kasten 3 jeweils 50 %. Sie sind unabhängig von der Dimension des Vermischungsproblems und der Anordnung der Fraktionen, sodass für sie die gleichen Schlussfolgerungen gelten wie im eindimensionalen Fall.⁵⁴ Eine Vermischungsaussage ist demzufolge nur möglich, wenn alle Fraktionen simultan betrachtet werden. Die Gleichmäßigkeit der Anteile ist dabei das entscheidende Kriterium: Je gleichmäßiger die Fraktionsanteile sind, umso größer ist die Vermischung. Weisen hingegen nur eine oder einige wenige Fraktionen einen großen Fraktionsanteil auf, so ist die Vermischung geringer. Ein Getränkekasten mit vier braunen, vier grünen und vier weißen Flaschen ist vermischter als ein Kasten mit sechs braunen und sechs grünen Flaschen.

⁵² Der hier gezeigte Vermischungsfall wird in der Verfahrenstechnik auch als homogen vermischt bezeichnet, vgl. Polke/Sachweh (2004), S. 34. Wird ein kleinerer Ausschnitt des Kastens, z. B. zwei mal zwei Gefache, betrachtet, so ist jeweils eine immer abwechselnde Anordnung eines Objektes der schwarzen und weißen Fraktion zu sehen, insgesamt immer zwei schwarze und zwei weiße Objekte, unabhängig davon, welcher Ausschnitt gewählt wird.

⁵³ Vgl. zur Übersicht der Vermischungsmerkmale nochmals Tabelle 4.1, S. 59.

⁵⁴ Vgl. Abschnitt zu den Häufigkeitsmerkmalen auf Seite 60.

Zusätzlich zu den Häufigkeitsmerkmalen sind auch bei zweidimensionaler Vermischung die **Anordnungsmerkmale** als Charakteristik für das Ausmaß der Vermischung relevant. Die Diskussion einiger intuitiver Einschätzungen zur Anordnung soll zeigen, ob hier eine Übertragbarkeit der Merkmale **Wechselanzahl**, **Gruppenanzahl**, **Gruppengröße** und **Gruppenabstände** ebenfalls möglich ist oder ob die neue Dimension eine angepasste, spezielle Sichtweise erfordert. Dazu soll zunächst die zweidimensionale Unvermischtheit analysiert werden.

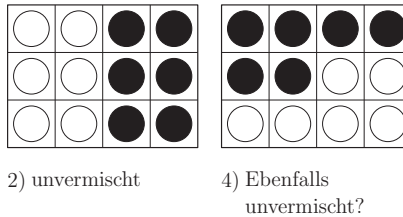


Abbildung 4.19: Vergleich zweier unvermischter Kästen bei gleichen Fraktionsanteilen

Unvermischtheit lag im eindimensionalen Fall immer genau dann vor, wenn alle Objekte einer Fraktion direkt nebeneinander liegen. Nun gibt es im zweidimensionalen Fall aber nicht nur eine Möglichkeit, wie Fraktionsobjekte nebeneinander angeordnet sein können, um dieser Unvermischtheitsbeschreibung zu genügen. Dies zeigen die Kästen 2 und 4 in Abbildung 4.19.⁵⁵ Jedoch erscheint bei der Betrachtung der Kästen intuitiv Kasten 2 entmischter als Kasten 4 aufgrund der kompakteren Anordnung der Fraktionen. Während diese Einschätzung der Vermischung für die Kästen 2 und 4 noch vergleichsweise einfach zu treffen ist und plausibel erscheint, gestaltet sie sich bei einem Vergleich der nachfolgend abgebildeten Kästen 5 bis 8 ungleich schwieriger:

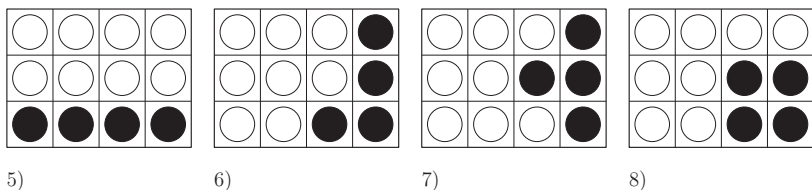


Abbildung 4.20: Weitere unvermischte Kästen

⁵⁵ Den hier dargestellten Kästen wird für eine bessere Vergleichbarkeit einzelner Vermischungszustände eine feste Bezeichnung zugeteilt, sodass mit der gleichen Nummer immer der gleiche Kasten bezeichnet wird. Daher wird Kasten 2 aus Abbildung 4.18 auch in Abbildung 4.19 Kasten 2 genannt.

Die drei geringen Vermischungen in den Kästen 5 bis 7, nur bezogen auf die Anordnung der weißen Fraktion, sind verschieden. Sie scheinen aber gleichermaßen kompakt, ohne dass unmittelbar eine klare Aussage getroffen werden kann, welche Anordnung besser ist. Möglicherweise sind sie auch alle gleichwertig. Nur Kasten 8 ist intuitiv vermischer bezogen auf die weiße Fraktion. Hinsichtlich der schwarzen Fraktion ist intuitiv eindeutig Kasten 8 der am meisten entmischte Kasten. Die Analyse der Anordnungsmerkmale kann möglicherweise weiter helfen. Sie können – in Anlehnung an die eindimensionale Vermischung – einzeln und für jede Fraktion untersucht werden, müssen für eine Gesamteinschätzung der Vermischung aber später gemeinsam betrachtet werden.

Die **Wechselanzahl** zählt, wie oft sich unterschiedliche Fraktionen in der Reihe abwechseln. Im zweidimensionalen Fall existiert keine Reihe mehr, sodass zunächst eine neue Konvention zur Zählung der Wechsel getroffen werden muss. Durch die Struktur des Kastens bietet sich eine einfache Erweiterung an: Jede Zeile wird als eigene Reihe aufgefasst und für sie die Wechsel gezählt. Durch Addieren wird die Gesamtzahl Wechsel ermittelt. Dies alleine erfasst jedoch noch nicht alle Fraktionswechsel; ein Objekt im Kasten hat nicht mehr nur einen rechten und linken Nachbarn. Je nach seiner Position im Kasten kann es auch noch einen oberen und unteren Nachbarn, insgesamt also vier Nachbarn, haben. Das heißt zusätzlich zu den zeilenweisen Fraktionswechsel müssen auch noch die spaltenweisen Fraktionswechsel abgezählt werden. Im Beispiel kommen Kasten 5 und 6 auf je vier Fraktionswechsel und Kasten 7 auf fünf Wechsel. Abgeleitet aus der Aussage, dass eine steigende Wechselanzahl eine größere Vermischung bedeutet, ist demnach Kasten 7 stärker vermischt als Kasten 5 und 6 (und 8), weil er mehr Fraktionswechsel enthält. Dies erscheint bei nochmaliger Betrachtung der Kästen plausibel.

Gruppengröße und **Gruppenanzahl** wurden in der Konzentration der Objekte einer Fraktion zusammengefasst. Zur Betrachtung des Merkmals Gruppengröße muss vorab neu definiert werden, was eine Gruppe im zweidimensionalen Fall ausmacht. Im eindimensionalen Fall bilden alle Objekte der gleichen Fraktion, die unmittelbar nebeneinander liegen, eine Gruppe. In der um eins höheren Dimension besteht eine Gruppe aus einem Bündel Objekte, die sich in horizontaler und/oder vertikaler Ausdehnung jeweils an mindestens einer Gefachseite berühren. Die Fraktionen in den Kästen 5 bis 8 bestehen demnach jeweils nur aus einer Gruppe, die die maximal mögliche Größe haben, weil sie alle Objekte umfassen. Zwischen den Kästen bestehen **aus dieser Perspektive** keinerlei Unterschiede in der Unvermischtheit. Das Gegenbeispiel ist Kasten 3 in Abbildung 4.18. Seine Fraktionen bestehen aus jeweils sechs Gruppen mit je einem Objekt. Er ist vollständig vermischt.

Ein alternatives Merkmal für die Erfassung der ‚Kompaktheit‘ von Gruppen im zweidimensionalen Vermischungsfall können die Anzahl **Kontaktstellen** der Objekte zu ihren Nachbarn gleicher Fraktion sein. Sie sind das Pendant zu den Fraktionswechseln, aber zugleich auch ein Maß der Konzentration in Gruppen und der Entmischung. Durch die quadratische Gefachstruktur sind die Kontaktstellen eindeutig abgegrenzt. Jedes Gefach hat vier Kontaktstellen, wobei nur die innenliegenden Kontaktstellen im Kasten relevant sind. Die randseitigen Begrenzungen der Gefache werden nicht betrachtet. Je mehr Kontaktstellen eine Fraktion aufweist, umso weniger wechseln sich die Fraktionen ab und umso mehr konzentrieren sich die Objekte in Gruppen bzw. einer großen Gruppe. Die Kenntnis und Einbeziehung der Gruppenanzahl kann die Wahrnehmung der Vermischung noch zusätzlich unterstützen.

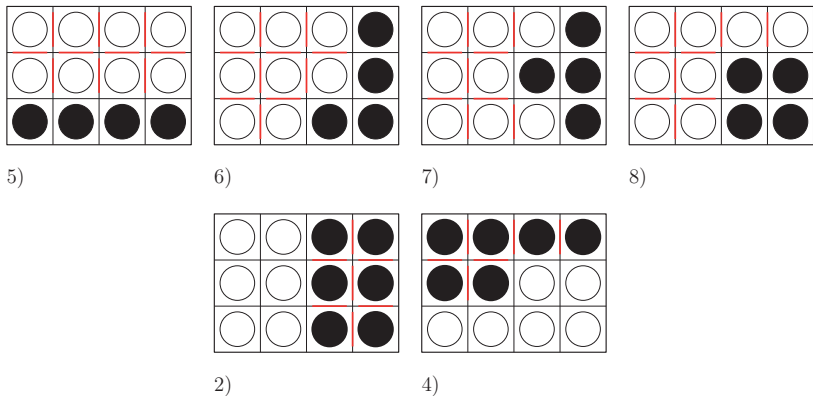


Abbildung 4.21: Abzählung der Kontaktstellen (rot markiert) einer Fraktion für mehrere Beispielkästen

Für die Beispielkästen 5 und 6 ergibt sich nach Abzählen der Kontaktstellen der weißen Fraktion jeweils eine Anzahl von zehn Kontakten (vgl. rote Markierungen in Abbildung 4.21). Die beiden Entmischungen der weißen Fraktion in den Kästen 5 und 6 sind demnach gleichwertig. Kasten 7 weist nur neun Kontaktstellen auf, worauf auch die zuvor festgestellte höhere Wechselanzahl im Vergleich zu den beiden anderen Kästen hindeutete. Ähnliches gilt für Kasten 8, der auch nur neun Kontaktstellen der weißen Fraktion besitzt (aber bei nur vier Fraktionswechseln). Die schwarze Fraktion besitzt in den ersten drei Kästen nur drei Kontaktstellen und in Kasten 8 die bei vier Objekten maximal möglichen vier Kontaktstellen. In den Beispielkästen 2 und 4 unterscheiden sich die Entmischungen der schwarzen Fraktion unter Abzählen der Kontaktstellen auch voneinander. Kasten 2 hat sieben Kontaktstellen der schwarzen

Fraktion, Kasten 4 nur sechs (vgl. ebenfalls rote Markierungen in Abbildung 4.21 unten).

Es sei nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass im Fall der Entmischung die Kompaktheit als sinnvollste Anordnung unterstellt wird. Kompaktheit von Gruppen kann bei der Sortierung ein wünschenswerter Vorteil sein, wenn davon ausgegangen wird, dass die Objekte in einer kompakten Gruppe schneller, gezielter und ‚sauberer‘ ausgetragen werden können. Die Ausprägung zweidimensionaler Vermischung bzw. Entmischung kann abhängig vom angewendeten Sortierverfahren jedoch als völlig unterschiedlich empfunden werden. Wenn die Sortierung horizontal oder vertikal in ‚Streifen‘ erfolgen soll, z. B. durch Verstellen eines Schiebemechanismus auf verschiedene Flaschenbahnen oder nur bestimmte Fahrwege der Greifer möglich sind, dann ist eine spalten- bzw. zeilenweise Entmischung zweckmäßiger.

Schwieriger als im eindimensionalen Fall gestaltet sich die Erfassung der **Zwischenräume** oder **Abstände** von Gruppen der gleichen Fraktion einer flächigen Vermischung. Im eindimensionalen Fall wurden die Karten entlang der Blickrichtung von der letzten Karte einer Gruppe bis zur ersten Karte der nächsten Gruppe gezählt. Im zweidimensionalen Fall des Getränkekastens lassen sich für eine vollständig vereinzelt Fraktion die Abstände ganz ähnlich bestimmen. Durch die zweite Dimension bietet sich hier die City-Block-Distanzmessung an.⁵⁶ Es werden dabei die Abstände zweier Objekte sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung ermittelt und summiert. Gezählt werden die zwischen den Objekten liegenden Flaschen. Allerdings existieren hier jetzt nicht mehr nur Zwischenräume zwischen zwei Objekten, dem letzten der einen Gruppe und ersten der nachfolgenden Gruppe. Es sind Zwischenräume direkt zwischen allen Objekten möglich wie die Kästen 9 und 10 in Abbildung 4.22, S. 87, verdeutlichen. Kasten 9 zeigt dabei die intuitiv auf den Abstand bezogene größte Vermischung der schwarzen Fraktion an. In Kasten 10 ist die Vermischung intuitiv geringer, da der Abstand der Objektpaare mit nur einer Flasche Abstand nur eine Gefahreihe beträgt und nicht wie in Kasten 9 zwei Spalten.

Bei einzelnen Fraktionsobjekten ist es vergleichsweise einfach, einen Bezugspunkt für die Abstandsmessung zu finden; es ist nur ein Objekt. Für eine Gruppe ist dieser Punkt nicht unmittelbar offensichtlich, von welchem ihrer Objekt ausgehend gemessen wird. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, diesen Punkt festzulegen (vgl. die rot

⁵⁶ Vgl. Bankhofer/Vogel (2008), S. 166.

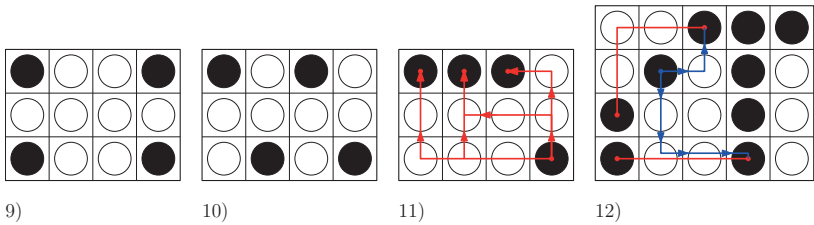


Abbildung 4.22: Beispiele zu den Gruppenabständen

markierten Pfade⁵⁷ in Kasten 11 in Abbildung 4.22).⁵⁸ Jedes einzelne Gruppenobjekt könnte gewählt werden.

Gibt es darüber hinaus in umfangreicheren Gemischen mehr als zwei Gruppen, deren Abstand aufgrund der Gruppenform⁵⁹ dazu noch uneinheitlich ist, so müsste eine Gruppe mehrere Bezugsobjekte besitzen. In Kasten 12 in Abbildung 4.22 haben die Objekte der größten Gruppe der schwarzen Fraktion unterschiedliche Abstände zur schwarzen Zweiergruppe unten links. Der obere, rot markierte Abstand beträgt drei Gefache, der untere beträgt nur zwei Gefache. Allerdings ist der Abstand des oberen Bezugspunktes zur schwarzen Einzelgruppe nur 1, während er vom unteren Bezugspunkt 3 Gefache umfasst (blaue Markierung in Abbildung 4.22).

Bei diesem Beispiel zeigt sich auch, dass sinnvolle Abstände nur zwischen Objekten erfasst werden sollten, zwischen denen eine direkte Verbindung möglich ist (bei einer Wegführung über City-Block, vgl. rote Pfade). Es macht bei der größten schwarzen Gruppe in Kasten 12 nur Sinn, die Abstände der Objekte zu untersuchen, die auch der betreffenden anderen Gruppe direkt zugewandt sind. Für alle übrigen Objekte, konkret die beiden Objekte in der obersten Reihe ganz rechts, besteht keiner direkte

⁵⁷ Die Pfeile sollen lediglich die ausgewählten exemplarischen Pfadverläufe besser veranschaulichen. Sie geben keine Auskunft darüber, in welcher Reihenfolge die Pfadlegung zu erfolgen hat. Sie ist genauso in entgegengesetzter Richtung möglich und ergibt die gleiche Pfadlänge.

⁵⁸ Für das mittlere Objekt der schwarzen Gruppe in Kasten 11 sind aus Gründen der Vollständigkeit zwei alternative ‚Wege‘ eingezeichnet, zur anderen Gruppe zu gelangen. Beide Wege sind sinnvoll und haben einen Abstand von drei Gefachen. Zur Auswahl eines Weges aus gleich langen Alternativen könnte neben der Konvention ‚wähle den kürzesten Weg‘, was auf beide Wege zutrifft, noch eine weitere getroffen werden. Sie könnte lauten ‚gehe dabei zunächst so weit wie möglich in vertikaler Richtung‘, wodurch der zunächst senkrecht nach unten führende und erst in der untersten Reihe abknickende Pfad vorgezogen würde.

⁵⁹ Die Gruppenform beschreibt die äußere Form der Anordnung von Objekten. Eine Gruppe kann eine Linienform, kompakte Kastenform oder auch eine unregelmäßige Form annehmen.

Verbindung zu der Zweiergruppe unten links.⁶⁰ Bereits bei der eindimensionalen Vermischung wurden die Abstände nur zwischen zwei sich zugewandten Objekten, dem letzten der vorderen Gruppe und dem ersten der folgenden Gruppe, bestimmt.

Der maximale Abstand zweier Gruppen kann auch nicht mehr aus allen nicht zu der Fraktion zählenden Objekten bestehen. Er wird zusätzlich zur Gitterstruktur durch die Kastenbreite bzw. -höhe abzüglich der durch ‚eigene‘ Fraktionsobjekte besetzten Gefache eingeschränkt, sodass nicht mehr alle Nicht-Fraktionsobjekte einen Beitrag zu den Zwischenräumen leisten, wie es im eindimensionalen Fall war. Eine Vereinfachung könnte darin bestehen, immer nur den kürzesten Abstand unabhängig von der horizontalen oder vertikalen Ausrichtung zu zählen.

Weitere mögliche Ansätze, Abstände bzw. Fraktionsverteilungen zu bestimmen, wären die Schwerpunktbildung jeder Gruppe mit anschließender Abstandsbestimmung zu den Schwerpunkten der weiteren Gruppen oder alternativ auch die Bestimmung des Trägheitsmoments einer gesamten Fraktion, welches auf die Flächenverteilung der Fraktionsobjekte schließen ließe. Diese beiden Wege werden hier jedoch nicht weiter verfolgt, da sie von der diskreten Gitterstruktur abweichen.

Kennzeichnend für Vermischung im zweidimensionalen Fall sind ebenso wie im eindimensionalen Vermischungsfall Merkmale wie Fraktionsanzahl und Fraktionsanteile – diese Merkmale sind sogar dimensionsunabhängig – sowie Fraktionswechsel, Gruppenanzahl, Gruppengröße und Abstände. Darüber hinaus sind auch noch die Gruppenform bzw. die Kompaktheit einer Fraktion wichtig. Für diese Merkmale sollen für den vorliegenden zweidimensionalen Vermischungsfall in Abschnitt 4.3.2 auf konzeptioneller Ebene Ansätze möglicher Messvorschriften entwickelt werden. Zuvor werden in diesem Abschnitt noch Merkmale dreidimensionaler Vermischungen untersucht.

Dreidimensionale Anordnungen

Dreidimensionale Vermischungen sind die natürlichste und häufigste Vermischungsform. Alle realen Objekte sind dreidimensional, und sie befinden sich gewöhnlich auch nicht nur in einer Reihe oder auf einer Fläche nebeneinander angeordnet, sondern auch übereinander im Raum. Als Ausgangspunkt für Abfallsortierung ist dreidimensionale Vermischung jedoch selten. Gewöhnlich werden dazu dreidimensionale Strukturen wie ein Gelber Sack oder eine mit Kästen beladene Palette aufgebrochen, indem der Sack

⁶⁰ Dennoch könnte ein Abstand ermittelt werden, der jedoch nur wenig aussagekräftig ist, weil auf dem Abstandspfad noch andere Objekte der gleichen Gruppe liegen, deren Abstand zur anderen Gruppe geringer ist.

geöffnet und sein Inhalt aufgelockert und einschichtig oder vereinzelt auf ein Band gegeben wird bzw. die Kästen abgeladen und vereinzelt werden. Aus diesem Grund sollen dreidimensionale Vermischungsstrukturen hier nur kurz auf rein konzeptioneller Ebene betrachtet werden.

Zur Vereinfachung kann auch auf ein dreidimensional vermisches Objektbündel, z. B. einen Gelben Sack, eine Gitterstruktur projiziert werden. Sie hat hier würfelförmige Gefache, in denen sich zur korrekten Erfassung der Vermischung nur ein Objekt einer Fraktion befinden sollte. Das gesamte Gitter selbst muss dabei aber nicht Würfel- oder Quaderform besitzen. Es sollte der Gestalt des Objektbündels mit seinen Erhebungen und Einbuchtungen folgen und es dabei vollständig umschließen.

Der Extremfall vollständiger Vermischung war im ein- und zweidimensionalen Fall dadurch gekennzeichnet, dass die Objekte einer Fraktion nicht nebeneinander lagen (fraktionsbezogene Sichtweise) und sich aus globaler Sichtweise mit Objekten anderer Fraktionen abwechseln, sodass möglichst gleichmäßige Abstände zwischen den Objekten einzelner Fraktionen entstehen. Dies kann ohne Einschränkungen auch auf dreidimensionale Gemische übertragen werden. Vollständige Entmischung lag vor, wenn jeweils alle Objekte einer Fraktion eine gemeinsame Gruppe bildeten. Im eindimensionalen Fall war diese Gruppe klar umrissen und durch den Anfang und das Ende eines Linienabschnitts begrenzt. Für den zweidimensionalen Fall war die intuitive Einschätzung von Entmischung zunächst nicht eindeutig. Die Form der Gruppe beeinflusste die Einschätzung, sodass schließlich die Konvention getroffen wurde, dass Entmischung dann in ihrer stärksten Ausprägung vorliegt, wenn die Fraktionsobjekte möglichst eng auf der Fläche gebündelt sind. Gleiches gilt auch für eine dreidimensionale Fraktion, die ein möglichst kompaktes Bündel im Raum bildet, wenn sie unvermischt ist.

Die Anordnungsmerkmale **Fraktionsanzahl** und **Fraktionsanteile** können auch bei dreidimensionaler Vermischung als Maß erhoben werden. Sie wurden bereits als dimensionsunabhängig ermittelt. Auch die bereits identifizierten Häufigkeitsmerkmale sind zur Beschreibung der Vermischung wieder hilfreich. Bei den **Fraktionswechseln** muss jetzt berücksichtigt werden, dass sie in drei Richtungen gezählt werden. Ein einzelnes Objekt kann dabei nun bis zu sechs direkte Nachbarn besitzen. Dies zeigt bereits, dass der Erhebungsaufwand insgesamt für jedes Merkmal und jede Fraktion mit höherer Dimension deutlich zunimmt. Die Konzentration in **Fraktionsgruppen** sowie die **Gruppenanzahl** sind dimensionsunabhängig und können auch im dreidimensionalen Fall durch Auszählen der Gruppen erfasst werden. Darüber hinaus könnte auch wieder die Anzahl Kontaktstellen zu den Nachbarn (abzüglich der Rand-

begrenzungen) zu einem Vermischungsmaß führen sowie auch der kürzeste **Abstand** zwischen den einzelnen Fraktionsgruppen bestimmt werden.

4.3.2 Konzeptionelle Messvorschriften für mehrdimensionale Vermischung

Im vorherigen Abschnitt wurden die Merkmale mehrdimensionaler Vermischung und ihre Wirkungen diskutiert. Im zweidimensionalen Fall können zu ihrer Beschreibung die gleichen Charakteristika eingesetzt werden wie im eindimensionalen Fall. Sie werden durch zwei weitere Merkmale, die Kompaktheit und die Gruppenform, ergänzt. Ebenso wie im eindimensionalen Fall ist auch hier nicht möglich, ein einzelnes Merkmal zur vollständigen Abbildung von Vermischung heranzuziehen, da mit jedem Merkmal nur ein Teilaspekt erfasst wird. In diesem Abschnitt sollen für die verschiedenen Merkmale Erweiterungen der Kennzahlen bzw. neue Messvorschriften für den zweidimensionalen Vermischungsfall skizziert werden.⁶¹ Von einer Aggregation aller Kennzahlen zu einer Gesamtkennzahl wird hier abgesehen, da sich diese Vorgehensweise bereits im eindimensionalen Fall als wenig sinnvoll herausgestellt hat.

Wie bereits oben diskutiert, kann 2d-Vermischung durch die Häufigkeitsmerkmale Fraktionsanzahl und Fraktionsanteile gemessen werden. Da diese Messung unabhängig von der dimensionalen Ausdehnung des Gemischs ist, ist keine Anpassung der Kennzahlenformeln für den FVG und den AVG erforderlich. Sie können, wie in den Abschnitten 4.2.3.1 und 4.2.3.2 erläutert ist, unverändert angewendet werden.

Die Messung des WVG muss für den zweidimensionalen Fall geeignet angepasst werden. Die Wechselzählung muss festgelegt werden, z. B. erst alle Wechsel in den Zeilen und dann alle Wechsel in den Spalten, wobei am Rand keine Wechsel existieren. Mit dem WVG werden auch weiterhin gleichzeitig die Wechsel aller Fraktionen erfasst. Die maximale Anzahl der Fraktionswechsel hat sich dadurch erhöht, dass nicht mehr nur horizontale, sondern auch vertikale Wechsel existieren. Sie ist dann erreicht, wenn alle Objekte aller Fraktionen vereinzelt sind. Die minimale Wechselanzahl liegt vor, wenn die jeweiligen Fraktionsobjekte so kompakt wie möglich eine Gruppe bilden. Der WVG ergibt sich dann in der angepassten Form als

$$WVG^{2d} = \frac{W^{fakt} - W^{min}}{W^{max} - W^{min}} \quad (4.32)$$

⁶¹ Auch wenn hier keine Formeln ausgearbeitet werden sollen, wird zur Vergleichbarkeit der Kennzahlen auch hier die Normierung auf ein Intervall zwischen [0,1] unterstellt.

Falls die tatsächliche Wechsellanzahl W^{fakt} der maximalen Wechsellanzahl W^{max} entspricht, so ergibt sich ein maximaler WVG^{2d} von 1; bei vorliegender minimaler Wechsellanzahl $W^{fakt} = W^{min}$ wird der Zähler zu 0 und infolgedessen ist auch der WVG^{2d} 0, also minimal. Diese allgemeine Formulierung des WVG^{2d} schließt bereits den Fall ein, dass eine Fraktion einen Anteil größer als 50% besitzt. Es muss nur W^{max} entsprechend bestimmt werden.

Der KVG ist auf den zweidimensionalen Vermischungsfall problemlos übertragbar. Er erfasst zunächst für jede Fraktion einzeln, wie sehr sich die Objekte in Gruppen konzentrieren, und wird schließlich zu einer Kennzahl für alle Fraktionen zusammengefasst. Diese Ermittlung ist von der Dimension unabhängig, da in ihr nur die Gruppengröße und nicht ihre Form oder ihre Position berücksichtigt wird.

Eine ähnliche Form der Messung der Konzentration und damit der Grad der Entmischung kann über die Bestimmung der Kompaktheit einer Fraktion erfolgen.⁶² Hier werden die Kontaktstellen zu Objekten der gleichen Fraktion untersucht. Sie sind das Gegenteil der Fraktionswechsel zwischen Objekten verschiedener Fraktionen. Je mehr Kontaktstellen eine Fraktion aufweist, umso enger liegt sie zusammen. Eine Möglichkeit, den **Entmischungsgrad** (EMG) zu berechnen, ist die Anzahl tatsächlicher Kontaktstellen einer Fraktion mit den maximal möglichen Kontaktstellen dieser Fraktion ins Verhältnis zu setzen. Für eine Kennzahl aller Fraktionen werden die Einzelkennzahlen addiert und durch die Anzahl Fraktionen geteilt. Durch die Verhältniszahl für jede einzelne Fraktion ist auch die Normierung auf das Intervall von $[0,1]$ gewährleistet:

$$EMG = \frac{\sum_f \frac{\text{Anzahl Kontaktstellen von Fraktion } f}{\text{maximale Anzahl Kontaktstellen von Fraktion } f}}{\text{Anzahl Fraktionen}} \quad (4.33)$$

Die Abstands- oder Zwischenraummessung der eindimensionalen Vermischungsmessung kann, wie in der Diskussion im vorhergehenden Abschnitt gezeigt wurde, nicht auf die höhere Dimension übertragen werden. Ein konzeptioneller Vorschlag für eine dieser Dimension angepassten Messung ist die Ermittlung des minimalen Abstands zwischen allen Gruppen einer Fraktion. Der Abstand wird dabei gemäß der Gefachstruktur entweder in horizontaler oder in vertikaler Richtung erfasst, je nachdem welcher Abstand der kürzere ist. Anschließend wird aus den so ermittelten Abständen ein ‚kürzester Weg‘ für alle Gruppen der gleichen Fraktion im Kasten errechnet. Werden die Gruppen dabei als Knoten eines Graphen aufgefasst und die Abstände

⁶² Vorbild für diese Sichtweise ist die sog. dichteste Kugelpackung aus der Festkörperphysik, vgl. Hering/Martin/Stohrer (2012), S. 789f.

als Bewertung der bidirektional gerichteten Kanten zwischen den ‚Gruppen-Knoten‘, können Methoden des OR, wie z. B. der Dijkstra-Algorithmus zur Ermittlung kürzester Wege in Graphen, bei der Lösung hilfreich sein.⁶³

Für dreidimensionale Vermischung können die dimensionsunabhängigen Kennzahlen (FVG, AVG, KVG) gemäß der obigen Formeln berechnet werden. Von einer Entwicklung weiterer Formeln wird an dieser Stelle Abstand genommen, da sie nicht weiter zielführend für den folgenden Verlauf dieser Arbeit ist.⁶⁴

4.4 Zwischenresümee

Die bisherigen Ausführungen haben verdeutlicht, dass sich die Vermischung eines Stoffgemisches nicht auf triviale Weise kennzeichnen lässt. Obwohl sich oft intuitiv einschätzen lässt, welches von zwei Stoffgemischen stärker vermischt ist, fällt eine objektive Kennzeichnung der Vermischung schwer. Dies ist erstens dadurch begründet, dass die Vermischung nicht durch ein einziges Kennzeichen beschreibbar ist, sondern der simultanen Analyse verschiedener Merkmale bedarf. Diese Merkmale beinhalten neben den (absoluten und relativen) Häufigkeiten der Fraktionen auch ihre Konzentrationen und Abstände innerhalb des Gemisches. Andererseits ist die Wirkungsrichtung der einzelnen Merkmale nicht immer eindeutig. So mussten bei gleicher Gruppenanzahl zur Beurteilung der Verteilung von Gruppengrößen und -abständen zunächst Konventionen getroffen werden, die von individuellen Einschätzungen und den konkreten Sortierprozessen abhängen. Überdies ist auch die Aggregation der in Kapitel 4.2.3 entwickelten Kennzahlen zu einer Gesamtkennzahl wenig zweckmäßig, da hierdurch die separat gemessenen, unterschiedlichen Charakteristika des Stoffgemisches nicht mehr sichtbar werden. Demgemäß lassen sich Sortierprozesse nur dann präzise planen, wenn die einzelnen Vermischungskennzahlen bekannt sind und ihr Aussagegehalt richtig interpretiert wird.

Werden die Erkenntnisse dieses Kapitels gemeinsam mit den Beschreibungen der technischen Sortierverfahren in Kapitel 3 in einen Zusammenhang gebracht, so wird deutlich, dass insbesondere Kenntnisse der Vermischungen ein- und zweidimensionaler Stoffgemische eine wichtige Rolle spielen. Sie sind die in der Abfallsortierung am häufigsten anzutreffenden Vermischungszustände. Neueren technischen Verfahren wie der

⁶³ Vgl. dazu z. B. Domschke/Drexel (2007), S. 72f.

⁶⁴ Für eine ausführlichere Auseinandersetzung mit der Vermischung räumlicher Phasen in einem Würfel vorwiegend stetiger Gemische und ihrer Messung sei erneut auf die Arbeit von Behrens (1998) verwiesen.

automatischen Klaubung liegt ausschließlich noch eine eindimensionale Vermischung zugrunde, die durch die Vereinzelung der Gemischbestandteile künstlich erzeugt wird. Die Entwicklung von Formeln zur Messung mehrdimensionaler Vermischung wurde daher auf einige konzeptionelle Überlegungen beschränkt.

Teil II

Strukturanalyse und Konstruktion eines ökonomischen Entscheidungsmodells für Sortierprozesse

Kapitel 5

Prozessstrukturen

In diesem Kapitel soll die strukturanalytische Vorarbeit als Basis der Modellformulierung geleistet werden. Dazu wird aus produktionswirtschaftlicher Sicht analysiert, wie Sortierprozesse aufgebaut sind. Sie werden mithilfe der Aktivitätsanalyse charakterisiert und als Input/Output-Graphen (I/O-Graphen) dargestellt. Da die Aktivitätsanalyse ein sehr umfangreiches und mächtiges Instrument ist, werden hier – aufgrund der gebotenen Kürze der Darstellung – nur die für die Strukturanalyse von Sortierprozessen relevanten Teilaspekte herausgegriffen.¹ Besondere Betrachtung erfahren zudem die Materialflüsse vom Abfallinput in den Wertstoffoutput, die über das formale Mengenmodell abgebildet werden. Zum Abschluss des Kapitels werden Analogiebetrachtungen durchgeführt, in denen der strukturelle Aufbau der Sortierprozesse mit Strukturen anderer (logistischer) Prozesse verglichen werden soll. Es werden mögliche Übereinstimmungen und Unterschiede untersucht.

5.1 Darstellung einfacher (einstufiger) Sortierprozesse mittels Input/Output-Graphen

5.1.1 Einfacher I/O-Graph eines Sortierprozesses

Ein I/O-Graph ist ein Instrument zur Visualisierung von Produktionen in der Produktionstheorie.² Eine einzelne Ausprägung der Produktion eines Produktionssystems

¹ An der Aktivitätsanalyse interessierte Leser seien darüber hinaus auf Dyckhoff (1994) verwiesen.

² Die Entwicklung der I/O-Graphen geht zurück auf Müller-Merbach (1981). Vgl. hierzu aber auch Dyckhoff (2006), S. 35.

wird dabei auch als **Aktivität** bezeichnet.³ Die Menge aller prinzipiell möglichen Aktivitäten heißt **Technik**.⁴ Abbildung 5.1 zeigt einen einfachen, abstrakten I/O-Graphen eines Sortierprozesses.⁵ Die Objektarten werden als Kreisknoten dargestellt. Auf der linken Seite befinden sich die Inputobjekte und auf der rechten Seite die Outputobjekte. Der Produktionsprozess ist als Black-Box mit einem Prozesskasten in der Mitte abgebildet. Pfeile verbinden den Input mit dem Prozesskasten und den Prozesskasten mit dem Output.⁶

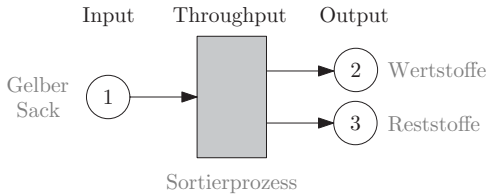


Abbildung 5.1: Einfacher I/O-Graph eines Sortierprozesses

In dem einfachen Beispiel in Abbildung 5.1 ist Objektart 1 ein gefüllter Gelber Sack. Die Objektarten 2 und 3 sind die aussortierten Wertstoffe und die Reststoffe. Sortierung ist eine **Kuppelproduktion**, d. h. der Wertstoffoutput kann nicht entstehen, ohne dass gleichzeitig auch eine Reststofffraktion entsteht.⁷ Der grau hinterlegte Prozesskasten steht für den nicht weiter aufgeschlüsselten Sortierprozess. Die genaue Abbildung der Transformation bei der Sortierung an sich, d. h. einzelne Prozesse wie z. B. Magnetscheidung oder händisches Klauben, wird bei dieser Darstellung ausgespart. Auch abstrahiert der I/O-Graph der Sortierung von der Modellierung weiterer Einsatzfaktoren wie Maschinen und menschlicher Arbeitskraft.⁸

³ Vgl. Dyckhoff (1995), S. 28.

⁴ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 85, bzw. Dyckhoff (2006), S. 56.

⁵ In Abgrenzung zum abstrakten I/O-Graphen bildet ein *konkreter* I/O-Graph genau eine einzelne Aktivität ab. An den Pfeilen sind dazu die realisierten Mengen der Input- und Outputobjekte abgetragen. Abstrakte I/O-Graphen hingegen beschreiben musterhaft alle möglichen Produktionen einer Technik, vgl. Dyckhoff (2006), S. 89ff.

⁶ Auf eine detaillierte Darstellung der Vorgänge innerhalb des Prozesskastens mit Verzweigen und Sammlern, wie MÜLLER-MERBACH(1981, S. 23-29) sie entwickelt, wird an dieser Stelle verzichtet.

⁷ Nach MÜLLER-MERBACH gibt es nur wenige Produktionen, die keine Kuppelproduktion sind, vgl. Müller-Merbach (1981), S. 37. DYCKHOFF geht sogar noch einen Schritt weiter und sagt, dass Kuppelproduktion nicht nur der Regelfall ist, es gibt keine andere Art der Produktion, vgl. Dyckhoff (1994), S. 14. Der Grenzfall, dass in einem Sortierprozess ohne Fehlwürfe der gesamte Input in den Wertstoffoutput transformiert wird, ist für die vorliegende Betrachtung uninteressant. Da der Input bereits sortenrein vorliegt, muss in diesem Fall streng genommen nicht mehr sortiert werden.

⁸ Da diese nicht im Zentrum der Betrachtung stehen, ist die Exklusion nicht-stofflicher Objektarten zweckmäßig.

Diese einfache Form der Darstellung von Sortierung ist für die weiteren Untersuchungen jedoch nicht ausreichend. In den nachfolgenden Abschnitten werden die unterschiedlichen Technikformen aus der Aktivitätsanalyse vorgestellt und die Sortierung im Rahmen einer Strukturanalyse entsprechend eingeordnet. Zum besseren Verständnis werden dabei weitere Sortierbeispiele anhand von sukzessive erweiterten I/O-Graphen erläutert.

5.1.2 Technikformen

5.1.2.1 Lineare und elementare Techniken

Elementare Techniken sind Techniken, die nur aus einer **Grundaktivität** bestehen. Grundaktivitäten sind musterhafte Prozesse, die eine elementare Verfahrensweise beschreiben. Dazu zählen z. B. Schnittmuster, Stücklisten oder Rezepturen. Der zu einer Grundaktivität gehörende bzw. aus einer Grundaktivität generierte Prozess wird als elementarer Prozess bezeichnet.⁹ Techniken, die aus mehreren (einer endlichen Anzahl) Grundaktivitäten (linear) kombiniert werden – dies wird auch als Aufspannen bezeichnet –, heißen **endlich generierbaren Techniken**.¹⁰

Elementare und endlich generierbare Techniken lassen sich in den Kontext der **linearen Techniken** einbetten. Diese bilden die Basis der linearen Aktivitätsanalyse. Alle Techniken, die in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt werden, bauen auf diesem Fundament auf. Eine lineare Technik ist durch die speziellen Eigenschaften **Additivität** und **Größenproportionalität** gekennzeichnet. Die Technik ist additiv, wenn jede (additive) Kombination zweier beliebiger Aktivitäten der Technik ebenfalls innerhalb der Technik liegt, d. h. ihre Durchführung also möglich ist.¹¹ Größenproportionalität – auch als konstante Skalenerträge bezeichnet – liegt vor, wenn jede Niveauvariationen jeder Aktivität der Technik wieder zu einer möglichen Produktion in der Technik führen.¹²

⁹ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 161f. und 183.

¹⁰ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 159.

¹¹ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 84. Ein Beispiel ist die gleichzeitige Produktion von Taschen und Schuhen in einem lederverarbeitenden Betrieb, vgl. Dyckhoff (2006), S. 59.

¹² Niveauvariation beschreibt z.B. eine Produktionsverdopplung, wenn das Produktionsniveau $\lambda = 2$ beträgt, d. h. ein Produktionsvorgang zweimal durchgeführt wird. Bei $\lambda = 0,5$ würde die Produktion entsprechend halbiert. Vgl. zu den weiteren Grundannahmen an lineare Techniken Dyckhoff (1994), S. 73–84 und 155f.

Elementare Techniken, die einfachsten der linearen Techniken, bilden nun die Bausteine für alle weiteren Techniken. Sie werden – bezogen auf den Materialfluss – in vier Produktionsstrukturtypen, auch Vergenztypen genannt, unterschieden:¹³

- glatte Produktion (Typ 1:1),
- konvergierende Produktion (Typ m:1),
- divergierende Produktion (Typ 1:n) und
- austauschende Produktion (Typ m:n).

Sortierprozesse lassen sich bezüglich ihres Materialflusses im Rahmen der (linearen) elementaren Techniken als **divergierende Produktion** einordnen. Es wird **ein** Inputgemisch (Gelber Sack oder Getränkekasten) in **mehrere** (n) Outputarten (Wertstoff- und Reststofffraktionen bzw. Kasten und Flaschen) umgewandelt. Abbildung 5.2 zeigt den I/O-Graphen einer divergierenden Produktion. An den Pfeilen sind jetzt auch die Inputkoeffizienten a_i (im Beispiel a_1) und die Outputkoeffizienten b_j (im Beispiel b_2 bis b_{n+1}) abgetragen. Sie geben die Input- bzw. Outputquantität bei einmaliger Durchführung des Produktionsprozesses an.¹⁴

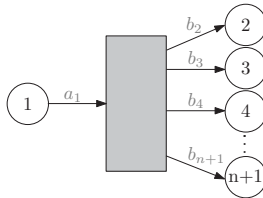


Abbildung 5.2: I/O-Graph einer divergierenden Produktion (vgl. Dyckhoff (1994), S. 188.)

Eine divergierende Produktion lässt sich allgemein auch durch ein formales, mathematisches Mengenmodell beschreiben. Aus dem Inputobjekt¹⁵ $i = 1$ werden die Outputobjekte $j = 2, \dots, n + 1$ erzeugt. Die Funktion des Inputs lautet:

$$x_1 = a_1 \cdot \lambda. \quad (5.1)$$

¹³ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 187ff., oder auch Küpper/Helber (2004), S. 9 und 54ff.

¹⁴ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 183.

¹⁵ Die Inputobjektart kann sowohl ein Gutfaktor, z. B. ein Rohstoff, als auch ein Redukt (Übelinput), z. B. Wertstoffabfälle, sein, vgl. zu den Objektkategorien Dyckhoff (1994), S. 67.

Dabei steht x_1 für die Inputquantität, a_1 bezeichnet den Inputkoeffizienten, λ ist das Produktionsniveau, sozusagen die Anzahl, wie oft ein Produktionsprozess durchgeführt wird. Für den Output ergeben sich folgende Funktionen:

$$b_j \cdot \lambda = y_j \quad \forall j = 2, \dots, n + 1. \quad (5.2)$$

b_j ist der Outputkoeffizient der Objektart j , y_j ist die Outputquantität von Objektart j . Hieraus lassen sich die **Produktionsfunktionen** als Verbindung der Input- mit der Outputseite ableiten:

$$y_j = b_{j1} \cdot x_1 \quad \forall j = 2, \dots, n + 1. \quad (5.3)$$

Der Ausdruck $b_{j1} = b_j/a_1$ wird als Ausbeutekoeffizient bezeichnet, und er beschreibt die Quantität des Outputs j bezogen auf eine Einheit des Inputfaktors. Es wird hier nochmals deutlich, dass es sich bei einem (divergierenden) Sortierprozess um Kuppelproduktion handelt, weil durch die Technik vorgegeben mehrere verschiedene Outputs anfallen.¹⁶

5.1.2.2 Einstufige Techniken

Einstufige Techniken sind eine Kombination elementarer Prozesse. Im I/O-Graphen wird daher für jeden dieser Prozesse ein eigener Prozesskasten eingezeichnet. Außerdem lassen sich alle Objekte eindeutig einer Input- oder einer Outputobjektart zuordnen; keine Objektart ist beides. Es treten nicht alle Input- bzw. Outputarten bei jeder (möglichen) Produktion auf.¹⁷

Einstufige Techniken können in fünf Grundstrukturtypen unterteilt werden:

- outputseitig determinierte Produktion,
- inputseitig determinierte Produktion,
- Verfahrenswahl bei der Outputherstellung,
- Verfahrenswahl bei der Inputnutzung und
- voll flexible Produktion bzw. Transportprozesse.¹⁸

¹⁶ Es liegt sogar der Fall starrer Kuppelproduktion vor, weil die Quantitäten eindeutig bestimmbar sind, vgl. Dyckhoff (1994), S. 201f.

¹⁷ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 209, und Dyckhoff (2006), S. 95.

¹⁸ Vgl. Dyckhoff (2006), S. 97f., bzw. Dyckhoff (1994), S. 211. Die völlig flexible Produktion wird auch als elastische Produktion bezeichnet.

Von diesen fünf Strukturtypen sind die inputseitig determinierte Darstellung und die Verfahrenswahl bei Nutzung eines Inputs zur Modellierung eines ‚diskreten‘ Sortierprozesses, z. B. eines Getränkekastens mit sechs Flaschen, anwendbar. Die Sortierung eines Gelben Sacks kann mit einer voll flexiblen Technik dargestellt werden. Da der Output als Ergebnis der Sortierung i. d. R. unbekannt ist und von der Zusammensetzung des Inputs abhängt, ist sowohl die outputseitig determinierte Produktion als auch die Verfahrenswahl bei der Outputerstellung zur Modellierung von Sortierung ungeeignet.

Determinierte Produktion

Bei der determinierten Produktion oder Reduktion werden eine oder mehrere Inputobjektarten unabhängig voneinander eingesetzt und **separat** aufgespalten. Im Fall mehrerer Inputobjektarten ‚bedient‘ jede jeweils einen eigenen, einzelnen Prozess. Die Outputobjektarten können für alle Prozesse die gleichen sein. Alle Prozesse sind Kuppelprozesse, bei denen zwangsläufig mehrere Outputarten anfallen.¹⁹

Ein determinierter Sortierprozess wäre z. B. das Trennen eines Getränkekastens von den enthaltenen gleichartigen Flaschen. Jedoch ist es für eine Sortierung eher untypisch bzw. nicht möglich, immer den gleichen Prozess durchzuführen, da der Input i. d. R. nicht in allen Fällen gleichartig zusammengesetzt ist. Ein konstruiertes Beispiel, das einen determinierten Prozess stärker verdeutlicht, wäre eine Tüte Weingummi, die verschiedene Sorten **mit immer der gleichen Stückzahl** jeder Sorte enthält. Ein wählerischer Konsument sortiert die einzelnen Weingummisorten vor dem Verzehr gemäß seiner sich nicht verändernden Präferenzen in unterschiedliche Farben.

Verfahrenswahl (bei der Inputnutzung)

Bei der Verfahrenswahl besteht die Möglichkeit, für die Produktion gezielt aus einer Menge mit abzählbar vielen Verfahren ein geeignetes Verfahren auszuwählen.²⁰ Im Unterschied zur determinierten Produktion, bei der jeder Input nur genau ein Verfahren bedient hat, bedient hier nun die Inputobjektart alle Verfahren. Im I/O-Graphen werden diese Verfahren als einzelne ‚kleine‘ Prozesskästen innerhalb eines

¹⁹ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 218, und Souren (2004a), S. 128.

²⁰ Diese Form wird auch als diskret elastische Produktion bezeichnet. Vgl. Dyckhoff (1994), S. 221 und 228, bzw. Souren (2004a), S. 130, sowie Souren (1996b), S. 74f., wobei zu beachten ist, dass SOUREN sich ausschließlich auf die Transformation einer Reduktart beschränkt.

,großen‘ Prozesskastens dargestellt. Jeder elementare Prozess vom Input über einen kleinen Prozesskasten zum Output ist dabei vom Typ (1:n), also divergierend (vgl. den rot gekennzeichneten Weg in Abbildung 5.3, Typ (1:2)). Werden alle elementaren Prozesse – im Beispiel in Abbildung 5.3 sind es drei – zu einer Technik kombiniert, so ist auch sie vom Typ (1:n). Das folgende, stark vereinfachte Beispiel verdeutlicht die Verfahrenswahl für die Sortierung von Getränkekästen.

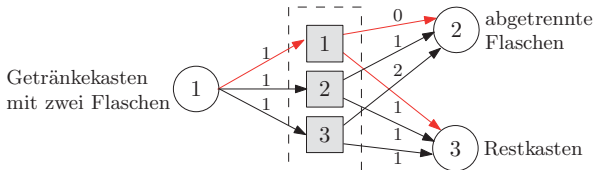


Abbildung 5.3: Verfahrenswahl am Beispiel eines Getränkekastens

Bei der Sortierung von Getränkekästen mit zwei Flaschen sollen die Flaschen und der Kasten getrennt werden (vgl. Abbildung 5.3). Bei der Abtrennung entstehen die zwei Objektarten ‚abgetrennte Flaschen‘ und ‚Restkasten‘. Ob der Restkasten noch Flaschen enthält oder vollständig geleert ist, soll an dieser Stelle nicht weiter unterschieden werden.²¹ Für dieses Sortierproblem existieren nun drei Verfahren ($\rho=3$). Das erste Verfahren trennt keine der beiden Flaschen ab, das zweite Verfahren trennt lediglich eine Flasche ab und das dritte Verfahren trennt beide Flaschen ab. Durch eine Normierung der Inputkoeffizienten auf 1 kann erreicht werden, dass für jedes Verfahren erkennbar ist, welche Quantitäten jeder Outputobjektart aus einer Einheit der Inputobjektart erzeugt werden (vgl. die Zahlen an den Pfeilen im I/O-Graphen in Abbildung 5.3).²²

Wird die Sortierung für insgesamt drei Kästen durchgeführt und für jeden Kasten ein anderes Verfahren gewählt, dann umfassen die abgetrennten Flaschen nach der Sortierung in Summe drei Flaschen (einmal wird keine Flasche abgetrennt, einmal wird eine Flasche abgetrennt und einmal werden zwei Flaschen abgetrennt), und die Gesamtzahl der nicht näher beschriebenen Restkästen ist drei.

²¹ Für eine detailliertere Beschreibung der Getränkekastensortierung vgl. das Beispiel in Abschnitt 5.5, S. 107.

²² Vgl. Dyckhoff (1994), S. 229.

Diese Vorgehensweise lässt sich in einem allgemeinen Mengenmodell für Verfahrenswahl formulieren:²³

$$x_1 = \sum_{\rho=1}^{\pi} x_1^{\rho} \quad (5.4)$$

$$\sum_{\rho=1}^{\pi} b_{j1}^{\rho} x_1^{\rho} = y_j \quad \forall j = 2, \dots, n+1. \quad (5.5)$$

Diese Bilanzgleichungen beschreiben in Gleichung (5.4) die Inputverteilung von x_1 auf die einzelnen möglichen Verfahren ρ (mit $\rho = 1, \dots, \pi$). In den Gleichungen (5.5) erfolgt die outputseitige Betrachtung, wobei für jede der unterschiedlichen Outputobjektarten j die Ausbeute aus allen π Verfahren ermittelt wird.

(Völlig) Flexible Techniken

Eine stärker verallgemeinerte Form der Verfahrenswahl mit hoher (stetiger) Elastizität und vielen Freiheitsgraden ist die völlig flexible Produktion. Bei dieser Form der Produktion bzw. Reduktion kann idealerweise jeder Input in jeden Output überführt werden. Allerdings ist diese Form der Transformation nicht für stoffliche Transformation zulässig, da nicht jeder Input uneingeschränkt bzw. ohne eine Kombination mit weiteren Inputobjektarten in jeden Output transformiert werden kann.²⁴ Diese Technik kann z. B. zur Modellierung von Transport- oder Verteilungsprozessen verwendet werden.

Alle Prozesse einer flexiblen Technik sind vom Typ (1:1), d. h. jeder Input i ist im I/O-Graphen über einen elementaren Prozess mit jedem Output j verbunden (vgl. die gefärbten Pfeile in Abbildung 5.4). Die Input- und Outputkoeffizienten sind gleich 1.²⁵ Insgesamt ergeben sich $m \cdot n$ Prozesse, sodass bereits bei einer geringen Anzahl Input- und Outputobjektarten eine sehr große Anzahl Prozesse vorliegt (vgl. Abbildung 5.4, S. 105).

Für das formale Modell kann jeder Prozess mit dem zugehörigen Indexpaar (i, j) der betreffenden Input- und Outputobjektart eindeutig bezeichnet werden. Eine Nummerierung der einzelnen Prozesse mit ρ , wie zuvor bei der Verfahrenswahl, entfällt.

²³ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 228. Die Formulierung des Modells erfolgt prozessbezogen.

²⁴ Materielle Transformationsprozesse werden entweder als determinierte Technik oder als Verfahrenswahlproblem dargestellt, vgl. Souren (2004a), S. 131.

²⁵ Abweichende Werte sind durch unterschiedliche Maßeinheiten bedingt oder modellieren z. B. im Fall kleiner 1 Verluste während der Transformation. Vgl. Dyckhoff (1994), S. 234ff., bzw. Souren (2004a), S. 130f.

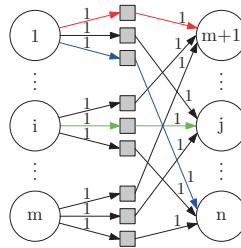


Abbildung 5.4: I/O-Graph einer völlig flexiblen Technik (Dyckhoff (1994), S. 212)

Damit entspricht das Prozessniveau λ_{ij} nun der Quantität, die von i nach j transformiert wird. Bei der Verfahrenswahl gab das Prozessniveau die Häufigkeit an, mit der ein Prozess durchgeführt wird. Das Mengenmodell einer flexiblen Technik kann über die Input- und Outputbilanzen folgendermaßen modelliert werden:²⁶

$$x_i = \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (5.6)$$

$$\sum_{i=1}^m \lambda_{ij} = y_j \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (5.7)$$

Sortierprozesse können auch als völlig flexible Techniken aufgefasst werden. Jede Wertstofffraktion sowie die Reststofffraktion werden dabei als eine eigene Inputart i ausgelegt und mithilfe der verschiedenen Verfahren in die Outputobjektarten j sortiert.²⁷

5.1.2.3 In Grenzen frei variierbare Produktion

Die allgemeinste Form zur Modellierung von Produktionen ist die in Grenzen frei variierbare Produktion. Sie umfasst nicht nur die Verfahrenswahl und die völlig flexible Technik, sondern sie kann zusätzlich noch natürliche oder technische Restriktionen, z. B. Reinheitsgrade, einbeziehen.²⁸ Durch diese Eigenschaft gehört die in Grenzen frei variierbare Produktion zu den nicht endlich generierbaren, linearen Techniken.²⁹

²⁶ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 236.

²⁷ Vgl. Souren (2004a), S. 131.

²⁸ Damit besitzt sie in der Gestaltung einen Parameter mehr als die völlig flexible Technik, auch wenn die zugegebenermaßen irreführende Bezeichnung dies zunächst nicht vermuten lässt.

²⁹ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 239

Die Restriktionen können in kollektive, d. h. alle Prozesse betreffende, und individuelle Beschränkungen unterschieden werden. Damit eine beschränkte Technik weiterhin die Eigenschaft der Linearität besitzt, müssen auch die Restriktionen einen linearen Charakter aufweisen. Ein Prozess ist umso elastischer, je schwächer die ihn beschränkenden Restriktionen sind. Umgekehrt liegt eine determinierte Technik vor, wenn die Technik durch starre Nebenbedingungen eingeschränkt ist.³⁰ Das formale Modell einer in Grenzen frei variierbaren Produktion besteht aus den Bilanzgleichungen (für Input und Output) einer flexiblen Technik und den daneben aufgeführten Restriktionen.

Sortierung wurde zuvor als divergierende Produktion charakterisiert und im Bereich der Verfahrenswahlprobleme als Verfahrenswahl bei Inputnutzung eingeordnet. Auch wurde gezeigt, dass sie als völlig flexible Technik modelliert werden kann. Häufig wird der Sortierprozess jedoch durch verschiedenartige Restriktionen eingengt, so dass **Sortierung** letztlich eine **in Grenzen frei variierbare Produktion** ist.

5.1.3 Erweiterung der Darstellung durch Komponentenmodellierung

Im vorherigen Abschnitt wurden verschiedene Möglichkeiten gezeigt, Sortierprozesse als Techniken zu modellieren. Die Modellierung und Darstellung der Objektarten erfolgte dabei aber nicht sehr stark detailliert. Die Inputobjektart wurde grob als Gelber Sack bzw. Getränkekasten mit Flaschen beschrieben. Auf der Outputseite gab es nur die Objektarten Wertstoffe und Reststoffe bzw. Flaschen und Restkästen. Tatsächlich besteht ein Gelber Sack aber aus einer Vielzahl unterschiedlicher Fraktionen, die durch die Sortierung in ebenso viele separate Wertstofffraktionen – und nicht nur eine einzelne – getrennt werden. Dabei kommt es auch vor, dass manche Objekte in die falsche Wertstofffraktion abgetrennt werden (sog. Fehlwurf). Zur Darstellung solcher Fehlwürfe bzw. der insgesamt feineren Struktur, die einem Sortierprozess unverkennbar zugrunde liegt, muss die bislang sehr grobe Objektartendarstellung verfeinert werden. Hierzu hat SOUREN den Ansatz der **Komponentenmodellierung** entwickelt.³¹

Die Komponentenmodellierung erweitert die reine Objekt- und Prozessebene des I/O-Graphen und des Mengenmodells um **Komponenten** und erhöht somit den Detail-

³⁰ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 247, und Dyckhoff (2006), S. 110f.

³¹ Vgl. Souren (1996b), Teil B. Die Komponentenmodellierung ist keine Technik. Mit ihr können Objektarten in allen Techniken genauer beschrieben werden.

lierungsgrad.³² Ihr zufolge bestehen dabei die Objektarten aus verschiedenen Komponenten. Alle Objektarten, die durch den gleichen elementaren Prozess verbunden sind, besitzen die gleichen Komponenten. Abbildung 5.5 zeigt den um Komponentenmodellierung erweiterten I/O-Graphen eines stark vereinfachten, beispielhaften Sortierprozesses. Die Komponenten sind dabei als kleiner Kreis innerhalb des größeren Objektartkreises eingezeichnet.

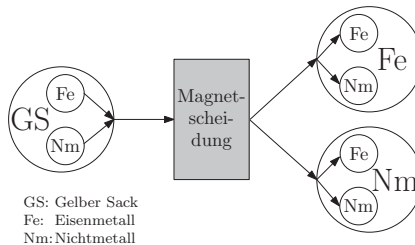


Abbildung 5.5: I/O-Graph einer Sortierung mit Komponentenmodellierung (in Anlehnung an Souren (1996b), S. 95 bzw. 109, sowie Souren (2004a), S. 134)

Die Inputobjektart Gelber Sack besteht aus den zwei Komponenten Eisenmetalle (Fe) und Nichtmetalle (Nm) (vgl. Abbildung 5.5). Durch die Magnetscheidung werden diese Komponenten aus der Inputobjektart sortiert. Die Outputobjektarten auf der rechten Seite enthalten die Zielfraktion (Fe-Komponente in der Fe-Outputobjektart; Nm-Komponente in der Nm-Outputobjektart), aber durch Fehlwürfe auch Objekte der jeweils anderen Komponente (z. B. Nm-Komponente in der Fe-Outputobjektart).

Die Quantitätsrelationen zwischen Komponenten und Objektarten lassen sich über **Massenbilanzgleichungen** allgemein formalisieren. Dazu wird, zusätzlich zu den Indizes i und j für die Input- und Outputobjektarten, für die Komponenten ein neuer Index k mit $k = 1, \dots, K$ eingeführt. $y_{j,k}$ bezeichnet demzufolge die Quantität der Komponente k in der Outputobjektart j .³³ Für die Objektarten ergibt sich dem-

³² Ebenso wie DYCKHOFF, der von einer Modellierung aller Objektarten absieht und nur auf die stofflichen Objektarten fokussiert, argumentiert auch SOUREN, dass ein Modellierungszwang für alle Komponenten unzweckmäßig ist. Es sollte eine Einschränkung auf die Komponenten erfolgen, die für die jeweilige Betrachtung zwingend erforderlich sind. Alle übrigen, unwichtigen oder nicht betrachteten Komponenten können entfallen oder in einer eigenen Objektart ‚Restkomponente‘ subsumiert werden. Vgl. Souren (1996b), S. 84, 86f. und 94, sowie Dyckhoff (1994), S. 189.

³³ Für das Beispiel in Abbildung 5.5 bezeichnet $y_{Fe, Nm}$ die Quantität der Komponente Nichtmetalle in der Outputobjektart Eisenmetalle.

nach:³⁴

$$x_i = \sum_{k=1}^K x_{i,k} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (5.8)$$

$$y_j = \sum_{k=1}^K y_{j,k} \quad \forall j = m + 1, \dots, m + n. \quad (5.9)$$

Die Gleichungen in (5.8) beschreiben die Aufspaltung der Quantitäten x_i der Inputobjektarten i in die objektartabhängigen Komponentenquantitäten $x_{i,k}$. Umgekehrt ergeben sich in (5.9) für die Outputobjektarten j die Outputquantitäten y_j aus der Summe ihrer Komponenten k . Angelehnt an das Beispiel in Abbildung 5.5 setzt sich die Inputobjektart Gelber Sack z. B. aus 20 kg Eisenmetallen und 80 kg Nichtmetallen zusammen; sie hat insgesamt also eine Quantität von 100 kg. Nach der Sortierung können sich diese 100 kg z. B. wie folgt aufteilen: 20 kg Outputobjektart Eisenmetalle, wobei davon 18 kg auf die Komponente Eisenmetalle entfallen und 2 kg auf die falsch abgetrennte Komponente Nichtmetalle. Die Outputobjektart Nichtmetalle umfasst 80 kg, wovon 78 kg Nichtmetalle und 2 kg fälschlicherweise abgetrennte Eisenmetalle sind.

SOUREN nennt diese Art der Transformation **Komponentenverteilung**.³⁵ Sie beschreibt die Umverteilung der in der Inputobjektart enthaltenen Komponenten auf die Outputobjektarten. Die Komponenten selbst bleiben unverändert, erzeugen aber durch die Umverteilung sich von der Inputobjektart unterscheidende Outputobjektarten.³⁶ Basierend auf dieser Definition wurden von SOUREN neuartige **Reduktionsprozestypen** abgeleitet, die sich an die Typologie von Techniken anlehnen. Unterschieden werden danach Abtrennungs-, Hinzufüge- sowie Umwandlungsprozesse.³⁷ Die Sortierung lässt sich den **Abtrennungsprozessen** zuordnen. Abtrennungsprozesse sind durch eine Komponentenverteilung charakterisiert, bei der eine Übertragung von Komponentenquantitäten stattfindet. Des Weiteren sind Abtrennungsprozesse auch Kuppelprozesse, bei denen neben der bewusst gewollten Abtrennung einer oder mehrerer Komponenten zwangsläufig mindestens eine weitere Objektart entsteht. Gewöhnlich bleiben nach der Abtrennung aller gewollten Komponenten noch weitere Objekte übrig, die zur Rest(stoff)objektart zusammengefasst werden.³⁸

³⁴ Vgl. Souren (1996b), S. 93.

³⁵ Vgl. Souren (1996b), S. 97f.

³⁶ Transformationen mit veränderlichen Komponenten heißen **Komponentenveränderung**, vgl. Souren (1996b), S. 98ff. Sie spielen in dieser Arbeit keine Rolle.

³⁷ Vgl. Souren (1996b), S. 97–105 und 115–120.

³⁸ Vgl. Souren (1996b), S. 118–126.

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen anhand weiterer Beispiele, wie Sortierprozesse durch Verfahrenswahl (bei Inputnutzung) sowie eine völlig flexible Technik jeweils mit integrierter Komponentenmodellierung beschrieben werden können.

Komponentenmodellierung bei Verfahrenswahl

Das nachfolgende Beispiel eines diskreten Sortierproblems zeigt die Komponentenmodellierung bei einem Verfahrenswahlproblem. Ein aus dem Handel an den Abfüller zurückgegebener Mehrweggetränk kasten sei mit sechs Flaschen bestückt.³⁹ Ziel der Sortierung ist es, einen nur mit Gutflaschen bzw. Leerstellen bestückten Kasten zu erhalten und Fremdflaschen auszusortieren. Dazu stehen sieben verschiedene Sortierverfahren zur Verfügung (vgl. den I/O-Graphen in Abbildung 5.6; hierbei ist zu beachten, dass die Komponenten zur besseren Übersichtlichkeit nicht als Komponentenknoten innerhalb des Objektknotens dargestellt sind, sondern als verbale Beschreibung jeweils neben dem Objektknoten stehen).

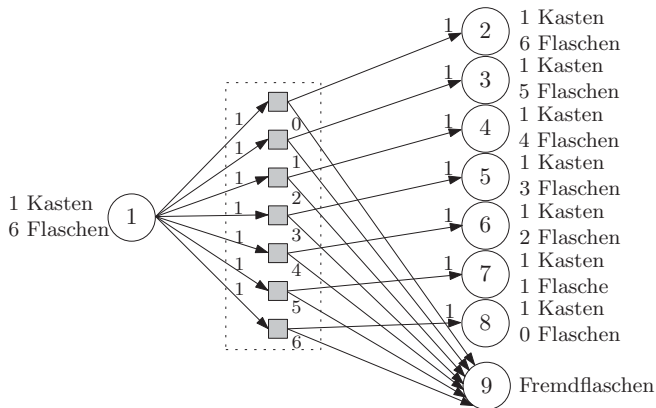


Abbildung 5.6: I/O-Graph des Verfahrenswahlproblems der Getränkekastensortierung

Objektart 1 ist der angelieferte, mit Flaschen bestückte Kasten. Die Objektarten 2 bis 8 bestehen jeweils aus den zwei Komponenten Kasten und Gutflaschen. Objektart 9 sind die aussortierten Fremdflaschen. Das erste Verfahren ist der beste Fall: Der Kasten enthält bereits sechs Gutflaschen. Es müssen keine Fremdflaschen sor-

³⁹ Das Beispiel ist an Souren (2004a), S. 132, angelehnt, wo eine Beschreibung des umgekehrten Prozesses, der Kastenbefüllung, erfolgt.

tiert werden.⁴⁰ Die weiteren Verfahren sortieren die diskret ansteigenden Quantitäten Fremdflaschen aus. Im letzten Verfahren werden alle Flaschen aussortiert, sodass die Objektart 8 nur aus einem leeren Kasten besteht. Würden die unterschiedlichen Flaschenkomponenten statt als Komponenten einer Objektart jeweils als eigene Objektarten modelliert, läge kein Verfahrenswahlproblem vor, sondern eine determinierte Produktion. Bereits an diesem relativ einfachen Beispiel ist ersichtlich, dass eine graphische Modellierung nur für sehr kleine Probleme zweckmäßig ist. Für größere Probleme wird der I/O-Graph sehr umfangreich und unübersichtlich.

Wird das obige Beispiel des Getränkekastens noch näher betrachtet, so kann festgehalten werden, dass es die Kriterien eines Verfahrenswahlproblems genau genommen nicht erfüllt. Für die Verfahrenswahl wird vorausgesetzt, dass der Input bekannt ist. Außerdem ist eine Bedingung für die Verfahrenswahl bei der Nutzung eines Inputs, dass es sich stets um dieselbe Inputart handelt.⁴¹ Diese beiden Annahmen sind im Beispiel jedoch verletzt. Der Getränkekasten mit sechs Flaschen als Input erscheint zwar immer als dieselbe Inputobjektart, ist aber als Objektsorte, bedingt durch die variable Anzahl Gut- und Fremdflaschen als Komponenten, jedes Mal verschieden.⁴² Darüber hinaus ist die genaue Zusammensetzung des Kastens vor der Sortierung immer zufällig und unbekannt. Auch für den Fall, dass der Input bekannt wäre, läge keine freie Wahl des Verfahrens vor, da, abhängig vom Input, immer genau ein bestimmtes Verfahren angewendet werden muss, um die Fremdflaschen abzutrennen. Dies wäre dann eine determinierte Produktion mit einem zuvor bestimmten Verfahren. Daher wäre es bezüglich des obigen Beispiels eher sinnvoll, von einer Kombination von Verfahren zu sprechen als von Verfahrenswahl. Insgesamt erscheint auch der Terminus ‚Sortierung‘ an dieser Stelle nicht vollständig zutreffend. Es findet zwar eine Zuordnung anhand eines bestimmten (Trenn-)Merkmals statt, aber der Vorgang an sich ist eher als ‚Entbündelung‘ anzusehen.

Um die Vorstellung eines Sortierprozesses dennoch beibehalten zu können, müssen die bisherigen Überlegungen erweitert werden. Die Darstellung in Abbildung 5.6 kann gedanklich in zwei Teile aufgebrochen werden, die nun jeweils eigene Prozesse bilden und abbilden. Die Sortierung besteht demnach aus einer Inspektion einerseits und der eigentlichen Entbündelung des Kastens andererseits. Beide Prozesse zusammen bilden dann eine zweistufige Technik, die sich wie folgt zusammensetzt:

⁴⁰ Der Pfeil zur Objektart der Fremdflaschen ist hier der Vollständigkeit halber angegeben, er könnte auch weggelassen werden, da keine Fremdflaschen abgetrennt werden.

⁴¹ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 228.

⁴² Vgl. zur Unterscheidung von Objektarten und Objektsorten Souren (1996b), S. 87ff.

Der Entbündelungsprozess kann alternativ als determinierte Technik oder als Verfahrenswahl modelliert werden. Im Fall einer determinierten Technik ist der Input bekannt (vgl. Abbildung 5.7 links, Objektarten 1 bis 7, hierbei steht GF für Gutflaschen und FF für Fremdflaschen). Es gibt zu jeder Inputobjektart einen eigenen determinierten Prozess (vgl. Abbildung 5.7 Mitte). Die Vorgabe für diesen Prozess ist, dass immer alle Fremdflaschen entnommen werden.

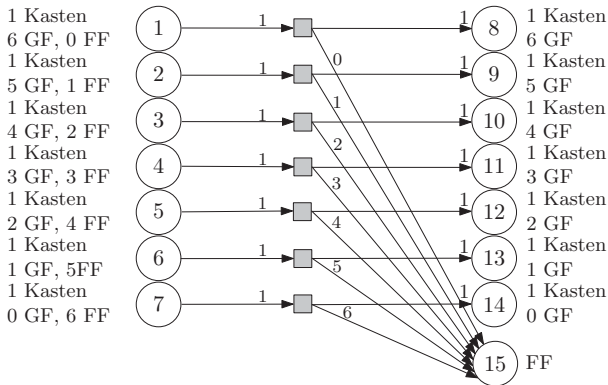


Abbildung 5.7: I/O-Graph der determinierten Technik zum Beispiel des Getränkekaustens

Abhängig davon, welche Ausprägung des bestückten Kastens vorliegt, wird der zugehörige Prozess durchgeführt. Insgesamt gibt es in Abbildung 5.7 sieben mögliche Kombinationen aus einem Kasten, Gutflaschen und Fremdflaschen. Jeder dieser Kombinationen ist ein eigener Prozesskasten zugeordnet, sodass sieben verschiedene determinierte Prozesse existieren.

Für die Modellierung als Verfahrenswahl gilt die gleiche Vorbedingung: Der Input mit der genauen Anzahl richtiger Flaschen und Fremdflaschen ist bekannt. Im Gegensatz zur determinierten Technik gibt es allerdings keine Vorgabe, wie sortiert bzw. entbündelt werden soll. Denkbar ist beispielsweise, dass die Sortierung im Auftrag weiterer Unternehmen erfolgt, die unterschiedliche Angaben zur Sortenreinheit vorgeben, wobei es dem Sortierer überlassen bleibt, welche entbündelten Gebinde er den jeweiligen Kunden zuordnet.

Abbildung 5.8 zeigt den I/O-Graphen für einen ausgewählten Kasten mit 4 richtigen Flaschen und 2 Fremdflaschen. Es gibt für die Entbündelung drei mögliche Verfahren. Dabei können beide Fremdflaschen, eine Fremdflasche oder keine der Fremdflaschen

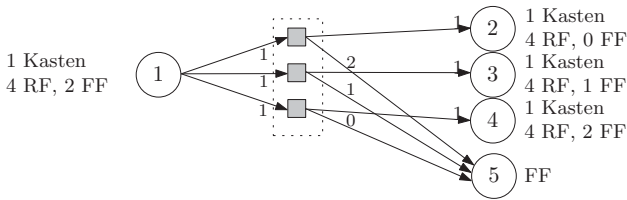


Abbildung 5.8: I/O-Graph zur Verfahrenswahl am Beispiel eines Getränkekastens (dies entspricht dem Beispiel aus Abbildung 5.3)

entnommen werden. Abhängig davon, für welchen seiner Kunden der Sortierer Flaschen und Kästen entbündelt, wird ein geeignetes Verfahren gewählt. Für ein Unternehmen, das sehr enge Fehlertoleranzen ansetzt, wird das obere Verfahren gewählt, wohingegen für ein anderes Unternehmen, das auch nicht-sortenreine Kästen mit z. B. zwei Fremdfaschen akzeptiert, eins der beiden anderen Verfahren gewählt werden kann. Die endgültige Wahl ist dann abhängig von den Kosten der Verfahren. In der Praxis ist es unwahrscheinlich, dass diese Verfahrenswahl angewendet wird. Es ist davon auszugehen, dass dort immer nur das erste Verfahren in Anspruch genommen wird und alle Fremdfaschen aussortiert werden.

Falls jedoch der Input hinsichtlich seiner Komponenten zufällig und unbekannt ist (ein Kasten mit sechs unbekanntem Flaschen), muss der Entbündelung zunächst ein weiterer Prozess vorgeschaltet werden. Dieser Prozess dient dazu, die unbekanntem Komponenten zu analysieren und im Anschluss an den passenden Entbündelungsprozess zu überführen. Die innerhalb dieses Identifikationsprozesses vollzogene Umwandlung verändert allein das Verständnis der Komponenten, jedoch nicht die Komponenten an sich. Dieser Transformationsprozess kann als **gedankliche Komponentenveränderung** bezeichnet werden.⁴³ Im vorliegenden Beispiel wird der eintreffende Getränkekasten mit sechs unbekanntem Flaschen im Rahmen des Identifikationsprozesses untersucht und die einzelnen unbekanntem Flaschen dabei als Gut- oder Fremdfaschen erkannt. Der Kasten verlässt diesen Prozess als gedanklich umgewandelte Objektsorte (Kasten mit bekannter Zuordnung der Flaschen), ohne dass an den Flaschen bzw. dem Kasten eine materielle Veränderung vollzogen wurde.

Werden die beiden Teilprozesse Inspektion und vollständige Entbündelung gekoppelt, entsteht der in Abbildung 5.9 dargestellte zweistufige Prozess.

⁴³ Vgl. Souren (2002), S. 298.

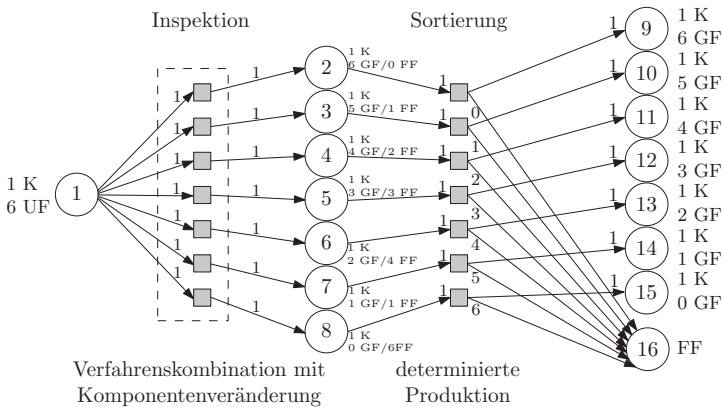


Abbildung 5.9: Zweistufiger Sortierprozess eines Getränkekastens (Die Abkürzung K steht für den Kasten und UF für unbekannte Flasche.)

Im linken Teil der Abbildung ist der dem Sortierprozess vorgeschaltete Verfahrenskombinationsprozess mit der gedanklichen Komponentenveränderung zu sehen. Der Kasten mit sechs unbekanntem Flaschen (Objektart 1) wird inspiziert und in die passende Objektart entsprechend der Anzahl Gutflaschen und Fremdflaschen (Objektarten 2 bis 8) überführt. Diese jetzt identifizierten Objektarten 2 bis 8 werden als Inputobjektarten im anschließenden (determinierten) Sortierprozess sortiert, sodass letztendlich nur noch Kästen mit Gutflaschen in unterschiedlicher Stückzahl (Objektarten 9 bis 15) sowie die Fremdflaschen (Objektart 16) vorhanden sind.

Komponentenmodellierung einer flexiblen Technik

Die Komponentenmodellierung kann auch in eine flexible Technik eingebunden werden. Für einen Sortierprozess mit nur einer Inputart ergeben sich dann auf der Prozessebene reine Verschiebeprozesse, und in der Komponentensicht ist die divergierende Struktur weiterhin erkennbar. Abbildung 5.10 zeigt den I/O-Graph mit Komponentenmodellierung für eine flexible Technik. Die Pfeile verlaufen jetzt von Komponente zu Komponente über die Prozesskästen. Zudem heben die rot markierten Pfeile die divergente Struktur für die erste Komponente nochmals exemplarisch hervor.

Die Inputobjektart (GS) ist ein Gemisch aus einer Wertstoffkomponente (GS,WS) und einer Reststoffkomponente (GS,RS). Die Sortierung soll nach Wertstoff (WS) und Reststoff (RS) erfolgen. Der erste und letzte Prozess ergeben eine korrekte Sor-

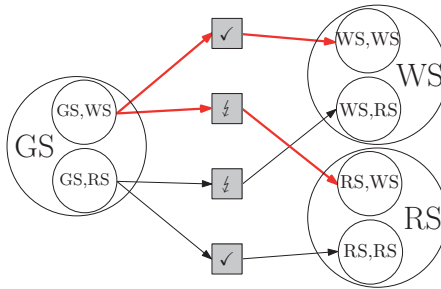


Abbildung 5.10: Komponentenmodellierung einer völlig flexiblen Technik (in Anlehnung an Souren (2012), S. 336)

tierung (✓). Der zweite und dritte Prozess hingegen erzeugen Fehlwürfe (⚡), sodass die Wertstoffkomponente (GS,WS) in den Reststoffoutput (RS,WS) verschoben wird bzw. die Reststoffkomponente (GS,RS) in die Wertstofffraktion (WS,RS) überführt wird. Hier ist ebenfalls erkennbar, dass eine steigende Zahl Komponenten die Komplexität des Graphen erhöhen würde und die graphische Darstellung dann nicht mehr zweckmäßig wäre. Durch geeignet formulierte Restriktionen kann die völlig flexible Technik zu einer in Grenzen variierbaren Produktion ‚eingeschränkt‘⁴⁴ werden, auf die auch die Komponentenmodellierung anwendbar ist.

Zwischenfazit

Für Sortierprozesse kann festgehalten werden, dass sie grundsätzlich eine divergente Struktur aufweisen. Sie lassen sich als Verfahrenswahlproblem bei Inputnutzung, völlig flexible Technik oder unter Beachtung von Restriktionen als in Grenzen variierbare Produktion (jeweils mit Komponentenmodellierung) formal modellieren und in I/O-Graph anschaulich darstellen. Da bei der Verfahrenswahl schon für sehr kleine Fälle sehr viele Verfahren und Kombinationsmöglichkeiten – infolgedessen auch sehr unübersichtliche I/O-Graphen – entstehen (vgl. das Beispiel zum 6er Getränkekasten), ist diese Technik bei umfangreicheren Produktionen nicht mehr handhabbar. Bei der Entwicklung des Sortiermodells im nächsten Kapitel steht daher die in Grenzen frei variierbare Technik im Vordergrund, die allgemeiner und kompakter darstellbar ist. Sie umfasst die Verfahrenswahl sowie die völlig flexible Technik und bietet bei der

⁴⁴ Die Einschränkung durch Restriktionen ist nur eine scheinbare Einschränkung, da sich insbesondere durch die Restriktionen eine Vielzahl weiterer Modellierungsmöglichkeiten ergibt.

Formulierung des Objektflusses und durch die Berücksichtigung von Restriktionen den größten gestalterischen Freiraum.

5.2 Vergleich mit strukturähnlichen Prozessen

Demontage

Ein Sortierprozessen strukturell ähnlicher Prozess aus dem Bereich Reverse Logistics ist die **Demontage**. Sie weist ebenfalls eine divergierende Prozessstruktur auf. Dem Demontageprozess wird ein Inputobjekt zugeführt, das zuvor bei der Montage aus verschiedenen Komponenten zusammengefügt wurde. Die Zusammenfügung in der Montage kann allgemein auf zwei Arten erfolgen. Zum einen gibt es lösbare Verbindungen, wie Steck- oder Schraubverbindungen, und zum anderen nicht-lösbare Verbindungen, z. B. durch Kleben oder Nieten. Lösbare Verbindungen können bei der Demontage zerstörungsfrei wieder gelöst werden. Feste Verbindungen können nur durch eine zerstörerische Demontage wieder gelöst werden, bei der oftmals auch die verbundenen Komponenten beschädigt oder zerstört werden.⁴⁵ Abbildung 5.11 zeigt für das stark vereinfachte Beispiel der Altfahrzeuggestaltung den I/O-Graphen mit divergierender Prozessstruktur.⁴⁶

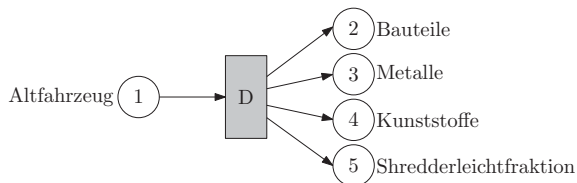


Abbildung 5.11: I/O-Graph eines Altfahrzeuggestaltungsprozesses

Das Altfahrzeug (Objektart 1) wird im Demontageprozess D in die Outputobjektarten ‚Bauteile‘, ‚Metalle‘, ‚Kunststoffe‘ und ‚Shredderleichtfraktion‘ zerlegt.⁴⁷ Wie es bei der Sortierung unterschiedliche Verfahren gibt, die Komponenten zu trennen, so ist es auch bei der Demontage möglich, unterschiedliche technische Methoden einzusetzen. Diese Verfahren können eine unterschiedliche Reihenfolge der Abtrennung

⁴⁵ Vgl. Spengler (1994), S. 14.

⁴⁶ Hier wird zum Vergleich ein sehr vereinfachtes Beispiel der Altfahrzeuggestaltung unterstellt. Tatsächlich besteht ein Fahrzeug aus mehreren Tausend Komponenten und bis zu mehreren Zehntausend einzelnen Teilen.

⁴⁷ Vgl. zu Materialfraktionen bei der Altfahrzeuggestaltung Zumkeller (2005), S. 62–67.

bzw. Demontagetiefe haben oder bei der quantitativen Ausbringung der einzelnen Komponenten voneinander abweichen. Daher ist auch die Demontage als Verfahrenswahl modellierbar (Abbildung 5.12).

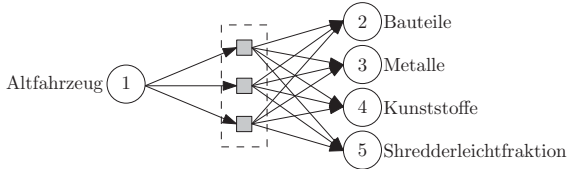


Abbildung 5.12: Modellierung der Demontage als Verfahrenswahl am Beispiel des Fahrzeugrecyclings

Eine weitere Gemeinsamkeit von Sortierung und Demontage ist, dass ihr Ziel in der Abtrennung der einzelnen Komponenten aus der Inputobjektart liegt.⁴⁸ Daher kann für die Demontage auch die Komponentenmodellierung angewendet werden. Wie schon für die Sortierung in Abbildung 5.9 gezeigt wurde, so ist auch die Demontage nicht immer nur ein einstufiger Prozess. Sie ist vielmehr eine mehrstufige Aneinanderreihung einstufiger Prozesse.⁴⁹ In jedem Demontageschritt wird nur eine Komponente bzw. werden nur wenige Komponenten abgetrennt.

Fehlerhafte Zuordnungen von Komponenten in die falschen Outputobjektarten können, wie Fehlwürfe bei der Sortierung, vorkommen. Sie werden durch Anhaftungen, bei zerstörerischer Demontage nicht sauber getrennt oder nicht mehr trennbare Komponenten verursacht. Im Unterschied zur Sortierung sind aber bei der Demontage alle in der Inputobjektart enthaltenen Komponenten aus der Montage, technischen Zeichnungen o. Ä. bekannt. Für ausgewählte bzw. neuere Fahrzeuge existieren Demontagehandbücher, in denen die Komponenten und ihre Platzierung im Fahrzeug sowie die Demontageoptionen beschrieben sind. Daher ist die Demontage i. d. R. von vornherein strukturierter als die Sortierung, deren Input unbekannte Komponenten in unbekannter Quantität enthält. Die Demontage kann aufgrund dessen sogar weitestgehend als deterministischer Prozess angesehen werden. Planungsprobleme der Demontage befassen sich daher weniger mit der korrekten Abtrennung und richtigen Zuordnung der Komponenten, sondern mit der optimalen Demontagetiefe oder der optimalen Demontagesequenz.⁵⁰

⁴⁸ Vgl. Souren (1996b), S. 83.

⁴⁹ Vgl. Souren (1996b), S. 74.

⁵⁰ Vgl. zu Planungsvorgängen von Demontageprozessen z. B. Spengler (1994) und Huber (2001).

Transportprozesse

Neben der Demontage weisen auch logistische Prozesse, wie **Transportprozesse**, ähnliche Strukturen zur Sortierung auf.⁵¹ In der Logistik-Literatur wird als einfachstes Problem das (klassische) Transportproblem genannt. Es wird mit Hilfe eines bipartiten Graphen⁵² abgebildet. Für Anbieter und Nachfrager werden Knoten eingeführt, und jeder Angebotsknoten wird mit jedem Nachfrageknoten durch einen Pfeil, auch als gerichtete Kante oder Bogen bezeichnet, verbunden. Die Angebots- und Nachfragemengen sind an den Knoten vermerkt (vgl. Abbildung 5.13 auf der nächsten Seite). Falls keine Transportverbindung zwischen zwei Knoten existiert, wird der Pfeil weggelassen.⁵³

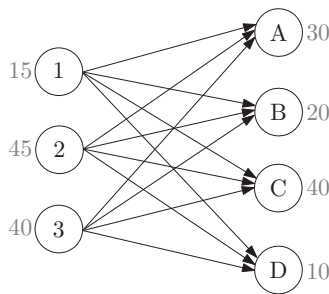


Abbildung 5.13: Graph eines klassischen Transportproblems mit 3 Anbietern und 4 Nachfragern (in Anlehnung an Grünert/Irnich (2005), S. 50)

DYCKHOFF nennt diese Form des Graphen kompakte I/O-Graphen, da er keine Prozesskästen enthält.⁵⁴ Diese können vernachlässigt werden, weil bei einer voll flexiblen Produktion alle Prozesse vom Typ (1:1) sind und die Input- und Outputkoeffizienten gleich 1 sind. Der elementare Prozess kann daher durch einen Pfeil ersetzt werden. Die Bögen im klassischen Transportproblem sind unkapazitiert, und es wird genau die Quantität verschoben (transportiert), die nachgefragt wird. Bei der völlig

⁵¹ Ein erster Ansatz, Transportprozesse aktivitätsanalytisch – aber nicht graphentheoretisch – zu formulieren, geht bereits zurück auf KOOPMANS und KOOPMANS/REITER, vgl. Koopmans (1951), S. 37, und Koopmans/Reiter (1951), S. 222–259.

⁵² Ein Graph wird als bipartit bezeichnet, wenn sich die Knoten in zwei disjunkte Mengen teilen lassen und zwei Knoten der gleichen Teilmenge nicht direkt miteinander verbunden sind, vgl. Grünert/Irnich (2005), S. 36.

⁵³ Vgl. hierzu und im Folgenden Grünert/Irnich (2005), S. 50. Für einen Graphen mit vernachlässigten Transportverbindungen vgl. Domschke (2007), S. 42.

⁵⁴ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 235f.

flexiblen Technik wird statt des Produktionsniveaus λ die verschobene Menge angegeben.⁵⁵

SOUREN zieht einen Vergleich zwischen Sortier- und Transportprozessen, da für diese beiden eine Modellierung als völlig flexible Technik in Anbetracht der oftmals sehr großen Anzahl darzustellender Prozesse zweckmäßig erscheint.⁵⁶ Bei näherer Betrachtung und dem Vergleich der graphischen Knotenrelationen von Sortierprozessen und Transportmodellen werden neben der Gleichartigkeit auch Abweichungen ersichtlich. Dies ist darin begründet, dass die Sortierung von Komponenten aus einer Inputobjektart kein völlig flexibler Prozess ist. Beim Transportprozess wird von jedem Angebotsort jeder Nachfrageort angefahren (vgl. Abbildung 5.13). Bei der Sortierung sind die Komponenten sowohl in der Inputobjektart als auch in den Outputobjektarten gebündelt (vgl. Abbildung 5.10, hier sind die Komponenten 1 und 2 in der Inputobjektart 1 und auch in beiden Outputobjektarten 2 und 3 enthalten.) Wird der Graph aus Abbildung 5.10 in einen kompakten Graphen übertragen, ist sofort erkennbar, dass nicht zwischen allen Input- und Outputkomponenten (die den Angebots- und Nachfrageknoten entsprechen) Verbindungen bestehen, sondern nur ganz bestimmte Relationen existieren.

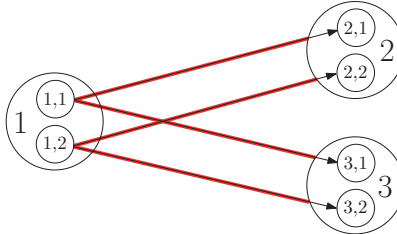


Abbildung 5.14: Kompakter I/O-Graph der flexiblen Komponentenmodellierung eines Sortierprozesses

In Abbildung 5.14 ist zu sehen, dass von jeder Inputkomponente (1,1) und (1,2) eine Verbindung zu jeder Outputobjektart (2 und 3) besteht (rot hinterlegt). Aus Komponentensicht gibt es von den Inputkomponenten jedoch nur die Verbindungen zur jeweils gleichartigen Komponente in den Outputobjektarten: (1,1) ist mit (2,1) und (3,1) verbunden, (1,2) mit (2,2) und (3,2). Die Komponente (1,1) kann nicht in (2,2) oder (3,2) verschoben werden, da bei der Sortierung nur eine Verteilung der Kom-

⁵⁵ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 235f., Dyckhoff (1995), S. 270–274, Grünert/Irnich (2005), S. 50, und Dyckhoff (2006), S. 100f.

⁵⁶ Vgl. Souren (2004a), S. 131, und Souren (2004b), Folie 16.

ponenten in die Outputobjektarten erfolgt und keine Komponentenveränderung.⁵⁷ Dennoch ist in jeder Outputobjektart jede Komponente enthalten.

Das nachfolgende Beispiel eines Transportprozesses soll die unterschiedlichen Sichtweisen zum Sortiermodell und gleichzeitig innerhalb des Sortiermodells weiter verdeutlichen. Im Transportprozess sollen von den Anbieterknoten 1 und 2 Güter zu den Nachfrageknoten A bis D transportiert werden. Im klassischen Transportmodell gibt es nun Verbindungen von jedem Anbieter zu jedem Nachfrager, insgesamt acht Relationen (vgl. Abbildung 5.15, links).

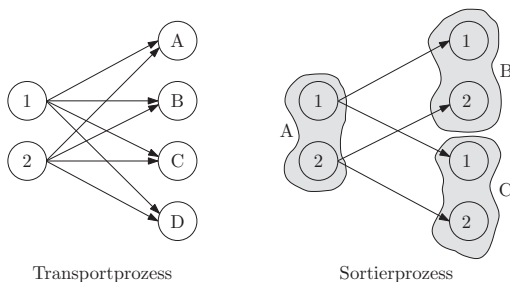


Abbildung 5.15: Graphisches Beispiel zum Vergleich von Transport- und Sortierprozessen sowie den unterschiedlichen Betrachtungsebenen

Angenommen die Anbieter werden zu einem Gebietsanbieter zusammengefasst und jeder der beiden vormals eigenständigen Anbieter stellt nur ein Gut her, vereinfacht als Gut 1 und Gut 2 bezeichnet, so würde dies einem Gelben Sack als Input der Sortierung entsprechen, der zwei verschiedene Komponenten, z. B. PET und Aluminium, enthält. Auf der Nachfrageseite wird ebenfalls angenommen, dass jeweils zwei Nachfrager zu einem Zielgebiet zusammengefasst werden und in jedes Zielgebiet von einem Transportfahrzeug sowohl etwas von Gut 1 als auch von Gut 2 geliefert wird. Dies entspricht bei der Sortierung den Outputobjektarten, in denen neben der gewünschten Komponente auch Fehlwürfe anderer Komponenten enthalten sind. Die Anzahl Relationen hat sich bei der Gebietszusammenfassung nun ebenfalls von acht auf vier verringert (vgl. Abbildung 5.15, rechts).

Grundsätzlich interessieren bei der Sortierung auf der Inputseite die einzelnen Komponenten, auch wenn sie in einer Inputobjektart gebündelt sind. Auf der Outputseite sind hingegen die Outputobjektarten mit ihren Quantitäten von Interesse, in denen mehrere Komponenten gebündelt sind. Deren einzelne Quantitäten sind zwar vorder-

⁵⁷ Aus einer PET-Flasche entsteht z. B. in der Sortierung nicht plötzlich eine Aluminiumflasche.

gründig nicht mehr relevant, können aber z. B. für eine Reinheitsmessung noch von Bedeutung sein. Durch den Sortierprozess erfolgt also ein Übergang von der Komponentenebene (Input) zur Objektebene (Output). Im Transportmodell existiert allein eine Betrachtungsebene, die Objektebene, da hier nicht die Verteilung unterschiedlicher Transportobjekte, sondern nur die Verteilung eines einzelnen, immer gleichen Transportobjekts betrachtet wird. Eine Darstellung der einzelnen Komponenten als Objektarten im Sortiermodell wäre jedoch nicht angemessen. Der Zweck der Sortierung, die Abtrennung einzelner Komponenten aus einem Bündel, die ja erst dann Sinn macht, wenn mehrere Komponenten eine Objektart konstituieren, würde nicht widerspiegelt. Diese Bündelung des Inputs zieht sich für die Sortierung durch alle Technikformen und ist nicht nur auf die flexible Technik begrenzt.

Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass Transportprozesse sich häufig auf zwischenbetriebliche Transporte bzw. Transporte zwischen Orten beziehen, d. h. sie werden auf einer Makroebene abgewickelt. Die Durchführung von Sortierprozessen hingegen findet gewöhnlich vollständig innerhalb eines Entsorgungsunternehmens bzw. eines Standortes statt. Diese rein innerbetrieblichen Verschiebeprozesse könnten jedoch, begründet durch die Ähnlichkeit der Strukturen, als **Transportprozesse auf Mikroebene** angesehen werden.

Kapitel 6

Grundüberlegungen zur Modellierung und Gestaltung der Nebenbedingungen

6.1 Entscheidungsvariablen und Massenbilanzen als strukturelle Basis der Modellformulierung

Auf Basis der im vorherigen Kapitel erarbeiteten Struktur von Sortierprozessen sollen im Folgenden grundlegende Überlegungen angestellt werden, diese Strukturen in ein Optimierungsmodell zu übertragen. Nach DOMSCHKE und DREXL besteht ein Optimierungsmodell in der einfachsten Form aus einer Alternativenmenge und einer bewertenden Zielfunktion.¹ Formal wird dies durch die Zielfunktion und eine speziell auf das zugrunde liegende Problem angepasste Anzahl von Nebenbedingungen ausgedrückt.² Als verbindendes Element zwischen Zielfunktion und Nebenbedingungen fungieren die Entscheidungsvariablen. Sie stellen die zu optimierende Größe dar. Für das hier vorliegende Optimierungsproblem ist es erforderlich, die Entscheidungsvariablen aus der Modellstruktur heraus zu identifizieren.³

In Abschnitt 5.1.3 wurde bereits untersucht und dokumentiert, dass Sortierprozesse (quantitative) Zusammenhänge auf drei unterschiedlichen Ebenen, der Prozessebene,

¹ Vgl. hierzu und im Folgenden Domschke/Drexel (2007), S. 3f.

² I. d. R. stellt das Nebenbedingungssystem des Optimierungsmodells ein Erklärungsmodell dar, vgl. Domschke/Drexel (2007), S. 5.

³ Die Ausführungen zur Gestaltung der Zielfunktion erfolgen in Kapitel 7.

der Objektebene und der Komponentenebene, aufweisen. Für das Optimierungsmodell gilt es nun, diese drei Ebenen miteinander zu verknüpfen. Die oberste Ebene ist die **Prozessebene**. Hier sind Inputobjekte und Outputobjekte über den Sortierprozess miteinander verbunden. Die Inputquantität wird durch den Prozess auf mehrere unterschiedliche Outputobjektarten verteilt. Die Massenbilanzen der Objektknoten bilden diese Verteilung der Quantitäten ab. Ihnen ist als Grundannahme unterstellt, dass der Prozess verlustfrei durchgeführt wird. Die Quantitäten auf der Outputseite insgesamt sind demnach gleich den gesamten Quantitäten der Inputseite. Aus der Sicht jedes einzelnen Objekts gelten Bilanzrelationen sowohl auf der Input- als auch auf der Outputseite (**Objektebene**). Das heißt die von einer Inputobjektart auf mehrere Outputobjektarten verteilte Quantität entspricht in der Summe eben der Quantität der Inputobjektart.

Der Detaillierungsgrad auf Prozess- und Objektebene zur Beschreibung und Erklärung von Sortierprozessen war noch nicht ausreichend, daher wurde in Abschnitt 5.1.3 die Komponentenmodellierung eingeführt. Damit wurden die Objektarten weiter in einzelne Komponenten aufgespalten und die Sichtweise der **Komponentenebene** geschaffen. Für die Komponentenquantitäten, die sich sowohl in der Inputobjektart als auch in den Outputobjektarten des Sortierprozesses finden, existieren ebenfalls mehrere Formen der Massenbilanzen. Dies ist einerseits die Massenbilanz einer Objektart, deren Komponentenquantitäten der unterschiedlichen (enthaltenen) Komponenten in Summe die Objektartquantität ergeben müssen. Andererseits bestehen auch Massenbilanzen für Quantitäten einer Komponente, die auf unterschiedliche (Output-)Objektarten verteilt wurden. Auch auf der Komponentenebene wird die Verlustfreiheit der verschobenen Quantitäten unterstellt. Über die Massenbilanzen werden also die verschobenen Quantitäten sowohl der Komponenten als auch der Objektarten erfasst. Diese verschobenen Quantitäten sind jedoch nicht vorab fixiert, sondern werden erst durch den Prozess selbst bestimmt.

Formal sollen die Verschiebequantitäten durch das in Abschnitt 5.1.2.2 eingeführte Symbol λ dargestellt werden. Über Indizes sollen die Quelle (Input) sowie die Senke (Output) der Verschiebequantität erfasst werden. i kennzeichnet dabei die Inputobjektarten⁴ und j die Outputobjektarten. Zusätzlich wird noch ein weiterer Index k eingeführt, der sowohl auf der Input- als auch auf der Outputseite die Komponenten abbildet. λ_{kij} ist demnach die Quantität der Komponente k aus der Inputobjektart

⁴ Vgl. S. 104f.

i , die in die Outputobjektart j verschoben wird.⁵ v steht für die Inputquantität⁶ und u für die Outputquantität.

Die Massenbilanzen⁷ eines ersten Grundmodells ergeben sich damit als:

$$v_i = \sum_k v_{ki} \quad \forall i \quad (6.1)$$

$$v_{ki} = \sum_j \lambda_{kij} \quad \forall k, i \quad (6.2)$$

$$\sum_i \lambda_{kij} = u_{kj} \quad \forall k, j \quad (6.3)$$

$$\sum_k u_{kj} = u_j \quad \forall j \quad (6.4)$$

$$\lambda_{kij} \geq 0 \quad \forall k, i, j. \quad (6.5)$$

Restriktion (6.1) ist die Massenbilanzgleichung der Inputobjektart i . In ihr wird festgehalten, dass die Summe über alle Komponentenquantitäten die Quantität von i ergibt. Für den hier unterstellten divergierenden Sortierprozess **ist eine Indizierung des Inputs gewöhnlich nicht erforderlich**, da davon ausgegangen wird, dass es als **einzige Inputobjektart** nur ein Abfallgemisch gibt.⁸ Zur eindeutigen Kennzeichnung und Unterscheidung von Input- und Outputobjekten wird die Indizierung hier allerdings beibehalten. (6.2) bilanzieren für alle Komponenten der Inputobjektarten, dass die gesamte Inputquantität verschoben wird.⁹ Die Verschiebequantitäten λ_{kij} werden komponentenweise in die jeweiligen Outputobjektarten j überführt (6.3). Schließlich werden mit der Bündelung der einzelnen Komponentenquantitäten die jeweiligen Outputobjektartquantitäten bestimmt (Restriktion (6.4)). Die Nichtnegativitätsbedingungen (6.5) stellen sicher, dass nur positive Quantitäten oder gar nichts verschoben wird. (6.1) bis (6.5) bilden das Nebenbedingungssystem des Ausgangsmodells eines Sortierprozesses.

⁵ Im Folgenden soll für die Indizierung gelten, dass Benennungsindizes hochgestellt und laufende Indizes tiefgestellt angegeben werden.

⁶ Die Inputquantitäten der einzelnen Komponenten werden in diesem Kapitel als zunächst bekannt vorausgesetzt.

⁷ Alternativ kann auch von Mengenbilanzen gesprochen werden. Abfälle werden jedoch nicht als Einzelobjekte gezählt, sondern in Kilogramm oder Tonnen gemessen. Somit erscheint der Begriff Massenbilanz zweckmäßiger.

⁸ Hier und im Folgenden wird als Beispiel für den Sortierprozess zumeist auf die Wertstoffsorrierung verwiesen. Dabei wird der Gelbe Sack als Abfallinput und mindestens eine Wertstoff sowie eine Reststofffraktion als Sortieroutput angenommen.

⁹ Die Verwendung der Pluralform für augenscheinlich nur eine einzelne Restriktion mag zunächst verwirrend erscheinen. Dies ist jedoch durch die hier verwendete Normalform für Optimierungsmodelle begründet, die mehrere gleiche Restriktionen verkürzt z. B. $\forall k$ darstellt. Tatsächlich muss die Restriktion bei der Lösung des Modells k -mal aufgestellt werden, sodass die Verwendung des Plurals bei der Erläuterung zweckmäßig ist.

In den Massenbilanzen werden nicht nur korrekt verschobene Quantitäten erfasst, d. h. die Quantität einer ausgewählten Komponentenart der Inputseite wurde in die richtige Outputobjektart verschoben.¹⁰ Es werden durch sie auch Fehlwürfe abgebildet, wenn z. B. eine Inputkomponente in die falsche Outputobjektart abgetrennt wurde. I. d. R. werden jedoch möglichst (sorten-)reine Outputobjektarten gewünscht. Zur Feststellung, wie gut sortiert wurde und wie rein die resultierenden Objektarten sind, können die Kennzahlen **Abtrennungsgrad** und **Sortenreinheit** herangezogen werden.¹¹ Die Sortenreinheit beschreibt innerhalb eines Outputknotens, wie rein die aussortierte Objektart ist, d. h. welchen Anteil die gewünschte Komponente an der gesamten Quantität der Objektart besitzt. Die Sortenreinheit¹² β ist nach SOUREN definiert als:

$$\beta = \frac{\text{abgetrennte Komponentenquantität}}{\text{Objektartquantität}} \quad \text{bzw.} \quad \beta_{kj} \stackrel{13}{=} \frac{u_{kj}}{u_j} = \frac{\sum_i \lambda_{kij}}{u_j} \quad (6.6)$$

β_{kj} ist die Sortenreinheit der Outputobjektart j , die sich als Anteil der Quantität u_{kj} der gewünschten Komponente ($k = j$) in der Outputobjektart bezogen auf die Objektartquantität von j ergibt. u_{kj} entspricht den aus den Inputobjektarten i in j verschobenen Quantitäten der Komponente k , λ_{kij} . Aus diesem Grund kann u_{kj} in der Formel durch die Summe der Komponentenquantitäten λ_{kij} aus dem Input i ersetzt werden, und der Zusammenhang zwischen der Sortenreinheit und der Verschiebequantität wird unmittelbar ersichtlich.

Der Abtrennungsgrad gibt hingegen an, wie viel von einer Komponente aus der ursprünglich im Input enthaltenen Quantität dieser Komponente v_{ki} in die Outputobjektart j verschoben wurde. Er setzt damit Input und Output in ein Verhältnis und ist zudem komponentenbezogen. Nach SOUREN ist der Abtrennungsgrad¹⁴ α definiert

¹⁰ Die richtige Zuordnung von (Input-)Komponente zu Outputobjektart erfolgt in der Sortierung genau dann, wenn es sich um die gleiche Materialfraktion handelt. D. h. wenn also die PET-Flaschen aus dem Gelben Sack (Inputkomponente) in den Container für PET-Flaschen (Outputobjektart) abgetrennt wurden.

¹¹ Zu Abtrennungsgrad und Sortenreinheit vgl. Souren (1996b), S. 140–143.

¹² Vgl. Souren (1996a), S. 65.

¹³ Die Summe in dieser und der nachfolgenden Formel ist nur mathematische Konvention. Sie stellt sicher, dass – falls es mehrere verschiedene Inputobjektarten i gibt, die (zumindest teilweise) die gleichen Komponenten besitzen – die aus allen Inputobjektarten nach j verschobenen Komponentenquantitäten gemeinsam berücksichtigt werden.

¹⁴ Vgl. Souren (1996a), S. 65.

als:

$$\alpha = \frac{\text{abgetrennte Komponentenquantität}}{\text{im Abfall enthaltene Komponentenquantität}} \quad \text{bzw.} \quad \alpha_{kj} = \frac{u_{kj}}{\sum_i v_{ki}} = \frac{\sum_i \lambda_{kij}}{\sum_i v_{ki}} \quad (6.7)$$

Auch für den Abtrennungsgrad können die Quantitäten in Zähler und Nenner durch die Verschiebequantitäten λ_{kij} bzw. die Objektknotenteilquantität abgebildet werden, sodass für α ebenfalls der Zusammenhang einzelner Quantitäten deutlich wird. Beide Kennzahlen, Abtrennungsgrad und Sortenreinheit, sind dimensionslos und lassen sich als Prozentzahl angeben.¹⁵ Durch sie wird die Notwendigkeit der Komponentenebene unterstrichen. Ohne diese Sichtweise gingen die für die Kennzahlen wesentlichen Informationen über die Komponentenanteile an den Outputobjektarten verloren.

Für die Wertstoffsortierung mit nur einer Inputobjektart können die beiden Formeln (6.6) und (6.7) verkürzt werden zu:

$$\beta_{kj} = \frac{\lambda_{k1j}}{u_j} \quad \text{und} \quad \alpha_{kj} = \frac{\lambda_{k1j}}{v_{k1}} \quad (6.8)$$

Um letztlich ein Optimum der Sortenreinheit bzw. des Abtrennungsgrads zu erzielen, erscheint es jedoch nicht zweckmäßig, die jeweilige Kennzahl zu maximieren. Das Maximum wäre hier jeweils bei einem Wert von 100% erreicht, was ökologisch zwar wünschenswert, ökonomisch jedoch ein unrealistisches Ziel ist. Da Abtrennungsgrad und Sortenreinheit aus den gleichen Quantitätsangaben der Komponenten ermittelt werden, auf denen auch die Massenbilanzen beruhen, ist es sinnvoll, eben diese Verschiebequantitäten zu optimieren. Dies sollte derart erfolgen, dass möglichst viel eines Wertstoffs abgetrennt, aber gleichzeitig auch eine gegebene bzw. möglichst hohe Sortenreinheit erzielt wird.¹⁶ Die Verschiebequantitäten λ_{kij} sind folglich die **Entscheidungsvariablen** des Modells.

¹⁵ Zur Bewertung eines Sortierprozesses sind immer beide Kennzahlen erforderlich. Eine hohe Abtrennung in eine Outputobjektart führt nicht zwangsläufig auch zu einer hohen Sortenreinheit. Eine hohe Sortenreinheit kann hingegen auch bei einer sehr geringen Abtrennung erzielt werden. Vgl. hierzu Souren (1996a), S. 66.

¹⁶ Abtrennungsgrad und Sortenreinheit sind zwei voneinander unabhängige Kennzahlen mit unterschiedlicher Berechnungsgrundlage, deren gleichzeitige maximale Zielerreichung theoretisch zwar möglich ist, praktisch aber nicht erreicht wird, da hiermit stark erhöhte Kosten einhergehen würden. Bei SOUREN wird daher eine der beiden Kennzahlen vorgegeben und die andere entsprechend angepasst, vgl. Souren (1996a), S. 66–73.

Vergleich mit dem Transportmodell

In Abschnitt 5.2 wurden die Modellstrukturen von Sortier- und Transportprozessen auf Analogien hin untersucht. Hierbei wurde eine große Ähnlichkeit der Prozesse festgestellt. Ob sich diese Ähnlichkeiten auch auf die mathematische Modellierung der Prozesse erstrecken, soll ein Vergleich der quantitativen Modelle, insbesondere ihrer Nebenbedingungen, zeigen.

Das klassische Transportproblem geht von mehreren Grundannahmen aus.¹⁷ Es gibt zwei Akteursphären im Modell: Die Anbieter i und die Nachfrager j . Die Anbieter i stellen jeweils eine bestimmte Quantität a_i ihres Gutes bereit. Demgegenüber haben die Nachfrager j einen Bedarf des Gutes in Höhe von b_j Quantitätseinheiten. Die Angebotsquantität ist gleich der Nachfragequantität. Zwischen Anbietern und Nachfragern erfolgt ein direkter Transport ohne Zwischenstufen; das Modell ist einstufig.¹⁸ Es muss nicht notwendigerweise eine Transportverbindung zwischen jedem Anbieter und jedem Nachfrager existieren.¹⁹ Auf den bestehenden Verbindungen werden die Quantitäten λ_{ij} von Anbieter i zum Nachfrager j transportiert. Die Transportquantitäten λ_{ij} sind unbeschränkt und werden mit dem Transportkostensatz c_{ij} bewertet. Für die Transportkosten wird üblicherweise eine lineare Kostenfunktion unterstellt.

Unter der Zielsetzung, dass die gesamte Nachfrage befriedigt wird und die dabei entstehenden Transportkosten so niedrig wie möglich sein sollen, ergibt sich folgendes formales Modell:

Notation – Klassisches Transportproblem

Indizes

i	Angebotsorte
j	Nachfrageorte

Parameter

c_{ij}	Transportkostensatz mit $c_{ij} \geq 0$
a_i	Angebotsquantität des Anbieters i mit $a_i \geq 0$
b_j	Nachfragequantität des Nachfragers j mit $b_j \geq 0$

Entscheidungsvariablen

λ_{ij}	Transportquantität von Angebotsort i zu Nachfrageort j
----------------	--

¹⁷ Vgl. hierzu z. B. Domschke (2007), S. 41f., Scholl (2002), A2-12f., sowie Grünert/Irnich (2005), S. 50.

¹⁸ Abbildung 5.13, S. 117, zeigt den (bipartiten) Graphen eines klassischen Transportproblems mit drei Anbietern und vier Nachfragern.

¹⁹ D. h. nicht jeder Anbieter muss jede Nachfrage bedienen.

Zielfunktion

$$\text{Min. } Z = \sum_i \sum_j c_{ij} \lambda_{ij} \quad (6.9)$$

U.B.d.R.

$$a_i = \sum_j \lambda_{ij} \quad \forall i \quad (\text{Mengenbilanz Angebotsmenge}) \quad (6.10)$$

$$\sum_i \lambda_{ij} = b_j \quad \forall j \quad (\text{Mengenbilanz Nachfragemenge}) \quad (6.11)$$

$$\lambda_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (\text{Nichtnegativitätsbedingung}). \quad (6.12)$$

Mit der Zielfunktion (6.9) wird die Minimierung der gesamten Transportkosten verfolgt. Die Nebenbedingungen (6.10) stellen sicher, dass die Angebotsquantitäten aller Anbieter zur Verfügung stehen, daher werden sie auch als Angebotsrestriktionen bezeichnet. Mit den Gleichungen (6.11), den Nachfragerestriktionen, wird sichergestellt, dass die Bedarfe aller Nachfrager erfüllt werden. Die Nichtnegativitätsbedingungen (6.12) sorgen dafür, dass über eine Transportverbindung (i, j) nur positive Transportquantitäten transportiert werden oder kein Transport stattfindet.

Die Nebenbedingungen des klassischen Transportproblems (6.10) und (6.11) sind, wie die Restriktionen im Sortiermodell, Mengenbilanzgleichungen, die einerseits die Verteilung eines Systeminputs (a_i in (6.10)) bzw. die Bündelung in die Systemoutputs (b_j in (6.11)) abbilden. Sie entsprechen damit den Restriktionen (6.2) und (6.3) des Sortiermodells. Die Entscheidungsvariablen des klassischen Transportmodells sind die Transportquantitäten, äquivalent zu den Verschiebequantitäten im Sortiermodell. Beide Modelle weisen also in diesen Punkten strukturelle Übereinstimmungen auf. Jedoch gibt es hinsichtlich der Annahmen Unterschiede. Im Transportmodell sind die Angebots- sowie die Nachfragequantitäten bekannt, und es findet nur noch eine (kostenminimale) Verteilung statt. Im **Sortiermodell** wird zwar zunächst auch davon ausgegangen, dass zumindest die **Inputquantitäten** bekannt sind. Die **Outputquantitäten** der einzelnen Objektarten ergeben sich i. d. R. aber **erst als Folge** der Sortierung und sind nicht vorab fix vorgegeben.

Die beiden Modelle unterscheiden sich auch hinsichtlich der Granularität der Quantitäten. Das klassische Transportproblem nimmt eine Verteilung auf Objektebene vor. Das Sortiermodell wurde dagegen bereits dahingehend verfeinert, dass die reine Objektebene ergänzt wird, indem die Inputobjektarten weiter in einzelne Komponentenquantitäten aufgespalten werden. Eine ähnliche Sichtweise weist bei den Transport-

problemen das Mehrgüterflussproblem²⁰ auf. Bei diesem Modell wird ein gerichteter Graph unterstellt; die Festlegung, welche Funktion die einzelnen Knoten erfüllen (Anbieter oder Nachfrager), erfolgt erst über die Parameterfestlegung im Rahmen eines Lösungsverfahrens. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass über die Pfeile des Graphen k unterschiedliche Güter fließen können. Die entscheidende Annahme, durch die sich die Modelle unterscheiden, ist jedoch die Kapazitierung der Pfeile, die angibt, wie viel jedes Gutes k über diese Verbindung transportiert werden kann. Neben der güterspezifischen Kapazität hat jeder Pfeil auch eine Gesamtkapazität für alle über ihn transportierten Güter. Das Modell kann in Anlehnung an GRÜNERT und IRNICH wie folgt modelliert werden:²¹

Notation – Mehrgüterflussproblem

Indizes und Mengen

i, j	Knotenindizes
k	Güterindex mit $k = 1, \dots, K$
A	Menge der Pfeile
V	Menge der Knoten
$\mathcal{V}(i); \mathcal{N}(i)$	Menge der Vorgänger- bzw. Nachfolgerknoten von i

Parameter

b_{ki}	Knotenquantität des Gutes k (Angebot oder Nachfrage)
c_{kij}	Transportkostensatz des Gutes k auf der Verbindung (i, j)
r_{kij}	untere Schranke der güterspezifischen Kapazität der Verbindung (i, j)
q_{kij}	güterspezifische Kapazität der Verbindung (i, j)
$R_{ij}; Q_{ij}$	untere bzw. obere Schranke der gemeinsamen Kapazität von (i, j)

Entscheidungsvariablen

λ_{kij}	Transportquantität des Gutes k von Knoten i zu Knoten j
-----------------	---

Zielfunktion

$$\text{Min } Z = \sum_{k=1}^K \sum_{(i,j) \in \mathbf{A}} c_{kij} \lambda_{kij} \quad (6.13)$$

²⁰ Vgl. hierzu und im Folgenden Grünert/Irnich (2005), S. 51f. Einen Überblick über Formulierungen von Mehrgüterflussmodellen gibt auch Kennington (1978).

²¹ Vgl. Grünert/Irnich (2005), S. 51. Aus Gründen der Vereinheitlichung wurde die Notation von GRÜNERT und IRNICH hier leicht modifiziert.

U. B. d. R.

$$\sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \lambda_{kij} - \sum_{j \in \mathcal{V}(i)} \lambda_{kji} = b_{ki} \quad \forall i \in \mathbf{V}, k = 1, \dots, K \quad (6.14)$$

$$r_{kij} \leq \lambda_{kij} \leq q_{kij} \quad \forall (i, j) \in \mathbf{A}, k = 1, \dots, K \quad (6.15)$$

$$R_{ij} \leq \sum_{k=1}^K \lambda_{kij} \leq Q_{ij} \quad \forall (i, j) \in \mathbf{A}. \quad (6.16)$$

In der Zielfunktion (6.13) werden die Transportkosten minimiert. (6.14) ist die Mengenbilanz der Knoten bezogen auf Gut k . Die Restriktionen (6.15) und (6.16) sind die Kapazitätsrestriktionen, einerseits für die güterspezifischen Kapazitäten (6.15) und andererseits für die gemeinsamen Kapazitäten (6.16).²² Das Mehrgüterflussmodell spaltet auf der Inputseite die Angebotsquantität nach Güterarten auf. Dies ist äquivalent zur Zerlegung des Sortierinputs in einzelne Komponenten. Ein Unterschied zum Sortiermodell liegt in der zwingenden güterspezifischen Kapazitierung der Transportverbindungen. Grundsätzlich ist eine Kapazitierung der Transportmengen in einem Sortiermodell denkbar. Hierunter könnte die flächenmäßige bzw. gewichtsspezifische Begrenzung des Förderbands bei der Aufgabe des Abfalls verstanden werden. Da der Abfall hier aber noch vermischt ist, würde nur eine Kapazitierung für die Gesamtheit der Komponenten sinnvoll erscheinen.²³

Sortiermodelle und Transportmodelle weisen neben der strukturellen auch hinsichtlich ihrer formalen Modellierung große Ähnlichkeiten auf. Jedoch existieren auch in einigen Punkten signifikante Unterschiede. Beide Modelle beruhen im Wesentlichen auf Massen- bzw. Mengenbilanzen in den Nebenbedingungen. In beiden Modellen stellen die zu transportierenden bzw. zu verschiebenden Quantitäten die Entscheidungsvariablen dar. Welche weiteren Modellierungsoptionen für Sortiermodelle möglich bzw. systematisch erforderlich sind, soll im Folgenden untersucht werden. Aufgrund der gezeigten Übereinstimmungen der Modellarten könnte es sich als sinnvoll herausstellen, ausgewählte Modellierungsoptionen aus Transportmodellen für ein Sortiermodell zu adaptieren.

²² Die Lösung des Optimierungsproblems soll hier nicht weiter verfolgt werden.

²³ Diese Form der Einschränkung und ihre Modellierung werden in Abschnitt 6.4.1 untersucht.

6.2 Übersicht über erforderliche Erweiterungen der Nebenbedingungen

Das Nebenbedingungssystem des zuvor vorgestellten einfachen Sortiermodells (6.1 bis 6.5) beschränkt sich bisher nur auf die Massenbilanzgleichungen und die Nichtnegativitätsbedingung. Das Modell ist also gekennzeichnet als unkapazitiertes, einstufiges, singuläres²⁴, reellwertiges Modell mit einem Wertstoffoutput ohne Mindestsortenreinheit. Die weiteren Modellierungsoptionen beziehen sich stets auf dieses Grundmodell aus Abschnitt 6.1 und sind in der Übersicht in Abbildung 6.1 zusammengefasst.

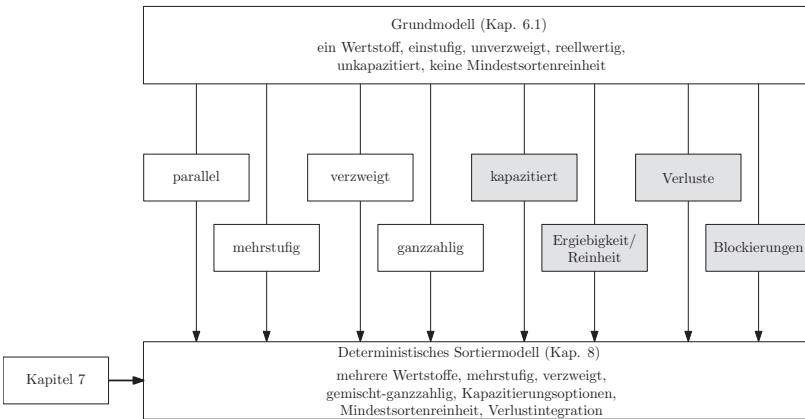


Abbildung 6.1: Übersicht über die unterschiedlichen Modellierungsoptionen der Nebenbedingungssysteme von Sortierprozessen

Im Folgenden werden die Nebenbedingungen unterschieden in strukturverändernde (weiß hinterlegt) und praxisrelevante Restriktionen (grau hinterlegt). Die strukturverändernden Nebenbedingungen bewirken, dass sich das neue Modell strukturell vom Grundmodell unterscheidet. Hierzu zählen die Mehrstufigkeit, parallele Prozesse (Sortiermaschinen) auf einer Stufe, ganzzahlige Mengenflüsse und die Erweiterung auf mehrere Wertstofffraktionen. Die praxisrelevanten Aspekte verändern die Struktur des Modells nicht zwingend, sondern belegen das Modell in der Regel mit zusätzlichen Beschränkungen. Einerseits ist dies die Kapazitätierungsoption, also die Einschränkung der (Transport-)Kapazitäten im Sortierprozess, und andererseits die rechtlich bzw. ökologisch/ökonomisch bedingte Vorgabe einer Mindestsortenreinheit

²⁴ Singulär bezeichnet an dieser Stelle die Abtrennung eines einzelnen Wertstoffs. Das Gegenstück bildet die parallele, d. h. gleichzeitige Sortierung mehrerer Wertstoffe innerhalb eines Prozesses.

sowie die Einbeziehung von Verlusten einzelner Elemente des Sortiergutstroms im Prozess.

In Kapitel 8 wird ein umfangreiches Modell eines beispielhaften Sortierprozesses mit den in diesem und im nachfolgenden Kapitel erarbeiteten Modellelementen zusammengestellt. Neben den strukturellen Nebenbedingungen und praxisrelevanten Aspekten müssten darüber hinaus zur realitätsnäheren Erfassung der Sortierprozesse auch Modellformulierungen herangezogen werden, die zufällige und schwankende Einflüsse internalisieren. Diese Modellerweiterungen werden in Teil III dieser Arbeit behandelt.

6.3 Strukturell-formale Nebenbedingungen

Die folgende Modellformulierung bezieht sich (zunächst) lediglich auf strukturelle Aspekte und ist nicht als Grundlage für eine mathematische Lösung konzipiert. Die strukturellen Änderungen des Modells sollen neben der mathematischen Formulierung, falls erforderlich, anhand eines I/O-Graphen verdeutlicht werden.

6.3.1 Parallele Aussortierung mehrerer Wertstoffe

Die Aussortierung mehrerer Wertstoffe in einem Sortierverfahren auf einer Sortierstufe kann als eine Form von Parallelität angesehen werden. Das Grundmodell sieht im einfachsten Fall eine Trennung in Wertstoff- und Reststoffoutput vor, kann aber auf die gleichzeitige Abtrennung weiterer Wertstoffe anhand ihrer unterschiedlichen spezifischen Trennmerkmale erweitert werden. Als klassisches Beispiel für die parallele Sortierung verschiedener Wertstoffe gilt die händische Sortierung: Der Sortierer entnimmt von einem Leseband einzelne Objekte und wirft sie abhängig vom Trennmerkmal in den jeweiligen vorgehaltenen Sammelbehälter. Durch die Ablösung der händischen durch sensorgestützte Sortierung können auch Mehrfach-Sortierkriterien in einer Sortierstufe angewendet werden.²⁵

Im formalen Modell erhöht sich die Anzahl Bilanzgleichungen der Outputseite mit der Ausweitung der Zielobjektarten (Wertstofffraktionen). Dazu zählen auch die Outputobjektarten, die im Rahmen einer multikriteriellen Sortierung durch die Kombination von Trennmerkmalen entstehen.²⁶ Mit steigender Anzahl Outputobjektarten

²⁵ Vgl. Wotruba (2008), S. 222.

²⁶ Ein Beispiel ist die Sortierung von Kunststoffflaschen, die gleichzeitig nach Kunststoffart, z. B. PET, und Farbe, durchsichtig oder durchgefärbt, erfolgen kann.

erhöht sich notwendigerweise auch die Anzahl der im Input zu unterscheidenden Komponentenarten. Die Definition einer neuen Wertstoffobjektart und der zugehörigen Komponente ist i. d. R. erst ab einer bestimmten mindestens zu erwartenden Outputquantität sinnvoll. Die Anzahl Wertstoffobjektarten, die aussortiert werden, ist abhängig vom festgelegten Gesamtkonzept des Sortierunternehmens. Es wird im Folgenden angenommen, dass im Sortiermodell $j = 1, \dots, J - 1$ die Outputobjektarten der Wertstoffe bezeichnen und J die Reststoffobjektart.

Der I/O-Graph der parallelen Sortierung wird auf der Outputseite auf die Anzahl Objektarten ausgeweitet, die im betrachteten Prozess getrennt werden (vgl. Abbildung 6.2). Da jede Wertstoffoutputobjektart auf einer Wertstoffkomponente beruht, beginnen sowohl die Komponenten als auch die Wertstoffoutputobjektarten in Abbildung 6.2 mit dem gleichen Zähler (1). Die Inputobjektart wird mit dem allgemeinen Index i bezeichnet.

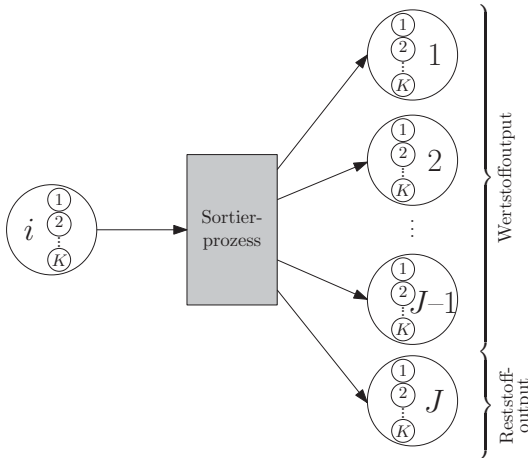


Abbildung 6.2: I/O-Graph der parallelen Ausbringung mehrerer Wertstoffe sowie einer Reststofffraktion

6.3.2 Mehrstufige Prozesse

Das einfache Grundmodell für Sortierprozesse und seine Erweiterung auf paralleles Sortieren mehrerer Wertstoffe sind hinreichend, um einfache Sortierprozesse, wie z. B. die Handklaubung, darzustellen. Jedoch ist diese Formulierung nicht ausreichend, wenn es gilt, kompliziertere Sortierprozessabläufe darzustellen, denn in der Praxis

sind einstufige Sortierprozesse eine seltene Ausnahme. In (automatischen) Sortieranlagen ist der Sortierprozess i. d. R. als Fließprozess organisiert, in dessen Verlauf das Sortiergut auf ein Förderband aufgegeben wird und dann die einzelnen Sortierstufen mit ihren spezifischen Sortierverfahren durchläuft.²⁷

Die Struktur eines mehrstufigen Sortierprozesses unterscheidet sich im I/O-Graph von der eines einstufigen Sortierprozesses dadurch, dass einzelne Objektarten nun nicht mehr nur Output eines Prozesses, sondern gleichzeitig Prozessinput für nachgelagerte Prozessstufen sind. Da diese Objektarten im Sortierprozess noch weiter getrennt werden und nicht in der in den Zwischenstufen existierenden Form als Primärouput abgegeben werden, sind sie als ‚Zwischengemisch‘²⁸ zu sehen. Hierdurch erhöht sich die Anzahl Objektarten und damit auch die Knotenzahl im I/O-Graphen. Jede einzelne Sortierprozessstufe wird durch einen eigenen Prozesskasten, der genau einem Sortierverfahren entspricht, dargestellt. Die Stufenanzahl ist durch die Anzahl hintereinander geschalteter Prozesskästen festgelegt.²⁹

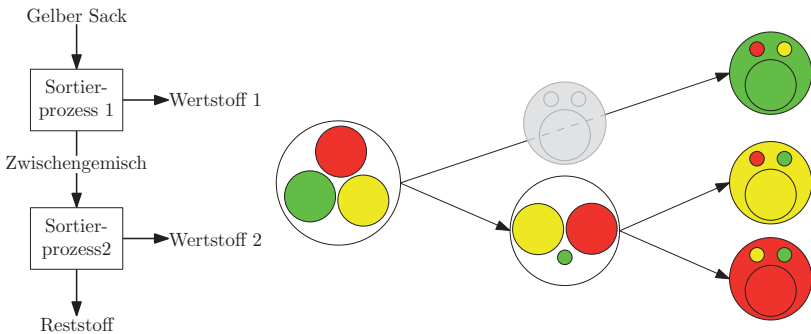


Abbildung 6.3: Beispiel für einen mehrstufigen Sortierprozess mit drei Komponenten und drei Outputobjektarten (links: Verfahrensfließbild; rechts: kompakter I/O-Graph mit virtuellem Knoten)

²⁷ Vgl. zu technischen Sortieranlagen Kapitel 3; Anlagenkonzepte finden sich zudem bei Uhlig/Bremerstein (1997), S. 78–85, oder Christiani (1997), S. 50f.

²⁸ Ein Zwischengemisch unterscheidet sich vom Abfallgemisch als erstem Prozessinput, weil bereits einzelne Komponenten aussortiert wurden. Da aber noch weitere Komponenten aussortiert werden, grenzt es sich noch wesentlich von der letztlich als Residualgröße entstehenden Reststofffraktion ab.

²⁹ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 265ff. und 290. Im Folgenden wird auf jeder Stufe von einem abgeschlossenen Sortierverfahren ausgegangen. Unterstufen innerhalb eines Verfahrens, z. B. einzelne Fluide einer Schwimm-Sink-Sortierung, werden nicht explizit ausgewiesen. In diesem Zusammenhang kann auch von einem *Grey-Box-Modell* gesprochen werden. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass der Detaillierungsgrad der (produktionswirtschaftlichen) Fragestellung angemessen angepasst wird, vgl. Dyckhoff/Spengler (2010), S. 73.

Abbildung 6.3 zeigt als schematisches Beispiel den Graphen des zweistufigen Sortierprozesses eines Abfallinputs mit drei Komponenten, dargestellt hier in Rot, Gelb und Grün. In der ersten Sortierstufe, z. B. Magnetscheidung, wird die grüne Komponente abgetrennt. Da es durch Anhaftungen, mangelnde Sorgfalt o. Ä. zu Fehlwürfen kommen kann, enthält die Outputobjektart ‚Grün‘ neben der grünen Komponente auch geringe Anteile der gelben und roten Komponente. Neben der Outputobjektart ‚Grün‘ verbleibt nach dem ersten Sortiervorgang ein Zwischengemisch, das hauptsächlich noch die Komponenten Rot und Gelb umfasst. Allerdings ist auch weiterhin ein geringer Anteil Grün enthalten, der nicht mit abgetrennt wurde. In der zweiten Sortierstufe, z. B. Ausblasen von Kunststoffteilen nach Materialerkennung, wird dann nach den Trennmerkmalen der gelben bzw. roten Komponente getrennt. Die hier abgetrennten Outputobjektarten enthalten wiederum neben der gewünschten Komponente geringe Anteile der weiteren im Ausgangsgemisch enthaltenen Komponenten.

Für diesen einfach gehaltenen Sortierprozess mit zwei nacheinander angeordneten Stufen lassen sich die Restriktionen des mehrstufigen Sortiermodells auf Basis des Grundmodells aus Kap. 6.1 formulieren. Weiterhin gelten hier die Annahmen, dass dem Modell ein ausschließlich vorwärts gerichteter Graph zugrunde liegt und die Inputquantität gleich der Outputquantität ist.

$$v_i = \sum_k v_{ki} \quad \forall i \quad (6.17)$$

$$v_{ki} = \sum_l \lambda_{kil} \quad \forall k, i \quad (6.18)$$

$$\sum_i \lambda_{kil} = t_{kl} = \sum_j \lambda_{klj} \quad \forall k, l \quad (6.19)$$

$$\sum_l \lambda_{klj} = u_{kj} \quad \forall k, j \quad (6.20)$$

$$\sum_k u_{kj} = u_j \quad \forall j \quad (6.21)$$

$$\lambda_{kij} \geq 0 \quad \forall k, i, j \quad (6.22)$$

Die Restriktionen (6.17) und (6.18) sind die gleichen Massenbilanzen wie im Grundmodell. Die Quantität der Inputobjektart setzt sich aus den Quantitäten der einzelnen enthaltenen Komponenten zusammen. Die Komponentenquantitäten werden verschoben. Zielobjektarten sind hier die Objektarten l nach der ersten Stufe des Prozesses. Ausgehend von den Objektarten l werden die Komponentenquantitäten in die Outputobjektarten j weiter verschoben (Restriktionen (6.19)). t_{kl} steht dabei für die Quantitäten der Throughputknoten. In (6.20) und (6.21) werden die einzelnen Komponentenquantitäten zur Gesamtquantität der jeweiligen Outputobjektart

gebündelt. Die Objektarten l erfüllen in diesem Modell die Rolle von Umschlagknoten. Die Besonderheit des Modells ist, dass durch die Indizierung jeder Knoten als Input-, Throughput- oder Outputknoten festgelegt ist und jeder Outputobjektart ein eigener Throughputknoten vorgeschaltet ist. So steht, bezogen auf das Beispiel in Abbildung 6.3, vor der grünen Outputobjektart ein virtueller Knoten, in den in der ersten Sortierstufe aussortiert wurde und von dem aus die Quantitäten ohne weitere mengenmäßige Transformation in die endgültige Objektart überführt werden (vgl. grau hinterlegter Knoten in Abbildung 6.3).

Ein Vergleich mit Transportproblemen zeigt, dass die oben stehende Modellformulierung und das **zweistufige Transportproblem** zur Erklärung und Optimierung von Transport- und insbesondere Verteilprozessen starke Analogien aufweisen. Die zugrunde liegenden Inhalte sind zwar verschieden, die mathematischen Formeln beider Modelle sind jedoch gleich. Praktische Anwendungsmöglichkeiten dieses Transportmodells sind bei der Distribution über Zentral- oder Regionalläger oder bei der Sammlung und dem Transport von Abfall und Altprodukten gegeben.³⁰

Reale Sortierprozesse sind i. d. R. nicht nur zweistufig, sondern bestehen aus einer Vielzahl Stufen. Für die Modellierung dieser mehrstufigen Prozesse kann sich die Formulierung nach (6.17) bis (6.22) als nachteilig erweisen. Denn in dieser Form muss für jede Sortierstufe eine weitere eigene Massenbilanz eingeführt werden, für die weitere Indizes zur Abgrenzung der einzelnen Stufen erforderlich sind. Dies ist mitunter der dem Transportmodell hinterlegten Annahme eines bipartiten Graphen geschuldet, der die (Objekt-)Knotenmenge in zwei disjunkte Mengen von Anbieter- (Input) und Nachfrageknoten (Output) teilt.³¹ Durch die Erhöhung der Stufenanzahl wird die Anzahl Restriktionen und die Notation bei vielen Prozessstufen unübersichtlich, sodass eine einfachere Modelldarstellung vorzuziehen wäre.

Aufgrund der Ähnlichkeiten zu den Transportmodellen kann möglicherweise aus der Menge der Transportprobleme eine alternative Modellformulierung adaptiert werden. Sinnvoll erscheint dafür die allgemeine Darstellung des **Umladeproblems**, da hier keine Beschränkung auf nur zwei Stufen besteht. In diesem Modell gibt es nur eine Form der Bilanzgleichung für die Knoten des Graphen. Sie dokumentiert zugleich die Zu- und Abflüsse eines Knotens. Falls ein Knoten nur Abflüsse aufweist,

³⁰ Vgl. Dyckhoff (1994), S. 290, und Domschke/Drexel (2007), S. 95.

³¹ In der Massenbilanzgleichung des Umladeknotens werden, jeweils bezogen auf den betrachteten Knoten, die Quellen (Input) und Senken (Output) eindeutig festgelegt. Dabei kann es sich aber sowohl bei den Quellen als auch bei den Senken ebenfalls um Umladeknoten handeln, deren jeweilige ‚Umladung‘ dann in eigenen Bilanzgleichungen mit definierten Quellen und Senken abgebildet wird.

handelt es sich um einen Angebotsknoten. Analog dazu läge bei einer Übertragung auf das Sortiermodell ein Inputknoten (Inputobjektart) vor. Knoten, die nur Zuflüsse verzeichnen, sind im Transportmodell Nachfrageknoten. Im Sortiermodell wären dies die Outputobjektarten (Wertstoffe und Reststofffraktion). Umladeknoten haben eine Knotenbilanz von 0, ihre Zuflüsse entsprechen den Abflüssen. Dies wären im Sortiermodell die Objektarten ‚Zwischengemische‘. Zur eindeutigen Bestimmung der Knotenausprägung müssen Vorgänger-/Nachfolgerbeziehungen der einzelnen Knoten über die Transport- bzw. Verschiebeverbindungen erfasst werden. Dies erfordert lediglich einen gerichteten Graph als Grundlage.³²

Diese Voraussetzung wird vom I/O-Graph des Sortierprozesses erfüllt (vgl. Abbildung 6.3, S. 133). Darüber hinaus ist eine eindeutige Reihenfolge der Prozessschritte festgelegt (Prozess 1 vor Prozess 2 etc.) sowie die Verbindungen der Objektarten untereinander.³³ Damit ist die Beschränkung auf lediglich zwei Stufen aufgehoben, und das Modell kann Prozesse mit einer Vielzahl Stufen wiedergeben. Die Komponentenebene bleibt auch in der nachfolgenden Modellierung des allgemeinen mehrstufigen Sortiermodells erhalten:

Notation

Indizes und Mengen

i, j	Knotenindizes
k	Komponente
$\mathcal{V}(i)$	Menge der Vorgängerknoten von Knoten i
$\mathcal{N}(i)$	Menge der Nachfolgeknoten von Knoten i
V	Knotenmenge
A	Pfeilmenge

Parameter

b_{ki}	Input- bzw. Outputquantität der Komponente k des Knotens i
----------	--

Entscheidungsvariablen

$\lambda_{kij}, \lambda_{kji}$	Transportquantität des Gutes k von Knoten i nach Knoten j bzw. j nach i
--------------------------------	--

³² Vgl. zu Umladeproblemen z. B. Domschke/Drexl (2007), S. 94ff., sowie Domschke (2007), S. 36–40.

³³ Die tatsächliche Reihenfolge der Sortierschritte hängt vom jeweiligen Anlagenkonzept ab und kann nicht verallgemeinert werden. Für mögliche Umsetzungen vgl. nochmals Uhlig/Bremerstein (1997), S. 78–85, bzw. Christiani (1997), S. 50f.

$$\sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \lambda_{kij} - \sum_{j \in \mathcal{V}(i)} \lambda_{kji} = \begin{cases} b_{ki} & \forall i \in V^{Input}, k \\ -b_{ki} & \forall i \in V^{Output}, k \\ 0 & \forall i \in V^{Through}, k \end{cases} \quad (6.23)$$

$$\sum_k b_{ki} = b_i \quad \forall i \quad (6.24)$$

$$\lambda_{kij} \geq 0 \quad \forall k, (i, j) \in A. \quad (6.25)$$

(6.23) sind die Massenbilanzgleichungen der Knoten bezogen auf die Komponenten mit drei möglichen Fällen. Es handelt sich um Inputknoten, wenn die Knotenquantität positiv ist, um Outputknoten, wenn die Knotenquantität negativ ist. Ist die Knotenbilanz gleich null, handelt es sich um einen Throughputknoten.³⁴ In (6.24) werden die Komponentenquantitäten in den einzelnen Knoten zur Gesamtquantität aggregiert. Die Nichtnegativitätsbedingungen (6.25) bewirken ausschließlich positive bzw. keine Verschiebequantitäten über die bestehenden Verbindungen zwischen Knoten.

6.3.3 Sortiergutstromverzweigung

Für die Verzweigung des Sortiergutstroms und die damit erforderliche Einrichtung paralleler Maschinen bzw. ganzer Sortierlinien können verschiedene Gründe ausschlaggebend sein. Aus technischen Gründen kann das Leseband nur eine bestimmte festgelegte Breite haben. Darüber hinaus kann das Aufgabegut nur korrekt sortiert werden, wenn es nicht zu dicht bzw. zu hoch geschichtet auf dem Band liegt. Durch diese Einschränkungen kann der Durchsatz einer Sortieranlage nicht beliebig variiert werden. Um dennoch eine höhere Ausbringung und/oder Reinheit zu erzielen, könnte der Strom des Sortierguts in mehrere Ströme aufgeteilt werden.³⁵ Als Beispiel paralleler Sortiergutströme sind hier die verschiedenartigen Konzepte der Handklaubung zu nennen. Dabei arbeiten z. B. die Sortierkräfte auf beiden Seiten des Sortierbandes, an zwei getrennten, gegenüberliegenden Bändern, von denen in mittig angeordnete Schächte sortiert wird, oder an Frontalarbeitsplätzen am Ende einzelner Sortierbänder.³⁶

³⁴ j bezeichnet jetzt nicht mehr exklusiv die Outputobjektarten, sondern dient als zweiter Knotenindex. So können über i, j bzw. j, i nun auch Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen besser dargestellt werden.

³⁵ Vgl. Buermann/Schniedermeier (1999), S. 268.

³⁶ Vgl. Abbildung 3.6, S. 38.

Im Rahmen einer maschinellen Sortierung ist die Vorsortierung durch z. B. Siebklassierung möglich, sodass das Aufgabegut in der Folge unterschiedliche Korngrößen aufweist, die dann auf getrennten Bändern der gleichen Sortierreihenfolge unterzogen werden. Des Weiteren ist es auch oftmals erforderlich, bestimmte abgetrennte Fraktionen einer weiteren Sortierung zu unterziehen, sodass mehrere parallele Sortierlinien, allerdings mit unterschiedlicher Maschinenbestückung, nebeneinander verlaufen.³⁷

Eine Verzweigung ist also nur bei mehrstufigen Sortierprozessen möglich, und es lassen sich drei Formen der Sortiergutstromverzweigung unterscheiden. Die erste Ausprägung ist die einmalige Verzweigung für eine Prozessstufe, bei der der Sortiergutstrom auf mehrere, den gleichen Sortiervorgang verrichtende Maschinen aufgeteilt wird. Im Anschluss an den Sortiervorgang werden die verbleibenden Sortiergutströme wieder zusammengeführt. Bei der zweiten Form findet eine einfache oder mehrfache Verzweigung der Ströme statt, die für die nachfolgenden Stufen einschließlich des letzten Sortiervorgangs dann als parallel verlaufende Linien weitergeführt werden. Der aufgeteilte Sortiergutstrom wird nicht wieder zusammen geführt. Der dritte Fall unterscheidet sich von der zweiten Möglichkeit der Verzweigung darin, dass einzelne oder auch alle Zweige des Sortiergutstroms wieder zusammengeführt werden können. Dabei kann es sich sowohl um eine Zusammenführung zu einer einzelnen weiter fortlaufenden Linie handeln als auch um die Rückführung einzelner Sortiergutströme an vorgelagerte Sortierstufen. Dann wird der Sortierprozess vom Aufgabegut erneut durchlaufen. Eine derartige Prozessführung wird als Zyklus³⁸ bezeichnet.

Abbildung 6.4, S. 139, fasst die Verzweigungsformen zusammen. Für alle Verzweigungsformen und Sortierverfahren über alle Stufen wird unterstellt, dass die aussortierten Wertstoffe der gleichen Objektart unabhängig von ihrem Entstehungsort zu einer Objektartquantität zusammengefasst werden. Z. B. werden alle im Prozess abgetrennten PET-Flaschen in einem Container zusammengeführt, unabhängig davon, an welcher Maschine sie abgetrennt wurden.

Im I/O-Graph hingegen wird der Sortierprozess nur durch den Materialfluss zwischen Objektknoten und Prozesskästen ohne gesonderte Modellierung der Potentialfaktoren abgebildet. Die Verzweigung muss daher hier durch spezielle Verzweigungsprozesse, die den Sortiergutstrom aufteilen, integriert werden. Ein solcher Verzweigungsprozess kann z. B. ein Klassiervorgang sein (vgl. Abbildung 6.5).

³⁷ Vgl. Uhlig/Bremerstein (1997), S. 78–85.

³⁸ Es existieren Sortieranlagenkonzepte, die vorsehen, dass das verbleibende (Reststoff-)Gemisch, nachdem es bereits alle Stufen des Sortierprozesses durchlaufen hat, dem Prozess erneut als Input zugeführt wird, vgl. Uhlig/Bremerstein (1997), S. 82.

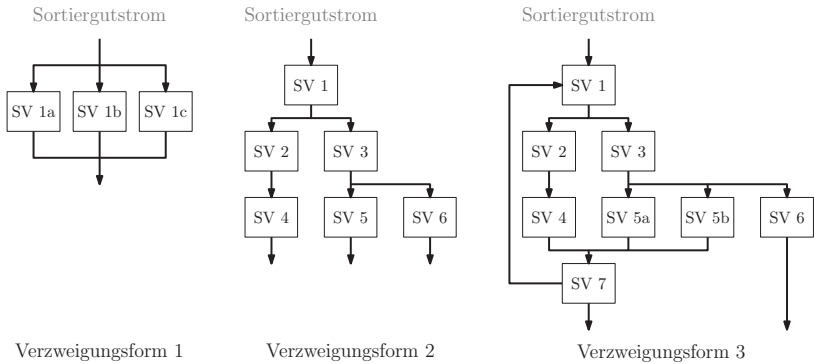


Abbildung 6.4: Drei Formen der Sortiergutstromverzweigung (SV: Sortierverfahren)

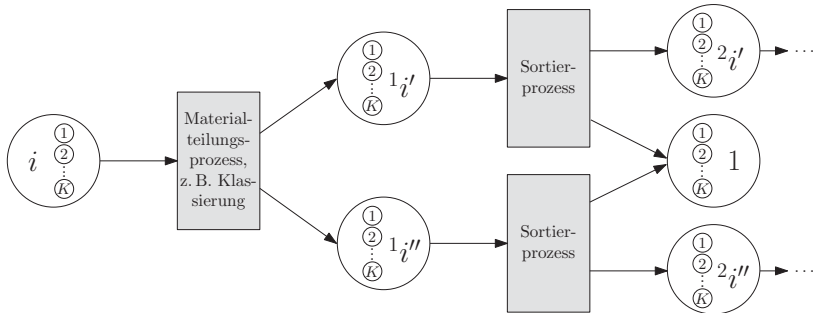


Abbildung 6.5: Beispielhafter I/O-Graph für einen verzweigten Sortierprozess mit zwei Sortiergutströmen

Das Inputgemisch i wird zunächst klassiert, sodass zwei unterschiedliche Gemische, ${}^1i'$ und ${}^1i''$, hinsichtlich der Größe der einzelnen Objekte entstehen.³⁹ Für jeden Sortiergutstrom folgt nun der erste Sortiervorgang bei dem jeweils die Komponente 1 abgetrennt und in einem gemeinsamen Container (hier durch den Objektknoten dargestellt) als Wertstoffobjektart 1 gesammelt wird. Das restliche Sortiergut bildet in jedem der beiden Ströme ein neues Gemisch. Durch Fehlwürfe und nicht erfolgte Abtrennung sind in allen Objektarten weiterhin Anteile aller Komponenten enthalten.⁴⁰

³⁹ Die 1 im hochgestellten Index des i bezeichnet die Prozessstufe, die Striche nummerieren die Gemische in der jeweiligen Stufe.

⁴⁰ Die Darstellung der einzelnen Komponenten erfolgt in Abbildung 6.5 nur symbolisch und nicht maßstabsgetreu.

Formal kann die Option verzweigter Ströme auf unterschiedliche Weise eingebunden werden. Bei mehreren parallelen Maschinen auf der gleichen Stufe kann durch einen weiteren Index der Entscheidungsvariablen, der die Maschine bezeichnet, der jeweilige Strom gekennzeichnet werden. Hierfür wird neben den Indizes für die Komponenten, Input- und Outputobjektarten der (Maschinen-)Index m in das Modell eingeführt. Die Bilanzgleichungen des Grundmodells lauten dann:

$$v_{kim} = \sum_j \lambda_{kijm} \quad \forall k, i, m \quad (6.26)$$

$$\sum_i \lambda_{kijm} = u_{kjm} \quad \forall k, j, m \quad (6.27)$$

$$\sum_k u_{kjm} = u_jm \quad \forall j, m \quad (6.28)$$

$$\sum_m u_jm = u_j \quad \forall j \quad (6.29)$$

$$\lambda_{kijm} \geq 0 \quad \forall k, i, j, m \quad (6.30)$$

Die Bilanzgleichungen (6.26) und (6.27) werden nun zusätzlich auch für jede Linie m aufgestellt, ebenso die Nichtnegativitätsbedingungen (6.30). Für eine Wiederausammenführung von Strömen ist es erforderlich, nicht mehr nur die Bilanzen der Objektarten in Abhängigkeit von den Komponenten zu betrachten (6.28), sondern die Quantitäten auch über die unterschiedlichen Ströme m zu summieren (6.29).

Da eine Sortiergutstromverzweigung immer auch mit einem mehrstufigen Prozess verknüpft ist, ist es zweckmäßig, neben der obigen einstufigen Version des Modells für parallele Maschinen einer Stufe, im Modell die Verzweigung mit der Mehrstufigkeit zu verbinden. Das in Abschnitt 6.3.2 vorgestellte adaptierte Umlademodell mit den Restriktionen (6.23) bis (6.25) für mehrstufige Prozesse ist dafür geeignet. Der dem Modell zugrunde liegende Graph muss lediglich gerichtet sein. Er ist nicht auf eine hierarchische Linienform fixiert, sondern kann ein allgemeines Netz sein. Darüber hinaus müssen Input-, Throughput und Outputknoten eindeutig festgelegt sein. Dann deckt dieses Modell neben der Mehrstufigkeit und Verzweigung auch die Möglichkeit zyklischer Ströme ab. Dies wird durch die Abbildung der Verschiebeverbindungen des Sortierprozesses in der Menge möglicher Transportverbindungen, den Knotenvorgängern bzw -nachfolgern, ermöglicht. Eine weitere Kennzeichnung der Ströme über den Index m existiert in diesem Fall aber nicht.

6.3.4 Ausbringung diskreter Quantitäten

Das vorgestellte Grundmodell ist ein Lineares Programm, in dem die Entscheidungsvariablen reelle Werte annehmen. $\lambda_{kij} \in \mathbb{R}$ werden i. d. R. mit der Masseinheit kg gemessen. In einem realen Sortierprozess können jedoch Stückgüter als Sortiergut vorliegen, z. B. ganze Flaschen, sodass eine Verschiebung nicht-ganzzahliger Entitäten nicht möglich ist.⁴¹

Die Diskretheit lässt sich erforderlichenfalls über die Formulierung einer Ganzzahligkeitsbedingung unterschiedlicher Form in ein Modell integrieren, sodass λ_{kij} in Stückzahlen angegeben werden kann. Eine Möglichkeit stellen Binärvariablen dar,⁴² was hier aber nicht zweckmäßig erscheint, da für die Komponenten im Abfallgemisch nicht entschieden werden soll, sie zu verschieben oder nicht, sondern in welche Outputobjektart das ganze Objekt transferiert werden soll. Für die Entscheidungsvariable λ_{ij} wird daher neben der Nichtnegativitätsbedingung angegeben, dass sie ganzzahlig sein soll:

$$\lambda_{ij} \geq 0 \text{ und ganzzahlig} \quad \text{bzw.} \quad \lambda_{ij} \in \mathbb{N}^0. \quad (6.31)$$

Auf die grundlegende Struktur des Grundmodells hat diese Erweiterung der Nebenbedingungen keinen Einfluss. Der I/O-Graph des Sortiergutstroms bleibt unverändert. Die Ganzzahligkeitsbedingung wirkt sich erst bei der Lösung eines derartigen linearen Programms aus, das, wie die meisten ganzzahligen Probleme, zu den NP-schweren Problemen gehört.⁴³

Damit ist diese Restriktion eine Ausnahme, die sich eigentlich keiner der beiden vorab definierten Nebenbedingungsarten zuordnen lässt. Da es sich aber um eine formale Restriktion handelt, wurde sie hier den strukturellen Nebenbedingungen zugeordnet.

6.4 Praxisbezogene Erweiterungen der Nebenbedingungen

Die in diesem Abschnitt behandelten weiteren Nebenbedingungen analysieren praxisrelevante Einschränkungen des Sortiermodells aus zwei unterschiedlichen Perspekti-

⁴¹ Vgl. zur Sortierung nach Artikeln Uhlig/Bremerstein (1997), S. 15. Theoretisch denkbar ist der Stückgutcharakter auch bis hin zu geschreddertem Eingangsgut kleiner Korngröße. Hier kann ein NIR-Sensor die einzelnen Partikel erkennen und gezielt ausblasen, vgl. Wotruba (2008), S. 221f.

⁴² Vgl. Domschke/Drexel (2007), S. 121.

⁴³ Vgl. zur Klasse der NP-schweren Probleme Domschke/Drexel (2007), S. 126f.

ven. Einerseits werden praktische (technische) Beschränkungen, die auf den Prozess einwirken und in das Modell internalisiert werden müssen, offensichtlich, wenn man technische Anlagenkonzepte analysiert. Andererseits soll eine rekursive Untersuchung aus der Perspektive der Transportmodelle erfolgen. Dabei sollen die weiteren restriktiven Optionen von Transportproblemen betrachtet und ihre Übertragbarkeit auf das Sortiermodell geprüft werden. Im Rahmen erster Überlegungen wurden vier Bereiche identifiziert, die möglicherweise weitere Restriktionen hervorbringen könnten. Dazu gehören die Kapazitätionsoptionen, die Modellierung von Verlusten im Prozessablauf, die Blockierung von Verschiebeverbindungen sowie die bereits angesprochene Ergiebigkeits- und Reinheitsrestriktionen.

6.4.1 Kapazitätierung

Bislang waren die vorgestellten Modelle unkapazitiert, d. h. über jede Verbindung zwischen Objektknoten konnte die erforderliche Quantität des Abfallgemisches bzw. der aussortierten Komponenten verschoben werden. In praktischen Sortier- bzw. Transportprozessen sind die Verbindungen jedoch hinsichtlich ihrer maximalen Verschiebe- bzw. Transportkapazität beschränkt. Grundsätzlich lassen sich zwei Arten der Kapazitätsbeschränkung (in Transportmodellen) unterscheiden. Einerseits gibt es die bereits erwähnte maximale Kapazität, bei der bis zu einer festgelegten oberen Schranke Quantitätseinheiten verschoben werden können. Andererseits besteht die Möglichkeit, für Verbindungen eine Mindestkapazität als untere Schranke zu setzen. Die einfachste untere Schranke ist die Nichtnegativitätsbedingung. Mit ihr wird festgelegt, dass minimal keine Verschiebungen auf einer Verbindung erfolgen. Darüber hinaus ist auch eine Installation einer Mindestkapazität größer null auf jeder Verbindung möglich. Beide Formen der Kapazitätierung sind für Sortierprozesse denkbar und werden im Folgenden diskutiert.

In einem Fließprozess erfolgt die Kapazitätierung durch die verfahrenstechnischen Gegebenheiten. Hierfür sind insbesondere die Maschinen und die Fördereinrichtung maßgeblich. Die Maschinen sind z. B. durch die Anzahl Operationen pro Zeiteinheit eingeschränkt, z. B. Erkennungs- und Ausblasvorgänge pro Minute bei einer NIR-Sortiereinheit oder Anzahl Greifvorgänge pro Mitarbeiter bei der Handklaubung.⁴⁴ Das Förderband des Prozesses hat i. d. R. auch nur ein bestimmtes Fassungsvermögen, das durch Breite des Bandes, Höhe des Aufgabegutes und die Fließgeschwindigkeit als Längenäquivalent eingeschränkt ist. Hinsichtlich der Breite des Förderbands ver-

⁴⁴ Vgl. Wotruba (2008), S. 221f., Uhlig/Bremerstein (1997), S. 23, Souren (1997).

weist WOTRUBA auf eine gängige Breite von 1200 mm, die auch beim Handklauben als Arbeitstiefe bei beidseitiger Besetzung nicht überschritten werden sollte.⁴⁵ Damit sowohl automatisierte Prozesse als auch manuelle Sortierung möglichst fehlerfrei erfolgen können, wird gewöhnlich eine einschichtige Aufgabe oder sogar eine vorge-schaltete Vereinzelung des Sortierguts durchgeführt.⁴⁶ Eine zu hohe Aufgabeschicht kann allerdings auch zu einer Nicht-Abtrennung führen, z. B. durch die Abdeckung metallischer Objekte vor einem Magnetabscheider. Auch können Sortierkräfte bei der Handklaubung bedingt durch die Verdeckung womöglich nicht alle Teile optisch erfassen. Die Geschwindigkeit des Fließbands sowie ggf. Pausen in der Bandbewegung müssen auf die zu durchlaufenden Prozesse angepasst werden. Hierzu könnte beispielsweise ein Fließbandabgleich durchgeführt werden.⁴⁷ Alternativ könnte das Sortiergut auch an problematischen Stellen im Prozess zwischengebunkert werden, was jedoch eine erneute Aufgabe nach sich ziehen würde und daher ökonomisch als nicht zweckmäßig einzustufen wäre. Alle diese Faktoren bestimmen die Kapazitätsobergrenze mit.

Als Gegenstück zur oberen Kapazitätsschranke kann ein Sortierprozess auch mit einer unteren Kapazitätsschranke belegt werden. Aus technischen Gründen ist es einerseits denkbar, dass eine Mindestquantität erforderlich ist, um den Prozess an sich aktiv zu halten. Andererseits ist denkbar (aber nicht sinnvoll), dass unterdurchschnittlich wenig oder sogar überhaupt kein Aufgabegut aufgegeben wird, ohne dass der technische Prozess dadurch unterbrochen wird. Es würden im letzten Fall dann keine Deckungsbeiträge erzielt, weil nichts sortiert wird. Da jedoch das Abfallaufkommen als relativ konstant angesehen werden kann und damit eine geregelte Aufgabe möglich ist, soll im Folgenden davon ausgegangen werden, dass es sich um einen gleichmäßigen Sortiergutstrom handelt, der nur durch eine Kapazitätsobergrenze beschränkt wird.

⁴⁵ Vgl. Wotruba (2008), S. 221f., und Schubert (2003b), S. 740.

⁴⁶ Vgl. zur Vereinzelung Schubert (2003b), S. 742.

⁴⁷ Vgl. zur Abstimmung von Fließbändern z. B. Zäpfel (2000), S. 197ff., oder Domschke/Scholl/Voß (1997), Kap. 4.

Beschränkung von Quantitäten

Die maximale Kapazität Λ einer Verschiebeverbindung zwischen zwei Objektknoten i und j ergibt sich gemeinsam mit der Nichtnegativitätsbedingung als

$$0 \leq \sum_k \lambda_{kij} \leq \Lambda_{ij} \quad \forall i, j. \quad (6.32)$$

Neben der Beschränkung des gesamten Sortiergutstroms wie in 6.32 können in Mehrgüterflussmodellen auch einzelne Güter kapazitiert werden. Auf den Sortierprozess übertragen würde dies bedeuten, dass ein einzelner Sortierprozess von einer bestimmten Fraktion nur eine gewisse Quantität abtrennen kann und der restliche Anteil im Sortiergutstrom verbleibt. Wenn z. B. durch eine zufällige und ungleichmäßige Aufgabe zu viel einer Fraktion auf das Sortierband gelangt, können die Sortierkräfte durch Handklaubung nicht alle zu dieser Fraktion gehörenden Objekte aussortieren. Die Kapazitätsrestriktionen für einzelne Komponenten setzen sich aus zwei Teilen zusammen, dem komponentenbezogenen Teil (Restriktion (6.33)) sowie der Beschränkung der Gesamtströme (Restriktion (6.32)). Auch in diesem Fall soll nur eine obere Kapazitätsschranke gesetzt werden:

$$0 \leq \lambda_{kij} \leq \Lambda_{kij} \quad \forall i, j, k \quad (6.33)$$

Bedarfsorientierte Kapazitätsausweitung

Eine weitere Option, die einen Einfluss auf die Kapazität in Sortierprozessen und deren Schranken haben könnte, ist die Inanspruchnahme von Zusatzkapazitäten. Derartige Konstrukte finden sich in der Produktionswirtschaft z. B. in der Produktionsprogrammplanung. Hier wird eine Entscheidung darüber getroffen, ob eine Vorproduktion der Produkte erfolgt oder ob zur termingerechten Fertigstellung zur Verfügung stehende Zusatzkapazitäten, meist in Form von Überstunden, genutzt werden.⁴⁹ In automatisierten Sortierprozessen kann die Ausbringung pro Tag erhöht werden, indem die Anlage über die planmäßige tägliche Betriebszeit hinaus betrieben wird. Die Kapazität der Fördereinrichtung (Quantität pro Zeiteinheit) hat sich hierdurch jedoch nicht verändert. Für die technischen Einrichtungen ist es auch ohne Weiteres nicht möglich, Kapazitäten zu verändern; wohl ist aber eine bedarfsorientierte Anpassung im Rahmen der Handklaubung denkbar. Durch mehr Sortierkräfte am Band

⁴⁸ Welcher Wert Λ hinterlegt wird und aus welchen Einzelaspekten sich dieser Wert zusammensetzt, d. h. ob er sogar durch einen Vektor dargestellt wird, ist Teil des Lösungsverfahrens und nicht Gegenstand dieser Diskussion.

⁴⁹ Vgl. Günther/Tempelmeier (2012), S. 158–169.

kann nicht nur die Abtrennung einzelner Komponenten gesteigert werden, sondern auch die Sortenreinheit.⁵⁰

Formal könnte eine bedarfsweise Ausweitung der händischen Sortierkapazität auf Basis der von KENNINGTON vorgestellten Formulierung der Kapazitätsausweitung in das Sortiermodell integriert werden.⁵¹

Notation

Parameter

κ_{ij}	Kostensatz pro Einheit Zusatzkapazität
B	Budget für die Kapazitätserweiterung

Entscheidungsvariablen

λ_{ij}	Verschiebequantität von Knoten i zu Knoten j
ϵ_{ij}	Zusätzliche Kapazität

$$\sum_k \lambda_{kij} \leq \Lambda_{ij} + \epsilon_{ij} \quad \forall i, j \quad (6.34)$$

$$\sum_{i,j} \kappa_{ij} \epsilon_{ij} \leq B \quad (6.35)$$

Restriktion (6.34) ist die angepasste Kapazitätsrestriktion. Diese steht hier für sich und ist nicht (mehr) mit der Nichtnegativitätsbedingung gekoppelt. Sie legt die obere Kapazitätsschranke fest, die sich aus der normalen Kapazität Λ und der zusätzlichen Kapazität ϵ zusammensetzt. ϵ ist dabei eine neue Entscheidungsvariable im Modell, d. h. neben den Verschiebequantitäten wird nun auch über die Nutzung der Zusatzkapazität entschieden. (6.35) beschränkt die zur Verfügung stehende Zusatzkapazität durch eine Budgetierung. Die anfallenden Kosten müssen dann auch noch in der Zielfunktion berücksichtigt werden.

6.4.2 Modellierung von Verlusten

Bisher wurde davon ausgegangen, dass der Sortiergutstrom vollständig sortiert wird. Neben der korrekten Sortierung wurden in der Modellierung Fehlwürfe, also die Abtrennung einer Komponente aus dem Sortiergutstrom in und Zuordnung die falsche Outputobjektart, berücksichtigt. Darüber hinaus ist vorstellbar, dass in einem Sortierprozess auch Verluste realisiert werden. Diese könnten dadurch zustande kommen,

⁵⁰ Vgl. hierzu die Untersuchungen von Souren (1997) zum Einsatz eines zusätzlichen Mitarbeiters am Sortierband.

⁵¹ Vgl. Kennington (1978), S. 211.

dass einzelne Teile aus dem Sortiergutstrom und vom Förderband herunter oder bei der Handklaubung neben den Auswurfschacht fallen bzw. während des Sortiervorgangs in der Maschine hängen bleiben. Denkbar ist, dass bestimmte Komponenten existieren, die, z. B. durch ihre Form besonders gefährdet sind, Verluste zu erleiden.

Möglicherweise werden die verlorenen Teile bei Reinigungsarbeiten eingesammelt bzw. aus den Maschinen ausgelöst und entweder direkt sortiert, d. h. der Zieloutputobjektart zugeführt, oder in die Reststoffkomponente entsorgt. Bei dieser Vorgehensweise würde, zwar mit einer zeitlichen Verzögerung, dennoch der gesamte Sortiergutstrom sortiert.⁵² Falls jedoch eine andere Verfahrensweise für diese Teile gewählt wird, müssen die Verluste in das Sortiermodell einbezogen werden. Als Ansatz hierfür lassen sich die generalisierten Flussbilanzen aus den **generalisierten Netzflussproblemen** für logistische Fragestellungen nutzen.⁵³ Dabei werden die Entscheidungsvariablen für die Transportquantitäten auf den Pfeilen mit einem Gewichtungssparameter bewertet. Je nach Ausprägung dieses Parameters entsteht auf einem Pfeil ein Verlust (Parameter zwischen 0 und 1) oder ein Zuwachs (Parameter größer als 1) der Transportquantität. Zuwächse sind im Sortiermodell jedoch i. d. R. ausgeschlossen.

Für einen Sortierprozess mit (möglichen) Verlusten kann der Parameter in der Restriktion folglich einen Wert von 0 bis 1 annehmen. Ein Totalverlust wird abgebildet, wenn der Parameter den Wert 0 annimmt. Bei einem Parameterwert von 1 wird die Verschiebequantität vollständig über die Verbindung geführt. Alle Werte zwischen 0 und 1 berücksichtigen einen anteiligen Verlust auf der entsprechenden Verschiebeverbindung. Formal ergeben sich die Massenbilanzgleichungen für die Knoten und Komponenten in Anlehnung an Restriktion (6.23) mit dem Verlustparameter ξ_{kij} als:

$$\sum_{j \in TV^{Nachf.}(i)} \sum_k \xi_{kij} \lambda_{kij} - \sum_{j \in TV^{Vorg.}(i)} \sum_k \xi_{kij} \lambda_{kji} = b_i \quad \forall i \in \mathbf{V} \quad (6.36)$$

$$0 \leq \xi_{kij} \leq 1 \quad \forall k, i, j. \quad (6.37)$$

6.4.3 Blockierung von Verbindungen

In diesem Abschnitt soll eine weitere mögliche Restriktionsart angesprochen werden, deren Übertragung aus den logistischen Modellen auf den Sortierprozess denkbar ist. Auf eine formale Ausführung wird jedoch an dieser Stelle verzichtet.

⁵² Für diesen Fall wäre ein dynamisches Modell zweckmäßig, dass über die Massenbilanzen die Quantitäten zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst.

⁵³ Vgl. Grünert/Irnich (2005), S. 43.

DOMSCHKE führt eine Option auf, in Transportmodellen bestimmte Transportverbindungen zwischen Knoten zu sperren. Dies kann erreicht werden, in dem die ausgewählten Pfeile mit hohen Strafkosten belegt werden.⁵⁴ Im Sortiermodell könnten Verbindungen auch über zusätzliche Restriktionen blockiert werden. Dazu würden bestimmte λ_{kij} von vornherein auf 0 gesetzt und so eine Sperrung ausgewählter Verschiebeverbindungen, als Transportverbindungsäquivalent, im Sortierverlauf erzwungen. Sinnvoll wäre eine derartige Restriktion z. B. bei Gefahrstoffen im Sortiergut, die keinesfalls im Wertstoffoutput enthalten sein dürfen und daher nicht in den weiteren Sortierprozess gelangen dürfen.

Darüber hinaus könnten auch neben o. g. Ausnahmefällen im normalen Sortiermodell solche Sperrungen eingebaut werden. Enthält der Sortiergutstrom z. B. sehr viel einer einzelnen Fraktion und bestimmte Fraktionen überhaupt nicht, könnten diese Verschiebequantitäten vorab auf 0 gesetzt werden, da hier nichts verschoben wird. Ein weiteres Beispiel ist ein Siebvorgang, bei dem keine 5 mm Fraktion abgetrennt werden kann, da das Aufgabegut lediglich Objekte enthält, die größer als 5 mm sind. Oder die 5 mm-Fraktion kann aus einem rein technischen Grund nicht in den Siebunterlauf, weil die Sieblochweite nur 2 mm beträgt. Folglich ist die Verschiebequantität für die Komponente der 5 mm Partikel gleich null und könnte alternativ aufgrund der bereits vorhandenen Kenntnis der Tatsache, dass keine Objekte dieser Komponente im Sortiergut enthalten sind, gesperrt werden.

6.4.4 Ergiebigkeits- und Reinheitsrestriktionen

Bereits in Abschnitt 6.1 wurden die Kennzahlen Abtrennungsgrad und Sortenreinheit als Zielgrößen bzw. Gütemaße im Sortierprozess vorgestellt und formal definiert. Der **Abtrennungsgrad** α ergibt sich demnach in Verbindung mit den Entscheidungsvariablen λ_{k1j} als

$$\alpha_{kj} = \frac{\lambda_{k1j}}{v_{k1}} \quad \forall k, j.^{55}$$

Er misst die Ergiebigkeit der Sortierung, wie viel der gewünschten Komponente korrekt abgetrennt wurde. Die **Sortenreinheit** β wurde definiert als

$$\beta_{kj} = \frac{\lambda_{k1j}}{u_j} \quad \forall j, k = j.$$

⁵⁴ Vgl. Domschke (2007), S. 43. Diese Form der Modellierung kann gewählt werden, wenn auf eine zusätzliche Restriktion verzichtet werden soll. Über die Zielfunktion erfolgt dann eine Minimierung der Kosten.

⁵⁵ Da sich die folgenden Aussagen in erster Linie auf die Wertstoffsartierung mit nur einer Inputobjektart beziehen, wurde hier der Index des Inputs auf 1 gesetzt.

Sie misst die Reinheit des Sortieroutputs bezogen auf die jeweilige gewünschte Komponente (die der jeweiligen Outputobjektart entspricht). Für beide Kennzahlen soll nun geprüft werden, inwieweit sie neben der Erfassung des Sortierergebnisses auch als Restriktionen des Optimierungsmodells für Sortierprozesse herangezogen werden können. Auf Basis des Grundmodells aus Abschnitt 6.1 findet zunächst eine isolierte Betrachtung der Restriktionen aus Abtrennungsgrad bzw. Sortenreinheit statt. Dabei gilt auch weiterhin die Annahme, dass die Daten des Modells bekannt sind, d. h. eine Aussage über α und β möglich ist.

Der Abtrennungsgrad könnte in einer Ergiebigkeitsrestriktion oder Sortierquote für jede einzelne Komponente in das Sortiermodell eingebunden werden.⁵⁶ Formal ergibt sich eine Ergiebigkeitsrestriktion aus dem Abtrennungsgrad α für die Abtrennung der Komponenten k aus der Inputobjektart 1 in die Outputobjektart j im Modell als

$$\frac{\lambda_{k1j}}{v_{k1}} \geq \hat{\alpha}_{kj} \quad \forall k, j. \quad (6.38)$$

Dabei ist plausibel, dass genau ein bestimmter Abtrennungsgrad $\hat{\alpha}_{kj}$ für jede Komponente vorgegeben wird und die Verschiebequantitäten entsprechend ermittelt werden. Diese Vorgabe wäre jedoch nicht sinnvoll, weil es technisch nur schwierig umsetzbar ist, einen einzelnen, konkreten Wert einzuhalten. Daher ist eine Einbindung als relative (Ungleichheits-)Restriktion vorzuziehen. Sie gibt einen **Mindestabtrennungsgrad** vor und stellt so eine Mindestquantität der betreffenden Objektart sicher, ohne dabei allerdings auf die Qualität zu achten. Eine Maximalabtrennung vorzugeben ist ebenfalls nicht sinnvoll. Hierdurch würde die Ausbringung beschränkt. Bei Erreichen der Schranke würden alle weiteren Objekte, die in die betreffende Outputobjektart abgetrennt werden könnten, stattdessen der Reststoffoutputobjektart zugeführt und wären für die weitere Objekt- bzw. werkstoffliche Nutzung verloren. Eine weitere zweckmäßige Einschränkung könnte sein, eine solche Mindestabtrennung nur für ausgewählte Kombinationen von Komponenten und Outputobjektarten vorzugeben. Und zwar sind dies die Kombinationen, bei denen eine korrekte Abtrennung erfolgt. Es erscheint nicht sinnvoll eine Mindestabtrennungsrestriktion für Fehlwürfe vorzugeben.

Die Sortenreinheit kann, ebenso wie der Abtrennungsgrad, als einzelne Reinheitsrestriktion in das Modell integriert werden. Ursprünglich wurde die Sortenreinheit für jede Komponente in der Outputobjektart definiert. Allerdings ist die Sortenreinheit nur für die Komponenten interessant, die der gewünschten Outputobjektart angehören

⁵⁶ Vgl. zur Sortierquote Uhlig/Bremerstein (1997), S. 124, bzw. Souren (1996a), S. 66. Alle Objekte, die nicht einer Wertstoffkomponente entsprechen, gehören vereinfacht zur Reststoffkomponente. Dies ist unabhängig davon, dass sich in der Realität auch bei den Reststoffen eine Unterscheidung unterschiedlicher Materialien bzw. Komponenten vornehmen ließe.

ren, z. B. der PET-Anteil am PET-Output. Daher wird die Sortenreinheit nur noch für die Outputobjektarten vorgegeben und der Anteil der ‚richtigen‘ Komponente bestimmt. Es kann hierfür – wie für $\hat{\alpha}_{kj}$ auch – ein Wert $\hat{\beta}_{kj}$ vorgegeben werden, den es bei der Optimierung einzuhalten gilt. Formal lautet die Restriktion für die Sortenreinheit der Wertstoffoutputobjektarten⁵⁷

$$\frac{\lambda_{k1j}}{u_j} \geq \hat{\beta}_{kj} \quad \forall j = 1, \dots, J-1; k = j. \quad (6.39)$$

Der Wertstoffabsatz ist i. d. R. direkt mit der Qualität des Wertstoffoutputs gekoppelt, und eine (zufällig) sauberere Sortierung wirkt sich nicht negativ (auf die Wertstofferrlöse) aus.⁵⁸

SOUREN beschreibt den Verlauf des Stückwertes einer Wertstoffoutputobjektart in Abhängigkeit von der Sortenreinheit als zumeist s-förmig.⁵⁹ Bis zu einer Mindestsortenreinheit steigt der Wert nur wenig an, danach jedoch progressiv. Ab dem Erreichen einer ‚ausreichenden‘ Sortenreinheit geht dieser progressive Anstieg in einen degressiven Anstieg über, sodass bei weiteren Steigerungen der Sortenreinheit nur noch geringere Grenzerlöse erzielt werden. Auf Basis dieser Überlegungen wäre auch die Vorgabe einer maximalen Sortenreinheit ($\hat{\beta}^{max}$) als obere Schranke eines Sortierintervalls ($\hat{\beta} \leq \beta \leq \hat{\beta}^{max}$) theoretisch vorstellbar. Dieser Wert sollte an dem Punkt festgesetzt werden, wo die (abnehmenden) Grenzerlöse die mit der gezielten Erreichung einer höheren Sortenreinheit verbundenen Kosten nicht mehr decken.⁶⁰

Eine sinnvolle Alternative zur Vorgabe einer Mindestsortenreinheit kann das Setzen eines maximalen Verschmutzungsgrads sein. Dieser Wert könnte – in Anlehnung an die Bezeichnung der Gegenwahrscheinlichkeit bzw. des Komplementärereignisses⁶¹ in der Statistik – als $\bar{\beta}$ bezeichnet werden, also die in der betrachteten Outputobjektart enthaltene Quantität nicht erwünschter Komponenten ins Verhältnis gesetzt zur gesamten Outputobjektartquantität:

$$\frac{\sum_{k \neq j} \lambda_{k1j}}{u_j} \leq \bar{\beta}_j \quad \forall j, \dots, J-1. \quad (6.40)$$

⁵⁷ Für die Reststoffoutputobjektart ist es nicht erforderlich eine Sortenreinheit zu fordern, da sie sich als Residualquantität aus der Abfallinputquantität abzüglich der aussortierten Wertstoffquantitäten ergibt und nicht weiter abgesetzt, sondern entsorgt wird.

⁵⁸ Vgl. hierzu Souren (1996a), S. 69ff., Souren (1997), S. 36, sowie Kuyumcu (1999b), S. 371.

⁵⁹ Vgl. hierzu und im Folgenden Abschnitt 7.2.2 bzw. Souren (1996a), S. 69.

⁶⁰ In der praktischen Sortierung würde von so einer Vorgabe aber eher Abstand genommen und grundsätzlich eine möglichst hohe Sortenreinheit angestrebt.

⁶¹ Vgl. zur Definition Bamberg/Baur/Krapp (2012), S. 79.

Z. B. darf bei der Wiederverwertung von Altglas nur ein bestimmter Anteil Störstoffe wie Porzellan aus Flaschenkorken bzw. Steine (zusammen maximal 10 Gramm pro Tonne) oder Metalle (Eisen-Metalle und Nicht-Eisen-Metalle je 1 Gramm pro Tonne) im Glasbruch enthalten sein.⁶² Im ersten Fall müsste ein $\bar{\beta}_j$ von kleiner gleich 1/100 000 eingehalten werden bzw. im zweiten Fall 1/1 000 000.

Restriktionen für ‚Reinheit‘ und ‚Ausbringung‘ sind auch in einer Modellformulierung von KUYUMCU zu finden.⁶³ Sein Ansatz ist aus einer technischen Perspektive heraus entstanden. Die Restriktionen des Modells sind einerseits Produktausbringungsdefinitionen für die Wertstoffprodukte und eine Reststoffobjektart sowie andererseits Wertstoffgehaltsrestriktionen für die Wertstoffprodukte. Die Produktausbringung entspricht dem Abtrennungsgrad. Sie ist – im Unterschied zum hier entwickelten Sortiermodell – die Entscheidungsvariable des Modells. Ziel ist die Deckungsbeitragsmaximierung.⁶⁴

Die Wertstoffgehaltsrestriktion gibt ein Intervall für den Reinheitsgrad vor, innerhalb dessen sich der Wertstoffgehalt eines Wertstoffprodukts bewegen muss, damit für dieses Produkt ein Erlös erzielt wird. Die Reinheitsgraddefinition gleicht der Sortenreinheitsdefinition.⁶⁵ In diesem Modell werden demnach auch beide Kennzahlen berücksichtigt, der Abtrennungsgrad als Entscheidungsvariable und die Sortenreinheit als Restriktion. KUYUMCU weist darauf hin, dass die Optimierung immer einen Kompromiss zwischen hoher Ausbringung und dem Reinheitsgrad eines Wertstoffprodukts erbringen muss.⁶⁶ Dies muss aber nicht unbedingt einen Zielkonflikt bedeuten. Eine hohe Abtrennung ist durchaus mit einer hohen Sortenreinheit vereinbar, erhöht jedoch i. d. R. die Sortierkosten.⁶⁷ Eine Plausibilitätsanalyse darüber, wie die Kosten und Erlöse des Sortiermodells im Zusammenspiel mit Kennzahlen und Restriktionen verlaufen könnten, schließt sich im nachfolgenden Kapitel 7 an.

⁶² Vgl. Glawitsch (2005), S. 146.

⁶³ Vgl. Kuyumcu (1999b), S. 370f.

⁶⁴ Vgl. Kuyumcu (1999b), S. 370.

⁶⁵ In den Ausführungen zum Reinheitsgrad wird nur angegeben, dass es sich beim maximalen Wertstoffgehalt um die Obergrenze des Wertstoffgehalts der Teilchen handelt. Es fehlt jedoch die explizite Angabe, ob es sich um die Teilchen des abgetrennten Wertstoffprodukts handelt oder um alle Teilchen des Sortierguts. Vgl. Kuyumcu (1999b), S. 371. Hier wird davon ausgegangen, dass es sich um den maximal möglichen Wertstoffgehalt der Teilchen des abgetrennten Wertstoffprodukts handelt.

⁶⁶ Vgl. Kuyumcu (1999b), S. 371, sowie zu dieser Problematik auch Souren (1996a), S. 66.

⁶⁷ Vgl. Souren (1997), S. 33.

Kapitel 7

Gestaltung der Zielfunktion

7.1 Strukturelle Analyse

7.1.1 Zielsetzungen des Sortiermodells

Nachdem in Kapitel 6 das Nebenbedingungssystem geschaffen wurde, widmet sich dieses Kapitel der Zielfunktion des Sortiermodells. In der Literatur lässt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Aussagen zur **Zielsetzung** von Sortierprozessen der Wertstoffindustrie finden. SOUREN nennt als Ziel der Wertstoffabtrennung¹ die Gewinnung nützlicher Komponenten aus dem Redukt und die damit verbundene Steigerung des Wertes des abgetrennten Produkts.² WILLING unterscheidet die technischen Ziele der Aussortierung einer möglichst großen Menge verwertbarer und vermarktbarer Sekundärprodukte und der Einhaltung der von der verwertenden Industrie geforderten Qualitätseigenschaften unter der Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit von allgemeinen Zielen, wie z. B. Schonung natürlicher Ressourcen und Verringerung zu behandelnder und abzulagernder Abfallquantitäten.³ KUYUMCU gibt einerseits als Ziel an, durch die Trennung mindestens ein Wertstoffprodukt mit höherem Wert gegenüber dem Ausgangsgemisch gewinnen zu wollen, und andererseits durch Trennung in vorab definierte Produkte die Wertschöpfung zu ermöglichen bzw. zu verbessern.⁴

¹ Die Wertstoffabtrennung wird bei SOUREN explizit hervorgehoben, um sie von der Schadstoffabtrennung abzugrenzen, vgl. Souren (1996b), S. 140. Der Fokus hier liegt auf der Wertstoffabtrennung im Sinne einer Positivlese bei der Sortierung. Die Schadstoffabtrennung (Negativlese) wird nicht untersucht.

² Vgl. Souren (1996b), S. 140.

³ Vgl. Willing (1999), S. 79.

⁴ Vgl. Kuyumcu (1999b), S. 369, und Kuyumcu (1999a), S. 3.

Hieraus lassen sich drei generelle Bereiche von **Zielsetzungen** für die Sortierung unterscheiden: die technische, die sozial-ökologische und die ökonomische Zielsetzung. Die **technische Zielsetzung** im Rahmen der Sortierung umfasst in erster Linie die Durchführbarkeit und Optimierung der Sortierung im Rahmen einer gegebenen maschinellen Ausstattung. Außerdem zählt die Weiterentwicklung technischer Verfahren bei exogen gegebenen Anforderungen, wie z. B. quantitativ mehr, schneller oder besser, d. h. sauberer bzw. sortenreiner zu sortieren, dazu.⁵ Dabei sind die technischen Zielsetzungen in der Regel nicht unabhängig, sondern direkt mit ökologischen und ökonomischen Zielsetzungen als übergeordnete Ziele verbunden. SOUREN bezeichnet die technischen Ziele Vollständigkeit und Sortenreinheit einzelner abgetrennter Objektarten als Unterziele der ökonomischen Wertsteigerung und unterlegt sie mit den Kennzahlen Abtrennungsgrad und Sortenreinheit.⁶

Ökologische bzw. **ökologisch-gesellschaftliche Zielsetzungen** sind auf die Schonung natürlicher Ressourcen ausgerichtet.⁷ Bei der Sortierung könnte aufgrund dieser Ausrichtung in einem formalen Modell z. B. die (Mindest-)Sortenreinheit als Zielsetzung bei der Stoffabtrennung verfolgt werden, anstatt lediglich als Nebenbedingung in das Sortiermodell einzufließen. Sie dient dadurch als Instrumentalziel zur Erreichung der Fundamentalziele Gewinnung (sauberer) Ressourcen⁸ und Materialeffizienz. Allerdings lassen sich ökologische Ziele zumeist nicht problemlos operationalisieren und mit weiteren, speziell den ökonomischen Zielsetzungen verknüpfen. Ein Versuch der Messbarmachung von Auswirkungen unternehmerischen Handelns auf ökologische Systeme ist z. B. die Bewertung mit ‚Ökopunkten‘ bei der Biotopbewertung von Gebietsnutzungen im Rahmen industrieller Bauprojekte alternativ zu einer ausschließlich monetären Bewertung.⁹

⁵ BUERMANN/SCHNIEDERMEIER sagen, dass das praktische Optimierungsziel für die Sortierung die Verbesserung der Produktqualität bei gleichzeitiger Steigerung des Durchsatzes und Reduzierung des Personals sei, vgl. Buermann/Schniedermeier (1999), S. 265.

⁶ Vgl. Souren (1996b), S. 140.

⁷ Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive wird die sozial-ökologische Zielsetzung unternehmerischen Handelns gelegentlich noch weiter in eine soziale und ökologische Zielsetzung aufgespalten, vgl. hierzu z. B. Schierenbeck/Wöhle (2012), S. 76. Dieser Vorgehensweise wird hier jedoch nicht weiter gefolgt, obgleich ebenfalls eine betriebswirtschaftliche Perspektive zugrunde gelegt wird. Zwischen ökologischen und gesellschaftlichen Zielen ist im vorliegenden Kontext eine enge Verknüpfung erkennbar, die sich sowohl durch mittelbare als auch unmittelbare Rückkopplung der ökologischen Ziele auf gesellschaftliche Ziele äußert. Als unmittelbare Rückkopplung kann die Belastung von Trinkwasser durch die Deponierung von Schadstoffen in Abfällen gesehen werden. Eine mittelbare Folge wären gesundheitliche Spätfolgen in der Bevölkerung durch die Belastung mit ungefilterten, giftigen Abgasen aus einer Müllverbrennungsanlage.

⁸ Eine Form der Ressourcengewinnung durch (nachträgliche) Sortierung findet z. B. beim Konzept *Urban Mining* Anwendung, vgl. zum Urban Mining Mocker et al. (2009).

⁹ Vgl. z. B. Biedermann/Werking-Radtke/Woike (2008), S. 3.

Die **ökonomische Zielsetzung** für Sortierprozesse, die auch im Folgenden fokussiert wird, ist die Wertschöpfung. Sie umfasst die technischen und ökologischen Zielsetzungen i. d. R. in Form von Nebenzielen in den Nebenbedingungen eines formalen Modells. Für die Sortierung als wertschöpfender Prozess erfolgt die ökonomische Bewertung, wie bei den meisten Wertschöpfungsprozessen, auf Basis entscheidungsrelevanter Kosten und Erlösen. Für die Gestaltung der Bewertung sollten relevante Zielarten, eine Vorschrift für ihre Messung sowie eine Höhenpräferenzrelation angegeben werden.¹⁰ Höhenpräferenzrelationen können Maximierungs-, Minimierungsvorschriften oder eine Satisfizierungsregel sein. Im Weiteren wird alternativ eine (Kosten-)Minimierung oder (Erlös- bzw. Deckungsbeitrags-)Maximierung verfolgt. Die formale Einbindung ökologischer Zielsetzungen wird über operationalisierte ökologische Effekte in Form von Kosten direkter bzw. indirekter Umwelteinwirkungen¹¹ erreicht.¹²

7.1.2 Elemente und Formulierung einer Ausgangsziel­funktion für das Sortiermodell

Mathematisch-formale Modelle werden anhand ihrer Zielfunktion sowie der Form ihrer Entscheidungsvariablen unterschieden. In erster Linie werden lineare, ganzzahlige-lineare, kombinatorische und nichtlineare Modelle unterschieden. In den ersten drei Modellklassen wird von einer linearen Zielfunktion und unterschiedlichen Arten von Variablen ausgegangen. Die letzte Klasse umfasst nichtlineare Zielfunktionen.¹³ Ausgangspunkt für die Zielfunktion des Sortiermodells ist die Formulierung eines allgemeinen Wertmodells für Reduktionsprozesse.¹⁴ In diesem Modell besteht die Zielfunktion aus einer linearen Funktion, deren Gesamtwert sich aus mehreren additiv verknüpften Termen zusammensetzt. Dieser Gesamtwert wird im Sortiermodell **Sor-**

¹⁰ Vgl. Isermann (1999), S. 71. Isermann bezieht sich mit seinen Aussagen vorrangig auf logistische Prozesse, denen er eine produktionstheoretische Fundierung nachweist. Da er die Entsorgungskette aber auch ausdrücklich dazuzählt und die produktionstheoretische Fundierung von Entsorgungsprozessen, insbesondere Abtrennungsprozessen bzw. Sortierprozessen, z. B. bei Souren (1996b) und Dyckhoff (1994) erfolgt, wird eine grundsätzliche Übertragbarkeit der Aussagen unterstellt.

¹¹ Direkte Umwelteinwirkungen durch der Sortierung sind Kosten, die durch die Abgabe von Objekten in die natürliche Umwelt entstehen, z. B. Deponiekosten. Indirekte Umwelteinwirkungen entstehen durch vorgelagerte Prozesse und können in sinnvollem Kontext ebenfalls als Kosten im Modell eingebunden werden, vgl. Isermann (1999), S. 79 und 83.

¹² An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass Mehrfachzielsetzungen denkbar, jedoch nicht Teil dieser Untersuchung sind. Zur Gestaltung und zum Umgang mit Mehrfachzielsetzungen vgl. z. B. Isermann (1991) oder Domschke/Drexel (2007), S. 55–59.

¹³ Vgl. zur Einteilung der Modelle und insbesondere Zielfunktionen z. B. Domschke (2007), S. 20.

¹⁴ Vgl. Souren (1996b), S. 78f.

tierwert genannt und soll maximiert werden. Formal wird die Zielfunktion des Sortiermodells – ausgehend vom allgemeinen Wertmodell – mit der folgenden Notation vorerst grob formuliert:¹⁵

Notation	
SW	Sortierwert
i	Inputobjektart (Abfallgemisch)
j	Outputobjektarten $j = 1 \dots, J$ (Wertstoffe bzw. Reststoff)
p_i	Preis der Inputobjektart i
e_j	Wertstoffenerlössatz der Wertstoffobjektart $j = 1, \dots, J - 1$
c_J	Entsorgungskostensatz für die Reststoffobjektart J
v_i	Inputobjektartquantität
u_j	Outputobjektartquantitäten
$C^P(VG, \rho, \lambda_{kij})$	Prozesskosten, abhängig von den VG , von ρ und von λ_{kij}

$$\text{Max! } SW = \underbrace{p_i \cdot v_i}_{\text{Annahmeerlöse}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{J-1} e_j \cdot u_j}_{\text{Wertstoffenerlöse}} - \underbrace{c_J \cdot u_J}_{\text{Entsorgungskosten}} - \underbrace{C^P(VG, \rho, \lambda_{kij})}_{\text{Prozesskosten}} \quad (7.1)$$

Der Sortierwert SW der **Ausgangszielfunktion** (7.1) ist ein spezieller **Deckungsbeitrag** und setzt sich aus Annahmeerlösen, Wertstoffenerlösen, Entsorgungskosten und Prozesskosten zusammen.¹⁶ Die einzelnen Terme, außer die Prozesskosten, sind ein Produkt der Objektartquantitäten und ihrem jeweiligen Stückwert. Abhängig von der Erwünschtheit der Objektarten kann der Stückwert bei erwünschten Objekten positiv, d. h. ein Erlös, sein oder bei nicht erwünschten Objektarten negativ sein, also Kostencharakter besitzen.

Die **Annahmeerlöse**, im Folgenden auch als Annahmehöhe bezeichnet, sind ein Produkt aus der Inputquantität und ihrem Stückpreis. Ein Sortierprozess hat ein aus verschiedenen Komponenten bestehendes Inputobjekt, z. B. einen Gelben Sack. Das Sortierunternehmen kann das Inputobjekt Gelber Sack unterschiedlich bewerten.¹⁷ Einerseits ist die Bewertung des Gelben Sacks als Redukt möglich. Redukts sind Übelinputs, durch deren Vernichtung oder Umwandlung eine (ökonomische) Leistung erbracht wird. Bei der Einstufung als Übel wird das Entsorgungsunternehmen für die Annahme des Gelben Sacks eine **Annahme-** bzw. **Entsorgungsgebühr** vom

¹⁵ Eine ähnliche Formulierung findet sich auch bei Souren (2012), S. 339.

¹⁶ Mit dem Terminus ‚Deckungsbeitrag‘ wird die Differenz von Erlösen und variablen sowie z. T. auch direkt zurechenbaren fixen Kosten bezeichnet, vgl. Schweitzer/Küpper (2011), S. 402.

¹⁷ Zur Einteilung der Objektkategorien nach der Erwünschtheit vgl. Dyckhoff (2006), S. 122ff.

Lieferanten verlangen. Diese Annahmegebühr ist aus Unternehmenssicht ein Erlös. Andererseits ist auch denkbar, dass das Inputgemisch für das Sortierunternehmen ein Faktor (Gutinput) ist. Er erfährt durch die Sortierung eine zusätzliche Aufwertung, z. B. durch die Sortierung von Elektronikschrott gewonnene hochwertige Metalle. Produktionsfaktoren müssen i. d. R. zu einem (Markt-)Preis gekauft werden, sodass dem Unternehmen in diesem Fall durch den für sie negativen Preis (**Einkaufs-)Kosten** entstehen.

Der Sortierinput wird in der Zielfunktion über einen Inputterm abgebildet, der die Inputobjekte bepreist. Die Inputobjekte durchlaufen nach ihrer Ankunft im Entsorgungsunternehmen die einzelnen Sortiervorgänge. Im Verlauf des Sortierprozesses entstehen durch die Nutzung der technischen Anlagen **Prozesskosten** $C_P(VG, \rho, \lambda_{kij})$. Die Prozesskosten umfassen zunächst noch nicht näher untersuchte, unterschiedliche Kostenbestandteile, z. B. Betriebskosten mit variablem Kostencharakter (Energiekosten oder Personalkosten). Ihre Abhängigkeit von den hier bereits angegebenen Größen VG , ρ und λ_{kij} wird im nachfolgenden Abschnitt näher betrachtet.

Im Sortierprozess fallen nach jedem Sortiervorgang sukzessive die mit den einzelnen Sortierverfahren abgetrennten Objektarten an. Dabei handelt es sich zumeist um vordefinierte Wertstoffobjektarten. Als letzte Objektart nach Durchlaufen des vollständigen Sortierprozesses verbleibt schließlich die Reststoffobjektart. Sie enthält für Recyclingzwecke nicht weiter nutzbare Objekte sowie fälschlicherweise nicht abgetrennte Wertstoffobjekte. Für die Wertstoffobjektarten, für die nach der Sortierung eine weitere sinnvolle Wieder- bzw. Weiterverwertung unterstellt wird, erzielt ein Entsorgungsunternehmen durch den Absatz am Markt **Wertstoff Erlöse**. Die Reststoffobjektart kann im Allgemeinen nicht erlösbringend abgesetzt werden.¹⁸ Für die Entsorgung der Reststoffobjekte, die i. d. R. eine thermische Vorbehandlung und anschließende Deponierung umfasst, ist für gewöhnlich eine Entsorgungsgebühr zu entrichten, sodass dem Sortierer für diese Objektart **Entsorgungskosten** entstehen.

7.1.3 Abhängigkeiten der Zielfunktionselemente und Interdependenzen der Entscheidungsvariablen

Die oben aufgestellte erste Ausgangszielfunktion ist für die Optimierung des Modells über Entscheidungsvariablen mit dem Nebenbedingungssystem verbunden. Jeder der vier Zielfunktionsterme unterliegt darüber hinaus Auswirkungen verschiedener weite-

¹⁸ Als Ausnahme wäre hier der Verkauf als Brennstoff an Ersatzbrennstoffkraftwerke denkbar. Der Preis könnte in diesem Fall z. B. von geschätzten Heizwert der Reststoffe abhängen.

rer Einflussgrößen. Zunächst gilt es, diese Einflussgrößen zu erfassen und anschließend ihre jeweilige Wirkung zu analysieren. Abbildung 7.1 auf der nächsten Seite fasst die Einflüsse auf die Zielfunktionsterme überblicksartig zusammen.

Die Abbildung zeigt ganz oben den I/O-Graphen eines einfachen Sortierprozesses. Darunter ist die Erfolgsebene mit der Zielfunktion abgebildet. Die Zielfunktionselemente stehen unter den Elementen des I/O-Graphen, an denen sie entstehen. Unterhalb der Zielfunktion sind die Einflussfaktoren dargestellt und über einen Pfeil mit dem beeinflussten Zielfunktionsterm verbunden. Direkte Einflüsse sind dabei mit einem durchgezogenen Pfeil gekennzeichnet. Gestrichelte Pfeile symbolisieren zum einen indirekte Einflüsse bzw. zum anderen den Sonderfall des in den Anfangszeiten des DSD sogar starken Einflusses des Abtrennungsgrads auf die Annahmegebühr.¹⁹

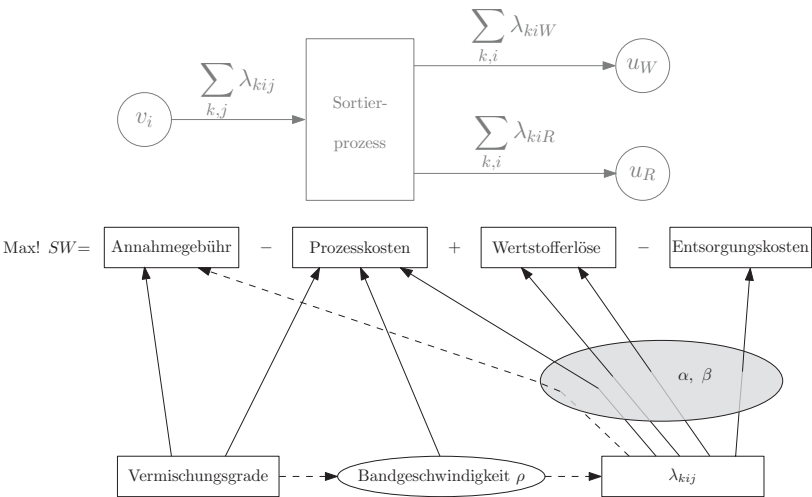


Abbildung 7.1: Einflussstrukturen auf die Zielfunktion

Die **Annahmegebühr** kann auf verschiedene Arten festgelegt werden. Anhand der Zielfunktion kann sie entweder durch einen konstanten Preis pro Quantitätseinheit, mit dem die angelieferte Quantität multipliziert wird, berechnet werden oder die Ausgestaltung des Preises erfolgt abhängig von der Qualität des angelieferten Abfalls.

¹⁹ Die Verbindung zwischen Annahmegebühr und den Verschiebequantitäten ist heute nicht mehr präsent. Sie soll aber zur Vollständigkeit hier erläutert werden, da sich durch sie auch die Veränderungen und Entwicklungen im Wertstoffentsorgungssystem dokumentieren lassen.

Dessen Vermischung kann mithilfe der Vermischungsgrade erhoben werden (vgl. den Pfeil von den Vermischungsgraden zur Annahmegebühr in Abbildung 7.1).²⁰

Beide oben genannten Einflussgrößen, Vermischungsgrade und Verschiebequantitäten, wirken auch auf den zweiten Term der Zielfunktion, die **Prozesskosten**. Die Vermischungsgrade geben vor, welches Ausmaß an Sortierung tatsächlich vonnöten ist. Das Entsorgungsunternehmen kann diese Kennzahlen bei der Ankunft des Abfalls lediglich erheben. Ein aktiver Eingriff zu ihrer Veränderung vor jeglichen Sortierprozessen ist nicht möglich. Auf Basis der Vermischungsgradkennzahlen ist es jedoch möglich und sinnvoll, die Parameter der einzelnen Sortierverfahren den Vermischungsgraden des Sortierguts anzupassen und dadurch erhöhte Prozesskosten zu vermeiden.²¹ Demnach kann für die Vermischungsgrade ein direkter Einfluss auf die Prozesskosten, aber über die Bandgeschwindigkeit ρ auch ein indirekter Einfluss unterstellt werden. Diese Aussage wird zusätzlich dadurch gestützt, dass abhängig von den Vermischungsgraden über den Prozessablauf hinaus weitere Auswirkungen auf die technischen Anlagen entstehen können. Für spezielle Vermischungsgradkonstellationen ist z. B. vorstellbar, dass sie den Prozessablauf stören, indem sie Maschinenstillstände verursachen oder für eine stärkere Werkzeugabnutzung verantwortlich sind. Die durch derartige Störfälle verursachten Kosten würden gleichfalls über den Prozesskostenterm erfasst.

Erwähnt seien an dieser Stelle noch die **Personalkosten**, die – insbesondere bei händischer Sortierung – einen großen Teil der Prozesskosten ausmachen. Sie sind stark von den Vermischungsgraden abhängig. So kann z. B. bei sehr hohen Vermischungsgraden eine erhöhte Mitarbeiteranzahl am Sortierband erforderlich sein, was bei leistungsunabhängiger Entlohnung zu einem sprunghaften Anstieg der Personalkosten und infolgedessen auch der Prozesskosten führen kann.

Die Verschiebequantitäten λ_{kij} werden im Gegensatz zu den Vermischungsgraden durch das Entsorgungsunternehmen aktiv gesteuert. Sie werden in der Regel anhand der Kennzahlen Abtrennungsgrad und Sortenreinheit beurteilt bzw. durch die Vorgabe eines Wertebereichs für beide Kennzahlen gesteuert. Durch Festlegen z. B. eines Mindestabtrennungsgrads kann eine Feinabstimmung einzelner Sortierverfahren erfolgen. Somit besteht ein durch Abtrennungsgrad- und Sortenreinheitskennzahlen moderierter Einfluss der Verschiebequantitäten auf die Prozesskosten. Da hierfür jedoch nicht immer alle λ_{kij} relevant sind, gilt es, diejenigen Verschiebequantitäten

²⁰ Für die nachfolgenden Untersuchungen soll zur Vereinfachung angenommen werden, dass die Vermischungsgrade des Inputs ein Datum und bekannt sind. Das Sortierunternehmen kann sie nicht beeinflussen.

²¹ Dies entspricht einem ‚Rüstkostenbestandteil‘ an den Prozesskosten.

herauszufiltern, die relevante Einflüsse ausüben. Wichtig für die Prozesskosten ist auch, dass nur aktiv sortierte Objektarten Prozesskosten verursachen. Die ‚passiv sortierte‘, d. h. nach Durchlaufen des Sortierverfahrens verbleibende, Reststoffobjektart verursacht keine direkten Prozesskosten.

Auf die Prozesskosten wirkt außerdem der Parameter ρ . Dieser Parameter ist genau genommen ein Vektor, der mehrere Parameter bzw. Steuergrößen umfasst. Diese haben eine Steuerungsfunktion sowohl für den gesamten Sortierprozess als auch für die einzelnen Sortierverfahren. Ihre Ausprägungen können vom Sortierunternehmen den Anforderungen entsprechend gewählt werden.²² Dazu zählt vorrangig die Geschwindigkeit des Sortierbands, auf die ρ häufig eingeschränkt wird. Über die Geschwindigkeit des Sortierbands wird der Durchsatz des Sortierguts reguliert.²³ Eine Variation der Geschwindigkeit wirkt sich z. B. durch gesteigerten Energiebedarf auf die Prozesskosten aus, aber auch auf den Durchsatz und die abgetrennte Quantität.²⁴ Zur Abgrenzung von den qualitativen und mengenmäßigen Einflussfaktoren ist der Prozessparameter in der Übersicht durch eine Ellipse dargestellt (vgl. Abbildung 7.1).

Die **Wertstoffenergieerlöse** setzen sich zusammen aus einem wertstoffspezifischen Preis pro Quantitätseinheit und der Wertstoffquantität an sich. Die Wertstoffquantität eines ausgewählten Wertstoffs j ergibt sich aus den aussortierten und in den Container für diese Wertstoffart verschobenen Quantitäten λ_{kij} . So haben die Verschiebequantitäten über den Quantitätsterm u_j einen direkten Einfluss auf die Höhe der Wertstoffenergieerlöse (vgl. Abbildung 7.1). Die Wertstoffpreisgestaltung findet zudem auf Basis der Qualität der aussortierten Wertstoffobjektarten statt. Je reiner eine aussortierte Wertstoffobjektart ist, umso höher ist der zu erwartende Erlös. Die Wertstoffqualität wird durch die Sortenreinheit gemessen, die sich formal aus den jeweiligen Verschiebequantitäten λ_{kij} berechnet.²⁵ So kann an dieser Stelle von einer indirekten Auswirkung der verschobenen Quantitäten, moderiert durch die Gütekennzahl, auf die Wertstoffpreise und damit die gesamten Wertstoffenergieerlöse gesprochen werden. Die Güte wird – zumindest im Fall der händischen Sortierung – über die Verschiebequantitäten indirekt auch durch ρ beeinflusst (vgl. gestrichelten Pfeil von ρ zu λ_{kij}), weil abhängig von der Bandgeschwindigkeit die Verschiebequantitäten variieren können. So werden letztlich auch die Wertstoffenergieerlöse sowie die Entsorgungskosten durch ρ beeinflusst.

²² Vgl. Dyckhoff (1994), S. 240f. und 249.

²³ Der Durchsatz ist definiert als Quantität pro Zeit, die eine definierte Fläche, hier die Breite des Sortierbands an einer bestimmten Stelle im Sortierprozess, passiert.

²⁴ Wenn das Band schneller läuft, ist z. B. nicht sichergestellt, dass die Sortierkräfte (bei gleichbleibender Sortenreinheit) auch schneller abtrennen können.

²⁵ Vgl. für die formale Berechnung nochmals Abschnitt 6.1, Formeln (6.6) und (6.7), S. 124.

Auf den letzten Zielfunktionsterm, die **Entsorgungskosten** der Reststoffe, haben die Quantitäten λ_{kij} ebenfalls direkten Einfluss. Die Quantität übrig gebliebener Sortierreste wird durch die aussortierten Verschiebequantitäten der Wertstoffe determiniert. Der Kostensatz dieses Terms ist, im Gegensatz zu den Wertstoffpreisen, i. d. R. nicht durch das Sortierunternehmen beeinflussbar, sondern vom Entsorgungsunternehmen vorgegeben. In seltenen Ausnahmefällen ist ein positiver Preis denkbar, wenn der Absatz als Ersatzbrennstoff möglich ist. Eine gewisse Variabilität des Preises in Abhängigkeit vom Heizwert der Reststoffe erscheint dann plausibel.

Insgesamt konnten fünf wesentliche Einflussfaktoren auf die Elemente der Zielfunktion des Sortiermodells identifiziert werden. Das sind die Verschiebequantitäten λ_{kij} , die die Vermischung im Ausgangsgemisch beschreibenden Vermischungsgrade (VG), der Prozesssteuerparameter ρ und die Gütemaße Abtrennungsgrad (α) und Sortenreinheit (β) als ‚Moderator‘ der Verschiebequantitäten. Die Zielfunktion stellt sich mit den internalisierten Einflüssen schließlich wie folgt dar:

$$\text{Max! } SW = \underbrace{p_i(VG) \cdot v_i}_{\text{Annahmeerlöse}} - \underbrace{C^P(VG, \rho, \lambda_{kij})}_{\text{Prozesskosten}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{J-1} e_j(\alpha, \beta) \cdot u_j(\alpha, \beta)}_{\text{Wertstofferrlöse}} - \underbrace{c_J(\alpha, \beta) \cdot u_J(\alpha, \beta)}_{\text{Entsorgungskosten}} \quad (7.2)$$

Weitere Vorgehensweise

Vergleichbar mit Abbildung 6.1 zeigt Abbildung 7.2 auf der nächsten Seite die vier Zielfunktionsterme, die zusammen mit dem Nebenbedingungssystem das Sortiermodell bilden. In Kapitel 8 wird das Modell in einem Zwischenresümee gesamthaft dargestellt. Die Verknüpfung der zu maximierenden Zielfunktion mit dem in Kapitel 6 entwickelten Nebenbedingungssystem erfolgt über die Entscheidungsvariablen des Modells. Als Größen, über die es zu entscheiden gilt, wurden in Kapitel 6 die in den einzelnen Sortiervorgängen zu verschiebenden Quantitäten der Inputkomponenten λ_{kij} identifiziert. Durch sie werden die Wertstoffobjektartquantitäten u_j sowie die Reststoffobjektartquantität u_J als Ergebnis des Sortierprozesses gebildet. Aus diesen Quantitäten ergeben sich durch Bewertung mit Preisen die Wertstofferrlöse in der Zielfunktion.

Abbildung 7.2 zeigt auch die weitere Vorgehensweise in diesem Kapitel. Im nächsten Abschnitt 7.2 werden die Einflüsse der Verschiebequantitäten bzw. der durch sie gebildeten Kennzahlen Abtrennungsgrad und Sortenreinheit auf die Zielfunktionsterme untersucht sowie Möglichkeiten der Optimierung von α und β angesprochen.

7.2 Optimierung der Wertfunktion durch Abtrennungsgrad und Sortenreinheit

Im folgenden Abschnitt wird die Optimierung der Zielfunktion durch Abtrennungsgrad und Sortenreinheit diskutiert. Die Darstellung beruht im Wesentlichen auf den Plausibilitätsüberlegungen zur Optimierung der allgemeinen Wertfunktion für Abtrennungsprozesse von SOUREN. Sie soll im Hinblick auf das vorliegende neue Sortiermodell – als ein spezieller Abtrennungsprozess – analysiert werden.²⁶

7.2.1 Optimierung bei konstanter Sortenreinheit und variablem Abtrennungsgrad

Das allgemeine Wertmodell

SOUREN legt seinen Überlegungen ein allgemeines Wertmodell für Abtrennungsprozesse zugrunde. Auf ihm baut die oben eingeführte Zielfunktion des Sortiermodells auf. Zum besseren Verständnis der Argumentationslinien wird hier das allgemeine Wertmodell kurz vorgestellt. Es setzt sich aus folgenden Termen zusammen:²⁷

$$\underbrace{p_1 \cdot v_1}_{\text{Annahmeerlöse}} - \underbrace{\sum_z c_z \cdot v_z}_{\text{Zusatzinputkosten}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{J-1} e_j \cdot u_j}_{\text{Wertstofflerlöse}} - \underbrace{c_J \cdot u_J}_{\text{Entsorgungskosten}} - \underbrace{C^P}_{\text{Prozesskosten}} \quad (7.3)$$

Die Entgegennahme des Redukts erfordert eine Vergütung an den bzw. durch den Entsorger. Daher stehen im ersten Term in (7.3) die **Annahmeerlöse**. SOUREN nennt diesen Term Redukterlöse. In vielen Reduktionsprozessen ist der Einsatz eines oder mehrerer Zusatzinputs z erforderlich, z. B. in Form von Hilfsstoffen. Bei einem divergierenden Prozess, wie dem Sortierprozess, existiert definitionsgemäß aber nur eine Inputobjektart. In der Sortierung ist dies das Abfallgemisch. Zu seiner Sortierung sind keine weiteren Repetierfaktoren notwendig. Es fallen demnach keine **Zusatzinputkosten** an. Sie sind hier aus Gründen der Vollständigkeit und zum Verständnis des Modellaufbaus angeführt, werden aber im Folgenden aus der Betrachtung ausgeschlossen, da divergierende Prozesse nur eine Inputobjektart besitzen. Die **Wertstofflerlöse** werden durch den Wertstoffabsatz am Markt erzielt. Die **Entsorgungs-**

²⁶ Vgl. Souren (1996b), Kap. 8.

²⁷ Die Notation der Formel wurde der Notation dieser Arbeit angepasst. Die Originalformel findet sich bei Souren (1996b) in Formel (8.12), S. 147. Sie beruht auf den Formeln (6.19), Souren (1996b), S. 112, und (4.10), Souren (1996b), S. 79.

kosten fallen für nicht weiter recycelbare und daher zu entsorgende Reststoffe an.²⁸ In seltenen Fällen ist – wie bereits zuvor angeführt – denkbar, dass Reststoffe zu positiven Marktpreisen abgesetzt werden und Reststoff Erlöse erzielen können. Die **Prozesskosten** beinhalten die Kosten für die im Prozess eingesetzten Anlagen und Sortierkräfte. Das allgemeine Wertmodell unterscheidet sich somit nur hinsichtlich der Zusatzinputkosten von der Zielfunktion des Sortiermodells in (7.1).

Annahmen

Im Folgenden wird zunächst für die Optimierung eine konstante Sortenreinheit von 100 % unterstellt und der Abtrennungsgrad variiert bzw. nach ökonomischen Prämissen optimiert.²⁹ Vollständige Sortenreinheit liegt dann vor, wenn die aus einem Abfallgemisch abgetrennten Wertstoffe in eine Objektart, die nur diese Wertstoffe enthält, aussortiert werden. Der Abtrennungsgrad kann dabei unterschiedliche Werte annehmen.³⁰ Im Fall vollständiger Abtrennung wurden alle Teile der im Abfallgemisch enthaltenen Komponente in die zugehörige korrekte Wertstoffobjektart aussortiert. Ein Abtrennungsgrad kleiner als 100 % impliziert, dass sich noch Anteile der (Wertstoff-)Komponente im Abfallgemisch befinden. Bei der Optimierung über den Abtrennungsgrad gilt es zu bestimmen, bei welchem Abtrennungsgrad, unter der Annahme vollständiger Sortenreinheit, die Gesamtwertfunktion maximal ist.

In Anlehnung an SOUREN sei weiterhin unterstellt, dass genau eine Wertstoffobjektart aussortiert wird. Daneben existiert auf der Outputseite als weitere Objektart nur noch die Reststoffobjektart. Der Sortierprozess wird als in Grenzen variierbare Technik aufgefasst. Des Weiteren wird ein eindeutig gegebenes Produktionsniveau zugrunde gelegt, an das die Reduktquantität gekoppelt ist, d. h. ein Produktionsniveau von $\lambda = 1$ entspricht genau einer definierten Quantitätseinheit des Abfallgemisches.³¹

Wertmäßige Abhängigkeiten vom Abtrennungsgrad der Wertstoffobjektart

Die **Annahmegebühr** (Redukt(stück)erlöse), als erster Bestandteil der Wertfunktion, wird als abtrennungsgrad- und prozessunabhängig angenommen. Sie verläuft da-

²⁸ In Anlehnung an die Redukterlöse wird dieser Term bei SOUREN als Restreduktlerlöse bezeichnet.

²⁹ Vgl. hierzu und im Folgenden Souren (1996b), S. 151–162.

³⁰ Zur Definition des Abtrennungsgrads vgl. Formel 6.7, S. 125.

³¹ Vgl. hierzu und im Folgenden Souren (1996b), S. 151–162.

her **konstant**. Eine Ausnahme kann bei der Preisfestsetzung für das Redukt anhand von Selbstkosten vorliegen. Diese verändern sich in Abhängigkeit vom Abtrennungsgrad, was im Redukterlösterm berücksichtigt werden muss.³²

Die **Wertstofferrlöse** sind das Produkt aus dem konstanten Stückwert und der abgetrennten Quantität des Wertstoffs. Dieser Bestandteil der Wertfunktion ist nur von der abgetrennten Quantität abhängig, da auch hier – bedingt durch die konstante, vollständige Sortenreinheit – keine wertmäßige Abhängigkeit besteht. Die Wertstofferrlöse **steigen** daher mit zunehmender abgetrennter Quantität **linear** an. Alternativ könnte auch eine fallende Preis-Absatzfunktion für Wertstoffe denkbar sein, dann hätte die Wertfunktion einen nicht mehr linearen, sondern **leicht degressiv ansteigenden** Verlauf.³³

Der vierte Term der Wertfunktion (7.3) sind die **Reststofferrlöse bzw. -kosten** für die nach der Sortierung verbleibenden Reststoffe.³⁴ Sie ergeben sich als Produkt aus dem Stückwert bzw. Preis pro Quantitätseinheit und der Quantität der Reststoffe. Der Preis ist unmittelbar abhängig vom Abtrennungsgrad, da je nach Abtrennungsgrad der Wertstoffe die Zusammensetzung und damit der Inhalt der Reststoffe variiert, der wiederum den Preis bestimmt. Die Quantität der Reststoffe wird auch durch den Abtrennungsgrad beeinflusst. Sie ergibt sich im Fall von nur zwei vorliegenden Fraktionen, Wertstoffe und Reststoffe, als Residuum der abgetrennten Wertstoffquantität.

Bei der Gesamtbetrachtung des Reststoffwertbestandteils können sich die beiden abhängigen Faktoren sowohl verstärken als auch gegenläufig gerichtet sein. Eine möglichst hohe Abtrennung der Wertstoffe bedeutet eine geringere Vermischung der Reststoffe, wodurch die ‚saubereren‘ Reststoffe einen höheren Preis erzielen könnten. SOUREN führt als Beispiel die Abtrennung von Metallteilen aus Biomüll an.³⁵ Dies kann gleichermaßen auf die Entfernung von Metall aus anderen Abfallfraktionen wie Glas oder LVP übertragen werden. Es kann aber auch den gegenläufigen Effekt geben, z. B. wenn die vermeintlich sauberen Reststoffe nichts weiter als nur noch thermisch verwertbare Sortierreste sind, die dann deponiert werden müssen, oder die mit zunehmender Abtrennung größer werdende Konzentration von Gefahrstoffen z. B. Umweltgiften. In beiden Fällen zieht eine größere Wertstoffabtrennung eine geringere Reststoffquantität nach sich. Ein positiver Preis für die Reststoffe wird einen mög-

³² Diese Ausnahme trifft gelegentlich für öffentliche Entsorgungsaufträge zu bzw. vormalig beim DSD, vgl. Souren (1997).

³³ Vgl. Souren (1996b), S. 154f.

³⁴ Bei SOUREN wird dieser Term als Restreduktlerlöse bezeichnet.

³⁵ Vgl. Souren (1996b), S. 156.

lichst geringen Abtrennungsgrad der Wertstoffe bewirken, um die Reststoffquantität und damit die Reststofflöse soweit wie möglich zu erhöhen.³⁶

Der letzte Wertbestandteil in der Wertfunktion für Abtrennungsprozesse ist der Prozesskostenterm. Die **Prozesskosten** sind nach SOUREN zunächst abhängig vom Produktionsniveau λ , das als konstant unterstellt wird.³⁷ Für die Prozesskosten hat SOUREN keine Aufteilung in einen wertmäßigen bzw. quantitativen Term vorgenommen, sondern sie gesamthaft modelliert.³⁸ Die Prozesskosten haben in Abhängigkeit vom Abtrennungsgrad der Wertstoffe einen steigenden Verlauf. Je mehr Wertstoffe abgetrennt werden, desto höher sind die Prozesskosten.

Ein **linear** steigender Verlauf dieses Wertbestandteils ist bei einer einheitlichen bzw. gleichbleibenden Abtrennung, z. B. einer Demontage oder auch bei der Leergutsortierung plausibel. **Progressiv steigende** Prozesskosten in Abhängigkeit vom Abtrennungsgrad der Wertstoffe sind hingegen auch immer mit einem überproportionalen Einsatz der Prozessobjekte verbunden. Um auch tatsächlich die allerletzten Teilquantitäten aus einem Abfallgemisch auszusortieren und einen Abtrennungsgrad von 100% zu erzielen, ist der erhöhte und sehr kostenintensive Einsatz von Sortiermaschinen bzw. Sortierkräften erforderlich. SOUREN begründet die Kostenintensivität außerdem mit der sinkenden Sortierleistung pro Zeit, die entsteht, wenn für die Erzielung eines höheren Abtrennungsgrades funktionsgleiche Anlagen hintereinander geschaltet werden.³⁹ Hier können nachgelagerte Anlagen aufgrund des (zunächst stark) abnehmenden Anteils der gewünschten Komponente im Abfallgemisch immer weniger abtrennen als ihre Vorgänger. Bei gleichen Prozesskosten der hintereinander geschalteten Anlagen können die insgesamt progressiv verlaufenden Prozesskosten auch Sprünge aufweisen. Degressive Verläufe der Prozesskosten erscheinen für die Mehrzahl der Verfahren nicht sinnvoll und werden somit auch nicht betrachtet.⁴⁰

³⁶ Vgl. Souren (1996b), S. 155f.

³⁷ Für Sortierprozesse, die in die Klasse der in Grenzen variierbaren Techniken fallen, wurde bereits in Abschnitt 5.1.2.3 gezeigt, dass das Prozessniveau den Verschiebequantitäten entspricht.

³⁸ Vgl. Souren (1996b), S. 157.

³⁹ Vgl. hierzu und im Folgenden Souren (1996b), S. 157f.

⁴⁰ Ein insgesamt degressiver Verlauf der Prozesskosten wäre in dem äußerst seltenen Fall denkbar, wenn in Abhängigkeit von der Inputquantität z. B. von einer kleinen, für größere Quantitäten jedoch kostenintensiveren Anlage ab einer kritischen Menge auf eine größere Anlage, die mehr oder schneller sortieren kann, umgeschaltet wird. Für die erste, kleinere Anlage könnten stark linear steigende Kosten angenommen werden, der zweiten, größeren Anlage dagegen verlaufen die Kosten zwar auch linear aber deutlich flacher. So ergibt sich aus diesen beiden Teilabschnitten ein (degressiv) geknickter Gesamtverlauf.

Die Ermittlung des optimalen Abtrennungsgrads erfolgt durch die Maximierung der gesamten Wertfunktion bezogen auf den Abtrennungsgrad. Für einen Sortierprozess könnten sich dabei die Verläufe in Abbildung 7.3 ergeben.⁴¹

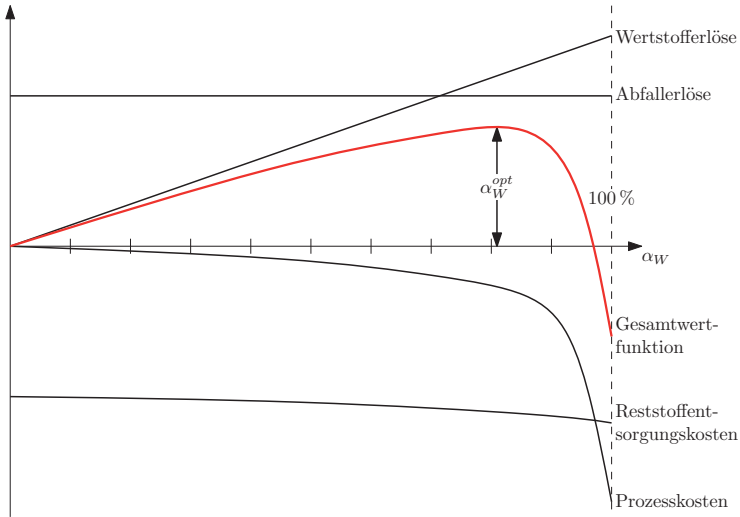


Abbildung 7.3: Qualitative Verläufe der einzelnen Wertbestandteile und der Gesamtwertfunktion jeweils in Abhängigkeit vom Abtrennungsgrad der Wertstoffobjektart (in Anlehnung an Souren (1996b), S. 161)

Die Gesamtwertfunktion in Abbildung 7.3 (rot) ergibt sich aus den einzelnen Wertbestandteilen. Dabei haben die Erlöse aus der Abfallgebühr sowie die Wertstoffertlöse einen als konstant bzw. linear unterstellten Verlauf. Die Reststoffentsorgungskosten sind mit zunehmendem Abtrennungsgrad als leicht progressiv steigend unterstellt. Die Prozesskosten nehmen ab einem kritischen Wert für den Abtrennungsgrad ebenfalls progressiv zu. Da im obigen Diagramm die Kosten nach unten abgetragen werden, fällt die Prozesskostenkurve. Der optimale Abtrennungsgrad lässt sich im Maximum der Gesamtwertfunktion ablesen. Im dargestellten Beispiel beträgt $\alpha_W^{opt} \approx 82\%$.⁴²

⁴¹ Angemerkt sei, dass an der Ordinate die ökonomische Bewertung in Erlösen bzw. Kosten abgetragen ist. Ihre Beschriftung wurde in Anlehnung an SOUREN jedoch bewusst weggelassen, da sie für jeden Wertbestandteil anders lauten müsste und keine für alle Funktionen gleichzeitig gültige Bezeichnung existiert.

⁴² Für einen empirischen Nachweis dieses Kostenverlaufs vgl. z. B. Souren (1997), S. 36.

7.2.2 Optimierung unsauberer Abtrennungsprozesse

In der Praxis werden viele Abtrennungsprozesse wie die Sortierung oftmals aus verschiedenen Gründen nicht sortenrein durchgeführt. Die abgetrennten Objektarten sind daher, bedingt durch Fehlwürfe, Gemische mit mehreren Komponenten. Eine aussortierte Wertstoffobjektart kann trotz der Fehlwürfe alle ursprünglich von ihr im Abfallgemisch enthaltenen und gewollt abgetrennten Objekte enthalten (Abtrennungsgrad 100 %). Es können aber auch von der gewünschten Objektart Anteile im restlichen Abfallgemisch zurückbleiben (Abtrennungsgrad $<100\%$). Optimierungsüberlegungen zu unsaubereren Abtrennungsprozessen können auf zwei Arten erfolgen. Einerseits kann die Argumentation wie im vorangegangenen Abschnitt 7.2.1 für einen optimalen Abtrennungsgrad bei konstanter, jedoch nicht mehr vollständiger Sortenreinheit gestaltet werden. Andererseits verweist SOUREN auf die interessanter erscheinende Analyse der optimalen Sortenreinheit bei konstantem Abtrennungsgrad bzw. die simultane Optimierung beider Kennzahlen.⁴³

Die Ausgangssituation der Überlegungen entspricht prinzipiell derselben wie im Abschnitt (7.2.1) zuvor. Jedoch wird nun der Abtrennungsgrad der betrachteten abgetrennten Objektart konstant, aber nicht notwendigerweise bei 100 %, gehalten. Das Produktionsniveau λ gilt weiterhin als (konstant) gegeben und es ist mit der Quantität des Abfallgemisches sowie seiner Zusammensetzung unmittelbar gekoppelt. Es sind hier auch wieder zwei Abhängigkeitsformen der einzelnen Wertfunktionsbestandteile, eine quantitative bzw. eine wertmäßige Abhängigkeit, denkbar.⁴⁴ Im Folgenden werden nicht alle Wertbestandteilsverläufe einzeln graphisch dargestellt, stattdessen erfolgt im Anschluss an die Erläuterung der einzelnen Abhängigkeiten und die Diskussion möglicher Verläufe eine gemeinsame Darstellung der Kurvenverläufe.

Der erste Wertbestandteil der Wertfunktion, die Redukterlöse bzw. **Annahmgebühren**, ist ebenso unabhängig von der Sortenreinheit der abgetrennten Objektart wie auch vom Abtrennungsgrad dieser Objektart. Die Abfallgebühren sind darüber hinaus auch unabhängig von der Wahl des Abtrennungsverfahrens. Graphisch werden sie hier wie im bereits diskutierten Fall als konstante Gerade abgebildet.

Die **Wertstoffertlöse** der abgetrennten Objektart, als zweiter Bestandteil der Wertfunktion, steigen fast immer mit zunehmender Sortenreinheit. Dabei wird die Wertsteigerung überwiegend durch den Stückwert bestimmt.⁴⁵ Grundsätzlich ist es so,

⁴³ Vgl. Souren (1996b), S. 162.

⁴⁴ Vgl. Souren (1996b), S. 163.

⁴⁵ Der Stückwert muss sich nicht zwangsläufig auf ein Stück der abgetrennten Objektart beziehen, er kann auch auf einen definierten Masseanteil, z. B. eine Tonne, bezogen werden.

dass bei einem konstanten Abtrennungsgrad die Sortenreinheit nur dadurch erhöht werden kann, dass Fehlwürfe in die gewollt abgetrennte Objektart verringert werden. Dadurch verringert sich die gesamte Objektartquantität (während die Quantität der gewünschten Komponente unverändert bleibt).⁴⁶ Dadurch ist es möglich, dass der Stückwert und die Quantität sich gegenläufig verhalten, wobei die Stückwertsteigerung die geringere Quantität mit steigender Sortenreinheit gewöhnlich überkompensiert.

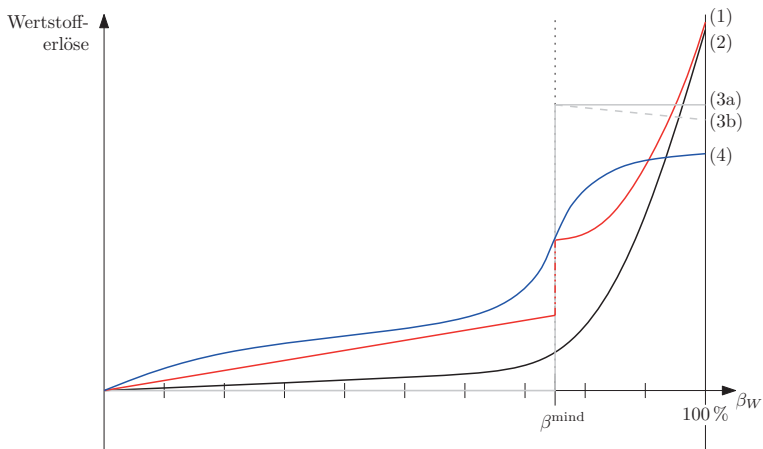


Abbildung 7.4: Beispielhafte Wertstoff-erlösverläufe bei konstantem Abtrennungsgrad und variabler Sortenreinheit

Für den Steigungsverlauf der Wertstoff-erlöse erscheinen eine Reihe unterschiedlicher Verläufe der Wertentwicklung plausibel. Abbildung 7.4 zeigt eine Auswahl möglicher Verläufe. Gewöhnlich ist die Wertsteigerung im Bereich kleiner Sortenreinheiten zunächst gering, und erst ab einer größeren, zunehmenden Sortenreinheit der abgetrennten Objektart steigen auch die Erlöse stärker an. SOUREN geht im mittleren Bereich der Sortenreinheit von einer progressiven Steigung aus.⁴⁷ Ein zentraler Wert, der großen Einfluss auf die Wertentwicklung der Wertstoff-erlöse in Abhängigkeit von der

⁴⁶ Wenn in einem Abfallgemisch 1000 kg einer Komponente enthalten sind und diese Komponente einen Abtrennungsgrad von 90 % hat, sind in die Outputobjektart 900 kg der Komponente aussortiert worden. Sind neben der gewünschten Komponente noch 100 kg aus Fehlwürfen in der Outputobjektart (insg. nun 1000 kg) enthalten, liegt eine Sortenreinheit von 90 % vor. Um die Sortenreinheit bei gleichem Abtrennungsgrad nun zu erhöhen, müssen die Fehlwürfe reduziert werden, z. B. auf 50 kg. Dann beträgt die Gesamtquantität der Outputobjektart nur noch 950 kg, aber die Sortenreinheit ist jetzt auf ca. 94,74 % gestiegen.

⁴⁷ Vgl. Souren (1996b), S. 164.

Sortenreinheit nimmt, ist die Mindestsortenreinheit. Sie ist kein für alle Abtrennungprozesse fixierter Wert, sondern kann individuell für jeden Prozess festgelegt werden. Das Erreichen dieser fixierten Mindestsortenreinheit stellt für den Wertbestandteilsverlauf einen markanten Änderungspunkt des Funktionsverlaufs dar, in dem sich die Steigungsform deutlich ändert oder die Funktion sogar eine Sprungstelle aufweist.

Kurve (1) in Abbildung 7.4 zeigt einen linear und zunächst nur geringfügig steigenden Verlauf, der bei Erreichen der Mindestsortenreinheit β_{mind} eine Sprungstelle aufweist und in der Folge progressiv weiter ansteigt. Der Verlauf von Kurve (2) zeigt zunächst einen linearen Verlauf mit progressivem Anstieg bei Erreichen von β_{mind} , jedoch ohne Sprungstelle. Die dritte Kurve (3a) weist einen treppenförmigen Verlauf auf, bei dem vor Erreichen der festgelegten Mindestsortenreinheit keine Erlöse erzielt werden und ab dem Erreichen von β_{mind} ein fixer Betrag gezahlt wird. In diesem seltenen Ausnahmefall liegt eine Unabhängigkeit der Erlöse von der Quantität vor. In der Regel sinken die Wertstoff Erlöse nach Erreichen von β_{mind} aber sogar leicht (vgl. Kurve (3b)), weil mit steigender Sortenreinheit die Quantität des Wertstoffoutputs sinkt. Kurve (4) zeichnet den oben erwähnten von SOUREN beschriebenen Verlauf mit geringer Steigung bei kleiner Sortenreinheit, progressivem Verlauf im mittleren Bereich und einem degressiven Wertverlauf nach Überschreiten der Mindestsortenreinheit nach.

Für den **Wertverlauf des Reststoffwertbestandteils** sind sowohl positive als auch negative Korrelationen des Preises bzw. der Quantität mit der Sortenreinheit des aus-sortierten Wertstoffs möglich. Bei konstantem Abtrennungsgrad und steigender Sortenreinheit verringert sich die als Wertstoff abgetrennte Quantität. Folglich erhöht sich die Reststoffquantität. Der Preis für die Reststoffe kann mit der Sortenreinheit (der Wertstoffe) fallen oder steigen. Im Beispiel der Trennung von Metall (Reststoff) aus Bioabfall (Wertstoff) steigen die Preise beider Objektarten je sortenreiner die Trennung erfolgt. Allerdings kann der Wert der Reststoffe mit zunehmender Entfernung der Wertstoffe auch sinken, z. B. durch die zunehmende Konzentration von Gefahrstoffen. Der resultierende Verlauf hängt vom Zusammenspiel von Preis und Quantität ab.⁴⁸

Der Wertbestandteil **Prozesskosten** verläuft i. d. R. steigend. Eine höhere Sortenreinheit kann nur durch eine intensivere bzw. längere Nutzung der Anlagen erreicht werden. Dabei ist ein progressiver Verlauf am plausibelsten. Ein konstanter Verlauf ist hingegen eher auszuschließen.⁴⁹

⁴⁸ Vgl. Souren (1996b), S. 165.

⁴⁹ Vgl. Souren (1996b), S. 65.

Die Gesamtwertfunktion in Abhängigkeit von der Sortenreinheit weist, analog zur Abhängigkeit vom Abtrennungsgrad in Abbildung 7.3, die Sortenreinheit mit dem maximalen Gesamtwert als optimal aus. Der Verlauf wird durch die vier Wertbestandteile Wertstoff Erlöse, Abfallgebühr, Reststoffentsorgungskosten und Prozesskosten determiniert. Mögliche Wertbestandteilverläufe und einen möglichen, rein qualitativen Gesamtwertverlauf zeigt nachfolgend Abbildung 7.5. Die optimale Sortenreinheit wird anhand des Wertfunktionsmaximums für dieses Beispiel bei ca. 92 % abgelesen.

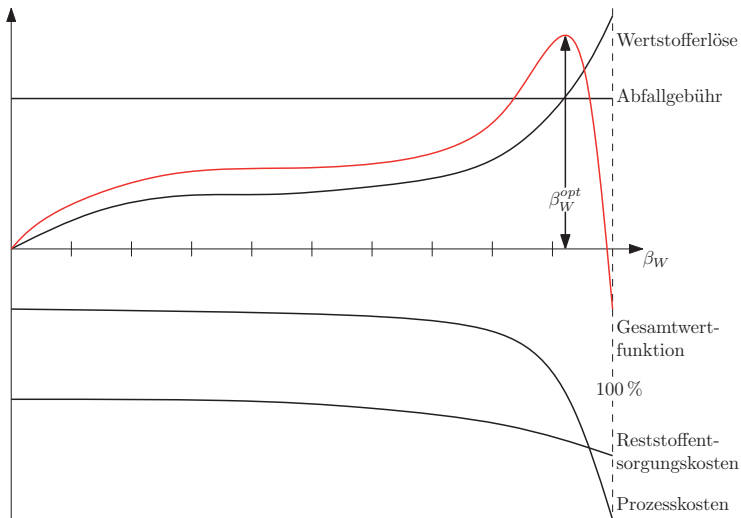


Abbildung 7.5: Wertbestandteilverläufe und Gesamtwertverlauf in Abhängigkeit von der Wertstoffsortenreinheit

7.2.3 Simultane Optimierung von Abtrennungsgrad und Sortenreinheit

SOURN hatte zunächst das Konzept einer gemeinsamen Kennzahl aus Abtrennungsgrad und Sortenreinheit, die Trenngüte, eingeführt.⁵⁰ Im Rahmen einer Prozessoptimierung wurde dieses Konzept jedoch verworfen, da voneinander verschiedene Reduktionsprozesse mit unterschiedlichen Ausprägungen von Abtrennungsgrad und Sortenreinheit aufgrund ihrer multiplikativen Verknüpfung den gleichen Trenngütwert

⁵⁰ Vgl. Souren (1996b), S. 143f.

aufweisen können.⁵¹ Aus diesem Grund ist eine zweidimensionale Optimierung über alle Kombinationen der Kennzahlen erforderlich. Gesucht wird dabei diejenige Kombination aus Abtrennungsgrad und Sortenreinheit, bei der der Gesamtwert maximal ist. Graphisch wird dieses Optimierungsproblem durch ein dreidimensionales Wertgebirge über Abtrennungsgrad und Sortenreinheit abgebildet. Abbildung 7.6 zeigt ein exemplarisches Wertgebirge.

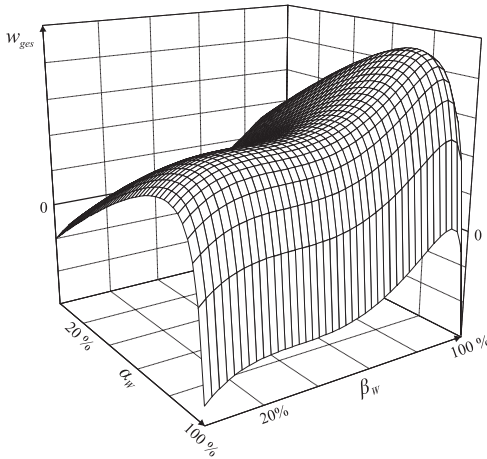


Abbildung 7.6: Wertgebirge über Abtrennungsgrad und Sortenreinheit (Souren (1996b), S. 167)

Die Gesamtwertverläufe der beiden Kennzahlen sind an die beispielhaften Verläufe der Abbildungen 7.3 und 7.5, wenn jeweils eine Kennzahl konstant gehalten wurde, angelehnt und überlagert. Eine einzelne Schnittebene durch das Wertgebirge zeigt den gerade beschriebenen Wertverlauf der Sortenreinheit für einen konstanten Abtrennungsgrad wie in o. g. Abbildung 7.5. Dies gilt ebenso für eine Schnittebene parallel zur Abtrennungsgradachse, d. h. für eine jeweils konstante Sortenreinheit. Das Gesamtoptimum der Kombination aus Abtrennungsgrad und Sortenreinheit ist dort abzulesen, wo das Wertgebirge seinen höchsten Punkt besitzt.

7.2.4 Kritische Würdigung

SOUREN hat erkannt, dass bei der Präferenzierung verschiedener Abtrennungsalternativen nicht ausschließlich die Güte des Prozesses als Entscheidungskriterium heran-

⁵¹ Vgl. Souren (1996b), S. 143f. und S. 166.

gezogen werden sollte. Vielmehr hat er gezeigt, dass aus ökonomischer Perspektive neben der Trenngüte bzw. ihren Bestandteilen Abtrennungsgrad und Sortenreinheit stets auch die wertmäßigen Auswirkungen zu berücksichtigen sind. Das Erzielen eines hohen Abtrennungsgrads bzw. einer hohen Sortenreinheit ist oftmals mit sehr hohen Kosten verbunden. Diese Kosten könnten den Erlös, als Maß des Erfolgs, übersteigen.⁵²

Kritisch zu sehen ist, dass SOUREN bei seinem allgemeinen Wertmodell für Abtrennungsprozesse davon ausgeht, dass die Stückerlöse für das Redukt stets gleichbleibend sind und nicht in Abhängigkeit von seiner Zusammensetzung modelliert werden müssen.⁵³ Für Abtrennungsprozesse, die immer nach dem gleichen Muster ablaufen und dafür stets den gleichen Input erfordern, wie z. B. die Demontage, kann diese Annahme als zutreffend beurteilt werden. Bei anderen Abtrennungsprozessen, wie den Sortierprozessen, ist die zentrale Ausrichtung des Prozesses insbesondere die bewusste Abtrennung von speziellen Objektarten aus einem (Abfall-)Inputgemisch, das jedes Mal eine veränderte Zusammensetzung aufweist. Diese kann von Prozess zu Prozess bzw. im Zeitablauf variieren und ist dem Sortierer unbekannt.⁵⁴ Der Prozessablauf, die Prozessdauer und letztlich auch das Prozessergebnis hängen jedoch gerade von der Reduktzusammensetzung ab. Daher sollten zweckmäßigerweise bei Sortierprozessen die Redukterlöse, d. h. die Annahmegebühr, sowie die Prozesskosten im Unterschied zum allgemeinen Wertmodell für Abtrennungsprozesse, in Abhängigkeit der Zusammensetzung des Redukts modelliert werden. Dies wird in den nachfolgenden Abschnitten untersucht.

7.3 Direkte Auswirkungen durch Anpassung der Bandgeschwindigkeit

Eine unmittelbare Beeinflussung der Prozesskosten erfolgt durch den Prozessparameter ρ , der im Folgenden als die Geschwindigkeit des Sortierbands und damit des gesamten Prozesses verstanden wird. Eine Veränderung der Bandgeschwindigkeit erfolgt oftmals mit dem Ziel, Schwankungen in der Beschäftigung auszugleichen. Diese sind häufig mit einer zu hohen oder zu niedrigen Schüttdichte der Abfallaufgabe auf

⁵² Vgl. Souren (1996b), S. 145 und 148.

⁵³ Vgl. Souren (1996b), S. 147.

⁵⁴ Beispielsweise unterscheiden sich die Abfallquantität und -zusammensetzung nach Feiertagen von denen in ‚normalen‘ Wochen.

das Sortierband gekoppelt.⁵⁵ Bei der Anpassung von ρ , die in der Produktionswirtschaft auch als Intensität bezeichnet wird, muss unterschieden werden, ob ausschließlich die technischen Anlagen dieser Geschwindigkeitsänderung unterliegen oder ob davon auch die Mitarbeiter der Handklaubung betroffen sind. Eine Anpassung der Maschinen kann innerhalb der technischen Leistungsfähigkeit relativ unproblematisch erfolgen. Wird das Sortierband schneller betrieben, müssen die Erfassungseinrichtungen wie z. B. Nahinfrarotsensoren mehr Objekte in kürzerer Zeit erkennen. Infolgedessen müssen die mechanischen Stößel bzw. Ausblasdüsen zur Ausschleusung der identifizierten Objekte entsprechend schneller angesteuert bzw. bewegt werden.⁵⁶

Zu den Grenzen des nutzbaren Geschwindigkeitsintervalls gibt es für die technischen Anlagen Herstellerangaben bzw. unternehmenseigene Erfahrungswerte. Die Erkennungs- und Sortierzeiten liegen bei der automatischen Klaubung im Millisekundenbereich. Sie können aber nicht beliebig verringert werden. So kann es zu Problemen führen, wenn Prozessparameter außerhalb des optimalen Betriebsbereichs gewählt werden.⁵⁷ Neben gesteigerten Kosten für den Betrieb sind Fehlwürfe in die falsche Outputobjektart eine weitere mögliche Folge. Auch Prozessausträge, bei denen die Objekte den Sortierprozess verlassen, also ‚daneben fallen‘, können zunehmend auftreten.

Bezogen auf menschliche Arbeitskräfte sind der Anpassung der Bandgeschwindigkeit enge Grenzen gesetzt. Ein Sortierer kann auf der ihm zugeteilten Fläche in einem bestimmten Zeitintervall nur eine begrenzte Anzahl Objekte abtrennen. Um eine möglichst gute Abtrennung und Sortenreinheit zu erzielen, wird den Sortierkräften nur eine sehr geringe Anzahl (ein bis zwei) unterschiedlicher Fraktionen mit einem spezifischen optischen Trennmerkmal zur Klaubung zugeteilt. UHLIG und BREMERSTEIN geben als Intervall für die Bandgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Korngröße und Dichte des Materials 0,1 bis 0,2 Meter pro Sekunde an.⁵⁸ ρ beeinflusst demnach auch die Verschiebequantitäten λ_{kij} und infolgedessen auch Abtrennungsgrad und

⁵⁵ In realen Sortierprozessen wird der Entsorger bestrebt sein, eine gleichmäßige Aufgabe zur Aufrechthaltung der Prozessabläufe und -ergebnisse zu gewährleisten. Zur Verdeutlichung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen erscheint die Betrachtung von Beschäftigungsschwankungen sinnvoll.

⁵⁶ Vgl. zum Austrag mit der Schiebermethode Schubert (1996b), S. 455.

⁵⁷ Die Alternative zur beschäftigungsabhängigen Anpassung der Geschwindigkeit wäre die Um- oder Neudimensionierung der Anlagen, z. B. die Verbreiterung des Sortierbands. Dies ist allerdings mit Investitionskosten verbunden und kurzfristig nicht möglich. Investitionsentscheidungen sind nicht Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit.

⁵⁸ Vgl. Uhlig/Bremerstein (1997), S. 23f., bzw. zur Anzahl der sortierten Fraktionen an einem Sortierplatz vgl. ebenda, S. 27, sowie Abschnitt 3.3.3.

Sortenreinheit. Die wiederum moderieren den Einfluss von λ_{kij} auf weitere Zielfunktionsterme wie Wertstofflöse und Reststoffentsorgungskosten.

Neben der oben angesprochenen Erhöhung könnte in außergewöhnlichen Aufgabesituationen auch eine Verringerung der Bandgeschwindigkeit erfolgen. Häufen sich beispielsweise Objekte einer ausgewählten (Wertstoff-)Fraktion auf dem Sortierband, erscheint es zweckmäßig die Geschwindigkeit zu verringern, damit die Sortierkräfte mehr Zeit haben, die Fraktion abzutrennen.⁵⁹ Ein verlangsamtes Band trägt außerdem zu einer besseren Erkennung und Zuordnung einzelner Objekte zu den Wertstofffraktionen sowie einer daraus folgenden umfangreicheren und saubereren Abtrennung bei. Erschwerte Identifikation tritt insbesondere dann auf, wenn Fraktionen sich sehr ähnlich sind.⁶⁰ Für die Sortierer ist es c.p. schwieriger, ähnliche Fraktionen auseinanderzuhalten und dem korrekten Wertstoffcontainer zuzuordnen. Es ist z. B. allein anhand optischer Trennmerkmale für die Sortierer nicht oder nur schwierig zu unterscheiden, aus welchem Material Kunststoffflaschen oder Joghurtbecher gefertigt sind.⁶¹

Aus der Güterproduktion lässt sich erforderlichenfalls das Konzept des Intensitätssplitting übertragen. Bei dieser Anpassungsform wird die Geschwindigkeit während des Prozesses verändert und den Gegebenheiten angepasst. Es werden stufenweise und kontinuierliche Variation unterschieden. Eine stufenweise Anpassung der Intensität würde bedeuten, die Geschwindigkeit zwischen drei exemplarischen Schaltstufen (schnell, mittel oder langsam) zu variieren. Die kontinuierliche Anpassung erlaubt eine stufenlose Wahl der gewünschten Intensität.⁶²

In der betriebswirtschaftlichen Literatur bzw. der Produktionstheorie erfolgt eine Auseinandersetzung mit der intensitätsmäßigen Anpassung sowie mit den durch sie

⁵⁹ Hierbei muss dann berücksichtigt werden, dass bei langsamer laufendem Band auch die Geschwindigkeit der Sortiergutaufgabe angepasst wird, da sich sonst die Flächendichte bzw. durch dreidimensionale Aufgabe die Schüttdichte erhöht. Dies wiederum würde sich negativ auf die Handklaubung auswirken, da nicht mehr alle Objekte für die Sortierkräfte direkt sichtbar wären.

⁶⁰ Zur Ähnlichkeitsproblematik und der Messung von Ähnlichkeiten z.B. bei Varianten in der Produktion vgl. Buchholz (2012), Kapitel 4.

⁶¹ Es existieren inzwischen sehr viele verschiedene Kunststoffe und Kunststoffmischungen. Für ein wertschöpfendes Recycling müssen sie aber unbedingt in die einzelnen Fraktionen getrennt werden. Daher werden den weitestgehend eingesetzten automatischen Sortierprozessen, die diese Kunststoffsorten unterscheiden können, Anreicherungsprozesse vorgeschaltet, in denen z. B. nach der Form (PET-Flaschen o. ä.) vorsortiert wird. Vgl. zu Untersuchungen zur Effizienz von Anreicherungsverfahren für Kunststoff aus Hausmüll Jansen/Pretz (2011).

⁶² Vgl. Dyckhoff (1994), S. 254f. DYCKHOFF gibt darüber hinaus an, dass ein Intensitätssplitting bei einer endlich wählbaren Anzahl Stufen nur zwischen benachbarten Stufen effizient und möglicherweise kostenminimal ist.

anfallenden Kosten.⁶³ GUTENBERG bezeichnet die intensitätsmäßige Anpassung als unterschiedlich starke Nutzung der Anlagen über die unveränderte Betriebsdauer, wenn sich die Beschäftigung verändert, d. h. rückläufig ist oder sich erhöht.⁶⁴ Dies entspricht im Wesentlichen der Beschreibung eines Sortierprozesses, dessen Bandgeschwindigkeit erhöht wird, weil mehr Wertstoffe im Sortiergut vorliegen oder eine erhöhte Quantität in gleicher oder kürzerer Zeit getrennt werden soll. Aber auch eine Verringerung der Geschwindigkeit, die dazu beiträgt, die gewünschte Qualität des Produkts bzw. der aussortierten Wertstoffe zu erzielen, zählt dazu.⁶⁵

Hinsichtlich der Kosten wird ein Sortierunternehmen, ebenso wie ein Produzent, immer danach streben, die Maschinen mit dem günstigsten Wirkungsgrad zu betreiben, weil die Betriebskosten an dieser Stelle ihr Optimum aufweisen. Der günstigste Wirkungsgrad umfasst oftmals ein (relativ enges) Intervall, innerhalb dessen die Intensität variiert werden kann, ohne dabei die Kosten signifikant zu erhöhen. Die in diesem Intervall liegende Intensität wird auch als effiziente Intensität bezeichnet.⁶⁶ Jede über die Intervallgrenzen hinausgehende Abweichung führt zu einer Erhöhung der Betriebskosten.⁶⁷ Für einen Sortierprozess kann unter der Annahme, dass mit der Intensität ρ der Durchsatz variiert wird, der Verlauf der Prozesskosten in Abhängigkeit von ρ graphisch dargestellt werden (vgl. Abbildung 7.7).⁶⁸

Die Abbildung zeigt einen exemplarischen Prozesskostenverlauf der Sortierung in Abhängigkeit der Bandgeschwindigkeit ρ . Im Intervall der effizienten Bandgeschwindigkeit zwischen ρ^1 und ρ^2 weisen die Prozesskosten ihr Minimum auf.⁶⁹ Jede Abweichung von diesem Intervall würde eine Erhöhung der Kosten bedeuten; die Kurve steigt wieder an. Dabei fällt die Kostensteigerung bei einer Abweichung in Richtung

⁶³ Vgl. Gutenberg (1983), S. 361–371.

⁶⁴ Vgl. Gutenberg (1983), S. 355.

⁶⁵ Vgl. Gutenberg (1983), S. 364.

⁶⁶ Vgl. zu den effizienten Intensitäten Dyckhoff (2006), S. 301f.

⁶⁷ Vgl. Gutenberg (1983), S. 363f. Häufig sind mit Abweichungen diejenigen in Richtung der maximalen Intensität gemeint, dies gilt aber ebenso für das Unterschreiten der effizienten Intensität.

⁶⁸ Eine Veränderung des Durchsatzes geht nicht nur mit einer Veränderung der auf dem Sortierband transportierten Quantität einher, sondern sie beeinflusst auch die Ausbringungsmenge, d. h. die abgetrennten Wertstoffquantitäten (und dadurch auch die Wertstoff Erlöse). Dies ist äquivalent zu GUTENBERGS Darstellung der Intensitäten durch die ausgebrachte Produktmenge, vgl. Gutenberg (1983), S. 367.

⁶⁹ Die Kurve verläuft in diesem Bereich sehr flach, besitzt aber keinen Geradenabschnitt. Es kann tatsächlich ein ρ^{eff} bestimmt werden, aber innerhalb des Intervalls sind die Unterschiede zu etwas darüber oder etwas darunter liegenden Werten für ρ nur verschwindend gering.

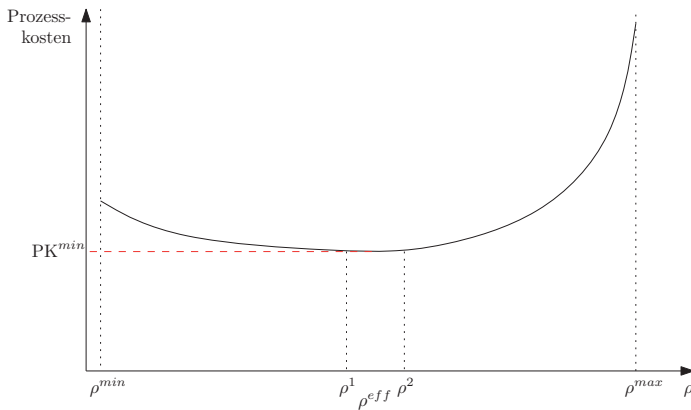


Abbildung 7.7: Prozesskosten in Abhängigkeit vom Prozessparameter mit erhöhten Kosten bei Abweichung von den effizienten Intensitäten

der maximalen Bandgeschwindigkeit größer aus als bei einer Verringerung der Bandgeschwindigkeit.⁷⁰

Eine Absenkung von ρ kann sich in besonderen Situationen, wie dem erhöhten Aufkommen ausgewählter, insbesondere hochwertiger, Wertstofffraktionen im Sortiergut, als sinnvoll erweisen. Zwar erhöhen sich dadurch die Prozesskosten, wie in Abbildung 7.7 dargestellt, aber die Sortierkräfte können einen höheren Austrag in Verbindung mit einem zumindest gleichbleibenden oder sogar steigenden Abtrennungsgrad der Wertstofffraktionen erzielen. Die Sortenreinheit kann dabei gleichfalls gesteigert werden. Sie sollte aber mindestens konstant bleiben und nicht abfallen. Durch den höheren Austrag, größeren Abtrennungsgrad und die möglicherweise auch gestiegene Sortenreinheit werden höhere Wertstofflöse erzielt. Damit kann die Prozesskostensteigerung durch das verlangsamte Sortierband ausgeglichen oder sogar überkompensiert werden. Abbildung 7.8, S. 176, zeigt einen exemplarischen Verlauf der Wertstofflöse in Abhängigkeit von ρ bei händischer Sortierung.

⁷⁰ Auch RIEBEL hat sich mit Kostenverläufen bezogen auf die Durchlaufgeschwindigkeit in der Produktion beschäftigt, vgl. Riebel (1957), S. 218ff. und S. 235ff. Er definiert die Durchlaufzeit als reziproken Wert der Verweilzeit der Rohstoffe im Prozess bis zum fertigen Produkt. Die Kosten setzen sich ihm zufolge aus einem verweilzeitunabhängigen und einem verweilzeitproportionalen Anteil zusammen. Dabei bleibt der verweilzeitunabhängige Teil der Kosten von der Durchlaufgeschwindigkeit unabhängig, „während die verweilzeitproportionalen Kosten mit zunehmender Durchlaufgeschwindigkeit zunächst sehr stark abnehmen und allmählich flacher verlaufen.“, Riebel (1957), S. 235. Hierin liegt der Unterschied zum exemplarischen Kostenverlauf des Sortierprozesses, bei dem die Kosten ab einem kritischen Punkt, der Obergrenze des Intensitätsintervalls, mit weiter zunehmender Geschwindigkeit wieder ansteigen.

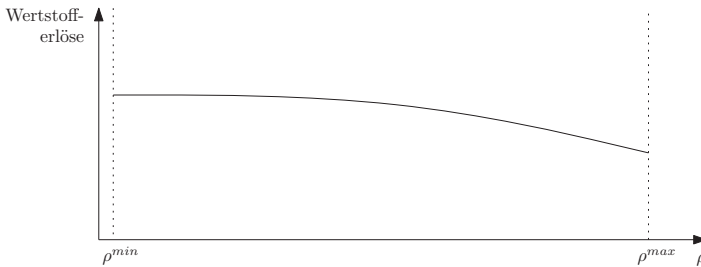


Abbildung 7.8: Exemplarischer Wertstoff-erlösverlauf in Abhängigkeit von ρ bei händischer Sortierung

Im Bereich geringer Bandgeschwindigkeit sind die Wertstoff-erlöse am höchsten, weil hier sowohl der Abtrennungsgrad der Wertstoffe als auch die Sortenreinheit, die den Preis für die Wertstoffe mitbestimmt, am größten sind. Mit steigender Bandgeschwindigkeit fallen die Wertstoff-erlöse stärker ab, weil zum einen die Sortierwerker nicht mehr so viel Wertstoffquantität abtrennen können und zum anderen durch zunehmende Fehlwürfe die Sortenreinheit der abgetrennten Wertstofffraktionen absinkt, sodass nur noch geringere Erlöse erzielt werden.

Die Veränderung der Bandgeschwindigkeit beeinflusst über Abtrennungsgrad und Sortenreinheit nicht nur die Wertstoff-erlöse, sondern auch die Reststoffentsorgungskosten. Wenn bei sehr hohem ρ in der händischen Sortierung weniger Wertstoffquantität abgetrennt wird, weil die Sortierkräfte nicht schneller greifen können, dann nimmt die Reststoffquantität zu. Falls dann die Reststoffentsorgungskosten abhängig von der Reststoffquantität ermittelt werden, kommt es bei zu einer Erhöhung (vgl. Abbildung 7.9). Der Preis pro Quantitätseinheit ist dabei und im Folgenden als konstant angenommen.

Bei niedrigem ρ sind verschiedene Szenarien vorstellbar. Wenn in diesem Fall besonders sauber sortiert wird, d. h. der Abtrennungsgrad der Wertstoffe und zugleich ihre Sortenreinheiten auch sehr hoch sind, dann kann die Reststoffquantität einerseits gering sein, weil die Wertstoffobjekte, die sonst in der Reststofffraktion verbleiben würden, abgetrennt werden. Die Gesamtabtrennung in die Wertstofffraktionen erhöht sich. Die Reststoffentsorgungskosten sind gering (vgl. Kurve (1) in Abbildung 7.9). Andererseits ist mit kleiner werdendem ρ aber auch eine Zunahme der Reststoffquantität denkbar, weil nicht mehr so viele Reststoffobjekte fälschlicherweise in die Wertstofffraktionen abgetrennt werden. Infolgedessen würde die Gesamtabtren-

nung sinken. Die Reststoffentsorgungskosten würden dann steigen (vgl. Kurve (2) in Abbildung 7.9).

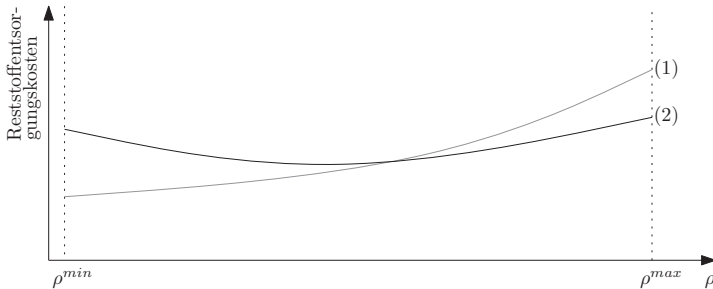


Abbildung 7.9: Exemplarischer Verlauf der Reststoffentsorgungskosten in Abhängigkeit von ρ

7.4 Vermischungsgrade als Einflussfaktoren auf die Prozesskosten

In Abschnitt 7.1.3 wurde festgestellt, dass die Vermischungsgrade – als Maß für die Vermischung des Inputgemischs – zwei Terme der Zielfunktion des Sortiermodells beeinflussen. Das ist zum einen der Prozesskostenterm, dessen Veränderungen abhängig von den Vermischungsgraden in diesem Abschnitt analysiert werden sollen, und zum anderen die Annahmegebühr, deren Beeinflussung durch die Vermischungsgrade erst im nächsten Abschnitt 7.5 untersucht wird.

7.4.1 Prozesskostenbestandteile und weitere Annahmen

Analyse der Prozesskostenbestandteile

Die Prozesskosten setzen sich aus **variablen** und (weitgehend) **fixen Bestandteilen** zusammen. Zu den fixen Prozesskosten zählen z. B. die Kosten für die Bereithaltung der Anlagen im Leerlauf bzw. im laufenden Betrieb, die nicht von den Vermischungsgraden oder anderen Einflussgrößen des Sortiermodells beeinflusst werden. Des Weiteren zählen auch Wartungskosten für regelmäßige, festgelegte Wartungszyklen dazu. Investitionskosten bei Anschaffung und Auslegung von Anlagen, die zumeist zu den

fixen Kosten gezählt werden, werden hier ausgespart.⁷¹ Und auch die weiteren fixen Prozesskostenbestandteile werden im Folgenden nicht näher betrachtet.

Die **variablen Prozesskosten** des Sortierprozesses bestehen aus den Personalkosten und den Maschinenkosten.⁷² Die **Personalkosten** sind insbesondere bei der **Handklaubung** variabel und stark schwankend. Sie ergeben sich zum einen aus der Mitarbeiteranzahl sowie zum anderen aus der individuellen Sortierleistung der Mitarbeiter. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Mitarbeiter, der durch häufigeres Greifen, größere Greiferkapazität oder längere Austragungswege eine höhere Sortierarbeit gegenüber anderen Mitarbeitern oder der ‚Normalsituation‘ verrichtet, (zumindest kalkulatorisch) auch höhere Personalkosten verursacht.

Die **Maschinenkosten** lassen sich in (variable) Wartungskosten und Betriebskosten aufgliedern. Die Wartungskosten sind insofern variabel, als es bei der Sortierung zu unvorhersehbaren Zeitpunkten zu Maschinenausfällen kommen kann, die eine Reparatur, einen Werkzeugwechsel oder weitere Eingriffe wie die Reinigung von anhaftendem Sortiergut erfordern. Die Maschinenkosten könnten zwar für jede einzelne Sortiermaschine erfasst werden, sollen nachfolgend aber gesamthaft für die Sortieranlage (als Maschinenverbund) bzw. speziell für die **automatische Klaubung** mit Förderanlage, Erkennungsprozess und Auswurfanlage betrachtet werden. Als Betriebskosten der Maschinen werden hier die Energiekosten verstanden, die mit der Geschwindigkeit der Maschine bzw. den Austragungsvorgängen und -wegen von Greifern variieren. Jeder weitere Greifvorgang erfordert demnach Energie und verursacht somit einen Anstieg der Prozesskosten.

Für die variablen Prozesskostenbestandteile sollen im Folgenden die Einflüsse von Vermischung – gemessen durch die in Kapitel 4 diskutierten unterschiedlichen Vermischungsgrade – jeweils am Beispiel der händischen und automatisierten Klaubung untersucht werden. Dabei können zwei verschiedenartige Vermischungseinflüsse beobachtet werden. Dies sind zum einen direkte Einflüsse der Vermischung auf die Prozesskosten und zum anderen indirekte Einflüsse der Vermischung, die z. B. erst durch eine Anpassung der Bandgeschwindigkeit auf die Prozesskosten durchschlagen.

⁷¹ Vgl. zur Analyse und Unterstützung von Investitionsentscheidungen für Sortierprozesse Spengler/Ploog (2001).

⁷² Vgl. Bosch (2006), S. 2.

Zusätzliche Annahmen

Die Sortierbeispiele Leergutsortierung und Wertstoffsartierung werden auch in diesem Kapitel weiter vertieft. Diese Beispiele wurden gezielt ausgewählt, da die Verpackungarten voneinander verschiedene Ausprägungen von Anordnung und Struktur aufweisen. Die mit Leergut bestückten Kästen sind zweidimensional vermischt und haben durch die vorgegebene Einteilung in einzelne Gefache eine fixierte Struktur. Die Leichtverpackungen hingegen sind bei ihrer Anlieferung dreidimensional vermischt. Diese Vermischung wird bei der Aufgabe auf das Sortierband verändert und durch eine einschichtige Aufgabe in eine zweidimensionale Vermischung ohne fixierte Struktur umgewandelt. Für automatische Klaubung werden die Abfallobjekte sogar vereinzelt, sodass die Vermischung nur noch eindimensional ist. Es soll im Folgenden für die Analyse von Vermischungseffekten bei beiden Beispielen zwischen Handklaubung und automatischer Sortierung unterschieden werden.

Die Analyse der Vermischungseinflüsse ist nur sinnvoll, wenn das technische Sortierverfahren nicht vorgibt, dass – sowohl bei der händischen Sortierung als auch bei der automatischen Klaubung – jedes Objekt einzeln gehandhabt und ausgetragen werden muss. In diesem Fall wären z. B. die unterschiedlichen Kapazitäten von Greifersystemen irrelevant, weil sie auf jeden Fall einzeln zugreifen müssen. Die Prozesskosten wären grundsätzlich konstant. Bei der folgenden Untersuchung werden die jeweils relevanten Abtrennungsprinzipien, die determinieren, wie sich die Vermischung auf die Prozesskosten auswirkt, kurz erläutert, sodass hier auf eine generelle Übersicht aller möglichen Auswurfverfahren verzichtet wird.

Vereinfachend wird die Sortierung einer standardisierten Tonne Wertstoffabfallinput unterstellt, auf die sich die Prozesskosten beziehen. Für die Getränkekästen ist die Bezugsgröße die Anzahl Kästen pro Stunde. Die Zusammensetzung der Fraktionen und ihrer Vermischungsgrade werden aus didaktischen Gründen als bekannt unterstellt. Abtrennungsgrad und Sortenreinheit werden im Rahmen der *ceteris paribus*-Betrachtung vorab festgelegt. Dabei macht es einen Unterschied, ob die Paarung ($\alpha = 100\%|\beta = 100\%$) oder ($\alpha = 90\%|\beta = 90\%$) gewählt wird. Die erste Paarung stellt den unwahrscheinlichen Sonderfall dar, dass das Inputgemisch vollständig und sortenrein in die Wertstoffobjektarten abgetrennt wird. Der zweite Fall ist möglich, allerdings ist der Wert für die Sortenreinheit deutlich schlechter als mit heutigen Sortierverfahren erreicht werden kann. Angemessene, in der Praxis erzielte Werte sind ein Abtrennungsgrad von 90 % und eine Sortenreinheit von 95 %.⁷³

⁷³ Vgl. Souren (1997), S. 35. PRETZ gibt für β in einigen Fällen sogar noch höhere realistische Werte von mehr als 99 % an, vgl. Pretz (2010) S. 160.

7.4.2 Direkte Beeinflussung durch Vermischung

Die Messung von Vermischung erfolgt durch (mindestens) einen der fünf Vermischungsgrade, den Fraktionsanzahlorientierten, Anteilsorientierten, Wechselorientierten, Konzentrationsorientierten oder Abstandsorientierten Vermischungsgrad. FVG und AVG sind die häufigkeitsmerkmalbasierten Vermischungsgrade, während WVG, KVG und ZVG anordnungsmerkmalbasierte Vermischungsgrade sind. Jeder dieser Vermischungsgrade misst die Vermischung auf eine andere Art, sodass zunächst vermutet werden kann, dass sie alle die Prozesskosten auch auf unterschiedliche Weise beeinflussen. Im Wesentlichen können jedoch nur **drei Effekte auf die Prozesskostenverläufe** durch die Vermischung beobachtet werden: ein (stückweise) konstanter Prozesskostenverlauf mit Sprungstellen, ein (linear) steigender Verlauf und ein ‚badewannenförmiger‘ Verlauf, bei dem die Kosten zunächst fallen, dann für einen Abschnitt ungefähr auf gleichem Niveau verlaufen und schließlich wieder ansteigen. Im Folgenden soll die Vermischungsabhängigkeit dieser drei Effekte für die Sortierverfahren **händische Sortierung** und **automatische Sortierung** in der Wertstoff- und Leergutsortierung analysiert werden.

Konstanter Prozesskostenverlauf mit Sprüngen

Der erste zu beobachtende Prozesskostenverlauf zeigt konstante Prozesskosten (vgl. Abbildung 7.10).

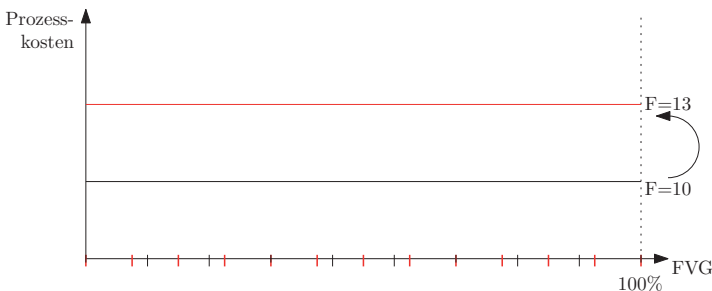


Abbildung 7.10: Konstanter Prozesskostenverlauf mit Kostensprung

Bei der **händischen Sortierung** ist dieser Prozesskostenverlauf plausibel, wenn die Personalkosten konstant verlaufen und die Vermischung mit dem **FVG** gemessen wird. Falls das Sortiergut nur eine Fraktion umfasst, beträgt der FVG 0 und hat keinen steigernden Einfluss auf die Prozesskosten. Das ‚Gemisch‘ ist bereits sortenrein

und erfordert keine aktive Sortierung mehr. Ein bereits sortenrein angelieferter Getränkekasten wird somit nach der Inspektion unangetastet dem entsprechenden Kastenspeicher zugeführt.⁷⁴ Wertstoffabfälle müssen noch in den zugehörigen Container ausgeworfen werden und erfordern nur eine minimale Anzahl Auswurfverrichtungen. Vollständige Vermischung ist nach Definition des FVG dann erreicht, wenn alle definierten Fraktionen im Gemisch auch enthalten sind.⁷⁵ Der nahe liegende Schluss wäre, anzunehmen, dass bei einem maximalen FVG von 100 % auch die Prozesskosten ihr Maximum erreichen. Allerdings sollten Sortierkräfte idealerweise nur eine Fraktion sortieren.⁷⁶ Demzufolge muss für jede mögliche Fraktion eine eigene Sortierkraft bereitstehen und die Personalkosten bleiben unverändert, egal, welcher FVG realisiert wird.

Erst wenn eine weitere Fraktion neu hinzu definiert wird und für die Sortierung dieser Fraktion eine eigene Sortierkraft bereitgestellt werden muss, erhöhen sich die Personalkosten sprunghaft. Sie bleiben dann auch für jeden realisierten FVG auf dem ‚neuen‘ Niveau, also auch dann, wenn die der Sortierkraft zugewiesene Fraktion im Aufgabebegut vorübergehend nicht enthalten ist.⁷⁷ In Abbildung 7.10 ist ein exemplarischer Prozesskostensprung von den schwarz eingezeichneten Prozesskosten bei zehn Fraktionen auf ein höheres Niveau zu den rot eingezeichneten Prozesskosten bei insgesamt dreizehn zu sortierenden Fraktionen eingezeichnet.

Ein konstanter Verlauf der variablen Prozesskosten ist für eine Handklaubung auch dann plausibel, wenn die Vermischung nach dem **AVG** gemessen wird. Unabhängig vom Anteil der Fraktionen am Gemisch muss für jede Fraktion eine Sortierkraft bereitstehen. Das ist auch der Fall, wenn ihr Fraktionsanteil gleich null ist bzw. wenn bei einem (sehr unwahrscheinlichen) AVG von 0 ein Sortierwerker alles abtrennen muss, weil das Sortiergut ausschließlich aus seiner Fraktion besteht.

Bei den **automatisierten Sortierverfahren** sind die einzelnen Fraktionen und ihre Merkmale für die Erkennungsverfahren von entscheidender Bedeutung. Neue Fraktionen werden in das System programmiert. Einige Anlagen sind auch in der Lage, eine bislang unbekannte Fraktion als neue Sorte zu ‚lernen‘. Eine neue Getränkekastensorte kann z. B. durch ein sogenanntes ‚teach-in‘-Verfahren in das System aufgenommen

⁷⁴ Vgl. Hofbauer (2006), S. 13.

⁷⁵ Bei der Wertstoffsortierung kann man die Fraktionsanzahl dahingehend beschränken, dass die relevanten Fraktionen, meist die Materialarten, dem System bekannt sind und gezielt abgetrennt werden. Alle weiteren Objekte werden ungeachtet ihrer Fraktionszugehörigkeit, die keiner der relevanten Fraktionen entspricht, den Reststoffen zugeordnet.

⁷⁶ Vgl. zu dem Parametern der Handklaubung z. B. Uhlig/Bremerstein (1997), S. 27.

⁷⁷ Diesen Fall, dass ein Mitarbeiter genau eine Fraktion sortiert, sehen FUCHS und STEHLE in der Patentbeschreibung zu ihrer Sortieranlage vor, vgl. Fuchs/Stehle (1994), S. 2-4.

werden.⁷⁸ Die Fraktionsanzahl bzw. die Vermischung nach dem **FVG** ist hier weitgehend irrelevant, da die benötigte Information über die Fraktion, so sie denn bereits bekannt ist, bei Bedarf aus einer Datenbank abgerufen wird und die Sortierung des Objektes entsprechend erfolgt. Die variablen Kosten des laufenden Prozesses werden durch eine größere Fraktionsanzahl nicht beeinflusst und sind für alle FVG konstant.

(Linear) Steigender Verlauf

Der (linear) steigende Prozesskostenverlauf ist für verschiedene Vermischungsgrade vorstellbar, insbesondere für den **WVG** bzw. **KVG**. Bei automatischer Sortierung ist er auch für den **FVG** möglich. In Abschnitt 4.2.2 wurden vier **Anordnungsmerkmale**, die Wechsellanzahl, die Gruppenanzahl, die Gruppengröße sowie die Gruppenabstände, identifiziert, die als Kenngrößen der Vermischung von Objekten unterschiedlicher Fraktionen dienen. Diese vier Merkmale stehen jedoch nicht für einen singulären Einfluss, sondern sie sind miteinander verwoben und beeinflussen bzw. determinieren sich gegenseitig. Wechsellanzahl und Gruppenanzahl einer Fraktion drücken in alternativer Form das Gleiche aus, werden aber zur Vermischungsmessung mit unterschiedlichen Kennzahlen herangezogen. **WVG** und **KVG** erfassen die Vermischungszustände ‚gleichgerichtet‘, jedoch jeweils aus einer anderen Perspektive (Wechsel bzw. Gruppen). Die Messung der Vermischung mit diesen beiden Kennzahlen hat demnach den gleichen Effekt auf die Prozesskosten. Aus diesem Grund wird im Folgenden nur der **WVG** betrachtet. Alle ihn betreffenden Aussagen gelten auch für den **KVG**.

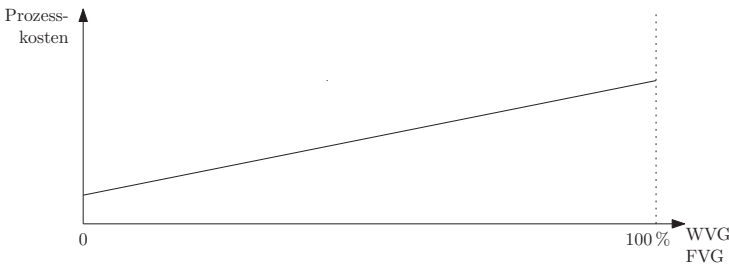


Abbildung 7.11: Möglicher Verlauf der variablen Prozesskosten in Abhängigkeit vom **FVG** bzw. **WVG**

Bei einer **automatischen Sortierung** ergibt sich der in Abbildung 7.11 dargestellte Prozesskostenverlauf, wenn die Vermischung mit dem **WVG** gemessen wird. Ist der

⁷⁸ Vgl. Irrgang (2010), S. 27.

WVG gleich null, d. h. alle Objekte jeder einzelnen Fraktion liegen hintereinander und resultieren in der minimalen Wechselanzahl, ergeben sich die minimalen Betriebskosten. Dies ist für einen Sortierprozess mit Abtrennung durch Schieber plausibel. Dabei wird der Austrag in den Container durch das Verstellen eines horizontalen Stellmechanismus ermöglicht. Dieser wird immer dann verstellt, wenn gerade die Fraktion wechselt. Der Stellmechanismus wird zur Teilung des Sortiergutstroms auf mehrere nachfolgende Sortierbänder z. B. bei der Inlinesortierung von Mehrwegflaschen verwendet. Sein Einsatz ist aber auch für weitere Sortiervorgänge nach einer Objekterkennung möglich.⁷⁹ Häufigere Fraktionswechsel erfordern demnach auch häufigere Stellvorgänge. Die Stellvorgänge erfordern ihrerseits (für jeden Vorgang das gleiche Ausmaß an) Energie, deren Inanspruchnahme wiederum Kosten verursacht.⁸⁰ Damit haben viele bzw. häufigere Fraktionswechsel über die benötigte Anzahl Stellvorgänge steigenden Einfluss auf die variablen Prozesskosten (vgl. Abbildung 7.11). Die maximalen Stellvorgänge sind bei der maximalen Anzahl Wechsel notwendig. So sind bei einem WVG von 100 % auch die Betriebskosten (für Energie) maximal.

Der lineare Prozesskostenverlauf in Abbildung 7.11 kann bei der automatischen Sortierung auch bei der Vermischungsmessung mit dem **FVG** plausibel sein. Grundsätzlich müssen für alle definierten Fraktionen die passenden Sortierverfahren bereit stehen. Eine Aktivierung der Verfahren z. B. aus dem Stand-by erfolgt aber erst, wenn die zugehörige Fraktion auch tatsächlich im Gemisch enthalten ist. Wenn für alle Verfahren die gleichen Betriebskosten unterstellt werden, dann steigen die variablen Prozesskosten linear mit dem FVG. Fallen jedoch unterschiedliche Betriebskosten für die Verfahren an, kann kein einheitlicher Prozesskostenverlauf abhängig vom FVG hergeleitet werden. Dann spielt nicht nur das Vorhandensein einer weiteren Fraktion im Gemisch eine Rolle, sondern auch die Information, um welche Fraktion es sich handelt.

In der **händischen Sortierung** sorgen häufige Fraktionswechsel für häufige Greifvorgänge, wenn die Prämisse zugrunde gelegt wird, dass hintereinander liegende Objekte gleicher Fraktion gemeinsam abgetrennt werden. Infolge der oben getroffenen Konvention, dass häufigeres Greifen höhere Kosten verursacht, steigen somit auch für die Handklaubung die Prozesskosten abhängig vom **WVG**. Der lineare Verlauf in Abbildung 7.11 ist plausibel. Alternativ könnte jedoch auch ein progressiver Verlauf möglich sein. Vorstellbar ist, dass bei zunehmendem WVG immer schneller gegriffen

⁷⁹ Vgl. Schubert (1996b), S. 455.

⁸⁰ Der Energiepreis wird als konstant angenommen (z. B. 20 Cent pro Kilowattstunde).

werden muss und schnelleren Greifbewegungen ein zunehmend höherer Kostensatz unterstellt wird.

Badewannenförmiger Verlauf

Der dritte Effekt, ein badewannenförmiger Prozesskostenverlauf, kann bei der Vermischungsmessung mit dem WVG sowohl bei Handklaubung als auch bei automatischer Sortierung auftreten.

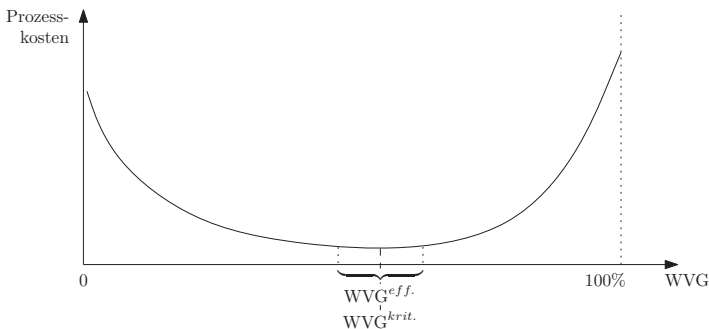


Abbildung 7.12: Prozesskostenverlauf mit effizientem WVG- bzw. ZVG-Intervall

Für eine **händische Sortierung** ist der Verlauf in Abbildung 7.12 plausibel, wenn nicht nur ein hoher **WVG**, sondern auch eine zu geringe Wechselzahl (,kleiner' WVG) steigende variable Prozesskosten verursacht. Wenige Wechsel bedeuten, dass für alle Fraktionen viele Objekte derselben Fraktion nebeneinander liegen. Wenn diese Gruppen zu groß sind, kann der Sortierwerker nicht mehr alle Objekte mit einem Griff austragen, weil c. p. sein Fassungsvermögen begrenzt ist. Zum Austrag aller Objekte müsste er häufiger zugreifen, was gemäß der zuvor getroffenen Konvention zu höheren Kosten führt.

Für das individuelle Fassungsvermögen der Sortiererhand existiert ein ,kritischer WVG', bei dessen Eintreten der Sortierwerker jede Gruppe vollständig mit einem Griff austragen kann und insgesamt nur die minimal erforderlichen Greifvorgänge durchführen muss. Dieser WVG liegt in einem Bereich mit nahezu gleichbleibenden, minimalen bzw. knapp über dem Minimum liegenden Prozesskosten, der in Anlehnung an die effiziente Intensität sozusagen den effizienten WVG bezeichnet (vgl. Abbildung 7.12). Dieses Intervall wird zudem durch eine Obergrenze eingeschränkt, die dann erreicht ist, wenn die Häufigkeit der Wechsel c. p. eine zunehmend erhöhte

Geschwindigkeit des Greifens erfordert. Die Intervallgrenzen sind nicht allgemein fixiert, sondern variieren für jedes Gemisch bzw. abhängig vom Fassungsvermögen der Sortierwerkerhand, und sie sind auch nicht unbedingt trennscharf.⁸¹

Die Argumentation für die händische Sortierung bezogen auf den WVG ist auf die **automatische Sortierung** unmittelbar übertragbar. Hier wird der Greifvorgang jedoch nicht von Sortiererhand, sondern durch einen mechanischen Greifer mit festgelegter Kapazität durchgeführt. Für unterschiedliche Greiferkapazitäten ergeben sich auch unterschiedliche Intervallgrenzen. Im Unterschied zur Handklaubung kann hier jedoch davon ausgegangen werden, dass der mechanische Greifer immer gleich sortiert und keiner Tagesform unterliegt. Somit sind die Intervallgrenzen trennscharf.

Bemerkungen zum ZVG

Die Analyse der Prozesskosten abhängig vom **ZVG** gestaltet sich diffizil. Der ZVG misst die Abstände zwischen den Objekten einer Fraktion über alle Fraktionen, bezogen auf die maximal möglichen Abstände. Dabei werden gleichmäßige Abstände bevorzugt, aber nicht direkt abgebildet. Wird sowohl für **händische** als auch **automatische Sortierung** als **Konvention** gesetzt, dass **gleichmäßige Abstände** der Objekte zu minimalen Prozesskosten führen, dann steigen die Prozesskosten mit zunehmender Ungleichheit der Abstände. Als Steigungsverlauf wäre sowohl ein linearer als auch ein progressiver Verlauf vorstellbar. Hierbei muss jedoch der Fall ausgespart werden, dass gar keine Abstände existieren. Dann ist das Sortiergut unvermischt, und es sind – wenn alle Fraktionsobjekte der gleichen Fraktion gleichzeitig ausgetragen werden können – nur die minimal erforderlichen Vorrichtungen zum Austragen durchzuführen. Dies führt auch zu den minimalen Prozesskosten.

Wird der ZVG gemäß seiner Definition zugrunde gelegt, dann erhöht sich die Vermischung je größer die tatsächlichen Abstände sind.⁸² Für alle Sortiertechniken könnte darüber die weitere Konvention getroffen werden, dass eine geringe Vermischung gemäß ZVG zu geringen variablen Prozesskosten führt und ein hoher ZVG auch hohe Prozesskosten bewirkt. Die Steigung der Prozesskosten bei steigendem ZVG kann linear erfolgen.

⁸¹ Die fehlende Trennschärfe lässt sich in der händischen Sortierung z.B. durch die ‚Tagesform‘ des Sortierers erklären.

⁸² Als Erschwernis bei der Messung wurde angemerkt, dass sich die Objektabstände der einzelnen Fraktionen gegenseitig beeinflussen. Der maximale Zwischenraum ist immer nur für eine Fraktion möglich.

Problematisch ist jedoch, dass nur relativ vage bzw. auf getroffenen Konventionen beruhende Aussagen über den Prozesskostenverlauf abhängig vom ZVG möglich sind. Dies liegt daran, dass anhand des ZVG kein Bezug auf z. B. die Greiferkapazität (Vermischungsmerkmal Gruppengröße) oder die Anzahl Greifvorgänge (Vermischungsmerkmal Gruppenanzahl bzw. Wechsel) möglich ist. Daher erscheint es an dieser Stelle wenig sinnvoll, weiter über **direkte Einflüsse** des ZVG auf die Prozesskosten zu mutmaßen. Die Abstände spielen jedoch weiterhin eine wichtige Rolle bei der vermischungsgradabhängigen Anpassung von Prozessparametern zur Senkung der Prozesskosten. Dies wird im nachfolgenden Abschnitt thematisiert.

7.4.3 Vermischungsgradbasierte Parameteranpassungen zur Prozesskostensenkung

Die Vermischungsgrade haben nicht nur direkten Einfluss auf die Prozesskosten, sie haben außerdem über Prozessparameter wie die Bandgeschwindigkeit ρ weitere indirekte Einflüsse. Diese Bedingtheit lässt sich nutzen, indem die Prozessparameter an die Vermischung angepasst werden und über diese Anpassung die (variablen) Prozesskosten gesenkt bzw. die in jedem Fall anfallenden Prozesskosten besser ausgenutzt werden. Dazu wird die Umwandlung von Leerkosten in Nutzkosten betrachtet. Leerkosten bezeichnen in der Kostenrechnung eine Form von fixen Kosten, die durch nicht genutzte Kapazitäten entstehen.⁸³ Die Nutzkosten werden aus der Subtraktion der Leerkosten von den Fixkosten ermittelt. Hier sind es im Folgenden jedoch zumeist kurzzeitig fixe Kosten, wie z. B. die Personalkosten, für die die Leerkosten reduziert werden sollen.⁸⁴

Die Diskussion der Parameteranpassungen soll ebenfalls am Beispiel der händischen bzw. automatischen Sortierung von Wertstoffabfällen bzw. Leergut erfolgen. Für diese Sortierverfahren soll eine vermischungsabhängige Senkung der Prozesskosten anhand von zwei ausgewählten Anpassungsmöglichkeiten diskutiert werden: **Nutzung von Bündelungseffekten** und **Variation der Bandgeschwindigkeit** ρ . Veränderbar sind bei der händischen Sortierung die Parameter Mitarbeiteranzahl, zu sortierende Fraktionsanzahl pro Mitarbeiter, die Anzahl Greifvorgänge und die Bandgeschwin-

⁸³ Vgl. Schweitzer/Küpper (2011), S. 320. In der Kostenrechnung wird hierüber die Beschäftigung gemessen.

⁸⁴ Die Personalkosten sind über die Mitarbeiteranzahl grundsätzlich variabel. Da Mitarbeiter aber gewöhnlich nicht ständig eingestellt und entlassen werden können, sondern nur zu festen Zeitpunkten, sind die Personalkosten zwischen diesen Zeitpunkten fix.

digkeit. Im Rahmen der automatischen Sortierung sind die anpassbaren Parameter die Anzahl Greifer, die Anzahl Greifvorgänge und die Bandgeschwindigkeit.

7.4.3.1 Nutzung von Bündelungseffekten

Handklaubung

Bündelungseffekte sind bei der händischen Sortierung möglich, wenn die Sortierkräfte variabel eingesetzt werden und (zumindest zeitweise) mehr als eine Fraktion sortieren können. Einem Mitarbeiter könnten statt nur einer Fraktion noch weitere Fraktionen zur Sortierung zugewiesen werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass diese Ausweitung der Fraktionen nicht beliebig erfolgen kann, sondern nur auf sehr wenige unterschiedliche Fraktionen je Mitarbeiter beschränkt ist.⁸⁵ Erst wenn die Mitarbeiter auf diese Weise nicht mehr alle enthaltenen Fraktionen sortieren können, müssen zusätzlich weitere Mitarbeiter eingesetzt werden.

Die Sprünge in den Prozesskosten werden bei dieser Vorgehensweise zwar nicht vermieden, sie finden jetzt aber in Abhängigkeit vom **FVG** statt. Auch ist das Niveau der Prozesskosten niedriger, da insgesamt weniger Mitarbeiter eingesetzt werden müssen. Ein neuer Mitarbeiter kommt dann hinzu (und löst einen Kostensprung aus), wenn der FVG einen kritischen Punkt erreicht hat und die enthaltenen Fraktionen nicht mehr vollständig von den bereits aktiven Mitarbeitern sortiert werden können. Auch ist die Einführung einer neuen Fraktion nicht mehr zwangsläufig der Auslöser für einen Kostensprung, da nicht mehr genau eine Sortierkraft für jede Fraktion bereitstehen muss. Nur wenn bei Einführung der neuen Fraktion alle bereits aktiven Sortierkräfte ausgelastet sind, muss ein weiterer Mitarbeiter eingesetzt werden, der dann den Kostensprung verursacht. Die Höhe der Sprünge kann dabei konstant sein, wenn eine gleiche Qualifikation der Mitarbeiter unterstellt wird. Variationen der Sprunghöhe wären durch unterschiedliche Anforderungen bzw. abweichende Qualifikationen der Sortierkräfte erklärbar, z. B. wenn die Identifikation einzelner Fraktionen erschwert ist.⁸⁶

Für die Auslastung der Sortierkräfte ist eine gleichmäßige Verteilung der Fraktionsanteile, also ein **AVG** von 100 %, wünschenswerter gegenüber einer ungleichmäßigen

⁸⁵ UHLIG und BREMERSTEIN gehen sogar nur von maximal zwei Fraktionen je Sortierkraft aus, vgl. Uhlig/Bremerstein (1997), S. 27.

⁸⁶ Es wird an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich um rein theoretische Plausibilitätsüberlegungen und eine ceteris paribus Analyse der Kostenverläufe handelt. Eine empirische Erhebung von Daten ist in der Praxis meistens nicht möglich.

Anteilsverteilung. Alle Sortierkräfte, deren Fraktionen im Gemisch enthalten sind, wären in diesem Fall in gleichem Maße ausgelastet, weil sie alle gleich viele Objekte vom Band klauben müssten. Die Prozesskosten sind konstant, da keine Anpassung der Mitarbeiterzahl erforderlich ist.

Angemerkt sei jedoch noch, dass hier keine Aussage darüber getroffen wird, ob diese quantitätsbezogene gleichförmige Auslastung auch im Zeitablauf der Sortierung ebenso gleichmäßig ist. Es ist nämlich durchaus denkbar, dass die Fraktionen dergestalt auf dem Sortierband angeordnet sind, dass die Mitarbeiter ihre Fraktionen nacheinander und nicht zeitgleich abtrennen. In diesem speziellen Fall würde ein Mitarbeiter ausreichen, der nacheinander je eine Fraktion vom Band entnimmt. Unter der Prämisse des **AVG** bleibt die Mitarbeiteranzahl aber konstant, und es ergeben sich keinerlei Auswirkungen auf die variablen Prozesskosten. Allerdings würden im Fall der wartenden Sortierkräfte z. B. Leerkosten entstehen; die Mitarbeiter stehen bereit und verursachen Lohnkosten, ohne eine Sortierleistung zu erbringen.⁸⁷ Basierend auf dieser Leerkostenproblematik erscheint eine Kostensenkung möglich, indem eine andere Beschäftigungsstrategie für die Mitarbeiter gewählt wird. Z. B. könnten zusätzlich zum eigentlichen Sortierer einer speziellen Fraktion weitere Mitarbeiter einspringen und neben ihrer eigenen Fraktion, die gerade nur einen geringen Anteil hat oder gar nicht im Gemisch enthalten ist, ebenfalls Getränkekartons sortieren, falls das Sortiergut einen wachsenden Anteil von Getränkekartons enthält oder sogar vollständig daraus besteht.⁸⁸ Dadurch könnten die Mitarbeiterzahl gesenkt und die Prozesskosten verringert werden.

Bei stets sehr ungleichmäßigen Anteilen (z. B. 1 % Getränkekartons und 99 % PET-Flaschen) könnte überlegt werden, die Mitarbeiteranzahl und damit auch die Kosten durch eine **Prozessumstellung** zu verringern. Dazu könnte die Sortierrichtung von der für die Wertstoffsortierung unterstellten Positivsortierung, also dem Austragen der PET-Flaschen, auf eine Negativsortierung, d. h. das Austragen der Ge-

⁸⁷ FUCHS und STEHLE gehen in ihrem Konzept sogar soweit, dass sie zur Erreichung einer gleichmäßigen Auslastung und zur Vermeidung von Leerkosten den Extremfall einer etappenweisen Monosortierung vorsehen, vgl. Fuchs/Stehle (1994), S. 2–7. Dabei sortieren alle Mitarbeiter innerhalb eines festen Zeitabschnitts an einem möglichst langsam laufenden oder sogar stehenden Sortierband dieselbe Fraktion. Nach Ablauf des vorgegebenen Zyklus wird die Fraktion gewechselt. Leerkosten werden vermieden, alle Mitarbeiter sind zu jeder Zeit gleichermaßen ausgelastet. Der mitarbeiterbezogene Anteil der Prozesskosten ist konstant und fraktions- sowie anteilsunabhängig.

⁸⁸ Dabei muss vorab festgelegt werden, ob die Mitarbeiter ähnliche Fraktionen sortieren, was vermutlich zu Fehlwürfen führt, oder ob ein Mitarbeiter bewusst unterschiedliche Fraktionen austrägt, um Fehlausträge zu vermeiden. Auf die Auswirkungen der unterschiedlichen Fehlwürfe soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden.

tränkekartons, umgestellt werden.⁸⁹ Für den speziellen Fall des beispielhaften Zwei-Komponentengemischs ohne weitere Reststoffe würde die Änderung des Trennmerkmals der Klaubung den gewünschten Erfolg bringen. Ansonsten ist eine Umstellung der Sortierrichtung zumeist nicht zielführend. Die Mehrweggebinder-sortierung erfolgt häufig als Negativsortierung, indem nach dem Erkennungsprozess – unabhängig vom Fraktionsanteil – nur die Fremdflaschen manuell aus dem Kasten entfernt werden.

Bei zu kleinen **Abständen** der Objekte einer Fraktion können Objekte zur Austragung verpasst werden. Dann ist es erforderlich, zumindest kurzzeitig einen weiteren Mitarbeiter zur Sortierung der ausgewählten Fraktion abzustellen. Zu große Abstände bei der Monosortierung durch je eine Sortierkraft wirken sich auch negativ auf die Prozesskosten aus. Falls ein Arbeiter keine Zweitfraktion zur Sortierung zugewiesen bekommen hat, ist er im Fall eines größeren Abstands seiner Fraktionsobjekte untätig. Dadurch entstehen Leerkosten, und die Prozesskosten steigen, was vermieden werden sollte.

Automatische Sortierung

Bei der automatischen Klaubung können Bündelungseffekte über die Veränderung der Greiferkapazität erzielt werden. Solange in der Leergutsortierung für jedes Gefach, das eine Fremdflasche enthält, ein separater Greifer vorgesehen ist, sind die Prozesskosten von den Betriebskosten jedes einzelnen Greifers abhängig. Sind die Greifersysteme hingegen auf eine maximale Zahl von n Vorrichtungen pro Vorgang beschränkt, so sind die Systeme bei Vorliegen von $n + 1$ Fremdflaschen gezwungen, zwei Greifvorgänge zur vollständigen Sortierung zu verrichten. Die Kosten steigen folglich in Abhängigkeit der Anzahl Greifvorgänge, die durch die Anzahl Fremdflaschen ausgelöst werden, treppenförmig an. Zusätzlich kommt es neben der Anzahl Greifvorgänge auch darauf an, an welcher Position sich das auszutragende Objekt befindet; so wirken sich die Fahrwege der Greifwerkzeuge, z. B. durch den höheren Energiebedarf bei längeren Wegen, zusätzlich erhöhend auf die Kosten aus. Durch die Erhöhung der Greiferkapazität sowie die Optimierung der Fahrwege können die Prozesskosten verringert werden.

⁸⁹ Angemerkt sei hier nochmals, dass die Negativsortierung zumindest bei der Kunststoffabfallsortierung gewöhnlich schlechtere Ergebnisse erzielt als die Positivsortierung. Vgl. zur Negativsortierung allgemein Uhlig/Bremerstein (1997), S. 21, bzw. speziell bei der Kunststoffsortierung aus Hausmüll Jansen/Pretz (2011), S. 71. Außerdem ist die technische Umsetzbarkeit des ‚Verfahrenswechsels‘ nicht ohne Weiteres möglich.

7.4.3.2 Vermischungsabhängige Variation der Bandgeschwindigkeit

Während die Erzielung von Bündelungseffekten überwiegend bei der Anwendung der häufigkeitsmerkmalbasierten Vermischungsmessung möglich war, wird eine Anpassung der Bandgeschwindigkeit ρ auch zur Kompensation der anordnungsmerkmalbezogenen Vermischung eingesetzt.

Handklaubung

Falls immer nur ein Sortierarbeiter für eine spezielle Fraktion zuständig ist, ist es erforderlich, die Bandgeschwindigkeit so zu wählen, dass die Fraktion vollständig ausgetragen werden kann.⁹⁰ Der Grund ist, dass die Greiferkapazitäten der Sortierkräfte in ihrem Fassungsvermögen beschränkt sind. Bei hohem Wertstoffaufkommen in großen Gruppen im Sortiergut – der **WVG** ist in diesem Fall sehr klein – sind daher wiederholte Greifvorgänge zum vollständigen Austragen einer Gruppe notwendig. Kleine Gruppen sind zwar vollständig greifbar, aber es werden die Kapazitäten zumeist nicht ausgenutzt. Hier besteht die Möglichkeit zu warten, bis die nächste ‚kleine‘ Gruppe auf dem Sortierband liegt und erst dann die ‚vollen Hände‘ in den Abwurfschacht zu entleeren.⁹¹ Alternativ kann auch nach jedem Greifvorgang einer kleinen Gruppe in den Abwurfschacht ausgetragen werden. Dabei fallen dann häufigere Austragebewegungen mit einer insgesamt längeren zurückgelegten und daher kostenintensiveren Wegstrecke an als beim Warten auf weitere Objekte der zu sortierenden Fraktion.

Beide Optionen ziehen höhere variable Prozesskosten nach sich. Für ein Sortierunternehmen stellt sich eine Entscheidungssituation nach der günstigeren Alternative, die nur durch die Erhebung und den Vergleich empirischer Daten zufriedenstellend gelöst werden kann. Die Prozesskosten wären am geringsten beim Vorliegen der optimalen Gruppengröße jeder Fraktion. Die optimale Gruppengröße, bei der dieses Problem nicht vorliegt und ρ nicht angepasst werden muss, kann sich von Fraktion zu Fraktion unterscheiden, z. B. wenn eine Fraktion Objekte mit einem großen Volumen umfasst, während eine andere Fraktion aus Objekten mit vergleichsweise höherem Gewicht besteht.⁹²

⁹⁰ Das Verringern der Bandgeschwindigkeit führt, wie bereits in Abschnitt 7.3 angesprochen, zu steigenden variablen Prozesskosten.

⁹¹ Hierbei besteht allerdings die Gefahr, Objekte nicht greifen zu können, wenn die nächste Gruppe ‚groß‘ ist und nicht mehr vollständig gefasst werden kann.

⁹² Ein Beispiel wären z. B. Folien im Vergleich zu Getränkekartons.

In der Diskussion über eine Reduzierung der Prozesskosten durch die vermischungsgradabhängige Bandgeschwindigkeit sollten auch die Objektabstände (d. h. der ZVG) nicht vernachlässigt werden. Sind die Abstände zwischen den Fraktionsobjekten zu gering, wird ein Sortierwerker nicht alle seine Fraktionsobjekte austragen können und vermutlich einen Teil seiner Fraktionsobjekte verpassen, während er bereits gegriffene Objekte in den Abwurfschacht wirft. Um dem entgegenzuwirken, besteht die Möglichkeit, die Bandgeschwindigkeit zu verringern. Ist der Abstand wieder größer geworden, kann ρ wieder erhöht werden. Häufige Geschwindigkeitswechsel sind zwar (in Grenzen) möglich, aber nicht immer sinnvoll, weil hierdurch die Sortierung anderer Fraktionen beeinflusst wird. Einen Mitarbeiter als Springer einzusetzen, ist hingegen im Rahmen der Verfügbarkeit immer möglich und sinnvoll.

Automatische Sortierung

Sowohl eine hohe aber auch eine sehr geringe **Wechselanzahl** erzeugt Rückkopplungen auf die **Bandgeschwindigkeit** bei der automatischen Sortierung. Wenn mehr Wechsel im Sortiergut vorhanden sind und dadurch die Greif- bzw. Stellvorgänge schneller durchgeführt werden müssten, ist es oftmals zweckmäßig zur Aufrechterhaltung der Sortierqualität die Bandgeschwindigkeit anzupassen und zu verringern. Im Fall seltener Fraktionswechsel erscheint eine Senkung der Bandgeschwindigkeit sinnvoll, um die Möglichkeit zu eröffnen, alle Objekte der zu sortierenden Fraktion abzutrennen. Wird die Bandgeschwindigkeit abgesenkt, kann es passieren, dass die Bandgeschwindigkeit nicht mehr in dem für sie effizienten Intervall liegt. Infolgedessen steigen die variablen Prozesskosten an.⁹³ Einen möglichen Prozesskostenverlauf aus dem **Zusammenwirken von WVG und Bandgeschwindigkeit** ρ zeigt Abbildung 7.13, S. 192.

In Abbildung 7.13 sind an den Achsen in der Ebene die Prozessgeschwindigkeit ρ und der WVG abgetragen. Die Prozesskosten, abgetragen an der dritten Achse, bilden das Wertgebirge in Abhängigkeit der beiden Parameter. Erkennbar ist, dass sich z. B. das Kostenminimum bei der optimalen Wechselanzahl in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit verschiebt. Diese Verschiebung ist nicht gleichmäßig über die möglichen Geschwindigkeiten; die optimale Wechselanzahl muss nicht zwangsläufig mit der kostenminimalen Geschwindigkeit zusammenfallen. Das globale Minimum liegt daher auch nicht in der ‚Mitte‘ des Gebirges.

⁹³ Vgl. hierzu nochmals Abschnitt 7.3.

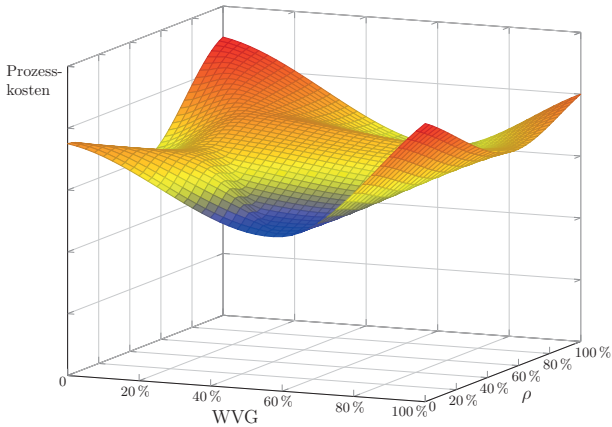


Abbildung 7.13: Wertgebirge des Zusammenwirkens von WVG und Bandgeschwindigkeit ρ auf die Prozesskosten

Markant sind auch die Eckpunkte des Gebirges. Sie weisen die höchsten Kosten insgesamt auf. Dies ist plausibel, da beispielsweise bei einer geringen Wechselzahl viele Objekte gleicher Fraktion auf dem Sortierband liegen und viele Greifvorgänge nach sich ziehen. Dies allein bewirkt bereits höhere Kosten, da für häufige Greifvorgänge z. B. mehr Energie eingesetzt werden muss. Außerdem ist das verlustfreie Entnehmen vieler Objekte nur bei einer geringen Geschwindigkeit durchführbar, was c. p. auch zu steigenden Kosten führt. Angemerkt sei, dass nicht alle Kombinationen von WVG und ρ sinnvoll möglich sind und es demnach aus praktischer Perspektive Definitionslücken gibt. Die Kombination ‚hohe Geschwindigkeit bei kleiner Wechselzahl‘ ist nicht sinnvoll. Ihr Einsatz führt zu sehr hohen Kosten, da viele Objekte verfehlt werden, weil die Greifer nicht schnell genug sind bzw. ihre Kapazität zu klein ist und eine Nachsortierung oder mehr Sortiermaschinen notwendig sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sowohl direkte als auch indirekte Vermischungseinflüsse auf die Prozesskosten bestehen. Die Anpassung von Prozessparametern an die Vermischung ermöglicht eine Reduzierung der Prozesskosten. Dazu können bei händischer bzw. automatischer Sortierung Parameter wie Mitarbeiteranzahl bzw. Anzahl Greifer, Fraktionsanzahl pro Mitarbeiter (nur bei händischer Sortierung), Anzahl Greifvorgänge und Bandgeschwindigkeit verändert werden. Die vermischungabhängigen Prozesskosten ergeben sich somit als ein Wertgebirge, dessen Verlauf (direkt) von den Mischungsgraden und (indirekt) bis zu vier Parametern bestimmt

werden kann. Ein plausibler Gesamtverlauf bei der gleichzeitigen Abhängigkeit von allen diesen Größen ist graphisch jedoch nicht darstellbar.

7.5 Gestaltung der Annahmegebühr

Die Annahmegebühr nimmt in der Zielfunktion – wie zuvor kurz angesprochen – eine etwas gesonderte Stellung ein. Sie kann, muss aber nicht zwangsläufig, durch Parameter und Variablen des Modells definiert werden. Sie ist in Abschnitt 7.1.2 in der Ausgangszielfunktion (7.1) als Inputquantität multipliziert mit einem Preis formuliert. Ist der Preis positiv, handelt es sich tatsächlich um eine **Annahmegebühr**, die für die Anlieferung von Abfall an den Entsorger zu entrichten ist. Aus dessen Sicht ist die ‚Gebühr‘ dann ein Erlös, der auch zur Deckung der Kosten veranschlagt werden kann. Werden die Sortierkapazitäten nicht ausgeschöpft, kann der Abfall als Faktor zugekauft werden. Der hierfür zu entrichtende positive Marktpreis ist für den Entsorger dementsprechend ein **Einkaufskostensatz**. Die Bestimmung der Annahmegebühr bei vermischungsabhängigem Annahmepreis p_i bzw. ihre modellunabhängige Festsetzung werden in den beiden nachfolgenden Teilabschnitten vorgestellt. In Abschnitt 7.5.3 werden abschließend zwei Sonderfälle kurz angesprochen.

Eine zentrale Annahme hinsichtlich der Höhe der Annahmegebühr ist, dass zumindest die Entsorgungskosten gedeckt sein sollten. Dies gilt insbesondere für den schlechtesten angenommenen Fall, dass der Sortierer, entgegen seiner eigentlichen Funktion, den Abfall direkt ohne Sortierung an eine Entsorgungseinrichtung (Müllverbrennungsanlage, MBA) weiterreicht, z. B. weil er keine nennenswerten Wertstoffe enthält. Die Annahmegebühr darf allerdings nicht zu hoch gewählt werden, da sonst die Gefahr besteht, dass es statt der Anlieferung beim Sortierer zu ‚wildem Ablagerungen‘ des Abfalls in die Natur kommt.

Im erweiterten Fall sollte die Annahmegebühr neben den Reststoffentsorgungskosten zumindest einen Teil der Prozesskosten mit abdecken, falls nicht ausreichend Wertstofflöse aus der Sortierung zu erwarten sind. Allerdings ist es nicht immer möglich, dem angelieferten Abfall – sowohl vorab als auch nach der Sortierung – genau die Prozesskosten zuzuordnen, die er verursacht. Der angelieferte Abfall wird in einem Bunker abgeladen und vermischt sich dort mit Wertstoffabfällen aus anderen Quellen. Infolgedessen lässt sich die Annahmegebühr auch nur auf Basis durchschnittlicher Prozesskosten kalkulieren.

7.5.1 Vermischungsabhängige Preisgestaltung

Für einen Sortierer besteht die Möglichkeit, seine Annahmegebühr in **Abhängigkeit von der Vermischung des Abfallinputs** zu gestalten. Hierzu muss die Vermischung des Abfallinputs bestimmt werden, und dann kann der Preis (für eine Standardtonne Abfallinput) entsprechend gewählt werden.⁹⁴ Idealerweise existiert hierzu bereits eine Vorkalkulation, der, abhängig vom Vermischungsgrad und der gewünschten Kostendeckung, der Preis entnommen werden kann. Ist der Vermischungsgrad des Abfallinputs – wie für die Analysen in diesem Kapitel unterstellt – bekannt, so kann der Preis abgelesen und die Annahmegebühr aus Preis und angelieferter Quantität sofort bei der Anlieferung berechnet und entrichtet werden.

Tatsächlich ist aber bei der Anlieferung die Qualität des Abfalls in der Regel unbekannt. Es ist davon auszugehen, dass zumeist kein hochwertiger Abfall, z. B. mit vielen oder wertvollen Metallen, angeliefert wird, der vom Entsorgenden selbst noch weiter verwendet oder verwertet werden könnte. Insofern sieht sich der Sortierer bei der Abfallannahme einem ‚Zitronenproblem‘ gegenüber.⁹⁵ Allerdings ist nicht wie beim Zitronenproblem davon auszugehen, dass durch die Wahl des (Annahme-)Preises jeglicher ‚gute‘ Abfall verdrängt wird und nur noch qualitativ schlechter Abfall angeliefert wird. Durch die bereits vorgeleistete Getrenntsammlung von Wertstoffen in Haushalten und Unternehmen gemäß Verpackungsverordnung ist ein gewisser Wertstoffgehalt und das Vorhandensein festgelegter Wertstofffraktionen weitgehend gesichert. Um auch weiterhin die vermischungsabhängige Annahmegebühr vor der Durchführung der Sortierung zu berechnen und von dem Anliefernden entrichten zu lassen, muss die Qualität des Abfalls ohne weitere Kenntnis oder über eine Stichprobe mit anschließender Abfallanalyse geschätzt werden.⁹⁶

Eine noch genauere Bestimmung der tatsächlichen Vermischung kann (erst) in der Sortierung selbst erfolgen. In diesem Fall lassen sich ein sehr genauer Annahmepreis bestimmen bzw. die tatsächlichen Sortierkosten, die durch die vorliegende Vermischung entstanden sind, dem Preis zugrunde legen. Allerdings ist die Annahmegebühr dann erst nach der Sortierung berechenbar und kann dem Anliefernden auch erst nachträglich in Rechnung gestellt werden.⁹⁷

⁹⁴ Eine Standardtonne Abfallinput besteht aus 1000 kg eines qualitativ durchschnittlichen Wertstoffabfallgemischs aus Siedlungs- bzw. Gewerbeabfällen.

⁹⁵ Vgl. zum Zitronenproblem, welches das Problem beschreibt, dass der Zustand eines Gebrauchtwagens bei seinem Verkauf unbekannt ist, Akerlof (1970).

⁹⁶ Vgl. hierzu z. B. Killmann (2008), S. 33f.

⁹⁷ Ein vergleichbarer Prozess erfolgt z. B. in Scheideanstalten, die bei unbekanntem Legierungen oder anderen Scheidungsgütern die einzelnen Bestandteile erst nach der Scheidung

Die Kalkulation des Annahmepreises kann auf der Basis der Vermischungsgrade erfolgen. Hierzu sind die häufigkeitsmerkmalbasierten Vermischungsgrade gut geeignet. Die anordnungsmerkmalbasierten Vermischungsgrade erfassen die Vermischung hingegen zwar auch sehr genau, sie sind aber für die Annahmepreiskalkulation nicht geeignet, weil die Sortierung nicht für die Anordnung erfolgt, die angeliefert wird. In den vorbereitenden Prozessen werden die Säcke geöffnet, der Inhalt gegebenenfalls zerkleinert und dann einschichtig auf ein Förderband aufgegeben. So erfolgt die letztendlich zu sortierende Anordnung erst durch die Förderbandaufgabe.

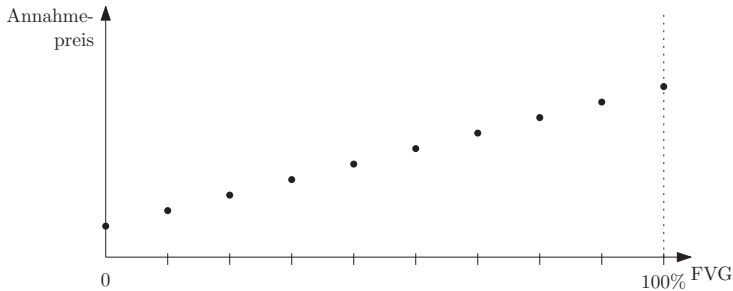


Abbildung 7.14: Exemplarischer Annahmepreisverlauf abhängig vom FVG (mit maximal 10 Fraktionen)

Der Fraktionsanzahlorientierte Vermischungsgrad gibt die Vermischung bezogen auf eine definierte Anzahl Fraktionen an, die im Gemisch enthalten sein können. Je mehr dieser Fraktionen im Gemisch tatsächlich enthalten sind, umso stärker ist die Vermischung. Ein vermischungsabhängiger Annahmepreis sollte – wenn der FVG zugrunde gelegt wird – mit steigendem Vermischungsgrad ebenfalls ansteigen. Der niedrigste Preis sollte dann angesetzt werden, wenn das Inputgemisch unvermischt ist und nur aus einer Fraktion besteht (FVG = 0), der höchste Preis bei einem FVG von 100%. Abbildung 7.14 zeigt einen exemplarischen Verlauf des Annahmepreises in Abhängigkeit vom FVG (bei maximal zehn möglichen Fraktionen).⁹⁸

kennen und auch erst dann die zurückgewonnenen Edelmetalle abrechnen können, vgl. <http://www.scheideanstalt.de/edelmetall-recycling/>. Da kleinere Abfalllieferungen sich im Bunker mit anderen Abfällen vermischen, ist diese Ermittlungsart nur für große Anlieferungen eines Anlieferers, die sich im Sortierunternehmen nicht mit weiteren Wertstoffabfällen mischen, sinnvoll.

⁹⁸ Da der FVG aufgrund der ganzzahligen Fraktionsanzahl immer nur für bestimmte Punkte definiert ist, ist auch der Preis immer nur in diesen Punkten definiert. Der erste Punkt in Abbildung 7.14 liegt direkt auf der Ordinate, weil bei Vorliegen von nur einer von zehn möglichen Fraktionen der FVG definitionsgemäß minimal, d. h. 0, ist.

Alternativ zum FVG kann auch der Anteilsorientierte Vermischungsgrad zur Preisbestimmung genutzt werden. Beim AVG ergeben definitionsgemäß gleichmäßige Fraktionsanteile einen höheren Vermischungsgrad als ungleichmäßige. Ist der AVG sehr klein bzw. 0, besteht das Inputgemisch nur aus wenigen Fraktionen, von denen eine einen sehr hohen Anteil aufweist, bzw. nur aus einer Fraktion. Weil hier die Vermischung gering ist, darf auch der Annahmepreis gering sein. Bei einem hohen AVG sollte dann auch ein hoher Preis gesetzt werden. Für den Annahmepreis in Abhängigkeit des AVG sind z. B. die in Abbildung 7.15 dargestellten Verläufe plausibel.

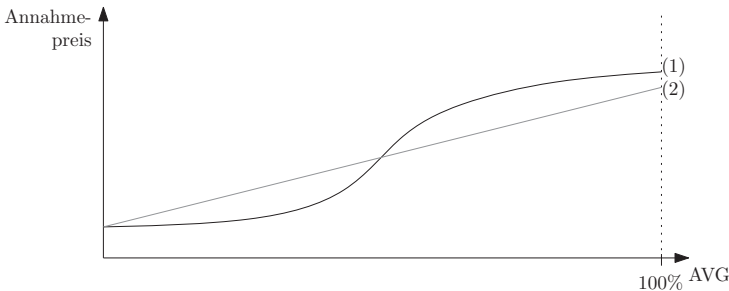


Abbildung 7.15: Exemplarische Verläufe des Annahmepreises in Abhängigkeit vom AVG

Kurve (1) zeigt einen zunächst langsam ansteigenden Verlauf, der ab einem ‚kritischen‘ AVG progressiv steigt und dann für höhere AVG in einen degressiven Verlauf übergeht. Der Grund für diesen starken Preisanstieg bei mittleren AVG kann z. B. der erhöhte Energieeinsatz sein, der für die Sortierung ab diesem AVG erforderlich ist, sich bei noch höheren AVGs aber nicht mehr sehr stark erhöhen würde. Kurve (2) zeigt einen linear steigenden Verlauf des Annahmepreises bei steigendem AVG.

7.5.2 Unabhängige Preisgestaltung

Quantitätsbasierte Annahmegebühr

Als einziger Term der Zielfunktion kann die Annahmegebühr auch unabhängig von den Parametern des Sortiermodells festgelegt werden. Eine Möglichkeit ist die Festsetzung eines konstanten Preises pro Standardtonne Abfall, z. B. für eine durchschnittliche Vermischung oder auch äquivalent zu den Reststoffentsorgungskosten für eine Standardtonne Reststoffe. Die Höhe der Annahmegebühr wird dann allein durch die angelieferte Abfallquantität bestimmt. Die Qualität des Abfalls wird bei der Fest-

legung nicht berücksichtigt. Vorteilhaft ist, dass die Abfallgebühr bei Anlieferung erhoben werden kann. Dazu muss die Abfallquantität lediglich verwogen werden.

Fixbetrag

Bei einer gesamthaft fixierten Annahmgebühr ist dem Sortierer unbekannt, welche Abfallquantitäten angeliefert werden. Er muss daher für seine Kalkulation die durchschnittlich zu erwartende Quantität ermitteln, damit die Annahmgebühr zumindest zur Deckung der Entsorgungskosten ausreicht. Falls der angelieferte Abfall ‚zu schlecht‘ ist und nur wenige Wertstoffe enthält, lohnt sich die Sortierung nicht und der Abfall wird vollständig als Reststoff entsorgt.⁹⁹ Gegebenenfalls sind in der festen Gebühr außerdem Transportkosten zur Müllverbrennungsanlage zu berücksichtigen. Die Annahmgebühr sollte jedoch einen kritischen Wert nicht überschreiten, der die Grenze zwischen der Erfüllung der Entsorgungspflicht des Anliefernden und der Inkaufnahme einer Strafe bei ‚wilder Entsorgung‘ darstellt. Da die Einstellung dieses Grenzwertes sehr unsicherheitsbehaftet ist, erscheint eine vollständig fixierte Annahmgebühr nur wenig sinnvoll.

7.5.3 Sonderfälle

(Vormalige) Abrechnungsform des DSD

Einen etwas anderen Vergütungsansatz für Entsorgungsunternehmen hat das DSD während seiner Zeit als alleinige Regelungsinstanz des Wertstoffrecyclings in Deutschland vorgegeben.¹⁰⁰ Es wird nicht mehr angewendet, hier jedoch aus Gründen der Vollständigkeit kurz angesprochen. Die unterschiedlichen Wertstofffraktionen wurden nach einer eigenen Entgeltstaffelung vergütet. Die Höhe der Annahmgebühr für das Entsorgungsunternehmen richtete sich danach, wie viel der Wertstoffe aussortiert wurde und nicht auf Basis der angelieferten Inputquantität. Das Maß für die Berechnung und Einstufung in die Entgeltstaffelung war der Abtrennungsgrad. Die Sortenreinheit war als Produktspezifikation vorgegeben, bei deren Unterschreiten keine Vergütung erfolgte.

⁹⁹ Eine hohe Sortenreinheit und auch hohe Abtrennungsgrade der Wertstoffe könnten in der Sortierung zwar trotz der schlechten Qualität des Inputs erreicht werden, aber die abgetrennte Gesamtquantität ist voraussichtlich zu gering, um ausreichend Wertstofflöse zu erzielen, die die Sortierkosten decken würden.

¹⁰⁰ Vgl. hierzu und im Folgenden Souren (1997), S. 33f.

Beide Größen, Abtrennungsgrad und Sortenreinheit, können im Sortiermodell durch die verschobenen Komponentenquantitäten λ_{kij} abgebildet werden. Somit gab es nach dem ursprünglichen DSD-Vergütungsmodell einen Einfluss der Entscheidungsvariablen dieses Modells auf den Preis der Abfallannahme. Durch die Weitergabe der sortierten Wertstoffe an die sog. Garantiegeber entfiel in diesem Ansatz die Möglichkeit, Wertstoff Erlöse durch den Verkauf am Markt zu erzielen.¹⁰¹

Abfallzukauf

Einen weiteren und sehr seltenen Sonderfall stellt der gezielte Zukauf von Abfällen dar. Ein Grund hierfür kann in der geringen Auslastung der Sortieranlage liegen. Falls ein Entsorger sich entschließt, Abfall hinzuzukaufen, kann er den Preis nicht selbst bestimmen. Möglicherweise kann der Sortierer in diesem Sonderfall die Vermischung zu einem gewissen Ausmaß beeinflussen, indem er z. B. nur Wertstoffabfälle mit ausgewählten und garantiert enthaltenen Fraktionen oder vorbestimmten Anteilen einzelner Fraktionen kauft. Überdies kann er nur die Quantität, die er kaufen möchte, selbst festlegen und über seine Wahl gegebenenfalls Rabatte realisieren.

Da in diesem Fall keine (zusätzlichen) Annahmeerlöse erzielt werden, sondern stattdessen Einkaufskosten entstehen, beruht die gesamte Kostendeckung sowie darüber hinaus ein möglichst hoher Sortierwert ausschließlich auf den erzielbaren Erlösen für die sortierten Wertstoffe. Das Ziel muss es demnach sein, durch hohe Abtrennung und Sortenreinheit möglichst hohe Wertstoff Erlöse zu erreichen. Falls es sich nicht um so hochwertige Wertstoffabfälle handelt, deren Wertstoff Erlöse nach der Sortierung die Einkaufskosten deutlich übersteigen, sollte der Abfallzukauf ein Ausnahmefall bleiben.

¹⁰¹ Vgl. zu den Garantiegebern für die Abnahme der sortierten Wertstoffe Emslander (1995), S. 145f.

Kapitel 8

Zwischenresümee: Ein deterministisches Gesamtmodell

In diesem Zwischenresümee werden die in den Kapiteln 6 und 7 entwickelten Modellteile des Sortiermodells zu einem Gesamtmodell zusammengefügt. Der erste Hauptteil der Arbeit, die Entwicklung eines deterministischen Sortiermodells, wird damit abgeschlossen. Das im Folgenden dargestellte Sortiermodell besteht allerdings nur aus einem Teil der in Kapitel 6 vorgestellten Nebenbedingungen. Dies ist dadurch begründet, dass nicht alle Formulierungen gleichzeitig im Modell angewendet werden können. Es gibt alternative Möglichkeiten zur Darstellung der Einschränkungen, z. B. Formulierung nach Transportmodell bzw. Formulierung nach Umlademodell. Hier wird die Formulierung nach dem Umlademodell gewählt, weil sie die allgemeinere Formulierung ist.¹

Sie ergibt sich demgemäß als:

$$\text{Max! } SW = \sum_{i \in V^{Input}} p_i \cdot v_i - C^P(VG, \rho, \lambda_{kij}) + \sum_{i \in V^{WOutput}} e_i \cdot u_i - \sum_{i \in V^{ROOutput}} c_i \cdot u_i \quad (8.1)$$

¹ Aufgrund der allgemeinen und nicht festgelegten Anzahl Objektarten und Sortierverfahren kann das allgemeine Modell nicht graphisch dargestellt werden. Dafür wird im Anschluss an das allgemeine Sortiermodell ein konkretes Beispiel präsentiert.

U. B. d. R.

$$v_i = \sum_k v_{ki} \quad \forall i \in V^{Input} \quad (8.2)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \lambda_{kij} - \sum_{j \in \mathcal{V}(i)} \lambda_{kji} = \begin{cases} v_{ki} & \forall i \in V^{Input}, k \\ -u_{ki} & \forall i \in V^{Output}, k \\ 0 & \forall i \in V^{Through}, k \end{cases} \quad (8.3)$$

$$\sum_k u_{ki} = u_i \quad \forall i \in V^{Output} \quad (8.4)$$

$$\frac{\sum_{i \in V^{Input}} \lambda_{kij}}{\sum_{i \in V^{Input}} v_{ki}} \geq \hat{\alpha}_{kj} \quad \forall k, j \in V^{WOutput} \quad (8.5)$$

$$\frac{\sum_{i \in V^{Input}} \lambda_{kij}}{u_j} \geq \hat{\beta}_{kj} \quad \forall j \in V^{WOutput}, k = j \quad (8.6)$$

$$0 \leq \sum_k \lambda_{kij} \leq \Lambda_{ij} \quad \forall (i, j) \quad (8.7)$$

$$0 \leq \lambda_{kij} \leq \Lambda_{kij} \quad \forall (i, j), k \quad (8.8)$$

(8.1) ist die Zielfunktion des Modells. Der zu maximierende Sortierwert berechnet sich aus der Summe von Annahmehöhe und Wertstofflösen abzüglich Prozesskosten und Reststoffentsorgungskosten. $V^{WOutput}$ und $V^{ROutput}$ kennzeichnen dabei die Knotenmengen der Wertstoffobjektarten und der Reststoffobjektart als Teilmengen der Knotenmenge des Outputs. Die erste Restriktion, (8.2), spaltet die Quantität des Inputs auf die einzelnen Komponenten auf. (8.3) sind die Knotenbilanzen der Objektarten. Der Knoten der Inputobjektart weist nur Quantitätsabflüsse (positive Werte; v_{ki}) auf, Knoten der Outputobjektarten besitzen nur Quantitätszuflüsse (negative Werte; $-u_{ki}$). In den Throughputknoten entsprechen die Zuflüsse den Abflüssen, sodass die Massenbilanz jeweils 0 ist. Diese Bilanzen werden für alle Knoten und alle Komponenten erstellt. Durch diese Bilanzgleichungen sind die Aufteilung des Sortiergutstroms, das gleichzeitige Aussortieren mehrerer Fraktionen sowie das Sortieren in mehreren aufeinander folgenden Stufen schon mit erfasst. In (8.4) wird sichergestellt, dass die Summe der Komponentenquantitäten die jeweilige Outputobjektartquantität ergibt. Hier ist – im Unterschied zu den bisherigen Formulierungen – der Knotenindex

für die Outputobjektart ebenfalls i , da die Objektart in den Knotenmengen fixiert ist.²

Zu den praxisrelevanten Restriktionen gehören die Nebenbedingungen (8.5). Sie sind die Vorgabe der Mindestabtrennung für jede Komponente in jede Outputobjektart. Allerdings sind hier nur Vorgaben für die Wertstoffe von Interesse, sodass die Restriktionen durch Angabe einer speziellen Knotenmenge auf die Wertstoffoutputobjektarten eingegrenzt werden. Ähnliches gilt für die Reinheitsrestriktionen (8.6). Hier wird eine Mindestsortenreinheit für jede Wertstoffoutputobjektart vorgegeben. (8.7) und (8.8) sind zum einen die Nichtnegativitätsbedingungen. Zum anderen umfassen sie auch die Kapazitätsvorgaben für die Verschiebequantitäten der einzelnen Sortierverfahren. Die Verfahren werden dabei durch die Verschiebung von i nach j symbolisiert. Es gilt die Kapazitätsrestriktionen sowohl für die insgesamt verschobenen Quantitäten als auch bei Verschiebungen auf der Komponentenebene einzuhalten.

Dieses deterministische Modell soll im Weiteren als Grundlage dienen für Überlegungen zu Modellerweiterungen, die auch Zufallseinflüsse abbilden können. In das Modell wurden keine Verbindungsblockaden eingebaut. Der Spezialfall Gefahrgutsortierung sei an dieser Stelle ausgeblendet. Auf die Modellierung von Verlusten ist ebenfalls verzichtet worden.

Beispiel für eine Sortierung

Abbildung 8.1 auf der nachfolgenden Seite zeigt einen beispielhaften Wertstoffsor-tierprozess, für den das formale Gesamtmodell aufgestellt wird. In diesem Prozess gibt es zehn Objektarten. Sie sind die Knoten im Modell und werden gemäß ihres Auftretens durchnummeriert (vgl. Aufteilung der Mengen unten). Der Gelbe Sack ist die Inputobjektart (dunkelgrau hinterlegt). Metall, PP, PE und Reststoffe sind die Outputobjektarten (grau hinterlegt). Die Gemische sind Throughputobjektarten.³ Zusätzlich zu den genannten Zuordnungen werden aus formalen Gründen noch zwei weitere Knotenteilmengen definiert, die zum einen nur die Wertstoffoutputobjektarten und zum anderen nur die Reststoffobjektart umfassen.

² Aufgrund der mathematischen Formulierung des Umlademodells gibt es nur eine Knotenmenge V für alle Objektarten, deren einzelne Knoten mit i bzw. j bezeichnet werden. Welche Knoten dann Input- bzw. Outputobjektart sind, wird nicht direkt durch den Index, sondern durch die Zugehörigkeit zu den Teilmengen V^{Input} und V^{Output} der Gesamtknotenmenge V festgelegt.

³ Die Throughputobjektarten sind eine Hilfskonstruktion, die besagt, dass das jeweilige Gemisch in dieser Zusammensetzung nur in dem ‚Umladeknoten‘ auftritt. Sie sind keine selbstständigen Redukte bzw. gezielt erzeugter Output.

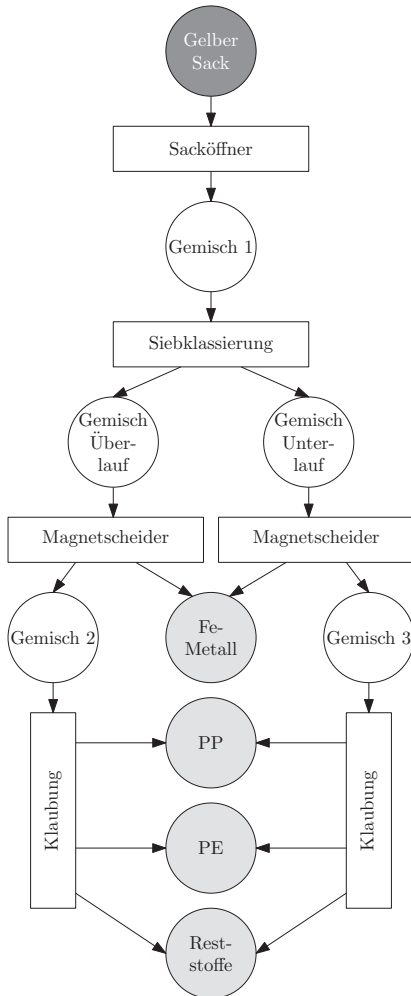


Abbildung 8.1: Fließbild des Beispielprozesses

$$V = \{\text{Gelber Sack, Gemisch 1, Gemisch Unterlauf, Gemisch Überlauf, Gemisch 2, Gemisch 3, Fe-Metall, PP, PE, Reststoffe}\} \Rightarrow$$

$$V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$$

$$V^{Input} = \{1\}$$

$$V^{Through} = \{2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$V^{Output} = \{7, 8, 9, 10\}$$

$$V^{WOutput} = \{7, 8, 9\}$$

$$V^{ROutput} = \{10\}$$

Von der Darstellung der Komponenten in den Objektartknoten wurde im Fließbild 8.1 aus Gründen der Übersichtlichkeit abgesehen, im formalen Modell sind sie aber ein wichtiger Kernbestandteil. Welche Komponenten im Modell existieren, muss vorab definiert werden. Es sollte auf jeden Fall zu jeder Outputobjektart eine passende Komponente geben.⁴ Demzufolge ergibt sich die Komponentenmenge für das Beispiel als:

$$K = \{7, 8, 9, 10\}$$

Damit die Durchflüsse bei der ‚Umladung‘ in den Throughputknoten korrekt abgebildet werden, müssen die Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen für den jeweiligen Knoten hinterlegt werden. Dazu werden für jeden Knoten Vorgänger- und Nachfolgermengen angelegt. Z. B. für die Objektart 2 (Gemisch 1) wäre die Vorgängermenge $\mathcal{V}(2) = \{1\}$ und die Nachfolgermenge $\mathcal{N}(2) = \{3, 4\}$

Es gibt sechs Sortierverfahren: Sacköffnung, Siebklassierung, zwei Magnetscheidungen und zwei Klaubeprozesse. Über die Pfeile werden die Objektartquantitäten verschoben. Mit den eingeführten Komponenten und Objektarten kann das allgemeine Modell (8.1) bis (8.8) bereits ein Stück weit präzisiert werden und die Handhabung der Objektarten verdeutlichen:

$$\text{Max! } SW = p_1 \cdot v_1 - C^P(VG, \rho, \lambda_{kij}) + \sum_{i \in V^{WOutput}} e_i \cdot u_i - c_{10} \cdot u_{10} \quad (8.9)$$

⁴ Andernfalls wäre die Sortierung (einer nicht existierenden Komponente) nicht sinnvoll.

U. B. d. R.

$$v_1 = \sum_{k=7}^{10} v_{k1} \quad (8.10)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \lambda_{kij} - \sum_{j \in \mathcal{V}(i)} \lambda_{kji} = \begin{cases} v_{k1} & \forall k = 7, \dots, 10 \\ -u_{ki} & \forall i \in V^{Output}, k = 7, \dots, 10 \\ 0 & \forall i \in V^{Through}, k = 7, \dots, 10 \end{cases} \quad (8.11)$$

$$\sum_{k=7}^{10} u_{ki} = u_i \quad \forall i \in V^{Output} \quad (8.12)$$

$$\frac{\lambda_{k1j}}{v_{k1}} \geq \widehat{\alpha}_{kj} \quad \forall j \in V^{WOutput}, k = 7, \dots, 10 \quad (8.13)$$

$$\frac{\lambda_{k1j}}{u_j} \geq \widehat{\beta}_{kj} \quad \forall j \in V^{WOutput}, k = j \quad (8.14)$$

$$0 \leq \sum_{k=7}^{10} \lambda_{kij} \leq \Lambda_{ij} \quad \forall (i, j) \quad (8.15)$$

$$0 \leq \lambda_{kij} \leq \Lambda_{kij} \quad \forall (i, j), k = 7, \dots, 10 \quad (8.16)$$

Eine noch weitere Konkretisierung und die Lösung des Modells kann erst erfolgen, wenn weiteres Zahlenmaterial wie z. B. die Inputquantität und Angaben zu den Preisen für Sekundärrohstoffe bzw. der Reststoffentsorgung aus einem praktischen Prozess zur Verfügung gestellt wird. Die Lösung des Modells mit speziellen Lösungsverfahren ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit.

Teil III

Einsatz- und Erweiterungsmöglichkeiten

Kapitel 9

Theoretische Modellevaluation und Problemidentifikation

In Teil II dieser Arbeit wurde ein deterministisches Entscheidungsmodell für Sortierprozesse entwickelt. Dabei standen fast ausschließlich die strukturierenden Elemente und Eigenschaften des Modells im Vordergrund. Seine Einsatzmöglichkeiten wurden bislang noch nicht betrachtet. Daher beschäftigt sich Teil III dieser Arbeit nun mit der Modellevaluation und daraus abgeleiteten Erweiterungen des Sortiermodells. In diesem Kapitel wird dazu – auf verbal-argumentativer Ebene – untersucht, wie ein (fiktives) Sortierunternehmen das Modell nutzen kann und seine Entscheidungen an verschiedenen Stellen unterstützt werden. Darüber hinaus sollen Schwächen und Lücken des Modells aufgezeigt werden.

Prozesssimulation

Die nächstliegende Einsatzmöglichkeit des Sortiermodells für einen Sortierer ist das Einsetzen von Daten und die anschließende Ermittlung einer Lösung mithilfe eines geeigneten Lösungsverfahrens.¹ Das Ergebnis zeigt – abhängig von den in das Modell integrierten Strukturen – die quantitativsmäßige Abtrennung der Wertstofffraktionen und den bei den gegebenen Daten resultierenden Sortierwert. Über die einzelnen Terme der Zielfunktion des Modells sind weitere Aussagen über Kosten und Erlöse des Prozesses ableitbar. Die auf diese Art ermittelten Werte können dann z. B. für eine Budgetplanung genutzt werden.

¹ Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass Lösungsverfahren sowie ihre Entwicklung nicht Teil dieser Arbeit sind.

Das Sortiermodell kann durch Einbinden in eine umfangreiche Simulationsumgebung zur Prozesssimulation genutzt werden.² Hierbei können Prozessparameter, z. B. die Prozessgeschwindigkeit, bestimmt und überprüft werden. Das Sortierunternehmen ist dadurch in der Lage, zu evaluieren, ob die aktuell gewählten Prozessparameter angemessen sind und das gewünschte Ergebnis erzielt wird. Sollte sich die Parameterwahl als unzureichend erweisen, können mithilfe des Modells Parameterveränderungen zunächst getestet und die Ergebnisse anhand des Sortierwerts evaluiert werden. Erhöhte (Prozess-)Kosten, die bei einer unmittelbaren Parameteranpassung in der laufenden Sortierung anfallen würden, werden vermindert oder sogar ganz vermieden.

Zufallseinflüsse

Als problematisch in der praktischen Anwendung kann sich die bisher bei der Konstruktion des Modells unterstellte Annahme einer Standardtonne Abfallinput erweisen. Vereinfachend wurde dabei eine immer gleiche Zusammensetzung von Fraktionsanzahl und -anteilen vorausgesetzt. In der Praxis macht es zwar durchaus Sinn, bezogen auf die Quantität eine Standardtonne Abfall als Input zu definieren; dieser ‚Standard‘ gilt darüber hinaus jedoch nicht für die weiteren Inputeigenschaften. Tatsächlich variiert die Anzahl unterschiedlicher Fraktionen zufällig mit jeder Tonne Abfallinput, ebenso wie ihre quantitativen Anteile. Ursachen für unterschiedlich zusammengesetzten Abfall sind z. B. in den verschiedenen Siedlungsstrukturen oder auch durch die Jahreszeit begründet.³ Diese zufälligen Zusammensetzungen sind bisher im Sortiermodell noch nicht berücksichtigt. Sie haben aber einen starken Einfluss auf das Ergebnis der Sortierung, da immer nur die Wertstoffe abgetrennt werden können, die auch im Input enthalten sind.

Unterstützung strategischer Entscheidungen

In seiner Ausrichtung ist das Sortiermodell ein operatives Modell, das für eine konkrete Situation mit gegebenen Daten ein Ergebnis generieren kann. Doch darüber hinaus ist auch vorstellbar, die mit dem Modell erzielten Ergebnisse für verschiedene

² Das Sortiermodell ist ein lineares Programm, das den Sachverhalt der Sortierung geschlossen darstellt. Dies widerspricht genau genommen der Definition einer Simulation, die zumeist zur Untersuchung einzelner Teilsysteme komplexer Gesamtsysteme eingesetzt werden. Jedoch werden mit dem Sortiermodell auch vereinfachte Annahmen gegenüber der Realität getroffen. Zudem können ungetestete Parameterveränderungen bei der Sortierung in der Praxis zu hohen Kosten führen, was für den Einsatz des Modells als Simulation spricht, vgl. zu Simulationen Domschke/Drexel (2007), S. 225.

³ Vgl. zur Siedlungsstruktur z. B. Miofsky/Souren (2010), S. 13f.

Sortierszenarien bzw. die mit einer Simulation – auf Basis des Sortiermodells – gewonnenen Erkenntnisse bei der Parameterwahl auch zur Unterstützung für strategische Entscheidungen heranzuziehen. Dies betrifft u. a. Entscheidungen zur Investition in eine neue Anlagenkomponente oder eine neue Sortierlinie. Simulationen der neuen Konfiguration im Sortiermodell zeigen, ob die Investition zweckmäßig ist. Insgesamt ist dazu jedoch eine Einbettung des operativen Modells in einen größeren Rahmen des Entscheidungsproblems vonnöten. Dies ist dadurch begründet, dass das Sortiermodell investitions- und langfristige kostenrechnerische Aspekte, wie z. B. Abschreibungen, Zinsen und andere Einflussfaktoren, nicht einbezieht.⁴

Zu den mittel- bis langfristigen Entscheidungen gehört neben Investitionsentscheidungen auch die Auswahl der Fraktionen, die in der Sortieranlage abgetrennt werden sollen. Nicht immer ist für die Hinzunahme neuer Fraktionen auch eine neue Anlagenkomponente erforderlich. Die Anzahl zu sortierender Fraktionen kann über teach-in-Verfahren oder eine einfache Anweisung an das Sortierpersonal, die betreffende Fraktion zu entnehmen und einem neu bereitgestellten Container zuzuführen, ausgedeutet werden (vgl. Kapitel 3). Ob diese Veränderung für das Sortierunternehmen sinnvoll ist, bedarf einer eingehenden Überprüfung. Die Entscheidungsunterstützung kann an dieser Stelle auch wieder das Sortiermodell leisten. Dazu werden die neuen Fraktionen als abzutrennende Komponenten in das Modell aufgenommen. Unter der Voraussetzung, dass die weiteren Daten und Parameter geeignet gewählt bzw. eingestellt werden, kann die Veränderung gegenüber der Ist-Situation dann erneut anhand des Sortierwertes und der verschobenen Quantitäten abgelesen werden.

Controlling- und Managementinstrument

Das Sortiermodell ist insbesondere als Controlling- und Managementinstrument sinnvoll einsetzbar. Das Management kann in Zusammenarbeit mit dem Controlling auf Basis des Sortiermodells Kennzahlen erarbeiten, die zur Prozesssteuerung und -überwachung des realen Sortierprozesses eingesetzt werden. Die kontinuierliche Überwachung der Kennzahlen erfolgt ebenfalls durch das Controlling. Von dort aus gibt es wiederum eine Rückmeldung der Ergebnisse an das Management. Auf Basis dieser Informationen kann das Management Anpassungen der Kennzahlen vornehmen und Vorgaben für die Sortierwerker erarbeiten oder weitere, vollständig neue Kennzahlen konzipieren.

⁴ Auch SPENGLER und PLOOG haben eine mögliche Modellierung zur Investitionsbewertung von Recyclinganlagen vorgestellt, vgl. Spengler/Ploog (2001). Grundsätzlich ist die Einbindung des Sortiermodells in einen gleichartigen Kontext vorstellbar.

Derartige ökonomische Zielvorgaben sind jedoch nicht immer ohne Einschränkungen umsetzbar. Eine Managementvorgabe könnte beispielsweise lauten, dass die Sortenreinheit für eine ausgewählte Fraktion 95 % betragen soll. Der ausführende Sortierwerker weiß aber gewöhnlich nicht, wann diese 95 % erreicht sind. Lässt er zu stark in seiner Sorgfältigkeit nach und trennt – wenn auch ungewollt – zu viele Objekte falscher Fraktionen ab, wird die geforderte Sortenreinheit nicht erreicht. Dieses Verhalten hätte entweder erhöhte Kosten, verursacht durch eine Nachsortierung, oder entgangene Erlöse, weil die Wertstoffe mit einer geringeren Qualität nicht oder nur zu einem geringeren Preis abgesetzt werden können, als Konsequenz. Bei einem quasi-verspäteten Abbruch der Sortiertätigkeit hingegen wird die Sortenreinheit überschritten. Dies wirkt sich aber zumeist nicht negativ aus, da eine höhere Sortenreinheit gegebenenfalls sogar mit höheren Absatzpreisen vergütet wird.⁵ Es sind jedoch z. B. bei einer Nachsortierung auch Fälle vorstellbar, in denen die Sortierung dann abgebrochen werden sollte, wenn die Kosten für die gezielte weitere Erhöhung der Sortenreinheit die zusätzlichen Erlöse übersteigen.⁶

Allerdings ist es zumeist wenig sinnvoll, auf die Vorgabe zu bestehen, weil eine Rückkopplung auf die Motivation der Sortierwerker erfolgt. Sie können genau genommen nur die Anweisung, die ausgewählte Fraktion dem Band zu entnehmen oder die Fraktion nicht zu entnehmen, durchführen. Es ist den Mitarbeitern nicht vermittelbar, dass sie ihre Arbeit schlechter ausführen sollen als sie es tun, nur um der Vorgabe exakt gerecht zu werden. Ein weiteres Problem ist die Unsicherheit, ob und wann genau die Vorgabe von 95 % erreicht ist. Eine Absicherung kann z. B. durch das Sortieren von 98 % erreicht werden bzw. durch eine Nachsortierung. Eine Abtrennungsgradvorgabe kann durch den Einsatz einer ‚Schlussortierkraft‘, die alle Fraktionen sortiert und nach allen anderen die verpassten Objekte schließlich doch noch in die zugehörigen Container abtrennt, erfüllt werden. Aber auch ungeachtet einer eindeutigen Abtrennungsvorgabe kommt es zu fehlerhaften bzw. verpassten Abtrennungen von Wertstoffen. Dadurch wird dem Prozess eine stochastische Charakteristik verliehen.

Für eine technische Anlage ist eine Vorgabe einer maximalen Sortenreinheit nicht sinnvoll, wenngleich ein Abbruch der Tätigkeit bei Erreichen dieses Wertes hier tatsächlich programmierbar wäre. Die Maschine unterliegt im Unterschied zu menschlichen Sortierkräften keinen Motivationsschwankungen bzw. wechselnden Sortierleistungen und sollte – natürlich auch aus ökonomischen Aspekten heraus – maximal ausgelastet werden.

⁵ Vgl. für einen Sachverhalt mit ähnlicher Problemstellung Souren (1997).

⁶ Vgl. hierzu auch Abschnitt 6.4.4, S. 149.

Ablauforganisatorische Problemstellungen

Ein weiteres stark praxisbezogenes Problem bei der Prozesssteuerung ist die Entscheidung, welche Fraktionen ein Sortierwerker gemeinsam sortieren soll. Hier können verschiedene Strategien verfolgt werden, z. B. die sehr gegensätzlichen Möglichkeiten der gemeinsamen Sortierung sehr ähnlicher Objekte oder der Sortierung sehr unterschiedlicher Fraktionen. Je mehr Fraktionen gleichzeitig zu sortieren sind, umso komplizierter wird es für die Sortierwerker, alle Vorgaben gleichzeitig zu beachten und einzuhalten. Der Prozess wird dadurch noch stärker Unregelmäßigkeiten unterworfen. Somit sollte in einer Handlungsempfehlung eine sinnvolle Kombinationen von Fraktionen zusammengefasst werden, um die Unsicherheit zu verringern und bestenfalls zu minimieren.

Solche ablauforganisatorischen Fragestellungen kann das Sortiermodell nicht beantworten, und auch die dadurch verursachten stochastischen Schwankungen im Prozess werden nicht erfasst. Hierzu zählt des Weiteren z. B. auch die Frage, wie genau die Mitarbeiter am Band positioniert werden sollten. Das Modell kann zwar ein Ergebnis für einen fixierten Mitarbeiterereinsatz liefern, kann diesen selbst aber nicht aktiv steuern. Das Ergebnis des Modells könnte aber Hilfestellung geben, die Anzahl benötigter Sortierwerker zu ermitteln. Demzufolge ist das Sortiermodell zwar als Planungsmodell einsetzbar, jedoch nicht zur unmittelbaren Prozesssteuerung.

Zeitliche Gültigkeit des Sortiermodells

Beim Einsatz des Sortiermodells zur Planung müssen verschiedene Planungszeiträume berücksichtigt werden. Das Modell selbst enthält keinen zeitlichen Bezug. Sein Ergebnis ist aber abhängig von den eingegebenen Daten, und diese sind veränderlich und somit stets nur für einen begrenzten Zeitraum gültig. Die Abfallquantität und -zusammensetzung unterscheidet sich plausiblerweise zu verschiedenen Zeiten wie den Jahreszeiten: Im Sommer werden mehr Getränkeverpackungen gebraucht und weggeworfen als im Winter.⁷ Für einen sinnvollen und erfolgreichen Einsatz des Modells ist es daher erforderlich, geeignete Intervalle zu ermitteln, für die jeweils eine eigene Planung erfolgen sollte. Diese Intervalle müssen nicht zwangsläufig gleichlang sein. Sie sollten sich stattdessen auf Zeiträume beziehen, innerhalb derer annähernd gleichbleibende Rahmenbedingungen vorherrschen. Denkbar wären hierfür beispielsweise stets wiederkehrende Perioden im Jahresverlauf, wie die bereits erwähnten Jahreszeiten sowie feste Feiertage oder Schulferien. Auch eine Berücksichtigung singularer Großer-

⁷ Vgl. Souren (1996b), S. 218f., bzw. Uhlig/Bremerstein (1997), S. 77.

eignisse wie Sportveranstaltungen (Fußballweltmeisterschaft, Olympische Spiele etc.) kann sich als notwendig und sinnvoll herausstellen. Zur Antizipierung zufälliger, (jahres)zeitlich bedingter Abfallquantitäten könnten Prognosemodelle eingesetzt werden.

Mehrwegflaschensortierung

Bei der Entwicklung des mathematischen Sortiermodells wurde in erster Linie auf die Sortierung von LVP-Wertstoffen verwiesen. Das zweite Beispiel der Mehrwegflaschensortierung wurde dabei weitgehend vernachlässigt und erst wieder stärker bei der Diskussion der Auswirkungen verschiedener Vermischungsgrade auf die Ziel-funktionsterme aufgegriffen. Das Sortiermodell kann bei geeigneter Definition der Fraktionen aus Kästen- und Flaschensorten als einzelne Komponenten auch für die Flaschensortierung verwendet werden. Im Unterschied zur LVP-Sortierung muss das Modell an einigen Stellen speziell für die Flaschensortierung angepasst werden. Wie nachfolgend näher erläutert wird, sind nicht alle für die LVP-Sortierung entwickelten Nebenbedingungen auch für die Flaschensortierung erforderlich.

Die technische Sortieranlage bei der Flaschensortierung erscheint vergleichsweise weniger kompliziert als es bei der LVP-Sortierung der Fall ist. Es müssen keine stark verschieden ausgeprägten physikalischen Eigenschaften wie z. B. die magnetische oder elektrische Leitfähigkeit sowie Verhaltenseigenschaften im Schwerfeld oder in Fluiden berücksichtigt werden. Demnach ist auch keine auf diese Eigenschaften abgestimmte Vielfaltigkeit der Maschinen erforderlich, und es entfallen demzufolge diese Stufen im Sortierprozess. Die Flaschensortierung kann dennoch mehrstufig gestaltet werden, wohl aber nicht im gleichen Ausmaß wie die LVP-Sortierung.

Bei den nicht-strukturierenden Restriktionen kann im Flaschensortiermodell z. B. auf die gesonderte Formulierung zur Ausbringung diskreter Quantitäten verzichtet werden, da sowieso immer nur ganze Flaschen (und Kästen) und keine stetige Masse sortiert wird. Die Übernahme der nachfolgend angesprochenen Restriktionen ist hingegen sehr zweckmäßig: Beschädigte Flaschen werden im Verlauf als quasi eigenständige Fraktion von den weiteren Flaschen abgetrennt, verlassen daraufhin aber den Fließprozess. Sie können daher als Verlust interpretiert werden, sodass eine Verlustrestriktion sinnvoll erscheint. Eine Kapazitierung der Maschinen und Rollbahnen kann bei der Flaschensortierung – wie bei der Wertstoffsartierung auch – unterstellt werden. Und auch die bewusste Blockierung einzelner ‚Verschiebeverbindungen‘ ist bei der Flaschensortierung denkbar, z. B. wenn Rollbahnen für Kästen oder Flaschen bereits voll belegt sind.

Diskussionsbeitrag zur Abfalltrennung in Haushalten

Das entwickelte Sortiermodell kann neben den betrieblichen Entscheidungen möglicherweise auch einen kleinen Beitrag zur kontroversen Diskussion über die Abschaffung der Wertstoffsortierung in Haushalten liefern. Bereits seit vielen Jahren wird – auch in den öffentlichen Medien – darüber diskutiert, ob es nicht einfacher sei, alle Siedlungsabfälle – Restabfälle und LVP – wieder in einer Tonne zu sammeln und diese dann von den Entsorgungsunternehmen in Großanlagen sortieren zu lassen.⁸ Vorteile für die Haushalte seien die weniger aufwendige Abfallsammlung zu Hause und bestenfalls sinkende Entsorgungsgebühren. Entsorger hätten keine Probleme mehr mit verunreinigten Wertstoffen durch Fehlwürfe, deren Sortierung aufwendiger und teurer ist, sowie das Potential, auch aus den Restabfällen der Haushalte weitere wertvolle Stoffe zu gewinnen. Als Hindernis für diesen Schritt wird bislang neben politischen Gründen oft die zu hohe Feuchtigkeit des neuen Gemischs angeführt.⁹

Dieses Problem an sich kann das Sortiermodell nicht lösen, und es wird auch den Diskurs nicht abschließend zugunsten der gemeinschaftlichen oder getrennten Abfallsammlung entscheiden können. Aber es kann zum besseren Verständnis des Sortierproblems beitragen und einen Hinweis auf die ökonomisch sinnvolle Durchführbarkeit der Sortierung gemeinsam gesammelter Abfälle geben.

Abschließend kann noch einmal zusammengefasst werden, dass sich für das Sortiermodell vielfältige Einsatzmöglichkeiten insbesondere in der Planung bieten. Das Modell weist jedoch auch einige Schwächen auf. Dazu gehört die fehlende Eignung für ablauforganisatorische Fragestellungen. Der größte Fallstrick bei der Umsetzung des Sortiermodells ist jedoch der Zufallseinfluss auf die anteilmäßige Verteilung der Wertstoffe im Eingangsgemisch sowie Stochastizitäten im Prozessablauf. Für die Berücksichtigung dieser Eigenschaften ist das Modell bislang noch nicht ausreichend und praxistauglich genug. Daher wird dieses Problem im nachfolgenden Kapitel ausführlicher analysiert, um dann einen ersten Ansatz zu entwickeln, die Stochastizitäten in das Sortiermodell zu integrieren.

⁸ Vgl. Gallenkemper (2011), S. 115. Ausgenommen sind die getrennten Sammlungen von Papier und Glas, vgl. Langen et al. (2008), S. 236.

⁹ Der interessierte Leser sei an dieser Stelle auf weiterführende Beiträge zur Thematik getrennte oder gemeinsame Sammlung und Verwertung von Verpackungen und Restabfällen verwiesen, z. B. Pretz/Schmalbein/Wens (2010), Monzel (2010) oder Halm/Schiel (2010).

Kapitel 10

Konzeptionelle Überlegungen zur Integration stochastischer Einflüsse

In Kapitel 9 hat die Evaluation des einfachen Sortiermodells als ein wesentliches Defizit ergeben, dass das Modell keine stochastischen Schwankungen berücksichtigt. Dadurch ist das Modell noch nicht ausreichend praxisnah. Es bildet bisher den Sortierprozess als Verschiebung der Wertstoffe aus dem Input in Wertstoffoutputobjektarten ab.¹ Allerdings unterliegt die praktische Sortierung unbekanntem, schwankenden Einflüssen, die gewöhnlich nicht oder nur sehr eingeschränkt der Steuerung und Kontrolle des Entsorgungsunternehmens unterworfen sind.² In diesem letzten Kapitel soll diese Lücke ein Stück weit geschlossen werden. Dazu wird der Fokus von dem sehr abgegrenzten Bereich der linearen (bzw. gemischt-ganzzahligen) Programmierung und des Operations Research auf weitere Bereiche der Entscheidungstheorie erweitert. Auf diese Weise wird es möglich sein, Zufallseinflüsse in das Sortiermodell einzubeziehen.

In Abschnitt 10.1 erfolgt zunächst eine kurze Einordnung der Entscheidungsformen, bei der auch die Verwendung notwendiger Begrifflichkeiten geklärt wird. Anschließend werden Stochastizitäten bei der Wertstoffsortierung analysiert. Abschnitt 10.2 beschäftigt sich mit der formalen Umsetzung von Zufallsvariablen in das beispielhafte Sortiermodell aus Kapitel 8. Hier schließen sich modellbezogene sowie allgemeine Bemerkungen zur Berücksichtigung von Zufallsvariablen in linearen Programmen an. In 10.3 werden sog. Ersatzmodelle für stochastische lineare Programme vorgestellt und ihre Anwendung für das Sortiermodell diskutiert. Ein Zwischenresümee schließt

¹ Mit einem geeigneten Algorithmus könnte bei gegebenen Daten auch eine optimale Lösung errechnet werden.

² Vgl. zu vergleichbaren Unsicherheiten bei der Güterproduktion Fandel (2005), S. 183.

das Kapitel, indem Forschungslücken für weitere Untersuchungen zu stochastischen Sortiermodellen aufgezeigt werden sollen.

10.1 Beschreibung und Analyse potenzieller Stochastizitäten bei Sortierprozessen

Einordnung und Terminologie

Vor der Analyse der Zufallseinflüsse im Sortierprozess soll kurz geklärt werden, wie die verschiedenen Begriffe aus der Entscheidungstheorie und Statistik eingesetzt werden, da sie in der Literatur unterschiedlich verwendet werden. Als Ausgangspunkt zur Begriffsklärung wird der Terminus **Unsicherheit** gewählt. Unsicherheit entsteht immer dann, wenn die Informationen für eine Entscheidung nicht vollständig vorliegen bzw. Umwelteinflüsse nicht vollständig determiniert werden können.³ Beispielsweise muss für die Sortierung entschieden werden, wie die Wertstoffe aus einem Abfallgemisch abgetrennt werden. Vor der Wertstoffsartierung ist aber nicht oder zumindest nicht vollständig bekannt, wie der Abfall zusammengesetzt ist.⁴ Es existiert nun eine Menge möglicher ‚Abfallqualitäten‘, die auftreten können, wobei es aber noch ungewiss ist, welche tatsächlich eintreten wird (und zwar genau eine). Dies wird als unsicherer Tatbestand oder auch als **stochastischer Vorgang** bzw. **Zufallsvorgang** bezeichnet.⁵ Im Folgenden wird daher das unsichere Vorhandensein von Objekten (Abfallfraktionen bzw. Quantitäten der Abfallfraktionen) oder der unsichere Verlauf von Prozessen als zufällig oder stochastisch bezeichnet.

Aus der Literatur zur Entscheidungstheorie ist eine Aufspaltung der Entscheidungsformen in Entscheidung unter Sicherheit bzw. Entscheidung unter Unsicherheit bekannt. Unsicherheit wird dabei häufig weiter in Risiko und Ungewissheit unterteilt.⁶ Bei Risiko wird unterstellt, dass Aussagen über eine **Wahrscheinlichkeitsverteilung** für das Eintreten bestimmter Ereignisse möglich sind, was bei Ungewissheit nicht der Fall ist. Die mathematische Statistik nimmt eine solche Unterscheidung nicht vor.⁷ Und auch EISENFÜHR, WEBER und LANGER distanzieren sich von die-

³ Vgl. Powell/Topaloglu (2003), S. 560, sowie Eisenführ/Weber/Langer (2010), S. 23.

⁴ Diese Information wird erst nach der Durchführung der Sortierung bekannt sein.

⁵ Vgl. Bamberg/Baur/Krapp (2012), S. 71, und Eisenführ/Weber/Langer (2010), S. 24.

⁶ Vgl. z. B. Böttcher (1989), S. 1. Auch andere Begriffszuordnungen sind möglich, vgl. z. B. Dinkelbach (1982), S. 40, der Unsicherheit mit Ungewissheit gleichsetzt, ebenso Odening (1994), S. 4.

⁷ Vgl. Bamberg/Baur/Krapp (2012), S. 78.

ser Definition und halten den letzten Fall der Ungewissheit sogar für realitätsfern.⁸ Ihnen zufolge haben Entscheider immer eine zumindest vage Vorstellung über die Eintrittswahrscheinlichkeiten.⁹ Dieser Einschätzung wird hier gefolgt und Unsicherheit als Synonym für Risiko verwendet. Außerdem wird dazu im Weiteren angenommen, dass das Sortierunternehmen die erforderlichen Wahrscheinlichkeiten angeben, (von anderen) beschaffen oder auch empirisch ermitteln kann (z. B. über Stichproben oder Simulationen). Entscheidungen unter Sicherheit spielen im Folgenden keine Rolle mehr, sie wurden in Teil II behandelt.

Prozessanalyse

Um anschaulich aufzuzeigen, an welchen Stellen der Wertstoffsortierung Stochastizitäten einen Einfluss haben, wird an dieser Stelle der I/O-Graph eines einfach gehaltenen Sortierprozesses wieder aufgegriffen (vgl. Abbildung 10.1).

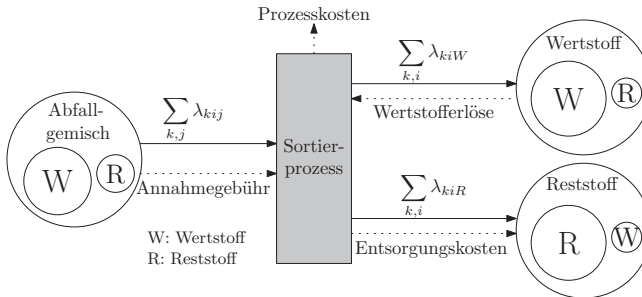


Abbildung 10.1: I/O-Graph eines einfachen Sortierprozesses mit Quantitäts- und Wertrelationen

Der abgebildete Graph enthält neben den kreisförmig dargestellten Komponenten¹⁰ und Objektarten sowie dem Prozesskasten durchgezogene Pfeile, die die Quantitätsrelationen abbilden. Zudem besitzt er – im Unterschied zu allen bisher gezeigten I/O-Graphen – auch Wertrelationen an den gepunkteten Pfeilen. Sie zeigen die Kosten (Pfeilrichtung vom Prozesskasten weg) bzw. Erlöse (Pfeilrichtung zum Prozesskasten

⁸ Vgl. Eisenführ/Weber/Langer (2010), S. 23.

⁹ Vgl. Eisenführ/Weber/Langer (2010), S. 305. Mögliche Messmethoden für solche Wahrscheinlichkeiten finden sich bei Eisenführ/Weber/Langer (2010), S. 184–194.

¹⁰ Die Größe der Kreise ist dabei nicht maßstabsgetreu, sondern soll nur exemplarisch die Anteile der Komponenten in den Objektarten verdeutlichen.

hin) der einzelnen Objektarten an.¹¹ Aus Gründen der Vollständigkeit sind zudem die Prozesskosten aufgeführt, auch wenn sie keiner Objektart eindeutig zugeordnet werden können. Damit sind in Abbildung 10.1 die Elemente der Zielfunktion und der strukturellen Nebenbedingungen des Sortiermodells vereinigt.

Bereits an mehreren Stellen in dieser Arbeit wurde auf die Heterogenität des Abfallinputs (Abb. 10.1 links) hingewiesen und auf die hierzu getroffene, vereinfachende Annahme, seine Quantität und Zusammensetzung sei bekannt und nicht veränderbar. Um das Sortiermodell realitätsnäher und praxistauglicher zu gestalten, ist es erforderlich, diese Annahme zurückzuziehen. Das Inputgemisch ist tatsächlich in mehrfacher Hinsicht variabel und zufallsbehaftet. Dazu zählen Schwankungen der Quantität und der Qualität des Gemischs sowie zeitlich bedingte Einflüsse. Durch diese Einflüsse unterliegt der Abfallinput im Gegensatz zum Input der klassischen Produktion nicht der bewussten Entscheidung des Sortierunternehmens.¹²

Quantitative Schwankungen betreffen die gesamte beim Entsorgungsunternehmen angelieferte Abfallmenge. Sie wird durch Faktoren wie die Siedlungsstruktur oder die Person des Entsorgten (Haushalte bzw. Gewerbe) beeinflusst. Aus dichter besiedelten Gebieten mit vielen Unternehmen ist mehr Abfall zu erwarten als aus Regionen, in denen nur wenige Menschen leben bzw. wenige Unternehmen angesiedelt sind.

Qualitative Schwankungen betreffen die Vermischung des Abfalls. Dabei spielen – wie in Kapitel 4 zur Vermischung bereits diskutiert wurde – sowohl die Anzahl der enthaltenen Komponenten als auch deren jeweiliger Anteil an der Gesamtmasse eine Rolle. Ein Gelber Sack, der hauptsächlich Tetrapaks sowie einen kleinen Anteil PE-Folien enthält, ist daher von besserer Qualität als ein Sack der neben Tetrapaks und Folie auch noch Papier und Essensreste beinhaltet. Wie viel der einzelnen erwünschten Wertstoffarten und der unerwünschten Fehlwürfe im Sack enthalten ist, hängt davon ab, wie genau die Haushalte und Unternehmen sich an die Vorgaben zur Abfalltrennung halten. Für das Sortiermodell ist nun wichtig, dass die Komponenten des Abfalls und ihre Quantitäten **Zufallsvariablen** sind. Infolgedessen ist auch der gesamte Abfallinput, als Summe der Komponentenquantitäten, stochastisch.

An dieser Stelle wird die Analogie der Sortierung zur Demontage ein weiteres Mal deutlich. Auch bei Demontageprozessen ist die Quantität der ankommenden Objekte selten im Voraus bekannt und daher stochastisch. Im Unterschied zur Sortierung sind jedoch die in den zurückkommenden Produkten verbauten Komponenten gemäß

¹¹ Vgl. zur Darstellung von Aufwand und Ertrag in I/O-Graphen Dyckhoff (1994), S. 190ff. bzw. 207.

¹² Vgl. zur Aussage bei klassischer Produktion Fandel (2005), S. 183.

des Bauplans oder der Stückliste mit ihrer Quantität und ihrer Position bekannt. Damit ist allerdings nicht sicher gestellt, dass auch in allen Produkten noch alle Komponenten enthalten sind oder dass nicht einzelne Komponenten ausgetauscht wurden. Die Qualität ist dort also auch stochastisch, wenn auch deutlich weniger als bei der Sortierung.

Quantität und Qualität des Abfalls werden außerdem noch durch jahreszeitliche Faktoren beeinflusst. Dazu zählen, z. B. durch wärmere Witterung im Sommer bedingt, erhöhte Anfallmengen von Getränkeverpackungen oder an Feiertagen erhöhte Abfallquantitäten durch aufwendige, mehrgängige Mahlzeiten mit vielen Zutaten oft für viele Personen sowie Geschenkverpackungen, z. B. zu Weihnachten. Auch singuläre Großereignisse wie Sportveranstaltungen können die Abfallquantität gegenüber den „normalen Quantitäten“¹³ erhöhen. Auch Änderungen der Abfallqualität sind denkbar, da bei einem Sonderereignis zumeist nur bestimmte Abfallarten bzw. Wertstoffverpackungen erhöhte Quantitäten aufweisen.

Folgt man dem I/O-Graphen weiter von links nach rechts, so enthält er als nächstes Element am durchgezogenen Pfeil die Verschiebequantitäten (vgl. Abb. 10.1). Durch die zufallsbehafteten Komponenteninputs sind sie in der Folge ebenfalls zufallsbehaftet. Aber auch auf dem Transportband unterliegt die Abfallquantität weiteren unvorhersehbaren Einflüssen. Durch Unregelmäßigkeiten im Lauf des Transportbands oder auch Verunreinigungen können einzelne Objekte vom Band herunterfallen. Möglicherweise können sich auch zuvor verzögerte Abfallobjekte lösen und wieder zurück in den Strom auf das Band fallen.

Gemäß Abbildung 10.1 durchlaufen die verschobenen Abfallquantitäten im I/O-Graphen dann den Prozesskasten.¹⁴ Der Sortierprozess ist ebenfalls nicht frei von zufälligen Schwankungen, die sich auf die Qualität und Quantität der Wertstoffprodukte auswirken. Ursache können z. B. die stochastischen Bahnbewegungen einzelner Partikel in Windsichtern oder Fluiden sein.¹⁵ Weiterhin können Störungen des idealen Prozessablaufs durch Ausfälle von Betriebsmitteln oder beim Einsatz von Mitarbeitern bei der händischen Sortierung auftreten.¹⁶ Die Sortierleistung von Mitarbeitern kann durch ihre Kenntnisse und Erfahrungen sowie ihre Tagesform variieren.¹⁷

¹³ Als normale Quantität könnte die durchschnittliche Abfallquantität unterstellt werden, die regelmäßig anfällt, wenn keine besonderen Ereignisse stattfinden.

¹⁴ Im Fall mehrstufiger Reduktion gelten die Aussagen auch für mehrfach verschobene Quantitäten und mehrere Prozesskästen.

¹⁵ Vgl. Schubert (1996b), S. 584.

¹⁶ Vgl. Fandel (2005), S. 149.

¹⁷ Vgl. Fandel (2005), S. 179.

Als Ergebnis des Sortierprozesses stehen nach dem Prozesskasten auf der rechten Seite des I/O-Graphen die Wertstoffobjektarten und die Reststoffobjektart (vgl. Abb. 10.1). Sie sind das Resultat dessen, was aus der angelieferten Abfallquantität mithilfe der Sortierverfahren abgetrennt wurde. Ihre Quantitäten bzw. Qualitäten unterliegen keinen unmittelbaren Schwankungen durch äußere Umwelteinflüsse. Sie sind dennoch stochastisch, weil sie den stochastischen Einflüssen des Inputs und auch den Störeinflüssen im Prozess unterliegen.¹⁸

Nachdem der Pfad der Abfallquantitäten (durchgezogene Pfeile im I/O-Graphen in Abb. 10.1) verfolgt wurde, sollen nun auch die Pfade der gepunkteten Pfeile der Wertrelationen untersucht werden. In Abbildung 10.1 sind die vier Pfeile mit Annahmegebühr, Prozesskosten, Wertstofferlöse und Reststoffentsorgungskosten bezeichnet. Annahmegebühr, Wertstofferlöse und Reststoffkosten sind abhängig von den Abfall- bzw. Wertstoffquantitäten und -qualitäten. Sind diese stochastisch, so schwanken in der Folge auch die Kosten bzw. Erlöse. Es können aber auch weitere Einflüsse vorliegen.

Die Annahmegebühr ist oftmals fixiert. Es ist aber auch denkbar, dass sie stochastischen Schwankungen unterliegt, wenn der Abfall am Markt gehandelt wird und die Marktpreise (positiver Annahmepreis, wenn der Abfall angeliefert wird, oder negativer Einkaufspreis, falls Wertstoffabfallgemisch zugekauft wird) schwanken. Gleiches gilt für die Wertstofferlöse. Werden die Wertstoffe als Sekundärrohstoffe am Markt gehandelt, so unterliegen ihre Preise auch den Schwankungen an der Börse. Prinzipiell kann auch der Kostensatz für die Reststoffentsorgung eine zufällige Veränderliche sein. Dies erscheint jedoch wenig plausibel, wenn die Restabfälle über die öffentlich-rechtlichen Entsorgungswege mit thermischer oder sonstiger Vorbehandlung und anschließender Deponierung entsorgt werden. Hier kann – zumindest für einen festgelegten, kurzfristigen Zeitraum – von konstanten Preisen ausgegangen werden.

Die Prozesskosten sind zusammengesetzt aus variablen und fixen Kostenbestandteilen (siehe gepunkteter Pfeil oberhalb des Prozesskastens in Abb. 10.1). In Abschnitt 7.4 wurde bereits ihre Abhängigkeit von den Vermischungsgraden diskutiert. Dort bestand jedoch die Annahme, dass die Vermischungsgrade bekannt bzw. von vornherein ermittelbar sind. In der Praxis können die Vermischungsgrade erst im Verlauf der Sortierung bzw. nach Durchführung der Sortierung bestimmt werden, wenn die Abfallbestandteile bekannt sind. Zudem schwanken die Vermischungsgrade bedingt durch die Abfallqualität und demzufolge auch die Prozesskosten für die Sortierung. Bei den variablen Kostenbestandteilen kann beispielsweise das Lohnniveau variieren,

¹⁸ Vgl. Fandel (2005), S. 180 und 183.

was sich wiederum auf die Prozesskosten auswirkt.¹⁹ Weitere Ursachen für Stochastizitäten der (nicht variablen) Prozesskosten sind unvorhersehbare Maschinenausfälle durch Werkzeugschäden²⁰ oder Verunreinigungen.²¹

Nachdem nun die Positionen der stochastischen Schwankungen im I/O-Modell der Wertstoffsortierung und ihre möglichen Ursachen verbal diskutiert wurden, wird im nachfolgenden Abschnitt in einem ersten Ansatz versucht, diese Überlegungen weiter zu formalisieren.

10.2 Erster Ansatz eines formalen stochastischen Sortiermodells

Die soeben diskutierten Stochastizitäten sollen nun in das formale – bisher deterministische – Sortiermodell (vgl. Kapitel 8) integriert werden. In der Zielfunktion und den Nebenbedingungen finden sich die Pfade des I/O-Graphen wieder. Die Wertrelationen an den gepunkteten Pfeilen in Abbildung 10.1 sind in der Zielfunktion abgebildet. Die Quantitätsrelationen (durchgezogene Pfeile) sind der wesentliche Teil der Nebenbedingungen. Und gemäß der vorangegangenen Diskussion können sowohl in den Wertrelationen der Zielfunktion als auch im Prozess Stochastizitäten auftreten. Dazu wird das Modell nun mit allen neuen Zufallsvariablen zunächst schlicht notiert. Wie diese Änderungen zu interpretieren sind, ob sie überhaupt sinnvoll sind und was sich im Umgang mit dem Modell verändert, wird anschließend diskutiert.

Zur Kennzeichnung der Zufallsvariablen gegenüber den weiteren im Modell verwendeten Symbolen wird im Folgenden die Tilde verwendet.²²

$$\text{Max! } \widetilde{SW} = \sum_{i \in V^{Input}} \tilde{p}_i \cdot \tilde{v}_i - \tilde{C}^P(VG, \rho, \tilde{\lambda}_{kij}) + \sum_{i \in V^{WOutput}} \tilde{e}_i \cdot \tilde{u}_i - \sum_{i \in V^{ROOutput}} c_i \cdot \tilde{u}_i \quad (10.1)$$

¹⁹ Vgl. Abel/Thiel (1981), S. 19f.

²⁰ Da es bei der Wertstoffsortierung keine Werkzeuge im engeren Sinne wie bei der Güterproduktion gibt, die Umformungen oder andere Veränderungen am Material vornehmen, sind damit hier einzelne, austauschbare Maschinenteile wie Luftdüsen, Greifer oder Magnete gemeint.

²¹ POWELL und TOPALOGLU bezeichnen die Prozesskosten bei ihren Untersuchungen stochastischer Transportprozesse auch als „Costs which are typically not fully known in advance“, Powell/Topaloglu (2003), S. 561. Dies erscheint durchaus auch auf das Sortiermodell übertragbar, da in Abschnitt 5.2 ja zumindest deterministische Transportprozesse als ähnlich zu Sortierprozessen charakterisiert wurden.

²² Zur Schreibweise des Modells sei angemerkt, dass hier auch weiterhin die sog. Normalform eines Linearen Programms verwendet wird, während sich in der Literatur auch häufig die Matrixschreibweise findet, vgl. zu diesen Formen Domschke/Drexel (2007), S. 17f.

U. B. d. R.

$$\tilde{v}_i = \sum_k \tilde{v}_{ki} \quad \forall i \in V^{Input} \quad (10.2)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \sum_k \tilde{\lambda}_{kij} - \sum_{j \in \mathcal{V}(i)} \sum_k \tilde{\lambda}_{kji} = \begin{cases} \tilde{v}_{ki} & \forall i \in V^{Input}, k = 1, \dots, K \\ -\tilde{u}_{ki} & \forall i \in V^{Output}, k = 1, \dots, K \\ 0 & \forall i \in V^{Through}, k = 1, \dots, K \end{cases} \quad (10.3)$$

$$\sum_k |\tilde{u}_{ki}| = \tilde{u}_i \quad \forall i \in V^{Output} \quad (10.4)$$

$$\frac{\sum_{k=j} \tilde{\lambda}_{kij}}{\tilde{u}_i} \geq \hat{\beta}_i \quad \forall i \in V^{Output} \quad (10.5)$$

$$0 \leq \sum_k \tilde{\lambda}_{kij} \leq \Lambda_{ij} \quad \forall (i, j) \quad (10.6)$$

$$0 \leq \tilde{\lambda}_{kij} \leq \Lambda_{kij} \quad \forall (i, j), k \quad (10.7)$$

Der erste Term der Zielfunktion (10.1) ist die Annahmegebühr. Im stochastischen Modell ist dieser Term eine Zufallsvariable, wobei zwei unterschiedliche Varianten denkbar sind. Im ersten Fall ist nur die Inputquantität eine Zufallsvariable, während im zweiten Fall auch die Preise Zufallsvariablen sind. Die Prozesskosten, der zweite Term der Zielfunktion, unterliegen nun auch einer zufälligen Verteilung. Wie bereits oben angesprochen, sind die Preise des Wertstofflösters – der dritte Term der Zielfunktion – möglicherweise Börsenpreise und somit ebenfalls Zufallsvariablen. Unverändert bleibt der letzte Term, die Reststoffentsorgungskosten. Seine Gesamthöhe variiert weiterhin nur abhängig von der Reststoffquantität. Infolge der zufallsbehafteten Terme der Zielfunktion ist auch der Sortierwert jetzt eine Zufallsvariable.²³

Die Nebenbedingungen enthalten in den Gleichungen (10.2), (10.3) und (10.4) Zufallsvariablen. Restriktion 10.5 ist die Reinheitsrestriktion, die auch bei stochastischen Quantitäten einzuhalten ist. Alle weiteren Nebenbedingungen bleiben unverändert deterministisch. Auch wenn sie keine Zufallsvariablen enthalten, können diese Restriktionen nichtsdestoweniger bindend sein, z. B. die Anlagenkapazität. Sie wurde in der Diskussion des I/O-Modells zuvor nicht explizit angesprochen. Dies liegt zum einen daran, dass die Potentialfaktorausstattung zumeist – und so auch hier geschehen

²³ Vgl. Dinkelbach (1982), S. 38f.

– nicht explizit in I/O-Modellen modelliert wird.²⁴ Zum anderen ist die Anlagenkapazität nicht stochastisch, sondern innerhalb festgelegter Planungszeiträume konstant.

Die Abtrennungsgradrestriktion wurde aus dem ursprünglichen Sortiermodell nicht in das stochastische Modell übertragen. Der Grund dafür ist, dass der Sortierer zwar eine Vorgabe für den Abtrennungsgrad machen kann, aber er kann sie nicht überprüfen, d. h. den Abtrennungsgrad korrekt messen. Dazu fehlt ihm die Information über die im Input enthaltene jeweilige Gesamtquantität der einzelnen Komponenten (v_{ki}), weil der Input stochastisch und unbekannt ist.²⁵ Auch nachträglich ist dieser Wert nicht ermittelbar.²⁶ An späterer Stelle, bei der Erläuterung von Modellen mit Wahrscheinlichkeitsrestriktionen, wird trotz des hiesigen Ausschlusses nochmals auf den Abtrennungsgrad als Beispiel zurückgegriffen.²⁷

Bemerkungen

Das Sortiermodell ist nun in eine Form übertragen, wie sie auch in der Literatur für einfache (lineare) stochastische Optimierungsmodelle zu finden ist.²⁸ Dazu wurden die Daten bzw. Parameter mit stochastischem Charakter in Zufallsvariablen umgeschrieben. Es sei angemerkt, dass das deterministische Sortierproblem²⁹ ein Spezialfall des stochastischen Problems ist. Und zwar ist das genau dann der Fall, wenn die Zufallsvariablen eine Einpunktverteilung aufweisen.³⁰

Zur Vereinfachung wird für stochastische Modelle zumeist unterstellt, dass die Verteilungen der Zufallsvariablen bekannt sind oder erforderlichenfalls ermittelt werden können. Sind die Verteilungsfunktionen nicht bekannt, werden ersatzweise die Wahrscheinlichkeitsfunktionen diskreter bzw. die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktio-

²⁴ Dies kann damit begründet werden, dass sie sich im Transformationsprozess nicht wesentlich verändert, vgl. Dyckhoff (1994), S. 16. Prinzipiell ist die Darstellung beliebiger Objektarten, also auch von Maschinen, aber möglich, solange sie quantitativ messbar sind, vgl. Dyckhoff (1994), S. 185.

²⁵ Vgl. Souren (1996b), S. 242.

²⁶ In realen Sortierprozessen sind die Objekte der einzelnen Fraktionen durch Fehlwürfe, Anhaftungen und auch Verluste zu stark verteilt, um sie alle zu lokalisieren und aus ihnen die Ursprungsquantität zu rekonstruieren.

²⁷ Vgl. S. 235f.

²⁸ Vgl. z. B. Werner (1973), S. 1f., Rembold (1977), S. 36f., oder Böttcher (1989), S. 6.

²⁹ In diesem Kapitel werden, wie auch im Operations Research geläufig, die Begriffe ‚Problem‘ und ‚Modell‘ synonym genutzt. Für manche Modelle ist es in der Literatur schlichtweg üblicher von ‚Problemen‘ als von ‚Modellen‘ zu sprechen, vgl. Domschke/Drexel (2007), S. 4f.

³⁰ Vgl. Rembold (1977), S. 36 bzw. 45; Abel/Thiel (1981), S. 21.

nen stetiger Zufallsvariablen verwendet.³¹ DINKELBACH geht von eindimensionalen Zufallsvariablen aus, wobei sie in der Realität aber oftmals gemeinsame Verteilungen aufweisen.³² Eine weitere, häufige Forderung ist die stochastische Unabhängigkeit.³³

Für Beschreibungszwecke ist die obige Modellformulierung zunächst ausreichend. Sie zeigt, wo bei der Sortierung Stochastizitäten auftreten. Darüber hinaus könnte man sie aber als naiv bezeichnen; DINKELBACH und KLEINE nennen sie ein ‚ill defined Problem‘.³⁴ Das Modell ist unvollständig formuliert und ohne weitere Angaben, wie z. B. die Präferenzinformationen³⁵ des Entscheiders, nicht (optimal) lösbar. Vor allem ist die Optimierungsaufgabe zur Lösung des Problems nicht sinnvoll definiert.³⁶ Durch die **Zufallsabhängigkeit der Zielfunktionswerte** sind diese nicht mehr eindeutig, und die hier gewählte Maximierungsvorschrift verliert ihren Sinn.³⁷ Um dies im Folgenden näher zu erklären, wird auf die Beschreibung graphischer Lösungsverfahren für deterministische lineare Optimierungsprobleme zurückgegriffen.

Bei deterministischen linearen Optimierungsproblemen wird durch die linearen Restriktionen ein Raum abgegrenzt, der die zulässigen Alternativen zur Lösung des Problems beinhaltet.³⁸ Als Optimum ist genau der Punkt auf dem Rand des Alternativenraums definiert, in dem die Zielfunktion diesen Raum gerade noch tangiert.³⁹ Für diesen Punkt nimmt die Zielfunktion einen eindeutigen Wert an.⁴⁰ Ist die Zielfunktion aber stochastisch, so kann nicht mehr für jeden zulässigen Punkt genau ein Wert berechnet werden. Es existiert nun stattdessen für jeden Punkt eine Zufallsvariable, die eine (bekannte) Verteilung aufweist. Für jede Realisation dieser Zufallsvariable ist nun ein anderer Optimalpunkt möglich. Ein kurzes Beispiel⁴¹ soll dies weiter verdeutlichen:

³¹ Vgl. zu dieser Voraussetzung auch Böttcher (1989), S. 6, bzw. Dinkelbach (1982), S. 40 und 58.

³² Vgl. Dinkelbach (1982), S. 58, sowie Kall (1976), S. 13.

³³ Vgl. Rembold (1977), S. 87. Diese Forderung besteht zumeist dann, wenn die Modelle auch tatsächlich gelöst werden sollen und die Verteilungen der Zufallsvariablen spezifiziert werden.

³⁴ Vgl. hierzu und im Folgenden Dinkelbach/Kleine (1996), S. 64.

³⁵ Hiermit ist die Risikoeinstellung des Entscheiders gemeint.

³⁶ Vgl. hierzu und im Folgenden Rembold (1977), S. 36ff., Werner (1973), S. 2, sowie Dinkelbach (1982), S. 38–40.

³⁷ Vgl. Alfieri/Brandimarte (2005), S. 79.

³⁸ Wobei auch der Rand zu diesem Raum dazu zählt.

³⁹ Zu linearen Optimierungsproblemen vgl. z. B. Domschke/Drexel (2007), S. 13–21.

⁴⁰ Die Zielfunktionswerte können für jeden Punkt des Alternativenraums bestimmt werden. Sie lassen sich zudem in eine Ordnung bringen, aus der der größte Wert bestimmbar ist, vgl. Rembold (1977), S. 37.

⁴¹ Das Beispiel ist eine Anlehnung an ein umfangreicheres Beispiel von Rembold (1977), S. 37.

Eine (vereinfachte) stochastische Zielfunktion \tilde{Z} eines Sortiermodells lautet

$$(\text{Max.}) \tilde{Z} = \tilde{e}_1 x_1 + x_2.$$

Dabei bezeichnet der erste Term $\tilde{e}_1 x_1$ die Wertstoff Erlöse. Der Erlössatz \tilde{e}_1 ist eine auf dem Intervall $[1, 5]$ gleichverteilte Zufallsvariable. Der zweite Term ist die Annahmehöhe. Vereinfachend ist für sie ein fester, deterministischer Erlössatz von 1 unterstellt, sodass ihre Gesamthöhe nur durch die Quantität x_2 bestimmt wird. x_1 ist die Entscheidungsvariable. Damit ist die Zielfunktion für jeden zulässigen Punkt eine Zufallsvariable $\tilde{e}_1 x_1 + x_2$ und wie \tilde{e}_1 gleichverteilt auf dem Intervall $[1x_1 + x_2; 5x_1 + x_2]$. REMBOLD schreibt dazu, dass infolge dieser Uneindeutigkeit das Konzept der Optimalität einer neuen Interpretation bedarf.⁴²

Durch die **Zufallsvariablen in den Nebenbedingungen** können Effekte entstehen, die die Alternativenmenge zulässiger Lösungen beeinträchtigen.⁴³ Solange die Realisation der Zufallsvariablen in den Nebenbedingungen nicht bekannt ist, kann die Alternativenmenge (der zulässigen Alternativen) selbst nicht bestimmt werden, da sie ‚schwankt‘.⁴⁴ Bezogen auf eine lineare Restriktion in einer graphischen Darstellung bedeutet dies, dass (noch) nicht bekannt ist, an welcher Position die Gerade im Diagramm liegt, welches Niveau und welche Steigung sie aufweist. Befindet sich die Zufallsvariable auf der ‚rechten Seite‘ der Nebenbedingung, führt eine Änderung dieses Wertes zu einer Parallelverschiebung der Restriktionsgeraden.⁴⁵ Sind hingegen die Koeffizienten auf der ‚linken Seite‘ zufällig, so ändert sich die Steigung der Restriktionsgeraden.⁴⁶ Weil infolgedessen vor der Realisation der Zufallsvariable keine Aussage über die Zulässigkeit oder Unzulässigkeit einzelner Punkte (im Diagramm) möglich ist, sieht REMBOLD Bedarf, auch den Zulässigkeitsbegriff im Rahmen stochastischer Modelle neu zu interpretieren.⁴⁷ Es können dabei auch Fälle auftreten, in denen die Lösung nicht optimal ist oder in denen die Menge zulässiger Alternativen nach der Realisation der Zufallsvariablen leer ist. Dann existiert auch keine optimale Lösung mehr. WERNER gibt aufgrund dessen zu bedenken, dass auch die Möglichkeit unzulässiger Lösungen berücksichtigt werden muss.⁴⁸

⁴² Vgl. Rembold (1977), S. 38, sowie auch Dinkelbach (1982), S. 38.

⁴³ Vgl. Werner (1973), S. 5ff.

⁴⁴ Vgl. Dinkelbach (1982), S. 38, sowie Rembold (1977), S. 38.

⁴⁵ Vgl. Böttcher (1989), S. 8.

⁴⁶ Nach BÖTTCHER kommt es zusätzlich auch zu einer Verschiebung der Restriktionsgeraden, vgl. Böttcher (1989), S. 8.

⁴⁷ Vgl. Rembold (1977), S. 38.

⁴⁸ Vgl. Werner (1973), S. 8, Böttcher (1989), S. 10, sowie Arnold (1987), S. 18.

Problematisch ist bei derartig formulierten stochastischen Modellen häufig, dass durch die Realisation einer zu großen Nachfrage die Grundannahme Angebotsquantität = Nachfragequantität verletzt ist. Infolgedessen wäre das Modell nicht mehr lösbar. Es muss also eine Möglichkeit gefunden werden, diese Differenz formal auszugleichen. Eine Möglichkeit wäre die Einführung von Schlupfvariablen oder alternativ die Modifikation der ursprünglichen Annahme in Anlehnung an KALL, der für ein stochastisches Transportproblem vorsieht, dass die Nachfrage das Angebot mit einer Wahrscheinlichkeit von nahezu 1 nicht überschreitet.⁴⁹ Für das Sortiermodell ist dieses Problem zwar – in umgekehrter Form – auch gegeben, aber nicht so gravierend, da in der praktischen Sortierung die Summe der Wertstoff- und Reststoffquantitäten die Inputquantität nicht übersteigen kann, weil im Reduktionsprozess keine weiteren Objekte hinzugefügt werden. Verlorene Objekte könnten – wie beschrieben – durch Schlupfvariablen erfasst werden.

In den meisten Entscheidungssituationen kann der Entscheider – hier das Sortierunternehmen – aber nicht bis zum Bekanntwerden der Realisation der Zufallsvariablen abwarten, um seine Entscheidung zu treffen (sog. wait-and-see-Situation). Stattdessen muss er bereits vorab in Unkenntnis der tatsächlichen Daten seine Entscheidung über die durchzuführende Sortierung treffen (sog. here-and-now Situation).⁵⁰ Viele Entscheider wählen in dieser Situation, wenn es an die Lösung ihres Problems geht, einen sehr einfachen Weg. Sie ersetzen die Zufallsvariablen im Modell durch ihre Erwartungswerte oder eine Schätzung der Erwartungswerte.⁵¹ Anschließend lösen sie das dadurch entstandene – jetzt wieder deterministische – lineare Programm. Dieses **Erwartungswertmodell** birgt jedoch die große Gefahr, recht häufig nicht durchführbare Lösungen zu erzeugen. KALL empfiehlt daher eine gebotene Vorsicht für den Einsatz dieses vermeintlich einfachen Lösungsansatzes.⁵²

Sinnvoller ist es, für das stochastische Entscheidungsproblem ein eigens angepasstes (deterministisches) **Ersatzmodell** zu definieren. Dieses Ersatzmodell umfasst die Annahmen oder das Wissen des Entscheiders über die Wahrscheinlichkeiten im Modell, die auch als Risikopräferenzen bezeichnet werden. Zudem ist es mit speziellen Algorithmen numerisch lösbar. Mögliche Ersatzmodelle für stochastische lineare

⁴⁹ Vgl. Kall (1976), S. 26.

⁵⁰ DINKELBACH bezeichnet dies auch als typisches stochastisches Entscheidungsproblem, vgl. Dinkelbach (1982), S. 39.

⁵¹ Vgl. Dinkelbach/Kleine (1996), S. 117, Souren (1996b), S. 239, sowie Böttcher (1989), S. 9 und 23.

⁵² Vgl. Kall (1976), S. 12. KALL zeigt dort ein Beispiel, das die mangelnde Zulässigkeit der Lösung des linearen Programms nach Einsetzen der Erwartungswerte für die Zufallsvariablen verdeutlicht.

Programme werden im nächsten Abschnitt vorgestellt. Zuvor wird noch kurz – wie bei der Prozessanalyse in Kapitel 5 und beim deterministischen Sortiermodell in Kapitel 6 – ein Vergleich zwischen dem stochastischen Sortiermodell und stochastischen Transport- und Umladmodellen gezogen.

Vergleich mit stochastischen Transport- und Umladeproblemen

In Abschnitt 5.2 wurde die Strukturähnlichkeit von Sortierprozessen mit Transportprozessen aufgezeigt. In Kapitel 6.1 wurden anschließend sogar Formulierungen aus den Nebenbedingungen des formalen Transportmodells in das Sortiermodell übertragen. Später wurde die Modellformulierung auch auf Teile von Umladmodellen ausgeweitet. Daher erscheint es sinnvoll, an dieser Stelle zu betrachten, wie es sich mit der Ähnlichkeit von stochastischen Transport- und Umladeproblemen zum stochastischen Sortierproblem verhält.

Transportprobleme gehören zu den Modellen, die im Rahmen erster Überlegungen zur Entwicklung stochastischer (linearer) Modelle betrachtet wurden.⁵³ In der Folge entstanden eine Vielzahl weiterer Veröffentlichungen, die sich mit stochastischen Transportproblemen im Besonderen beschäftigen.⁵⁴ Dort besteht die Zielsetzung zumeist in der Formulierung numerisch lösbarer Ersatzmodelle sowie in der Entwicklung algorithmischer Lösungsverfahren für diese Probleme.

Stochastische Transportprobleme haben meistens eine Zufallsvariable in der Zielfunktion und weitere in den Restriktionen. In der Zielfunktion sind oftmals die Transportkostensätze stochastisch schwankend. Im stochastischen Sortiermodell würde das den zufälligen Wertstofflösen entsprechen.⁵⁵ In den Nebenbedingungen können sowohl die Angebotsquantität als auch die Nachfragequantität – jeweils auf der rechten Seite der Restriktion – zufallsabhängig sein.⁵⁶ Hier gibt es einen Unterschied zum Sortiermodell, in dem ausschließlich das ‚Angebot‘ stochastisch und die ‚Nachfrage‘ nur das Ergebnis des Transports ist. ARNOLD sieht hingegen die Angebotsquantitäten in stochastischen Transportproblemen als fixiert und nicht beeinflussbar.⁵⁷ Er begründet dies damit, dass er die Transportplanung als Teil der Distributionsplanung sieht und

⁵³ Diese ersten Ansätze stochastischer linearer Programmierung werden im Allgemeinen zurückgeführt auf den Beitrag von Dantzig (1955).

⁵⁴ Vgl. exemplarisch Arnold (1987).

⁵⁵ In Transportproblemen werden in der Regel die Transportkosten minimiert, während im Sortiermodell der Sortierwert maximiert wird.

⁵⁶ Vgl. Kall (1976), S. 27f., sowie Rembold (1977), S. 13.

⁵⁷ Vgl. hierzu und im Folgenden Arnold (1987), S. 1, 12 und 14.

im Rahmen der Distributionsplanung die Angebotsquantitäten im Sinne herzustellender Güter nicht zur Disposition stehen. Weitere Autoren vernachlässigen in ihren Modellformulierungen zum stochastischen Transportmodell stochastische Angebotsquantitäten ohne Begründung und konzentrieren sich auf die stochastische Nachfrage.⁵⁸

Die im deterministischen Modell getroffene Annahme, dass für die Lösbarkeit des Modells die Angebotsquantität der Nachfragequantität entsprechen muss, kann im stochastischen Modell nicht immer eingehalten werden. Wie bereits zuvor kurz angesprochen, weicht KALL diese Annahme soweit auf, dass er davon ausgeht, dass die Nachfragequantität fast sicher, d. h. mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit nahe 1, nicht überschreitet.⁵⁹ Ziel ist aber auch weiterhin, dass – wie im deterministischen Fall – die Nachfrage so gut wie möglich befriedigt wird. Ist die Nachfrage nun sehr hoch realisiert, könnte ein zu geringes Angebot z. B. durch Zukaufen weiterer Produkte bzw. ein Überangebot bei sehr niedriger Nachfrage durch Lagerung der überzähligen Produktquantitäten kompensiert werden. Beides würde zusätzliche Kosten verursachen. Die Lösung eines gleichartigen Problems durch ein sogenanntes **Kompensationsmodell** wird im nachfolgenden Abschnitt näher thematisiert.

Eine Modellformulierung für ein stochastisches Umladeproblem findet sich bei BÖTTCHER.⁶⁰ Das Umladeproblem unterscheidet sich vom Transportproblem darin, dass es als (graphentheoretisches) Flussproblem modelliert ist. Und auch hier wird – im Unterschied zum Sortierproblem – nur eine stochastische Nachfrage angenommen. Die Angebotsorte mit ihren Quantitäten werden als gegeben vorausgesetzt.⁶¹ Das Problem ist dort bereits als Kompensationsmodell formuliert, in dem ein Nachfrageüberhang bzw. ein zu großes Angebot mit Strafkosten als Kompensation belegt wird. Zusätzlich zu den drei Knotengleichungen für die Angebots-, Nachfrage- und Umladeorte, die auch im deterministischen Umladeproblem zu finden sind, wird eine weitere, universelle Knotengleichung eingeführt. Je nach Realisation der Nachfrage ergibt sich aus dieser Restriktion, um was für einen Knoten – Angebots-, Nachfrage- oder Umladeknoten – es sich handelt. Dies erscheint sinnvoll, da ein Umladeknoten beispielsweise zu einem Nachfrageknoten werden kann, wenn seine Bilanz bedingt durch die nun bekannt gewordene Nachfrage größer als 0 ist. Somit erscheint auch eine Übertragung dieses Konstrukts auf ein als Umladeproblem formuliertes Sortiermodell als sehr sinnvoll.

⁵⁸ Vgl. Rembold (1977), S. 144, Böttcher (1989), S. 44.

⁵⁹ Vgl. Kall (1976), S. 26.

⁶⁰ Vgl. hierzu und im Folgenden Böttcher (1989), S. 44ff.

⁶¹ Vgl. Böttcher (1989), S. 44 und 48.

Obwohl Transport- und Sortierprozesse in ihrer Struktur starke Analogien aufweisen, unterscheiden sie sich doch in der Formulierung der stochastischen Modelle dahingehend, dass die Zufallsvariablen in den Nebenbedingungen im Transportmodell hauptsächlich die Nachfrage betreffen und im Sortiermodell ausschließlich den Input (das Angebot). Im stochastischen Sortiermodell schwankt der Wertstoffoutput, das Nachfrageäquivalent, zwar ebenfalls, aber diese Schwankungen sind die Folge einer stochastischen Inputquantität und unsicherer Prozesse bei der Sortierung und nicht durch äußere (Zufalls-)Einflüsse induziert.

10.3 Zum Umgang mit stochastischen Modellen

10.3.1 Ein allgemeines Schema der stochastischen Optimierung

Der vorhergehende Abschnitt hat sich mit einem ersten stochastischen Sortiermodell befasst. Dabei standen die Modellformulierung sowie bei der Modellierung zu berücksichtigende Besonderheiten und Eigenschaften stochastischer Modelle im Vordergrund. Auch wurden Probleme aufgezeigt, die einer besonderen Beachtung bedürfen. Außerdem wurden Unterschiede zu bereits bekannten stochastischen Transport- und Umladmodellen herausgearbeitet. Bislang noch nicht betrachtet wurde, wie ein Sortierer das stochastische Modell prinzipiell zur Unterstützung seiner Prozesse einsetzen kann. Hierzu benötigt er, wie im vorherigen Kapitel bereits angedeutet, ein auf seine Entscheidungssituation angepasstes **Ersatzmodell** des stochastischen Sortiermodells.

Im Folgenden werden die grundsätzlichen Vorgehensweisen zur Gestaltung von Ersatzmodellen anhand allgemeiner Modelltypen der stochastischen (linearen) Optimierung dargestellt. Die nachfolgenden Erläuterungen und Einteilungen orientieren sich an dem von REMBOLD erarbeiteten allgemeinen Schema der stochastischen linearen Optimierung.⁶² Allen Überlegungen zu den Modellen liegt die Zurückführung des stochastischen linearen Modells auf das **Grundmodell der Entscheidungstheorie** zugrunde.⁶³ Dessen Gültigkeit wird im Folgenden vorausgesetzt, und es bildet somit die Grundlage für alle nachfolgenden entscheidungstheoretischen Schlussfolgerungen.

⁶² Vgl. Rembold (1977), S. 69f.

⁶³ Die ausführliche Darstellung der Komponenten des Grundmodells der Entscheidungstheorie und die Rückführung des stochastischen Modells auf dieses Grundmodell können bei Rembold (1977), S. 39–67, bzw. bei Dinkelbach (1982), S. 5f. und 58f. (Beispiel D), nachgelesen werden. Für die nachfolgenden Ausführungen wird auf das dort verwendete entscheidungstheoretische

Die Anpassung formaler Modelle auf Basis der vorgestellten Modelltypen speziell auf das Sortierproblem bleibt jedoch zukünftigen Forschungsarbeiten vorbehalten.

Abbildung 10.2 zeigt das allgemeine Schema der stochastischen Optimierung.

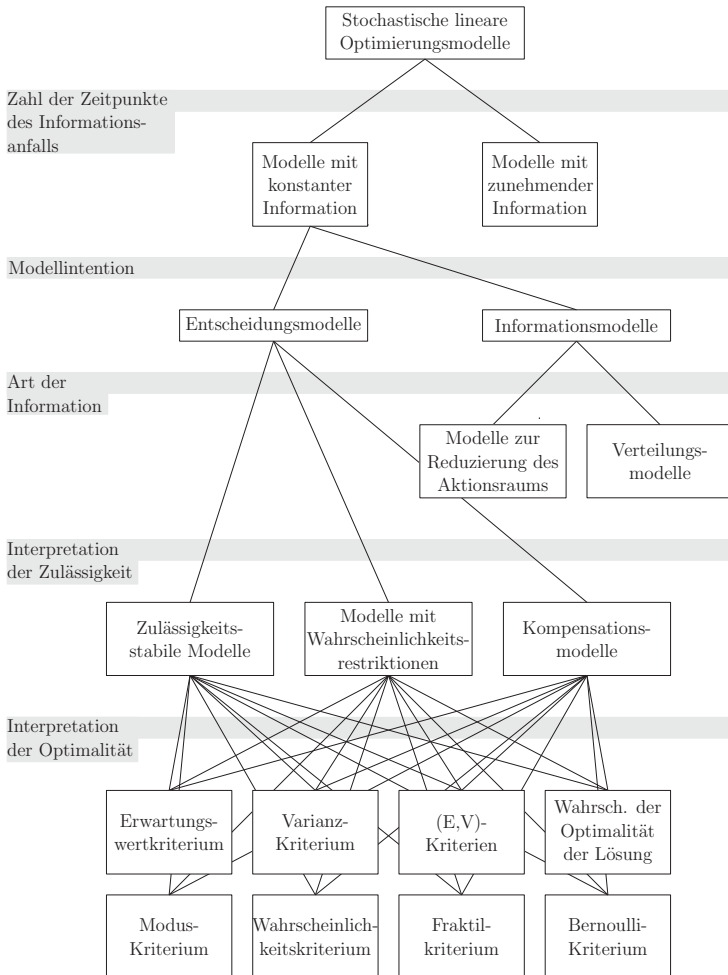


Abbildung 10.2: Ein allgemeines Schema der stochastischen linearen Optimierung (Rembold (1977), S. 70)

Vokabular zurückgegriffen. Dazu sei noch angemerkt, dass bei einigen Autoren die Alternativen, zwischen denen entschieden wird, auch als Aktionen bezeichnet werden.

Bevor ein Sortierunternehmen das stochastische Sortiermodell einsetzen kann, sind einige Vorüberlegungen vonnöten. Das Unternehmen muss für sein Entscheidungsproblem herausfinden, wann notwendige Informationen bekannt werden und wie sie eingesetzt werden. Wenn diese Informationen immer nur für eine bestimmte Situation gelten und eingesetzt werden, handelt es sich um konstante Informationen. Die zugehörigen **Modelle mit konstanter Information** werden für isolierte und voneinander unabhängige Entscheidungen eingesetzt. Alternativ ist auch eine Entscheidungssituation mit **zunehmenden Informationen** möglich. Dazu wird eine dynamische Betrachtung zugrunde gelegt. Die zum Zeitpunkt der ersten Entscheidung erlangten Informationen werden für alle nachfolgende Entscheidungen mit genutzt. Alle weiteren Entscheidungen sind dann Funktionen der vorangegangenen Entscheidungen. Diese dynamischen Modelle werden auch als mehrstufige Modelle bezeichnet.⁶⁴ Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass für die Sortierung voneinander unabhängige Entscheidungen jeweils für eine Periode getroffen werden. Mehrstufige dynamische Modelle werden nicht betrachtet.

Der Entscheider muss für die Nutzung des Modells wissen, wann er seine Entscheidung treffen muss. Kann er abwarten, bis die Realisation der Zufallsvariable erfolgt ist, wird dies als ‚wait-and-see‘ bezeichnet. Wird jetzt mithilfe des gewünschten Modells optimiert, so entspricht dies einem deterministischen Entscheidungsmodell. Wait-and-see-Situationen werden zumeist dazu genutzt, weitere Informationen durch das Modell zu gewinnen. Anschließend wird dann – basierend auf diesen neuen Informationen – eine Entscheidung außerhalb des Modells getroffen. Diese Modelle werden als **Informationsmodelle** bezeichnet. Zu den Informationsmodellen gehören die **Verteilungsmodelle**, die zur Entscheidungsunterstützung Hilfsgrößen wie z. B. Verteilungsfunktionen bestimmen. Des Weiteren zählen sogenannte **Entscheidungsprinzipien**, die den Aktions- bzw. Alternativenraum erweitern, dazu.

In den meisten Fällen kann der Entscheider die Realisation der Zufallsvariablen jedoch nicht abwarten und muss seine Entscheidung vor ihrem Bekanntwerden treffen (‚here-and-now‘).⁶⁵ Will er zudem die bestmögliche Entscheidung treffen und die optimale Alternative aus der Menge der möglichen Handlungsalternativen ermitteln, setzt er ein stochastisches **Entscheidungsmodell**⁶⁶, wie das obige Sortiermodell,

⁶⁴ Vgl. Rembold (1977), S. 68. Ein Beispiel für ein dynamisches stochastisches Entscheidungsproblem ist die mehrperiodige Lagerhaltung, vgl. Dinkelbach (1982), S. 122.

⁶⁵ Vgl. Abel (1984), S. 7.

⁶⁶ Allgemein werden alle Modelle, die eine formale Darstellung eines Entscheidungsproblems sind, als Entscheidungsmodelle bezeichnet, vgl. Dinkelbach (1982), S. 29f. REMBOLD grenzt diesen Begriff nun für sein Schema auf ausgewählte Modelle ein, die die optimale Entscheidung liefern, vgl. Rembold (1977), S. 54.

ein. Da das stochastische Modell aber nicht direkt numerisch lösbar ist, muss ein deterministisches Ersatzmodell formuliert werden, das die Risikopräferenzen des Sortierunternehmens in geeigneter Weise einbezieht. Mit Einbindung der Risikopräferenzen wird auch die Zulässigkeit der Alternativenmenge neu interpretiert. Dadurch wird der im vorherigen Abschnitt angeführten Kritik entgegengewirkt. Aus diesen Interpretationsansätzen der Zulässigkeit gehen drei Modelltypen hervor: die **zulässigkeitsstabilen Modelle**, **Modelle mit Wahrscheinlichkeitsrestriktionen** und **Kompensationsmodelle**.⁶⁷

Um mithilfe dieser Modelle schließlich zu einer endgültigen Entscheidung zu gelangen, ist neben der Interpretation der Zulässigkeit ebenfalls eine neue Auslegung der Optimalität notwendig. Hierfür werden **Entscheidungsregeln** eingesetzt, mit denen die optimale Lösung für das Modell eindeutig ermittelt werden kann.⁶⁸ Exemplarisch seien hier das wohl am häufigsten verwendete Erwartungswert-Kriterium sowie das Varianz- und Bernoulli-Kriterium genannt.

10.3.2 Informationsmodelle

Verteilungsmodelle

Verteilungsmodelle sind in der Literatur der am häufigsten behandelte Typ der Informationsmodelle.⁶⁹ Mit ihnen können Hilfsgrößen errechnet und Szenarien simuliert werden, die einen Entscheider bei der Auswahl einer Alternative – die dann außerhalb des Modells erfolgt – unterstützen sollen.⁷⁰ Hierzu können z. B. die Verteilungsfunktionen der Alternativen ermittelt werden. Für jede Ausprägung der Zufallsvariablen des Modells kann eine optimale Alternative sowie der zugehörige Zielfunktionswert

⁶⁷ Vgl. Rembold (1977), S. 71. In diesem Schema nicht aufgeführt sind Modelle, die nur eine stochastische Zielfunktion besitzen und ausschließlich deterministische Restriktionen. Für sie gelten im Umgang mit der stochastischen Zielfunktion die gleichen Entscheidungsregeln zur Auswahl einer optimalen Alternative wie auch für die weiteren Entscheidungsmodelle.

⁶⁸ Vgl. Rembold (1977), S. 59, sowie Dinkelbach/Kleine (1996), S. 78. An anderer Stelle werden die Entscheidungsregeln auch als Entscheidungskriterien bezeichnet, vgl. Abel (1984), S. 19. Es sei zudem darauf hingewiesen, dass es in der Literatur keine einheitliche Verwendung der Begriffe ‚Entscheidungsprinzip‘ und ‚Entscheidungsregel‘ gibt, vgl. dazu die abweichende Verwendung durch Dinkelbach/Kleine (1996), S. 78. Da die Ausführungen dem Schema von Rembold (1977) folgen, soll im Folgenden auch seine Begriffszuordnung verwendet werden. Nach dieser führen beide Formen zu einer Lösung, jedoch ermitteln nur Entscheidungsregeln die optimale.

⁶⁹ Des Weiteren zählen z.B. auch die stochastische Sensitivitätsanalyse, vgl. Böttcher (1989), S. 11, und die Risikoanalyse, vgl. Dinkelbach (1982), S. 73f., zu den Informationsmodellen. Sie werden im Folgenden aber nicht näher betrachtet.

⁷⁰ Vgl. Abel (1984), S. 4, sowie Böttcher (1989), S. 10f.

bestimmt werden. Wenn nun für alle möglichen Ausprägungen der Zufallsvariablen der beste Zielfunktionswert Z_{opt} bestimmt (und notiert) wird, ergibt sich daraus eine neue Zufallsvariable der optimalen Zielfunktionswerte \tilde{Z}_{opt} .⁷¹ Für diese neue Zufallsvariable kann nun die Verteilungsfunktion bestimmt werden.⁷²

REMBOLD kritisiert an dieser Vorgehensweise, dass für einen Entscheider zumeist nicht die fiktive Verteilung der optimalen Zielfunktionswerte aller Alternativen interessant ist, sondern vielmehr die Verteilung der Zielfunktionswerte einer konkreten Alternative, die er näher in Betracht zieht.⁷³ Für eine Sortierung könnte auf diese Weise mithilfe des Sortiermodells entweder die Verteilung des Sortierwertes für alle möglichen Sortieralternativen oder gezielt für eine ausgewählte Sortieralternative ermittelt werden. Das Sortierunternehmen kann dadurch Rückschlüsse auf das monetäre Sortierergebnis ziehen, bevor es sich für eine Alternative entscheidet.

Ein weiterer interessanter Aspekt für den Entscheider ist die Betrachtung der zu den optimalen Zielfunktionswerten gehörenden optimalen Lösungen der ursprünglichen Entscheidungsvariablen. Aus ihnen lassen sich z. B. Schwankungsbereiche für die zufälligen Modellparameter ableiten.⁷⁴ Dies ermöglicht wiederum Rückschlüsse von den Realisationen der Zufallsvariablen auf die Werte der Entscheidungsvariablen.

Kritikpunkt an den Verteilungsmodellen ist die oftmals sehr aufwendige Berechnung der Werte, sodass ein Einsatz nur bei Problemen mit wenigen Zufallsvariablen sinnvoll ist. Zudem ist nicht sichergestellt, dass der Entscheider in jedem Fall durch den Ansatz sinnvolle Informationen erhält.⁷⁵ Allerdings gestattet die Rechenleistung moderner Computer inzwischen auch aufwendige Berechnungen und Simulationen umfangreicherer Modelle. Als Vorteil des Ansatzes kann gewertet werden, dass das stochastische Modell zur Gewinnung objektiver Informationen eingesetzt wird, ohne die subjektiven Entscheidungskriterien einzubeziehen, die ein Entscheidungsmodell enthält.⁷⁶

⁷¹ Vgl. Rembold (1977), S. 56ff., sowie das Problem ‚V2‘ bei Dinkelbach (1982), S. 63f.

⁷² Vgl. Rembold (1977), S. 72.

⁷³ Vgl. Rembold (1977), S. 73. Die gleiche Vorgehensweise schlägt auch DINKELBACH in seinem Problem ‚V1‘ vor, vgl. Dinkelbach (1982), S. 63.

⁷⁴ Vgl. Rembold (1977), S. 73.

⁷⁵ Vgl. Abel (1984), S. 5, sowie Rembold (1977), S. 59.

⁷⁶ Vgl. Rembold (1977), S. 59 sowie 74.

Entscheidungsprinzipien

„Entscheidungsprinzipien sind Entscheidungskriterien“⁷⁷. Sie führen im Unterschied zu Entscheidungsregeln jedoch nicht zur optimalen Lösung, sondern werden eingesetzt, um die Anzahl möglicher Handlungsalternativen einzuzugrenzen. So muss der Entscheider seine Wahl nur noch unter den verbleibenden Alternativen treffen.

REMBOLD zählt z. B. das Dominanzprinzip zu den Entscheidungsprinzipien.⁷⁸ EISENFÜHR, WEBER und LANGER definieren die **stochastische Dominanz** wie folgt: „Eine Alternative a dominiert eine Alternative b stochastisch, wenn für jede Ausprägung der Zielvariablen die Wahrscheinlichkeit, diese zu überschreiten, bei a mindestens genauso hoch wie bei b und für mindestens eine Ausprägung der Zielvariablen bei a höher als bei b ist.“⁷⁹

Dieses Instrumentarium kann nun genutzt werden, um z. B. die Verteilungsfunktionen der Alternativen zu vergleichen und dominierte Alternativen auszuschließen. REMBOLD weist aber darauf hin, dass mithilfe des Dominanzprinzips nicht immer vollständige Ordnung unter den Alternativen erzeugt werden kann, da oftmals nicht alle Verteilungsfunktionen miteinander vergleichbar sind.⁸⁰ Des Weiteren führt die Anwendung des Dominanzprinzips nicht zwingend zu einer optimalen Lösung des stochastischen Modells.⁸¹

10.3.3 Entscheidungsmodelle

Zulässigkeitsstabile Modelle (fat solution)

Das zulässigkeitsstabile Modell liefert eine zulässige (sowie zugleich optimale) Lösung, unabhängig von der Realisation der Zufallsvariablen.⁸² Dazu wird die Menge der Alternativen vorab gestaltet, dass sie für jede Realisation der Zufallsvariablen stets zu

⁷⁷ Rembold (1977), S. 54.

⁷⁸ Vgl. Rembold (1977), S. 54ff.

⁷⁹ Eisenführ/Weber/Langer (2010), S. 312. DINKELBACH unterscheidet die stochastische Dominanz anhand des Einbeziehens von Nutzenfunktionen noch weiter in Dominanzen i -ten Grades, was an dieser Stelle aber nicht weiter betrachtet werden soll, vgl. Dinkelbach (1982), S. 141–144.

⁸⁰ Vgl. Rembold (1977), S. 55.

⁸¹ Vgl. Dinkelbach (1982), S. 141.

⁸² Vgl. hierzu und im Folgenden Rembold (1977), S. 76, Abel (1984), S. 13 und 25.

einer zulässigen Lösung führt.⁸³ Diese Menge ist vergleichsweise einfach bestimmbar, und die Zulässigkeitsproblematik wird umgangen. Allerdings gibt es häufig Fälle, z. B. bei großem Streuungsbereich der Zufallsvariablen, in denen die Menge permanenter zulässiger Alternativen sehr klein oder sogar leer ist. Dann existieren keine Alternativen, die in jedem Fall zulässig sind.⁸⁴ Infolge der sehr kleinen Alternativenmenge ergeben sich zumeist sehr pessimistische Lösungen des Modells.⁸⁵ Eine Möglichkeit, diese Einschränkung zu vermeiden, besteht in der Verkleinerung der Schwankungsbereiche der Modellparameter.

Zu den zulässigkeitsstabilen Modellen zählen auch solche, die nur in der Zielfunktion Zufallsvariablen aufweisen und deren Lösungsraum durch die deterministischen Nebenbedingungen konstant ist.⁸⁶ BÖTTCHER merkt zudem an, dass dieser Ansatz nur für sehr risikoscheue Entscheider bedeutsam ist, da das Risiko fast vollständig eliminiert wird.⁸⁷

Für das Sortiermodell – wie aber auch für viele andere Probleme – erscheint die Anwendung des zulässigkeitsstabilen Modells nur wenig sinnvoll. Die Zufallsvariable Inputgemisch unterliegt sehr starken Schwankungen, sodass es keine Sortieralternative gibt, die in allen Fällen zulässig ist. Eine Verringerung der Schwankungsbreite liegt nicht im Einflussbereich des Sortierunternehmens, sodass auch hierüber die leere Alternativenmenge nicht gefüllt werden kann. DINKELBACH gibt zudem an, dass für einen sinnvollen Einsatz des Ansatzes die Voraussetzung gilt, dass die Alternativenmenge durch Ungleichungen beschrieben wird, und die kann aufgrund der Bilanzgleichungen im Sortiermodell nicht erfüllt werden.⁸⁸

⁸³ Aufgrund dessen wird das Modell auch als Spezialfall des Modells mit Wahrscheinlichkeitsrestriktion gesehen, bei dem alle Wahrscheinlichkeiten auf 1 gesetzt sind, vgl. Dinkelbach/Kleine (1996), S. 117, bzw. Böttcher (1989), S. 26.

⁸⁴ Vgl. Rembold (1977), S. 50, sowie Böttcher (1989), S. 26.

⁸⁵ Vgl. Rembold (1977), S. 77, sowie Abel (1984), S. 13f.

⁸⁶ In diesem Fall ist eine Alternative entweder für alle Realisationen der Zufallsvariable zulässig oder für alle unzulässig im Sinne der linearen Optimierung. Es werden daher die Alternativen als zulässig ausgewählt, die immer zulässig sind, vgl. Rembold (1977), S. 50, bzw. Abel (1984), S. 14.

⁸⁷ Vgl. Böttcher (1989), S. 26.

⁸⁸ Vgl. Dinkelbach (1982), S. 104.

Modelle mit Wahrscheinlichkeitsrestriktionen (chance-constraint program)

Für die zweite Gruppe der Entscheidungsmodelle werden die Anforderungen an die Zulässigkeit der Alternativen gelockert. Sie müssen nun nicht mehr stets zulässig sein, sondern nur noch mit einer vorgegebenen konstanten Wahrscheinlichkeit im Intervall zwischen 0 und 1.⁸⁹ Dies wird auch als **Wahrscheinlichkeitsrestriktion** bezeichnet. Mit der Wahl der Höhe der einzuhaltenden Wahrscheinlichkeit bringt der Entscheider seine Risikoeinschätzung qualitativ in das Modell ein.⁹⁰

Es gibt zwei unterschiedliche Varianten von Wahrscheinlichkeitsrestriktionen. **Modelle mit gemeinsamer, d. h. totaler Wahrscheinlichkeitsrestriktion** weisen für alle Restriktionen eine gemeinsame, gleich hohe Wahrscheinlichkeit auf. Deterministische Restriktionen bleiben von den Wahrscheinlichkeitsrestriktionen unbeeinflusst.⁹¹ Bei Modellen mit **getrennten Wahrscheinlichkeitsrestriktionen** wird für jede einzelne Restriktion des Nebenbedingungssystems angegeben, dass sie mit einer eigens für sie vorgegebenen Wahrscheinlichkeit zwischen 0 und 1 eingehalten werden muss.⁹² Auf diese Weise kann den Restriktionen auch eine Gewichtung zugewiesen werden.⁹³ Wichtige Restriktionen sollten mit einer höheren Wahrscheinlichkeit eingehalten werden als weniger wichtige, deren Verletzung nur geringfügige Folgen hätte.

Ein Beispiel für eine getrennte Wahrscheinlichkeitsrestriktion im Sortiermodell ist die Forderung, dass ein Mindestabtrennungsgrad⁹⁴ von 90 % mit einer Mindestwahrscheinlichkeit von 95 % eingehalten wird ($P\{\alpha \geq \hat{\alpha}\} \geq p \Rightarrow P\{\alpha \geq 0,90\} \geq 0,95$).

Gelegentlich ist erforderlich, dass ausgewählte Restriktionen mit Sicherheit (Wahrscheinlichkeit gleich 1) eingehalten werden. Dies kann jedoch nur über eine gesonderte Einschränkung des Alternativenraums umgesetzt werden und nicht über die Wahrscheinlichkeitsrestriktionen des Modells.⁹⁵

⁸⁹ Vgl. Rembold (1977), S. 50.

⁹⁰ Die Einschätzung ist rein qualitativ, da nachfolgend nur die Tatsache der Restriktionsverletzung und nicht deren Höhe gemessen wird, vgl. Böttcher (1989), S. 29.

⁹¹ Vgl. Rembold (1977), S. 79.

⁹² Vgl. Rembold (1977), S. 51.

⁹³ Vgl. Böttcher (1989), S. 25f.

⁹⁴ Der Abtrennungsgrad wurde zwar zuvor in Abschnitt 10.2 ausgeschlossen, eignet sich an dieser Stelle aber gut als didaktisches Beispiel. Die Berechnung des Abtrennungsgrads könnte ermöglicht werden, wenn es auf exakte Genauigkeit nicht ankommt. Und zwar, indem die unbekanntes Gesamtquantitäten der einzelnen Komponenten im Input (die v_{ki} im Nenner der Abtrennungsgradformel) auf Basis einer repräsentativen Stichprobe geschätzt werden.

⁹⁵ Vgl. Rembold (1977), S. 51.

Kritisiert wird an diesem Ansatz, dass die Wahl der einzuhaltenden Wahrscheinlichkeit(en) nicht trivial ist und sie die optimale Lösung beeinflussen kann.⁹⁶ Ein weiteres Risiko bei der Anwendung ist, dass eine aufgrund des Modells gewählte Alternative sich im Nachhinein – nach der Realisierung der Zufallsvariablen – immer noch als unzulässig herausstellen kann und außerhalb des Lösungsraums liegt.⁹⁷ Die Bewertung der Unzulässigkeit findet hier allein durch den Wahrscheinlichkeitsparameter statt. Dies kann sowohl als positiver Aspekt gewertet werden, da die Modellanwendung gegenüber dem Kompensationsmodell einfacher erscheint, als auch als negativer Punkt, da keine Aussage getroffen wird, wie in Fällen mit unzulässigen Alternativen zu handeln ist. Eine Kompensation der Unzulässigkeit ist in diesem Ansatz zwar explizit nicht vorgesehen, das heißt aber nicht, dass keine existiert. Sie kann auch außerhalb des Modells erfolgen.⁹⁸ Ein weiteres Problem dieses Ansatzes ist, dass zumeist keine Gleichheitsrestriktionen berücksichtigt und bewertet werden können.⁹⁹

Kompensationsmodelle (two-stage problems)

Die dritte Modellformulierung der Entscheidungsmodelle sind die Kompensationsmodelle. Sie werden auch als zweistufige Modelle (two-stage Problems) bezeichnet.¹⁰⁰ Die Stufigkeit bezieht sich dabei allerdings nicht auf eine zeitliche Dynamik, wie sie bei den mehrstufigen Modellen vorliegt. Vielmehr besteht der Ansatz aus zwei Teilschritten: der here-and-now-Entscheidung für eine Handlungsalternative und dem Ausgleichsmechanismus, falls diese Entscheidung nach Eintritt der Zufallsvariablen nicht zulässig sein sollte. In den nachfolgenden Absätzen werden die beiden Teilschritte detaillierter aufgeschlüsselt und erläutert.

In der **ersten Stufe** des Ansatzes wird ein zum stochastischen Modell äquivalentes deterministisches Ersatzmodell aufgestellt. Auf Basis dieses Modells erfolgt auch die (endgültige) Entscheidung für eine Handlungsalternative, während die Ausprägungen der Zufallsvariablen noch unbekannt sind. In der **zweiten Stufe** des Ansatzes ist dann die Realisation der Zufallsvariablen erfolgt. Infolgedessen können Restriktionen

⁹⁶ Vgl. Böttcher (1989), S. 26.

⁹⁷ ABEL schränkt infolgedessen die Anwendbarkeit auf Situationen ein, in denen die Restriktionen nicht zwangsläufig eingehalten werden müssen, vgl. Abel (1984), S. 15. BÖTTCHER weist hingegen darauf hin, dass unzulässige Lösungen in der Praxis durchaus durchführbar sein können, wenn Restriktionen betroffen sind, deren Einhaltung kurzzeitig vernachlässigt werden kann, vgl. Böttcher (1989), S. 26.

⁹⁸ Vgl. Rembold (1977), S. 79, sowie Böttcher (1989), S. 26.

⁹⁹ Diese können möglicherweise nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 0 eingehalten werden, vgl. Böttcher (1989), S. 26.

¹⁰⁰ Vgl. hierzu und im Folgenden Abel (1984), S. 46f.

verletzt sein, und die zuvor gewählte Alternative kann sich als unzulässig erweisen. Diese Unzulässigkeit wird erforderlichenfalls – im Unterschied zu den anderen beiden Ersatzmodellarten, die eine solche Option nicht beinhalten – ausgeglichen, d. h. kompensiert.

Für das stochastische Sortierproblem kann ein Kompensationsmodell sehr gut als Ersatzmodell verwendet werden. In der ersten Stufe gelten dabei alle Alternativen als zulässig, und mithilfe des Sortiermodells wird – rein deterministisch – eine Sortieralternative ausgewählt. Zugleich wird hier, noch bevor die Zufallsvariable realisiert, festgelegt, welche Formen der Kompensation in verschiedenen Fällen von Unzulässigkeit nach erfolgter Realisation der Zufallsvariablen möglich sind. Die Überprüfung von Art und Ausmaß der Unzulässigkeiten sowie deren anschließende Kompensation erfolgt dann in der zweiten Stufe, wenn die tatsächliche Ausprägung der Zufallsvariablen bekannt geworden ist.

Die einfachste **Kompensation** besteht in einem fixierten Wert, der durch Unzulässigkeit zusätzlich anfallende Kosten unabhängig vom Ausmaß der Restriktionsverletzung angibt. Alternativ können die Kosten auch in Abhängigkeit der Höhe der Restriktionsverletzung bemessen werden. Noch häufiger aber wird ein gesondertes lineares Kompensationsprogramm aufgestellt, das aus einer Menge möglicher Kompensationsalternativen eine geeignete kostenminimale Alternative ermittelt. Der Kostenwert wird dann als Minderung des ursprünglichen Zielfunktionswertes berücksichtigt.¹⁰¹

Für das Kompensationsprogramm eines beispielhaften Sortierprozesses wäre denkbar, dass schlecht sortierte Wertstoffobjektarten auf die geforderte Sortenreinheit nachsortiert werden müssen. Die Art der Unzulässigkeit besteht demnach in der zu geringen Sortenreinheit. Das Ausmaß der Unzulässigkeit könnte über die Abweichung der tatsächlichen Sortenreinheit von der geforderten Sortenreinheit erfasst werden. Die Bewertung der Unzulässigkeit erfolgt dann über einen zugehörigen Kostensatz für die zur Nachsortierung eingesetzten Ressourcen. Allerdings existiert im Kompensationsprogramm nicht zwangsläufig für jede Ausprägung der Unzulässigkeit eine eigene zulässige Lösung (d. h. eine zulässige Kompensation). Daher werden Entscheidungen, die zu einem unzulässigen Kompensationsprogramm führen, oft vorab ausgeschlossen.¹⁰²

Die Modellformulierung des zweistufigen Modells ist nicht grundsätzlich auf alle stochastischen linearen Optimierungsprobleme anwendbar. Die Zweistufigkeit muss sichergestellt sein, indem zunächst das Niveau der Entscheidungsvariablen auf der er-

¹⁰¹ Vgl. Rembold (1977), S. 52 und 80f, sowie Dinkelbach (1982), S. 109f.

¹⁰² Vgl. Böttcher (1989), S. 13.

sten Stufe – vor Realisation der Zufallsvariablen – festgelegt wird. Des Weiteren muss die Möglichkeit zur Kompensation zwischen erster und zweiter Stufe gegeben sein, wobei eine (monetäre) Bewertung der Kompensationen erforderlich ist.¹⁰³ Wenn das Kompensationsmodell eingesetzt wird, liegt eine besondere Schwierigkeit darin, die Kostenfunktion für die Kompensation festzulegen. Eine unpräzise Formulierung hat jedoch allenfalls zur Folge, dass eine nichtoptimale Lösung gewählt wird. Diese Lösung kann nach Realisation der Zufallsvariablen trotzdem zulässig sein, wenn durch sie erfolgte Verletzungen der originären Restriktionen zusätzlich kompensiert werden.¹⁰⁴

Es existieren neben den hier vorgestellten Formen des Kompensationsmodells noch zahlreiche Varianten, z. B. ein allgemeineres Modell, bei dem auch die Kompensation stochastisch ist, sowie Erweiterungen, z. B. eine Kombination des Kompensationsmodells mit Wahrscheinlichkeitsrestriktionen.¹⁰⁵

Entscheidungsregeln zur Ermittlung der optimalen Alternative

In den drei vorhergehenden Unterabschnitten wurden drei Ansätze vorgestellt, die sich mit Zufallsvariablen in den Restriktionen eines stochastischen Optimierungsmodells und der damit verbundenen Zulässigkeitsproblematik befassen. Dabei wurde bisher ausgespart, anhand welcher formaler Vorschriften die optimale Entscheidung für eine oder auch mehrere indifferente Alternativen innerhalb des Modells ermittelt wird, wenn auch die Zielfunktion des Modells zufallsbehaftete Koeffizienten enthält.¹⁰⁶

In Abschnitt 10.2 wurde beim Umschreiben des Sortiermodells in ein stochastisches Modell bereits festgestellt, dass die in deterministischen Modellen eingesetzten Vorschriften (Maximierung und Minimierung) bei einer stochastischen Zielfunktion wirkungslos sind. Aus diesem Grund ist es erforderlich, eine neue plausible Definition für eine ‚optimale Lösung‘ aufzustellen. Dazu wird für die ursprüngliche stochastische Zielfunktion eine (deterministische) Ersatzzielfunktion geschaffen, die die Alternativen, zwischen denen entschieden werden soll, vergleichbar macht.¹⁰⁷ Die Bewertung erfolgt durch **Entscheidungsregeln**, die auf Basis verschiedener Kriterien die optimale Alternative exakt anzeigen bzw. errechnen lassen. Anzumerken ist hierzu, dass

¹⁰³ Vgl. Werner (1973), S. 42.

¹⁰⁴ Vgl. Abel (1984), S. 16.

¹⁰⁵ Vgl. Böttcher (1989), S. 14f. und 30f.

¹⁰⁶ Ausführungen zur Optimalität beziehen sich dabei auf die zwei möglichen Fälle, dass entweder nur die Zielfunktion zufallsbehaftet ist oder sowohl Zielfunktion als auch die Restriktionen stochastische Koeffizienten beinhalten.

¹⁰⁷ Vgl. Dinkelbach (1982), S. 75 und 77.

die ermittelte optimale Alternative unter Umständen nur für dieses eine spezielle Kriterium optimal ist. Falls ein anderes Kriterium gewählt wird, können sehr wohl andere Alternativen optimal sein.¹⁰⁸ Im Folgenden werden einige ausgewählte Kriterien der Entscheidungsregeln kurz vorgestellt.¹⁰⁹

Das am häufigsten eingesetzte Kriterium ist das **Erwartungswertkriterium**.¹¹⁰ Es gilt als vergleichsweise einfach anzuwenden.¹¹¹ Hierbei wird die stochastische Zielfunktion (als Zufallsvariable) durch ihren Erwartungswert ersetzt und – im Falle der Maximierung – diejenige Alternative mit dem höchsten Zielfunktionserwartungswert ausgewählt.¹¹² Als positiver Aspekt dieses Kriteriums wird gewertet, dass der Erwartungswert sich – nach dem Gesetz der großen Zahl – bei vielen Wiederholungen ‚im Mittel‘ einstellt. Für einmalige Entscheidungen ist dies aber problematisch. Außerdem wird mit dem Erwartungswert nur Risikoneutralität abgebildet und die Streuung der Zielfunktionswerte vernachlässigt.¹¹³

Die Streuung der Zielfunktionswerte wird beim **Varianzkriterium** betrachtet. Es wird dann diejenige Alternative ausgewählt, bei der die Varianz der Ersatzzielfunktion minimal ist. Der Einsatz dieses Kriteriums führt zur Entscheidung für Alternativen, deren Zielfunktionswerte zumeist ‚stabil‘ sind; allerdings sind diese Entscheidungen nicht immer mit dem Dominanzprinzip vereinbar.¹¹⁴ Um den negativen Aspekten des Einsatzes der Einzelkriterien entgegen zu wirken, gibt es auch die Möglichkeit der **Kombination von Erwartungswert- und Varianzkriterium**. Üblicherweise wird dabei die Differenz aus Erwartungswert und dem φ -fachen der Varianz maximiert ($\varphi \geq 0$).¹¹⁵

¹⁰⁸ Vgl. Abel (1984), S. 19.

¹⁰⁹ Weitere Kriterien finden sich z. B. bei Rembold (1977), Abschnitt 2.3.4.2, Dinkelbach (1982), Abschnitt 2.2, und Abel (1984), Abschnitt 4.2.

¹¹⁰ Die Existenz der Momente wird vorausgesetzt, vgl. Abel (1984), S. 20.

¹¹¹ Vgl. Rembold (1977), S. 60.

¹¹² Vgl. Rembold (1977), S. 59f. DINKELBACH weist darauf hin, zu beachten, dass hier die stochastische Zielfunktion und nicht die stochastischen Koeffizienten durch den Erwartungswert ersetzt werden. Die zweite Methode kann ihm zufolge zu ‚irreführenden Ergebnissen‘ führen, vgl. Dinkelbach (1982), S. 78f., sowie zum Beweis dieser Aussage das Beispiel auf S. 82f.

¹¹³ Vgl. Rembold (1977), S. 60, sowie Dinkelbach (1982), S. 79.

¹¹⁴ Vgl. Rembold (1977), S. 60f., sowie Abschnitt 10.3.2, S. 233f., in dieser Arbeit.

¹¹⁵ Für $\varphi = 0$ ist das Erwartungswertkriterium als Spezialfall in der Kombination enthalten, vgl. Dinkelbach (1982), S. 84. φ kann dabei als Maß für die Risikobereitschaft interpretiert werden – je risikoscheuer der Entscheider ist, umso höher wird er sein φ wählen. Darüber hinaus gibt es noch weitere Funktionen aus Mittelwert und Varianz, die optimiert werden können, vgl. Rembold (1977), S. 62.

Abschließend wird noch kurz das **Bernoulli-Kriterium** angesprochen. Es ist aus der Erwartungsnutzentheorie bekannt. Hierbei wird unterstellt, dass der Entscheider eine monoton wachsende Nutzenfunktion besitzt, die als Ersatzzielfunktion eingesetzt und deren Erwartungsnutzen maximiert wird. Positiv hervorzuheben ist bei diesem Kriterium, dass Nutzenfunktionen das Risikoverhalten abbilden können und auch mit dem Dominanzprinzip in Einklang stehen.¹¹⁶ Das Bernoulli-Kriterium kommt zumeist bei Modellen mit stochastischer Zielfunktion zum Einsatz. DINKELBACH und KLEINE geben an, dass es für Modelle mit stochastischer Alternativenmenge häufig vernachlässigt wurde.¹¹⁷

Weitere mögliche Kriterien sind das **Moduskriterium**, die **Wahrscheinlichkeit der Optimalität der Lösung**, das **Wahrscheinlichkeitskriterium** und das **Fraktilkriterium**.¹¹⁸

10.4 Zwischenresümee

In Kapitel 9 wurde in der Modellevaluation des Sortiermodells festgestellt, dass diesem für einen realitätsnahen, praktischen Einsatz die Möglichkeit fehlt, zufällige Schwankungen – insbesondere des Abfallinputs – einzubeziehen. Daher wurde das Sortiermodell in diesem Kapitel um Zufallsvariablen in der Zielfunktion und den Restriktionen erweitert. Diese Erweiterung stellt lediglich einen ersten Ansatz eines stochastischen Sortiermodells dar. Ein Vergleich des Modells mit stochastischen Transport- und Umladomodellen hat noch einmal Übereinstimmungen und Unterschiede zwischen den Modellen hervorgehoben. Im weiteren Verlauf wurde dem Leser gezeigt, wie mit einem stochastischen Modell umzugehen ist, wenn es praktisch eingesetzt und gelöst werden soll. Es wurde gezeigt, dass der Lösungsweg nur über den Umweg eines situativ angepassten Ersatzmodells führt und nicht mehr vergleichsweise trivial ist wie bei einem deterministischen linearen Modell.

Dieses Kapitel ist im Zuge der Sortierproblematik auch als eine Einführung für interessierte Leser gedacht, die bisher keinen oder nur wenig Kontakt mit stochastischen linearen Modellen hatten. Weil es an dieser Stelle aber zu weit von der Sortierproblematik wegführen würde, wurden einige formale und wahrscheinlichkeitstheoretische Aspekte bewusst ausgeblendet. Dies betrifft hauptsächlich die Angabe der Wahr-

¹¹⁶ Vgl. Rembold (1977), S. 66f.; Abel (1984), S. 19, sowie Dinkelbach/Kleine (1996), S. 79f.

¹¹⁷ Vgl. Dinkelbach/Kleine (1996), S. 67 bzw. 120.

¹¹⁸ Vgl. Rembold (1977), S. 63–66.

scheinlichkeitsräume der Zufallsvariablen.¹¹⁹ Unangesprochen blieben auch Probleme, die bei konkaven Funktionsverläufen entstehen. Weitere Aspekte und Feinheiten stochastischer linearer Modelle können in der zugehörigen Fachliteratur nachgelesen werden.

Neben der eigentlichen Modellformulierung sieht sich ein Entscheider beim praktischen Einsatz seines stochastischen (Sortier-)Modells mit Schwierigkeiten bei der Datengewinnung konfrontiert.¹²⁰ Da es nicht möglich ist, theoretische Verteilungsfunktionen für die Zufallsvariablen zugrunde zu legen, ist es stattdessen erforderlich, auf empirische Wahrscheinlichkeitsfunktionen bzw. Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen zurückzugreifen. Diese können auf Basis von Erfahrungs- oder Beobachtungswerten ermittelt werden, was aufgrund der Datenfülle ein aufwendiger Prozess sein kann. Auch Stichproben und darauf basierende Prognoseverfahren könnten zum Einsatz kommen.¹²¹ In der praktischen Abfallaufbereitung gibt es bereits das Instrument der Abfallanalyse, mit deren Hilfe aus entnommenen Abfallstichproben notwendige Daten ermittelt werden können.¹²² Als wichtiges Instrument für stochastische Sortiermodelle könnte sich zudem die **Simulation** erweisen. Sie bietet einen weiten Rahmen für den Einsatz des stochastischen Modells sowie bei der Generierung geeigneten Datenmaterials stochastischer Verteilungen.¹²³

Ein weiteres Problem beim Praxiseinsatz ist die Wahl des Modelltyps.¹²⁴ Der Entscheider muss für seine spezielle Entscheidungssituation den geeigneten Typ aus den Ersatzmodellen auswählen. Dabei spielen die zu erhebenden Daten sowie der erforderliche Berechnungsaufwand eine nicht unerhebliche Rolle.¹²⁵ Es ist zudem zu prüfen, ob der Einsatz linearer stochastischer Optimierung überhaupt möglich und sinnvoll ist. Für die Restriktionen muss festgelegt werden, ob und welche einer erhöhten Einhaltung bedürfen, was für Wahrscheinlichkeitsrestriktionen sprechen würde. Auch muss geprüft werden, ob das Modell mit einem Kompensationsprogramm kompatibel ist und wie hoch die Kosten hierfür sind.¹²⁶ Als Hilfestellung kann dazu auch das all-

¹¹⁹ Eine ausführliche Darstellung hierzu findet sich in den Ausführungen von Kall (1976).

¹²⁰ Vgl. Heitsch (2007), S. 2f.

¹²¹ Vgl. Rembold (1977), S. 165–167, Souren (1996b), S. 239, sowie Heitsch (2007), S. 2.

¹²² Vgl. Heilmann (2000), S. 42–46. In der Praxis werden Abfallanalysen jedoch überwiegend dazu genutzt, die Abfälle anhand ihrer Komponenten zu klassifizieren.

¹²³ Vgl. Heitsch (2007), S. 3.

¹²⁴ Vgl. Abel/Thiel (1981), S. 147f.

¹²⁵ Vgl. Böttcher (1989), S. 41.

¹²⁶ Vgl. Abel/Thiel (1981), S. 148.

gemeine Schema (Abbildung 10.2) herangezogen werden. Weitere Empfehlungen für die Modellwahl finden sich bei REMBOLD sowie ABEL und THIEL.¹²⁷

Alle soeben angesprochenen Probleme zeigen Forschungslücken im Bezug auf das Sortierproblem auf, die im Rahmen dieser Grundlagenarbeit nicht oder nur sehr oberflächlich behandelt werden konnten. Sie bieten Ansatzpunkte für zukünftige Forschungsarbeiten.

¹²⁷ Vgl. Rembold (1977), S. 173–181, und Abel/Thiel (1981), S. 147ff.

Kapitel 11

Resümee und Ausblick

In der betriebswirtschaftlichen Forschung haben Abfallsortierprozesse – ein wichtiger Teilbereich des Recyclings – bislang nur wenig Aufmerksamkeit erhalten. Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es daher, ein betriebswirtschaftliches Modell zu entwickeln, das Sortierprozesse einerseits beschreibt, andererseits aber auch die Grundlage für ein praktisch einsetzbares Optimierungsmodell mit stochastischen Parametern bildet. Die Untersuchung bezog sich auf einen schmalen Ausschnitt der Kreislaufwirtschaft, sie ist in diesem Feld als Grundlagenarbeit jedoch umfassend angelegt. Daher konnte sie sich nicht allen mit ihr in Verbindung stehenden Problemstellungen im Detail widmen. Diese vertiefende Analyse und insbesondere die Feinjustierung des Modells für den praktischen Einsatz wird weitergehenden Arbeiten vorbehalten sein.

In Teil I wurden die konzeptionellen **Grundlagen** erarbeitet. Hier hat sich gezeigt, dass die Sortierung fester Bestandteil einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft ist und dass für ein tieferes Verständnis eine wissenschaftliche Analyse – insbesondere aus betriebs- bzw. produktionswirtschaftlicher Sicht – vonnöten ist. Dazu wurden in Kapitel 2 für den Sortierbegriff eine **Arbeitsdefinition** erstellt und der Betrachtungsgegenstand für diese Arbeit auf die Wertstoff- und Leergutsortierung eingeschränkt. Anschließend wurde die Sortierung in das allgemeine Kreislaufmodell eingeordnet. Hierbei wurde herausgearbeitet, dass Sortierprozesse phasenübergreifend an der Nahtstelle von Kollektion und Reduktion stattfinden.

Sortierung hat sich im Laufe der Zeit zu einem sehr stark technisierten und automatisierten Prozess entwickelt. So kann das technische Sortierproblem in vielen Bereichen als weitgehend gelöst angesehen werden, wenngleich die Verfahren für eine noch reinere Trennung der Fraktionen ständig überarbeitet und verbessert werden. Die Entwicklung betriebswirtschaftlicher Modelle und Verfahren für die Sortierung

im gleichen Zuge wurde jedoch vernachlässigt. Für ein besseres Verständnis der Vorgänge wurden in Kapitel 3 die **technischen Sortierverfahren** vorgestellt und für ökonomische Zwecke nutzbare Prozessparameter der einzelnen Verfahren analysiert. Dabei zeigte sich, dass faktisch jedes Verfahren mindestens einen durch den Sortierer beeinflussbaren Parameter besitzt.

Kapitel 4 beschäftigte sich mit dem wohl kritischsten Element der Sortierung, dem Gemisch als Redukt (Übelinput) des Sortierprozesses. Dazu wurden Gemische und ihre Beschaffenheit, wie der **Vermischungszustand**, näher untersucht. Aus didaktischen Gründen wurde hierbei und auch für die darauf folgenden Kapitel die – zugegebenermaßen realitätsferne – Annahme unterstellt, dass Inhalt und Anordnung der untersuchten Gemische bekannt sind. Aus den ermittelten Charakteristika wurden neuartige Messvorschriften entwickelt, die es erlauben, den Vermischungszustand eines (Abfall-)Gemisches als Maßzahl auszudrücken. Diese Vermischungsgrade wurden hauptsächlich für die eindimensionale, linienförmige Vermischung entwickelt, weil in der Sortierung die Objekte häufig vereinzelt und hintereinander liegend transportiert werden, z. B. bei der Inline-Leergutsortierung und Sensorsortierung. Für höherdimensionale Vermischungen wurden Vorschläge für Vermischungskennzahlen auf konzeptioneller Basis erarbeitet, z. B. der zweidimensionale Wechselorientierte Vermischungsgrad (WVG^{2d}) und der Entmischungsgrad (EMG).

Teil II bildete den Kern der Arbeit, in dem als Neuerung ein spezielles betriebswirtschaftliches Modell für Sortierprozesse aufgestellt wurde. Ziel war dabei die Erarbeitung eines ersten betriebswirtschaftlichen Entscheidungsmodells für Sortierprozesse, welches vorrangig die Zusammenhänge und Strukturen abbildet, aber auch als Grundlage für spätere Optimierungszwecke dient. Es war nicht das Ziel, dieses Modell mithilfe eines mathematischen Verfahrens auch tatsächlich optimal zu lösen. Bei der Formulierung wurden **Strukturähnlichkeiten** zu anderen produktionswirtschaftlichen und logistischen Prozessen – insbesondere Bilanzgleichungen, wie sie bei Transportmodellen zum Einsatz kommen – genutzt. In Kapitel 5 wurden zunächst die Strukturen von Sortierprozessen aktivitätsanalytisch untersucht und der Prozess als divergierend charakterisiert. Weil die einfache Aktivitätsanalyse in der Darstellung nicht ausreichend war, wurde sie für ausgewählte Sortierprozesse um eine Komponentenmodellierung erweitert. Der anschließende Vergleich mit divergierenden Transportprozessen ergab, dass die Strukturen ähnlich sind und eine Übertragbarkeit von Bilanzgleichungen als zentrales Modellelement möglich ist.

Die Bilanzgleichungen der Verschiebequantitäten – den Entscheidungsvariablen des Modells – wurden in Kapitel 6 aufgegriffen und als Kernstück der **Nebenbedingun-**

gen des Sortiermodells formalisiert. Doch gilt es bei Sortierprozessen noch weitere Faktoren außer der Verschiebung der Objekte zu berücksichtigen. Es wurden daher weitere Nebenbedingungen formuliert, die zum einen weitere Eigenschaften des Prozessverlaufs abbilden, wie die Teilung des Abfallstroms bzw. das Durchlaufen aufeinander folgender Prozessstufen, wie es auch in einem realen Sortierprozess stattfindet. Zum anderen wurden auch Restriktionen in das Modell einbezogen, die sehr praxisrelevante Einschränkungen umfassen. Dazu zählten vor allem die Ergiebigkeits- und Reinheitsrestriktionen, die auf den Kennzahlen Abtrennungsgrad und Sortenreinheit aufgebaut sind.

Die **Gestaltung der Zielfunktion** war Gegenstand von Kapitel 7. Eine Auseinandersetzung mit den Zielen der Sortierung führte zu einer Ausgangszielfunktion, die eine Maximierung des Sortierwertes vorsieht. Der Sortierwert setzt sich aus Annahmgebühr, Prozesskosten, Wertstoff Erlösen und Reststoffentsorgungskosten zusammen. Alle diese Terme werden durch den Vermischungszustand des Inputs und weitere Prozessparameter beeinflusst, was sich wiederum auf die Optimierung des Sortierwertes auswirkt. Es konnten im Wesentlichen fünf Effekte in Abhängigkeit von Vermischungsgraden und Bandgeschwindigkeit identifiziert und plausibilisiert werden. Die graphische Darstellung der Kosten- und Erlösverläufe konnten diese Effekte noch anschaulicher hervorheben.

Kapitel 8 schloss mit einer gesamthaften Darstellung des Sortiermodells, die Zielfunktion und Nebenbedingungen in einem praktischen **Beispiel** zusammengeführt hat, den modellbildenden Teil der Arbeit ab. Das daraus resultierende Modell ist rein deterministisch, verfügt aber über Anknüpfungspunkte für stochastische Erweiterungen.

Teil III begann mit einer **Evaluation** des entwickelten Sortiermodells und zeigte sowohl Einsatzmöglichkeiten als auch Lücken auf. Die wichtigste Feststellung dabei war die nicht ausreichende Praxistauglichkeit des Modells, die insbesondere der Annahme eines deterministischen (und bekannten) Abfallinputs geschuldet war. Infolgedessen wurde diese Annahme in Kapitel 10 zurückgezogen, und für eine realitätsnähere Gestaltung wurden stochastische Parameter in das Modell integriert. Hierzu erfolgte eine kurze Untersuchung, an welchen Stellen in der Sortierung und damit auch im Sortiermodell **Stochastizitäten** auftreten und welche Parameter durch Zufallsvariablen zu ersetzen sind.

Ein stochastisches Modell, wenn es denn tatsächlich optimal gelöst werden soll, gehorcht nicht mehr den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie ein deterministisches Modell. Durch die enthaltenen Zufallsvariablen verlieren die Optimierungsvorschriften ihre

Wirksamkeit. Aus diesem Grund wurden **Ersatzmodelle** nach einem allgemeinen Schema der stochastischen linearen Optimierung vorgestellt. Für das Sortierproblem sind grundsätzlich sowohl Informationsmodelle als auch optimierende Entscheidungsmodelle anwendbar. Die Modellwahl sowie die Wahl des Optimierungskriteriums sind dabei von den Zielsetzungen und Risikopräferenzen des Anwenders abhängig.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit haben mit den neu entwickelten Kennzahlen und Modellen eine betriebswirtschaftliche Basis für Sortierprozesse geschaffen. Dabei hat sich immer wieder gezeigt, dass dieses Fundament als Ausgangspunkt für vertiefende Behandlungen einzelner Problemstellungen in der Zukunft genutzt werden kann. Exemplarisch sollen hier einige Ansatzpunkte aufgezeigt werden. Der erste besteht in den noch nicht vollständig erschlossenen Kennzahlen zur Messung von Vermischung. Die entwickelten Kennzahlen reichten für die Untersuchungen in dieser Arbeit aus. In der praktischen Anwendung kann jedoch auch Bedarf für Messvorschriften höherdimensionaler Vermischung bestehen. Eine weitere Herausforderung besteht in einer Verknüpfung der betriebswirtschaftlichen Kennzahlen mit den im technischen Bereich existierenden ingenieurwissenschaftlichen Ansätzen, z. B mit dem Trenngrad.

Als weitere Lücke ist die praktische Erprobung des theoretischen Modells zu sehen. Dabei muss das Sortiermodell auf den betreffenden Sortierprozess hinsichtlich der Fraktionen und Anzahl Verfahrensstufen angepasst und mit einem Datensatz ausgestattet werden. Als wesentliche Schwierigkeit ist hierbei die Datenerhebung und -aufbereitung zu bewältigen. Für einen Test unter deterministischen Bedingungen können zunächst Standardalgorithmen genutzt werden. Bei sehr großer Datenmenge, die lange Rechenzeiten zur Folge hätte, wäre die Entwicklung eines speziellen heuristischen Verfahrens zu überdenken.

Noch ‚in den Kinderschuhen‘ steckt das hier entwickelte stochastische Sortiermodell. Zu seiner Validierung ist eine praktische Erprobung ebenfalls zweckmäßig. Hierbei könnten im Vorhinein vor allem die Überlegungen zur Modellwahl ausgeweitet werden, wobei ein Kompensationsmodell als das mächtigste Instrument mit den meisten Gestaltungsmöglichkeiten zu sehen ist. Vornehmlich die Ausarbeitung des Kompensationsprogramms bietet hier vielfältigste Optionen. Darüber hinaus bieten sich weitere Modellerweiterungen zur Untersuchung an. Genauer zu überprüfen ist, ob Sortierprozesse tatsächlich zeitlich unabhängig sind und ob nicht doch gewisse Lerneffekte beobachtet werden können, sodass ein dynamisches (also zeitlich-mehrstufiges) Modell in Erwägung zu ziehen ist. Allen stochastischen Modellen liegt die gleiche besondere Herausforderung zugrunde, die notwendigen Daten zu erheben und Verteilungen für die Zufallsvariablen abzuleiten.

Ein dritter Ansatzpunkt könnte in der Vernetzung des Sortiermodells mit anderen Prozessen innerhalb des Recyclingnetzes einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft bestehen. Insbesondere die Kopplung mit nachfolgenden Aufbereitungsprozessen erscheint dabei interessant. Dies gilt vor allem für den aus Sicht der Sortierung bisher nur wenig erschlossenen Bereich der Restabfallsortierung vor einer entsprechenden thermischen oder mechanisch-biologischen Behandlung mit anschließender Deponierung. Da im Restmüll oftmals noch viele Wertstoffe enthalten sind, stellt sich z. B. die Frage, ob es nicht für Betreiber von Müllverbrennungsanlagen lohnenswert ist, die Abfälle vor der Verbrennung zu sortieren und die abgetrennten Wertstoffe als Sekundärrohstoffe zu vermarkten.

Anhang

Anhang A Bilderübersicht der Kartenspiele



Abbildung 4.3 : Skatblatt mit 32 Karten in einer eindimensionalen Anordnung

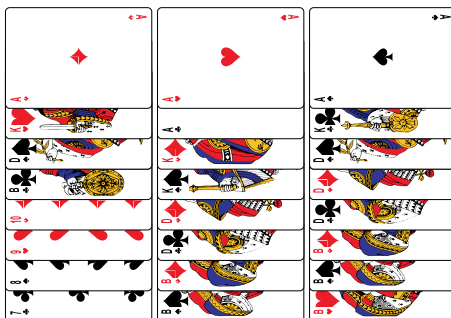


Abbildung 4.4 : Drei Teilgemische mit abnehmender Vermischung

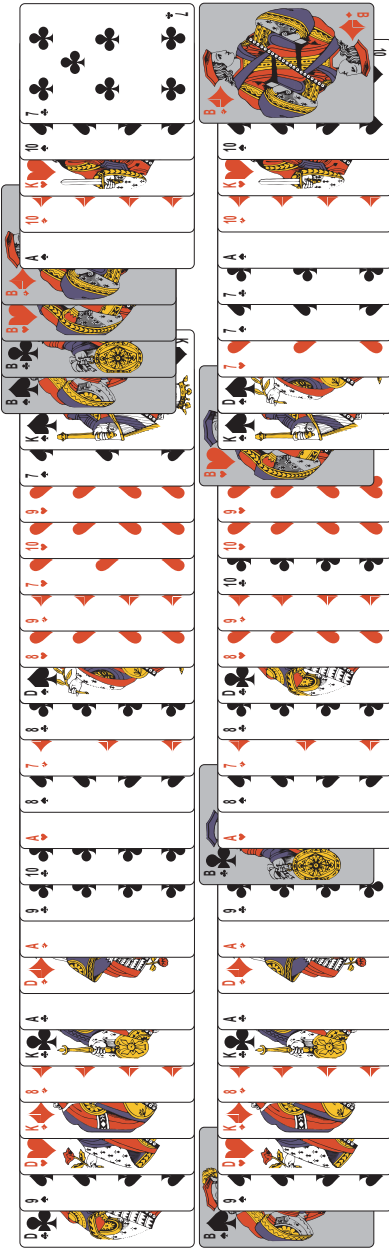


Abbildung 4.5 : Unterschiedliche Anordnungen von vier Buben

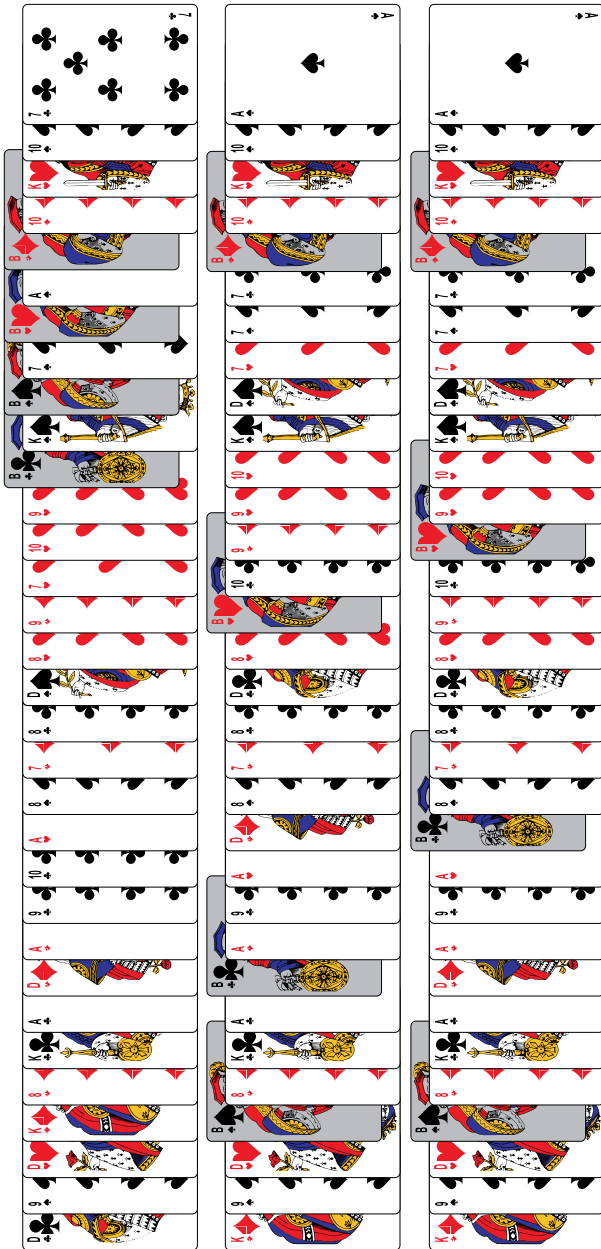


Abbildung 4.6 : Unterschiedlich vermischtes Kartenspiel mit vier einzelnen Buben

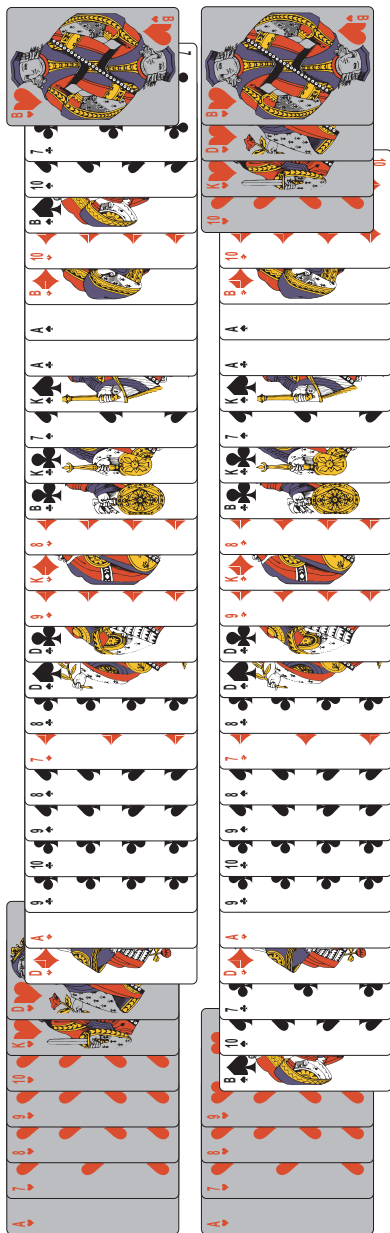


Abbildung 4.8 : Vermischung von acht gleichen Karten einer Fraktion



Abbildung 4.9 : Unvermischtheit aller Fraktionen

Anhang B Berechnung der KVGe für ein Beispiel mit 12 Karten

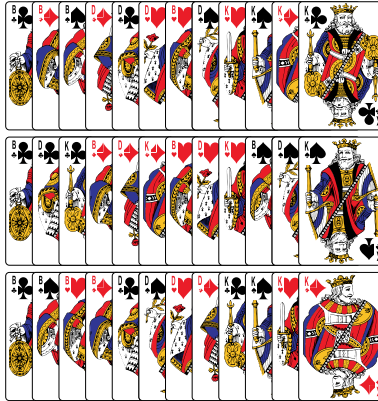


Abbildung B.1: Drei weitere Beispiele zur Bestimmung des KVG (oben Beispiel 2, Mitte Beispiel 3, unten Beispiel 4)

Tabelle B.1: Häufigkeitstabellen für Beispiel 2

Buben				Damen				Könige			
a_j	h_j	$a_j \cdot h_j$	S_j	a_j	h_j	$a_j \cdot h_j$	S_j	a_j	h_j	$a_j \cdot h_j$	S_j
1	1	1	$\frac{1}{4}$	1	1	1	$\frac{1}{4}$	4	1	4	1
3	1	3	1	3	1	3	1				
	2	4			2	4			1	4	

$$G^{Buben} = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot 1 + 1, 25 \cdot 1 \right) = 1 - \frac{3}{4} = \frac{1}{4} \tag{1}$$

$$G_{norm}^{Buben} = \frac{2}{2-1} \cdot \frac{1}{4} = \frac{1}{2} \tag{2}$$

$$KVG^{Buben} = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \tag{3}$$

$$G^{Damen} = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot 1 + 1, 25 \cdot 1 \right) = 1 - \frac{3}{4} = \frac{1}{4} \tag{4}$$

$$G_{norm}^{Damen} = \frac{2}{2-1} \cdot \frac{1}{4} = \frac{1}{2} \tag{5}$$

$$KVG^{Damen} = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \tag{6}$$

$$G^{Könige} = 1 - \frac{1}{1} \cdot (1 \cdot 1) = 1 - 1 = 0 \quad (7)$$

$$G_{norm}^{Könige} = \frac{1}{1-1} \cdot 0 = 1 \quad (8)$$

$$KVG^{Könige} = 1 - 1 = 0 \quad (9)$$

$$KVG^{Bsp.2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cdot 0 = \frac{1}{3} \quad (10)$$

Tabelle B.2: Häufigkeitstabellen für Beispiel 3

Buben				Damen				Könige			
a_j	h_j	$a_j \cdot h_j$	S_j	a_j	h_j	$a_j \cdot h_j$	S_j	a_j	h_j	$a_j \cdot h_j$	S_j
1	4	4	1	1	4	4	1	1	4	4	1
	4	4			4	4			4	4	

$$G^{Buben} = 1 - \frac{1}{4} \cdot (1 \cdot 4) = 1 - 1 = 0 \quad (11)$$

$$G_{norm}^{Buben} = \frac{4}{4-1} \cdot 0 = 0 \quad (12)$$

$$KVG^{Buben} = 1 - 0 = 1 \quad (13)$$

$$G^{Damen} = 1 - \frac{1}{4} \cdot (1 \cdot 4) = 1 - 1 = 0 \quad (14)$$

$$G_{norm}^{Damen} = \frac{4}{4-1} \cdot 0 = 0 \quad (15)$$

$$KVG^{Damen} = 1 - 0 = 1 \quad (16)$$

$$G^{Könige} = 1 - \frac{1}{4} \cdot (1 \cdot 4) = 1 - 1 = 0 \quad (17)$$

$$G_{norm}^{Könige} = \frac{4}{4-1} \cdot 0 = 0 \quad (18)$$

$$KVG^{Könige} = 1 - 0 = 1 \quad (19)$$

$$KVG^{Bsp.3} = \frac{3 \cdot 1}{3} = 1 \quad (20)$$

Tabelle B.3: Häufigkeitstabellen für Beispiel 4

Buben				Damen				Könige			
a_j	h_j	$a_j \cdot h_j$	S_j	a_j	h_j	$a_j \cdot h_j$	S_j	a_j	h_j	$a_j \cdot h_j$	S_j
4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1
	1	4			1	4			1	4	

$$G^{Buben} = 1 - \frac{1}{1} \cdot (1 \cdot 1) = 1 - 1 = 0 \quad (21)$$

$$G_{norm}^{Buben} = \frac{1}{1-1} \cdot 0 = 1 \quad (22)$$

$$KVG^{Buben} = 1 - 1 = 0 \quad (23)$$

$$G^{Damen} = 1 - \frac{1}{1} \cdot (1 \cdot 1) = 1 - 1 = 0 \quad (24)$$

$$G_{norm}^{Damen} = \frac{1}{1-1} \cdot 0 = 1 \quad (25)$$

$$KVG^{Damen} = 1 - 1 = 0 \quad (26)$$

$$G^{Könige} = 1 - \frac{1}{1} \cdot (1 \cdot 1) = 1 - 1 = 0 \quad (27)$$

$$G_{norm}^{Könige} = \frac{1}{1-1} \cdot 0 = 1 \quad (28)$$

$$KVG^{Könige} = 1 - 1 = 0 \quad (29)$$

$$KVG^{Bsp.4} = \frac{3 \cdot 0}{3} = 0 \quad (30)$$

Literaturverzeichnis

- Abel, P.:** Stochastische Optimierung bei partieller Information, Meisenheim 1984.
- Abel, P./Thiel, R.:** Mehrstufige stochastische Produktionsmodelle – Eine praxisorientierte Darstellung mit programmierten Beispielen, Frankfurt am Main 1981.
- aha (Hrsg.):** Benutzungsordnung Wertstoffhöfe und Deponien, http://www.aha-region.de/fileadmin/Download/Rechts_Ordnung/Benutzungsordnung.pdf, Zugriff am 29.12.2011.
- Akerlof, G.A.:** The market for „Lemons“: Quality Uncertainty and the Market Mechanism, in: Quarterly Journal of Economics, 84 1970 Nr. 3, S. 488–500.
- Alfieri, A./Brandimarte, P.:** Stochastic Programming Models for Manufacturing Applications, in: **Matta, A./Semeraro, Q. (Hrsg.):** Design of Advanced Manufacturing Systems – Models for Capacity Planning in Advanced Manufacturing Systems, Dordrecht et al. 2005, S. 73–124.
- Arnold, K.-P.:** Stochastische Transportprobleme, Hamburg 1987.
- Baltzer, J./Souren, R.:** Merkmale zur Charakterisierung diskreter Stoffgemische, Ilmenauer Schriftenreihe zur Betriebswirtschaftslehre, Ilmenau 2010.
- Bamberg, G./Baur, F./Krapp, M.:** Statistik, 17. Auflage, München, Wien 2012.
- Bankhofer, U./Vogel, J.:** Datenanalyse und Statistik, Wiesbaden 2008.
- Behrens, S.:** Stoffgemische als Erkenntnisobjekt der Betriebswirtschaftslehre, Wiesbaden 1998.
- Bellot, David:** [svg-cards](http://svg-cards.sourceforge.net/), <http://svg-cards.sourceforge.net/>, Zugriff am 25.06.2008.
- Berg, C.C.:** Recycling in betriebswirtschaftlicher Sicht, in: Wirtschaftswissenschaftliches Studium, 1979 Nr. 8, S. 201–205.

- Biedermann, U./Werking-Radtke, J./Woike, M.:** Numerische Bewertung von Biotoptypen für die Eingriffsregelung in NRW, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Recklinghausen 2008, zitiert nach: www.lanuv.nrw.de/natur/lebensr/Num_Bew_Biotyp_Sept2008.pdf, Zugriff am 29.11.2011.
- Bilitewski, B./Härdtle, G./Marek, K.:** Abfallwirtschaft: Handbuch für Praxis und Lehre, 3. Auflage, Berlin, Heidelberg 2000.
- Bittner, M./Marvik, J. van/Wolters, L.:** Aufbereitung von Kunststoffreststoffen, in: **Wolters, L./Marvik, J. van/Regel, K./Lackner, V./Schäfer, B. (Hrsg.):** Kunststoff-Recycling: Grundlagen – Verfahren – Praxisbeispiele, München et al. 1997, S. 45–121.
- Boeckh, M.:** Automatisierte Wertstofftrennung soll Recycling preiswerter machen: Reinheit rechnet sich, Entsorga-Magazin, 2001, Heft 1–2, S. 30–31.
- Bosch, C.H.:** Wertschöpfungspotentiale durch sensorgestützte Sortierverfahren bei der Schrottaufbereitung, in: **Pretz, T. (Hrsg.):** Sensorgestützte Sortierung 2006, Clausthal-Zellerfeld 2006, zitiert nach der CD zum Buch: \Tagungsunterlagen\04 Bosch\Bosch Langfassung.pdf.
- Böttcher, J.:** Stochastische lineare Programme mit Kompensation, Frankfurt am Main 1989.
- Brosch, B.:** Künstliche Intelligenz und „augmented reality“ – Leergutsortierung und Reinigung werden für Mehrwegbetriebe immer wichtiger, Verpackungsrundschau, 2008 Nr. 4, S. 102–108.
- Brosch, B.:** Kastenerkennung zur exakten Pfandberechnung, in: Brauwelt, 2009 Nr. 33–34, S. 956–958.
- Brosch, B.:** Leergutsortierung am heiligen Berg, in: Brauwelt, 2010 Nr. 7, S. 178–180.
- BRT Recycling Technologie GmbH:** Produktinformationen SORT-O-MAT, http://www.brt.info/images/pdf/FotoblaetterDE/produktinformation_sort-o-mat-ballistik-separator.pdf, Zugriff am 20.02.2012.
- Buchholz, M.:** Theorie der Variantenvielfalt – Ein produktions- und absatzwirtschaftliches Erklärungsmodell, Wiesbaden 2012.

- Buermann, H./Schniedermeier, B.:** Optimierung von Wertstoffsortieranlagen in der Abfallwirtschaft, in: **Kuyumcu, H.Z. (Hrsg.):** Sortieren – Innovationen und Anwendungen, Vorträge zum Kolloquium SORTIEREN, Berlin 1999, S. 261–268.
- Christiani, J.:** Kreislaufwirtschaft nach dem Muster der Verpackungsverordnung, Aachen 1997.
- Christiani, J.:** Sortierverfahren zur Gewinnung von Vorprodukten für die Kunststoffverwertung, in: **Pretz, T. (Hrsg.):** Sensorgestützte Sortierung 2004, Clausthal-Zellerfeld 2004, zitiert nach der CD zum Buch: \Tagungsunterlagen\03 Christiani\03 SgS04 Christiani.pdf.
- Christiani, J.:** Trenn- und Sortierverfahren – was leisten sie und was leisten sie nicht? in: **Pinnekamp, J. (Hrsg.):** 39. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft in der Messe Essen Ost, Aachen 2006, S. 51/1–54/6, zitiert nach: www.htp.eu/scripte/29_HTP-Christiani_Maerz-2006.pdf, Zugriff am 01.11.2011.
- Dantzig, G.B.:** Linear Programming under Uncertainty, in: Management Science, Vol. 1 1955 Nr. 3/4, S. 197–206.
- Dekker/Fleischmann, M./Inderfurth, K./Wassenhove, L.N. Van:** Reverse Logistics: Quantitative Models for closed loop supply chains, 2004.
- Dietz, D.:** Leergut-Chaos ade, in: Lebensmittelzeitung, 2005 Nr. 43 (28.10.2005), S. 39.
- Dinkelbach, W.:** Entscheidungsmodelle, Berlin, New York 1982.
- Dinkelbach, W./Kleine, A.:** Elemente einer betriebswirtschaftlichen Entscheidungslehre, Berlin et al. 1996.
- Domschke, W.:** Logistik: Transport, 5. Auflage, München, Wien 2007.
- Domschke, W./Drexel, A.:** Einführung in Operations Research, 7. Auflage, Berlin, Heidelberg 2007.
- Domschke, W./Scholl, A./Voß, S.:** Produktionsplanung, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York 1997.
- Duales System Deutschland GmbH:** Wertstoffkreislauf der Verbundverpackungen, <http://www.gruener-punkt.de/index.php?id=1816>, Zugriff am 15.07.2008.

- Duales System Deutschland (Hrsg.):** Sortierhandbuch (Stand 2004), http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/_15_DSD-Sortierhandbuch_01.pdf, Zugriff am 04.11.2011.
- duden.de:** <http://www.duden.de/rechtschreibung/sortieren>, Zugriff am 12.10.2011.
- Dyckhoff, H.:** Betriebliche Produktion – Theoretische Grundlagen einer umweltorientierten Produktionswirtschaft, 2. Auflage, Berlin et al. 1994.
- Dyckhoff, H.:** Grundzüge der Produktionswirtschaft: Einführung in die Theorie betrieblicher Produktion, Berlin et al. 1995.
- Dyckhoff, H.:** Produktion und Reduktion, in: **Kern, W./Schröder, H.-H./Weber, J. (Hrsg.):** Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, 2. Auflage, Stuttgart 1996, Sp. 1458–1468.
- Dyckhoff, H.:** Produktionstheorie, 5. Auflage, Berlin, Heidelberg 2006.
- Dyckhoff, H./Souren, R.:** Nachhaltige Unternehmensführung, Berlin 2008.
- Dyckhoff, H./Spengler, T.:** Produktionswirtschaft – Eine Einführung, 3. Auflage, Berlin 2010.
- Eisenführ, F./Weber, M./Langer, T.:** Rationales Entscheiden, 5. Auflage, Berlin, Heidelberg 2010.
- Elektrostatischer Separator:** <http://www1.fh-amberg-weiden.de/fachbereiche/mbut/labore/recycling/recyclingtechnik/korona.htm>, Zugriff am 19.01.2012.
- Emslander, T.:** Das duale Entsorgungssystem für Verpackungsabfall – Ein effizientes Regulierungsinstrument?, Wiesbaden 1995.
- ESG Edelmetall-Service GmbH & Co. KG:** Edelmetall-Recycling/Edelmetall-Rückgewinnung, <http://www.scheideanstalt.de/edelmetall-recycling/>, Zugriff am 23.06.2013.
- Faist, V./Ragossnig, A.:** Optische Sortiertechnik – Innovative Einsatzfelder in der Abfallwirtschaft, Grenzen und Forschungsbedarf, in: **Kühle-Weidemeier, M. (Hrsg.):** Abfallforschungstage, Göttingen 2008, S. 36–45.
- Falbe, J./Regitz, M.(Hrsg.):** Römpp-Lexikon Chemie, Band 5, 9. Auflage, Stuttgart 1999.

- Fandel, G.:** Produktion I: Produktions- und Kostentheorie, 6. Auflage, Berlin et al. 2005.
- Friedlaender, T.:** Sensorgestützte Sortiertechnik für die PET-Aufbereitung aus Anwendersicht, in: **Pretz, T. (Hrsg.):** Sensorgestützte Sortierung 2010, Clausthal-Zellerfeld 2010, zitiert nach der CD zum Buch: \unterlagen\lang\03_LF_Friedlaender_Krones.pdf.
- Fuchs, D./Stehle, W. (Erfinder):** Schutzrecht WO 94/26429 (24.11.1994), Maschinenfabrik Bezner GmbH & Co. KG (Anmelder), Pr.: P 43 15 691.6 11.05.1993.
- Gall, D./Jordanow, W./Vandahl, C./Wolf, S./Helm, H.-P.:** Beleuchtung von Sortierarbeitsplätzen im Recycling, Bremerhaven 1998.
- Gallenkemper, B.:** Erfassungssysteme für Abfälle und Wertstoffe – Ein Systemüberblick, in: **Wiemer, K./Kern, M. (Hrsg.):** Bio- und Sekundärrohstoffverwertung VI stofflich – energetisch, Witzenhausen 2011, S. 113–118.
- Glawitsch, G.:** Sortieren von Altglas – Theorie und praktische Anwendung, in: **Kuyumcu, H.Z. (Hrsg.):** Sortieren – Innovationen und Anwendungen, Vorträge zum 4. Kolloquium SORTIEREN, Berlin 2005, S. 146–153.
- Grünert, T./Irnich, S.:** Optimierung im Transport – Band 1: Grundlagen, Aachen 2005.
- Günther, H./Tempelmeier, H.:** Produktion und Logistik, 9. Auflage, Berlin, Heidelberg 2012.
- Gutenberg, E.:** Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Band 1: Die Produktion, 24. Auflage, Berlin/Heidelberg 1983.
- Haase, H./Garbe, H./Gerth, H.:** Grundlagen der Elektrotechnik, 3. Auflage, Hannover 2009.
- Habich, U.:** Veränderung von Aufbereitungssystemen durch sensorgestützte Sortiersysteme, in: **Pretz, T. (Hrsg.):** Sensorgestützte Sortierung 2010, Clausthal-Zellerfeld 2010, o.S., zitiert nach der CD zum Buch: \unterlagen\lang\01_LF_Habich_Steinert.pdf.
- Halm, G./Schiel, N.:** Modellversuch der Stadt Kassel zur Nassen und Trockenen Tonne, in: **Wiemer, K./Kern, M. (Hrsg.):** Bio- und Sekundärrohstoffverwertung V stofflich – energetisch, Witzenhausen 2010, S. 317–330.

- Harris, F.W.:** How many parts to make at once, in: *Factory, The Magazine of Management*, 10 1913 Nr. 2, S. 135–136 und 152, (Reprint; *Operations Research*, Nr. 38, Heft 6, 1990, S. 947–950).
- Heilmann, A.:** *Stoffstrommanagement für Abfälle aus Haushalten*, Dresden 2000.
- Heitsch, H.:** *Stabilität und Approximation stochastischer Optimierungsprobleme*, Berlin 2007.
- Hering, E./Martin, R./Stohrer, M.:** *Physik für Ingenieure*, 11. Auflage, Berlin et al. 2012.
- Hofbauer, A.:** Ausreichender Nachschub: Neue Leergutsortieranlage für die Binding Brauerei, in: *Brauindustrie*, Heft 5 2006, S. 10–14.
- Hofbauer, A.:** Nehmen und loslassen – Die Umstellung auf Individualflasche bei Bitburger durch eine mobile Flaschensortieranlage, in: *Brauindustrie*, Heft 6 2009, S. 10–14.
- Huber, A.:** *Demontageplanung und -steuerung – Planung und Steuerung industrieller Demontageprozesse mit PPS-Systemen*, Aachen 2001.
- Irrgang, R.:** Automatisches Sortieren von Leergut: Glasklare Vorteile, in: *Hebezeuge Fördermittel*, (50) 2010, Heft 1–2, S. 26–27.
- Isermann, H.:** Optimierung bei mehrfacher Zielsetzung, in: **Gal, T. (Hrsg.):** *Grundlagen des Operations Research 1: Einführung, Lineare Optimierung, Nichtlineare Optimierung, Optimierung bei mehrfacher Zielsetzung*, 3. Auflage, Berlin et al. 1991, S. 420–497.
- Isermann, H.:** Produktionstheoretische Fundierung logistischer Prozesse, in: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, Ergänzungsheft 4/99, Wiesbaden 1999, S. 67–87.
- Jansen, M./Pretz, T.:** Bewertung der Effizienz der Sortierung eines Kunststoffkonzentrats aus Hausmüll – Darstellung des Standes der Technik für die Sortierung anhand von Simulationen, in: *Müll und Abfall*, 2011 Nr. 2, S. 68–76.
- Kall, P.:** *Stochastic Linear Programming*, Berlin et al. 1976.
- Kennington, J. L.:** A Survey of Linear Cost Multicommodity Network Flows, in: *Operations Research*, Vol. 26 (2) 1978, S. 209–236.

- Killmann, D.:** Weiterentwicklung der sensorgestützten Sortierung von festen Abfallstücken, in: **Kühle-Weidemeier, M. (Hrsg.):** Abfallforschungstage, Göttingen 2008, S. 25–35.
- Kirchgeorg, M.:** Marktstrategisches Kreislaufmanagement, Wiesbaden 1999.
- Klee, M./Giss, M./Kraus, P.:** Leergutsortierung: zentral oder dezentral? Brauwelt, Nr. 46 2009, S. 1398–1399.
- Knudsen, N./Nowak, K.:** Batteriesortierung in Deutschland – Automatische Sortierung als Basis der Verwertung, in: **Kühle-Weidemeier, M. (Hrsg.):** Abfallforschungstage, Göttingen 2008, S. 1–13.
- Koether, R.:** Logistik als Managementaufgabe, in: **Koether, R. (Hrsg.):** Taschenbuch der Logistik, 4. Auflage, München 2011, S. 21–36.
- Koopmans, T. C.:** Analysis of Production as an Efficient Combination of Activities, in: **Koopmans, T. C. (Hrsg.):** Activity Analysis of Production and Allocation, New York, London 1951, S. 33–97.
- Koopmans, T. C./Reiter, S.:** A Model of Transportation, in: **Koopmans, T. C. (Hrsg.):** Activity Analysis of Production and Allocation, New York, London 1951, S. 222–259.
- Küpper, H.-U./Helber, S.:** Ablauforganisation in Produktion und Logistik, 3. Auflage, Stuttgart 2004.
- KrWG (Kreislaufwirtschaftsgesetz):** Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das durch § 44 Absatz 4 des Gesetzes vom 22. Mai 2013 (BGBl. I S. 1324) geändert worden ist.
- Kuyumcu, H.Z.:** Systemanalytische Betrachtung der Sortierung, in: **Kuyumcu, H.Z. (Hrsg.):** Sortieren – Innovationen und Anwendungen, Vorträge zum Kolloquium SORTIEREN, Berlin 1999a, S. 1–19.
- Kuyumcu, H.Z.:** Zur technisch-wirtschaftlichen Optimierung von Sortierprozessen, in: Aufbereitungs-Technik (40), 1999b Nr. 8, S. 369–378.
- Langen, M./Weber, H./Sabrowski, R./Oetjen-Dehne, R.:** Erfahrungen mit dem System Gelbe Tonne Plus in der Stadt Leipzig und auf dem Land Berlin, in: Müll und Abfall, 40. Jg, 2008 Nr. 5, S. 236–240.

- Lautenschläger, K.-H./Schröter, W./Teschner, J.:** Taschenbuch der Chemie, 19. Auflage, Frankfurt 2002.
- Martens, H.:** Recyclingtechnik, Heidelberg 2011.
- Miofsky, D./Souren, R.:** Einflussfaktoren auf die Höhe der Hausmüllgebühren, Ilmenauer Schriftenreihe zur Betriebswirtschaftslehre, Ilmenau 2010.
- Müller, W.:** Mechanische Trennprozesse, in: **Schwister, K. (Hrsg.):** Taschenbuch der Verfahrenstechnik, 4. Auflage, München 2010, S. 94–104.
- Müller-Merbach, H.:** Die Konstruktion von Input-Output-Modellen, in: **Bergner, H. (Hrsg.):** Planung und Rechnungswesen in der Betriebswirtschaftslehre, Berlin 1981, S. 19–113.
- Mocker, M./Fricke, K./Löhr, I./Franke, M./Bahr, T./Münnich, K./Faulstich, M.:** Urban Mining – Rohstoffe der Zukunft, in: Müll und Abfall, 41. Jg., 2009 Nr. 10, S. 492–501.
- Monzel, M.-G.:** Modellversuch Trier: Vollständige ökoefiziente Verwertung von Siedlungsabfällen aus der Region Trier – ein erste Zwischenbilanz, in: **Wiemer, K./Kern, M. (Hrsg.):** Bio- und Sekundärrohstoffverwertung V stofflich – energetisch, Witzenhausen 2010, S. 309–315.
- Mudgal, S./Lyons, L./Bain, J./Dias, D./Faninger, T./Johansson, L./Dolley, P./Shields, L./Bowyer, C.:** Plastic Waste in the Environment – Revised Final Report, Paris 2011.
- o. V.:** Duden Etymologie: Herkunftswörterbuch der deutschen Sprache, 2. Auflage, Mannheim, Wien, Zürich 1989.
- o. V.:** Am laufenden Band – Veltins nutzt vollautomatische Technik für Leergutsortierung, in: Fördern und Heben, 2005 Nr. 12, S. 716–718.
- o. V.:** Brockhaus Enzyklopädie, 21. Auflage, Leipzig, Mannheim 2006, Band 25.
- Oberrauner, A./Flachberger, H./Weiß, H.:** Elektroscheidung in Labor und Technik am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung der Montanuniversität Leoben, in: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Jg. 154, 2009 Nr. 4, S. 140–144.
- Odening, M.:** Komplexitätsreduktion in Entscheidungsmodellen, Frankfurt am Main 1994.

- Pascoe, R.D.:** Sorting of Wastoplastics for Recycling, in: Rapra Review Reports, Vol. 11, No. 4, 2000.
- Pitz, T.:** Recycling aus produktionstheoretischer Sicht, Heidelberg 2000.
- Polke, R./Sachweh, B.:** Mischungszustand und Anordnung, in: **Bohnet, M. (Hrsg.):** Mechanische Verfahrenstechnik, Weinheim 2004, S. 33–34.
- Powell, W.B./Topaloglu, H.:** Stochastic Programming in Transportation and Logistics, in: **Ruszczynski, A./Shapiro, A. (Hrsg.):** Stochastic Programming, Amsterdam et al. 2003, S. 555–635.
- Pretz, T.:** Kreislaufwirtschaft ohne sensorgestützte Sortierung?, in: **Pretz, T. (Hrsg.):** Sensorgestützte Sortierung 2006, Clausthal-Zellerfeld 2006, o. S., zitiert nach der CD zum Buch: \Tagungsunterlagen\01 Pretz\Pretz Präsentation.pdf.
- Pretz, T.:** Aufbereitung fester Abfallstoffe (Kapitel 5), in: **Kranert, M./Cord-Landwehr, K. (Hrsg.):** Einführung in die Abfallwirtschaft, 4. Auflage, Wiesbaden 2010, S. 135–183.
- Pretz, T./Julius, J.:** Stand der Technik und Entwicklung bei der berührungslosen Sortierung von Abfällen, in: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 60 2008, Heft 07–08, S. 105–112.
- Pretz, T./Schmalbein, N./Wens, B.:** Verwertung von Siedlungsabfall – ein Beitrag zur Ressourceneffizienz, in: Müll und Abfall, 42. Jg, 2010 Nr. 12, S. 576–581.
- Rembold, J.:** Stochastische lineare Optimierung – Eine anwendungsbezogene systematische Darstellung, Meisenheim am Glan 1977.
- Riebel, P.:** Kosten- und Ertragsverläufe bei Prozessen mit verweilzeitabhängiger Ausbeute, in: Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, 9. Jg., 1957, S. 217–248.
- Ripperger, S.:** Fraktale Dimension, in: **Stieß, M. (Hrsg.):** Mechanische Verfahrenstechnik – Partikeltechnologie 1, 3. Auflage, Berlin, Heidelberg 2009, S. 22–25.
- Schierenbeck, H./Wöhle, C. B.:** Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre, 18. Auflage, München 2012.

- Scholl, A.:** Optimierungsansätze zur Planung logistischer Systeme und Prozesse, in: **Arnold, D./Isermann, H./Kuhn, A./Tempelmeier, H. (Hrsg.):** Handbuch Logistik, Berlin et al. 2002, S. A 2–9–A 2–24.
- Schubert, G.:** Recyclingprozesse, in: **Nickel, W. (Hrsg.):** Recycling-Handbuch: Strategien – Technologie – Produkte, Düsseldorf 1996, S. 88–248.
- Schubert, H.:** Aufbereitung fester Stoffe – Band II: Sortierprozesse, 4. Auflage, Stuttgart 1996.
- Schubert, H.:** Zu den Grundlagen des Sortierens: Trennmerkmale – Wirkprinzipien – Makroprozesse – Mikroprozesse, in: **Kuyumcu, H.Z. (Hrsg.):** Sortieren – Innovationen und Anwendungen, Vorträge zum 3. Kolloquium SORTIEREN, Berlin 2003a, S. 1–20.
- Schubert, H. (Hrsg.):** Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik, Band 2, Weinheim 2003b.
- Schug, H./Eickenbusch, H./Marschneider-Weidemann, F./Zweck, A.:** Zukunftsmarkt Stofferkennung und -trennung, Berlin: Umweltbundesamt (Hrsg.) 2007.
- Schüler, K.:** Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland – Berichtsjahr 2008, Studie für das Umweltbundesamt, Mainz 2010.
- Schweitzer, M./Küpper, H.-U.:** Systeme der Kostenrechnung, 10. Auflage, München 2011.
- Sodhi, M. S./Young, J./Knight, W. A.:** Modelling material separation processes in bulk recycling, in: International Journal of Production Research, Vol. 37, No. 10, 1999, S. 2239–2252.
- Souren, R.:** Produktionswirtschaftliche Analyse betrieblicher Entsorgungsprozesse, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Ergänzungsheft 2/96: Betriebliches Umweltmanagement, Wiesbaden 1996a, S. 53–77.
- Souren, R.:** Theorie betrieblicher Reduktion – Grundlagen, Modellierung und Optimierungsansätze stofflicher Entsorgungsprozesse, Heidelberg 1996b.
- Souren, R.:** Optimale Sortierung von Verpackungsabfällen, in: Abfallwirtschaftsjournal, Band 9, Heft 12 1997, S. 32–38.
- Souren, R.:** Konsumgüterverpackungen in der Kreislaufwirtschaft, Wiesbaden 2002.

- Souren, R.:** Ein Kreislaufmodell als Analyserahmen einer transformations- und transaktionsorientierten Umweltwirtschaft, in: **Zabel, H.-U. (Hrsg.):** Theoretische Grundlagen und Ansätze einer nachhaltigen Umweltwirtschaft, Halle 2003, S. 93–110.
- Souren, R.:** Material flow analysis in closed-loop supply chains: modelling of packaging waste recycling at different hierarchical levels, in: International Journal of Integrated Supply Management, Vol. 1 2004a Nr. 2, S. 117–138.
- Souren, R.:** Sortierungsprozesse im Verpackungskreislauf: Aktivitätsanalytische Modellierung und Ansatzpunkte zur Optimierung, Vortrag auf der Tagung der Wissenschaftlichen Kommission Logistik im Verband der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e. V., Bremen 2004b.
- Souren, R.:** Alles im Fluss? Ansatzpunkte eines nachhaltigen Kreislaufmanagements für Verkaufsverpackungen, in: **Hahn, R./Janzen, H./Matten, D. (Hrsg.):** Die gesellschaftliche Verantwortung des Unternehmens: Hintergründe, Schwerpunkte und Zukunftsperspektiven, Stuttgart 2012, S. 321–347.
- Spengler, T.:** Industrielle Demontage- und Recyclingkonzepte: betriebswirtschaftliche Planungsmodelle zur ökonomisch effizienten Umsetzung abfallrechtlicher Rücknahme- und Verwertungspflichten, Berlin 1994.
- Spengler, T./Ploog, M.:** Techno-ökonomische Modellierung des Mengengerüsts und der Wertschöpfung bei Sortierprozessen – dargestellt am Beispiel des Elektronikschrottrecyclings, in: **Kuyumcu, H.Z. (Hrsg.):** Sortieren – Innovationen und Anwendungen, Vorträge zum 2. Kolloquium SORTIEREN, Berlin 2001, S. 28–39.
- Spiegelmacher, K.:** Die Guten ins Kästchen – Moderne Leergut-Sortiersysteme in der Getränkeindustrie, Getränkeindustrie, 2008 Nr. 3, S. 16–18.
- Spiegelmacher, K.:** Reibungsloser Leergut-Rücklauf – Inspektionstechnologie erhöht die Systemeffektivität im Petcycle-Kreislauf, Getränkeindustrie, 2010 Nr. 11, S. 64–67.
- Stieß, M.:** Mechanische Verfahrenstechnik – Partikeltechnologie 1, 3. Auflage, Berlin, Heidelberg 2009.
- Sutco Recyclingtechnik:** Sortieranlagen für Verpackungsabfälle, http://sutco.de/fileadmin/datenblaetter/Anlagenblatt_VP_DE_02SEP2010.pdf, Zugriff am 17.02.2012.

- Thomé-Kozmiensky, K.J.:** Aufbereitung, in: **Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.):** Verfahren und Stoffe in der Kreislaufwirtschaft, Berlin 1995, S. 65–79.
- Uhlig, D.E./Bremerstein, I.:** Handbuch der Sortiertechnik: Duales System in der Praxis, Duales System Deutschland GmbH (Hrsg.), Köln 1997.
- Vahrenkamp, R.:** Logistik, 6. Auflage, München, Wien 2007.
- VerpackV (Verpackungsverordnung):** Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen (Verpackungsverordnung – VerpackV) vom 21. August 1998 (BGBl. I S. 2379), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 19 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist.
- Werner, M.:** Stochastische lineare Optimierung, Frankfurt am Main 1973.
- Willenberg, B.:** Physikalische und chemische Aufbereitungsverfahren für Kunststoffe, in: **Nickel, W. (Hrsg.):** Recycling-Handbuch: Strategien – Technologie – Produkte, Düsseldorf 1996, S. 208–229.
- Willing, E.:** Sortierverfahren in der Abfallwirtschaft – eine kritische Bilanz, in: **Kuyumcu, H.Z. (Hrsg.):** Sortieren – Innovationen und Anwendungen, Berlin 1999, S. 78–89.
- Wotruba, H.:** Stand der Technik der sensorgestützten Sortierung, in: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Jg. 153, 2008 Nr. 6, S. 221–224.
- Zäpfel, G.:** Taktisches Produktions-Management, 2. Auflage, München, Wien 2000.
- Zumkeller, M. A.:** Kosteneffiziente Kreislaufführung von Kunststoffen – Dargestellt am Beispiel der stofflichen Verwertung von Kunststoffbauteilen aus Altfahrzeugen, Wiesbaden 2005.

Stichwortverzeichnis

- Abtrennungsgrad, 124, 147, 161
- Abtrennungsprozesse, 108
- Aktivität, 97
- Annahmegebühr, 154, 156, 166
- Anordnungsmerkmale, 60, 83, 182
- Arbeitsdefinition, 22

- Bandgeschwindigkeit, 172, 174
- Bernoulli-Kriterium, 240

- Demontage, 115
- Dichtesortierung, 21, 29
- Duales System, 1, 23

- Elektrosortierung, 19, 35
- Entmischungsgrad, 91
- Entscheidungsmodell, 230
- Entscheidungsprinzipien, 230, 233
- Entscheidungsregeln, 231, 238
- Entscheidungsvariable, 125
- Entsorgungskosten, 155, 159
- Ersatzmodell, 225
- Erwartungswertkriterium, 239

- Flotation, 19, 37
- Fraktionsanteil, 60, 82
- Fraktionsanzahl, 60, 81

- Gebindeöffnung, 24
- Gemisch
 - diskretes, 51
 - heterogenes, 49
 - homogenes, 49
 - stetiges, 51

- Gruppenabstände, 60, 83
- Gruppenanzahl, 60, 83, 84
- Gruppengröße, 60, 83, 84

- Häufigkeitsmerkmale, 60, 81
- Handklaubung, 19, 37

- I/O-Graph, 97, 156
 - abstrakter, 98
 - einfacher, 98
 - kompakter, 117
 - konkreter, 98
- Induktionsphase, 14
- Informationsmodelle, 230
- Intensität, 172

- Klassierung, 17, 27
- Klaubung, 19, 37
- Kollektionsphase, 14
- Kompensationsmodell, 227, 236
- Komponentenebene, 122
- Komponentenmodellierung, 15, 106
- Komponentenverteilung, 108
- Kontaktstellen, 85
- Korngröße, 17
- Kreislaufwirtschaft, 1, 12
- Kreislaufwirtschaftsgesetz, 12
- Kuppelproduktion, 98

- Magnetfeldsortierung, 19
- Magnetscheidung, 32
- Modell
 - mit Wahrscheinlichkeitsrestriktion, 235

- zulässigkeitsstabiles, 233
- Nahinfrarot, 19, 40
- Negativsortierung, 21
- Netzflussproblem, 146
- Objektebene, 122
- Optimierungsmodell, 121
- Positivsortierung, 21
- Prozessebene, 122
- Prozesskosten, 155, 157, 168
- Prozessparameter, 171
- Reduktionsphase, 14
- Reduktionsprozessstypen, 108
- Reduktionstheorie, 2
- Sacköffnung, 17, 24
- Schwimm-Sink-Sortierung, 21, 31
- Sekundärrohstoff, 12
- sensorgestützte Sortierung, 39
- Setzen, 21, 31
- Sichten, 21, 30
- Siebklassierung, 18, 27
- Sortenreinheit, 124, 147, 161
- Sortierung, 11, 16
 - sensorgestützte, 19
- Sortierverfahren, 32
- Sortierwert, 154
- stochastische Dominanz, 233
- Stromklassierung, 18, 29
- Technik, 97
 - einstufige, 101
 - elementare, 100
 - lineare, 99
 - völlig flexible, 104
- Teilsortierung, 21
- Totalsortierung, 21
- Transformation
 - materielle, 14
 - mengenmäßige, 15
 - raum-zeitliche, 14
- Transportproblem
 - zweistufiges, 135
- Trennmerkmal, 16
- Trennverfahren, 16
- Unsicherheit, 215
- Varianzkriterium, 239
- Verkaufsverpackungen, 12
- Vermischungsgrad, 157
 - 2d Wechselorientierter, 90
 - Abstands- bzw. Zwischenraumorientierter, 73
 - Anteilorientierter, 65, 90
 - Fraktionsanzahlorientierter, 65, 90
 - Integrierter, 77
 - Konzentrationsorientierter, 71, 91
 - Wechselorientierter, 68
- Verpackungsverordnung, 2, 12
- Verteilungsmodelle, 230, 231
- Verwertung, 13
- Wechselanzahl, 62, 83, 84
- Wertstoff Erlöse, 155, 158, 163, 166
- Wertstoffsammlung, 12
- Wirbelstromscheidung, 34
- Zerkleinerung, 17, 25
- Zielfunktion, 155
- Zufallsvorgang, 215