

Umweltforschungsplan
des Bundesministers für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Abfallwirtschaft

Forschungsbericht 298 33719

**Grundlagen für eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle
Verwertung von Verkaufsverpackungen**

von

Dr.-Ing. Joachim Christiani, HTP
Dipl.-Ing. Ulla Griepentrog, HTP
Dipl.-Ing. Heiko Weber, HTP
Dipl.-Physiker Jürgen Giegrich, ifeu
Dipl.-Biologe Andreas Detzel, ifeu
Dr. Lutz Breuer, ifeu

HTP

HTP Ingenieurgesellschaft für
Aufbereitungstechnik und Umwelt-
verfahrenstechnik Prof. Hoberg und
Partner

ifeu

ifeu - Institut für Energie- und
Umweltforschung Heidelberg
GmbH

IM AUFTRAG
DES UMWELTBUNDESAMTES

Juli 2001

Berichts - Kennblatt

Berichtsnummer 1. UBA-FB	298 33719	2.	3.
4. Titel des Berichts Grundlagen für eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Verwertung von Verkaufsverpackungen			
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Christiani, Joachim • Griepentrog, Ulla • Weber, Heiko Giegrich, Jürgen • Detzel, Andreas • Breuer, Lutz		8. Abschlussdatum Jul 01	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) HTP Ingenieurgesellschaft für Aufbereitungstechnik und Umweltverfahrenstechnik Prof. Hoberg und Partner Maria-Theresia-Allee 35 • 52064 Aachen ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH Wilckenstr. 3 • 69120 Heidelberg		9. Veröffentlichungsdatum	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 14193 Berlin		10. UFOPLAN - Nr. 298 33719	
		11. Seitenzahl 311	
		12. Literaturangaben 35	
		13. Tabellen und Diagramme 94	
		14. Abbildungen 142	
15. Zusätzliche Angaben			
16. Kurzfassung Diese Studie sollte insbesondere die Frage untersuchen, ob gewisse Leichtverpackungen (LVP-Fraktion) unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten sinnvoller über den Restmüll entsorgt oder wie bisher separat gesammelt und verwertet werden sollen. Da die Ergebnisse einer solchen Untersuchung stark technologieabhängig sind, wurden hierzu drei Szenarien vorgegeben: <ul style="list-style-type: none"> - Status quo 1998 (überwiegend händische und mechanisch gestützte Sortierung) - Status quo optimiert (Halbautomatische Sortierung mit Kunststoffartentrennung) - SORTEC-Verfahren (vollautomatische Sortierung mit integrierter Veredlung) Beim ökologischen Vergleich des bisherigen Verpackungsrecyclings mit einem unterstellten Beseitigungsmix aus 30 Prozent Verbrennung und 70 Prozent Deponierung ergibt sich im Status quo Szenario, dass die Beseitigung bei keiner Verpackungsmaterialgruppe ökologische Vorteile gegenüber der Verwertung hat. Die Verwertung von Alu-, Weißblech-, großen Kunststoffverpackungen und Flüssigkeitskartons hat eindeutig ökologische Vorteile gegenüber der Beseitigung. Allerdings weist die Beseitigung kleinerer Kunststoffverpackungen wie Becher, Folien kleiner DIN A4, Kunststoffverbunde, sonstige Kunststoffe und teilweise auch Papierkartonageverbunde keine eindeutigen ökologischen Nachteile auf. Würden letztere gezielt vollständig in einer Müllverbrennungsanlage mit einem thermischen Wirkungsgrad von 70 % beseitigt, ergibt sich ein ökologisches Patt. Beim optimierten Status quo der Sortiertechnik ergeben sich generell höhere Ausbringensraten und teilweise ökologisch hochwertigere Verwertungspfade für sortenreine Kunststoffe, auch bei kleinteiligen Verpackungen. Insofern ist ein weiteres wichtiges Fazit der Untersuchung: Wird die LVP-Sortierung und Aufbereitung an den Stand der Technik herangeführt, ist die Diskussion um einen Systemausschluss kleinteiliger Kunststoffverpackungen ein nachrangiges Problem. Hinsichtlich der ökonomischen Auswirkungen untersuchter Szenarien kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass die spezifischen Kosten für die Verpackungsentsorgung steigen, wenn bestimmte Verpackungen aus dem bisherigen LVP-Entsorgungssystem ausgeschlossen werden. Zum einen führt zwar der Ausschluss einzelner Materialgruppen zu einer Senkung der Systemkosten, die spezifischen Verwertungskosten der im System verbleibenden Verpackungen würden aber überproportional steigen, je mehr Verpackungen ausgeschlossen werden. Werden hingegen die Kostensenkungspotentiale des bisherigen Systems ausgeschöpft, wird eine Absenkung der DSD-Kosten für die Leichtverpackungen um mindestens 800 Mio. auf unter 2,0 Mrd. DM pro Jahr erwartet.			
17. Schlagwörter Verpackungen, sinnvolle Verwertung, Ökonomie, Ökologie, Duales System, kleinteilige Verpackungen			
18. Preis		19.	20.

Berichts - Kennblatt

Report No. 1. UBA-FB	298 33719	2.	3.
4. Report Title Bases for an ecologically and economically reasonable recycling of sales packaging			
5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) Christiani, Joachim • Griepentrog, Ulla • Weber, Heiko Giegrich, Jürgen • Detzel, Andreas • Breuer, Lutz		8. Report Date Jul 01	
6. Performing Organisation (Name, Adress) HTP Ingenieurgesellschaft für Aufbereitungstechnik und Umwelt- verfahrenstechnik Prof. Hoberg und Partner Maria-Theresia-Allee 35 • 52064 Aachen ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH Wilckenstr. 3 • 69120 Heidelberg		9. Publication Date	
		10. UFOPLAN - Ref.No. 298 33719	
		11. No. of Pages 311	
		12. No. of References 35	
7. Sponsoring Agency (Name, Adress) Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 14193 Berlin		13. No. of Tables, Diagr. 94	
		14. No. of Figures 142	
		15. Supplementary Notes	
16. Abstract <p>The study examines in particular the question whether it would be ecologically and economically more reasonable to dispose of certain lightweight packaging (PMD fraction) together with residual waste or whether the current practice of collecting it separately and recycling it should be retained.</p> <p>As the results of such a study are strongly technology-dependent, three scenarios were defined:</p> <ul style="list-style-type: none"> • status quo in 1998 (predominately sorting by hand and mechanically supported sorting) • status quo optimised (semi-automatic sorting including a separation according to polymer types of plastics) • SORTEC-treatment (fully mechanical sorting with integrated refinement) <p>The ecological comparison between packaging recycling as currently practised (status quo scenario) and an assumed disposal mix of 30 percent incineration and 70 percent landfill shows disposal to have no ecological advantages over recycling for any of the groups of packaging material considered. Recycling has clear ecological advantages over disposal in the case of aluminium, tin plate and bulk plastic packaging and cartons for liquids. The disposal of smaller plastic packaging items like cups, foils smaller than standard size DIN A4, plastic composites, other plastics and some paper carton composites does not, however, have any clear ecological disadvantages. If it is assumed that these are disposed of entirely by incineration with a thermal efficiency of 70 percent, the ecological comparison results in a tie.</p> <p>The use of optimised sorting techniques (optimised status-quo) leads generally to higher yield rates of pure polymer fractions and in some cases to ecologically superior recycling routes for these fractions, even in the case of small-size packaging.</p> <p>A further important conclusion of the study in this respect is: If PMD sorting and refinement is improved to reflect the state of the art, discussion about an exclusion of small plastic packaging will be a less relevant problem.</p> <p>Regarding the economic impact of investigated scenarios, the study concludes that the specific costs for management of packaging waste will rise if certain groups of packaging are excluded from the present system for management of PMD waste. On the one hand, the exclusion of some groups of material does reduce the system's costs, but the specific recycling costs of the packaging groups remaining in the system would rise disproportionately the more packaging is excluded. In contrast, if the cost reduction potential of the present system is fully exploited, the system's costs for lightweight packaging are expected to fall by at least DEM 800 million, to less than DEM 2.0 billion per year.</p>			
17. Keywords packaging, recycling, economy, ecology, Duales System, small-size packaging			
18. Price	19.	20.	

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	11
0 Zusammenfassung	15
1 Einführung	22
1.1 Veranlassung und Aufgabenstellung	22
1.2 Anmerkungen zu Methodik und Aufbau der Studie	23
2 Allgemeiner Teil	26
2.1 Definitionen und Aufkommen der untersuchten Verpackungsmaterial- gruppen	26
2.2 Charakterisierung der einzelnen Systemebenen	29
2.2.1 Getrennte Erfassung	29
2.2.1.1 Einflussfaktoren und allgemeine Abhängigkeiten	31
2.2.1.2 Verpackungsspezifische Erfassungsquoten und Bewertung der Selektivität der Erfassung	34
2.2.1.3 Kosten der Erfassung	37
2.2.2 Sortierung	39
2.2.2.1 Status quo	40
2.2.2.2 Optimierter Status quo	44
2.2.2.3 Sortec	45
2.2.2.4 Kosten der Sortierung	47
2.2.3 Veredlung und Verwertung	50
2.2.3.1 Technisches Szenario	50
2.2.3.2 Kosten der Veredlung und Verwertung	55
3 Spezieller Teil	57
3.1 Wertstoffbilanzen für einzelne Verpackungsmaterialgruppen	57
3.1.1 Vorgehensweise und Datengrundlage	57

Inhaltsverzeichnis

3.1.2	Darstellungsform	61
3.1.3	Charakterisierung der Verwertungseigenschaften einzelner Verpackungsmaterialgruppen.....	62
3.1.3.1	Folien >DIN A4.....	62
3.1.3.2	Folien < DIN A4.....	64
3.1.3.3	Kunststoffflaschen < 5l.....	65
3.1.3.4	Hohlkörper > 5l.....	66
3.1.3.5	Becher.....	67
3.1.3.6	Sonstige Kunststoffe	68
3.1.3.7	Kunststoffverbunde	70
3.1.3.8	EPS.....	71
3.1.3.9	PPK-Verbunde	72
3.1.3.10	Flüssigkeitskartons.....	73
3.1.3.11	Weißblech und Weißblechverbunde.....	74
3.1.3.12	Aluminium	76
3.1.3.13	Aluminium-Verbunde	77
3.1.3.14	Aluminiumhaltige Verbunde.....	78
3.1.3.15	Trennbare Kombinationsverpackungen.....	79
3.1.4	Vergleichende Gegenüberstellung der einzelnen Materialgruppen nach dem Kriterium stoffliche Verwertbarkeit	81
3.2	Spezifische Verwertungskosten einzelner Verpackungsmaterialgruppen	84
3.2.1	Vorgehensweise zur Ermittlung spezifischer Kosten	84
3.2.2	Spezifische Kosten und Kostenvergleich.....	87
3.3	Ökologische Bewertung.....	94
3.3.1	Grundlagen der Bilanzierung.....	94
3.3.1.1	Darstellung der Untersuchungsoptionen	94
3.3.1.2	Modellierungs- und Datengrundlagen.....	95
3.3.1.3	Bilanzierung des Nutzens.....	100

Inhaltsverzeichnis

3.3.1.4	Sensitivitätsbetrachtungen	103
3.3.2	Vorgehensweise bei der ökologischen Bewertung	104
3.3.2.1	Wirkungsabschätzung.....	104
3.3.2.2	Auswertung	105
3.3.3	Ökologische Bewertung	108
3.3.3.1	Bewertung der einzelnen Verpackungsmaterialgruppen.....	108
3.3.3.2	Kunststofffolien > DIN A4 (K.-Fo>A4).....	112
3.3.3.3	Kunststofffolien < DIN A4 (K.-Fo<A4).....	116
3.3.3.4	Kunststoffbecher (K.-Becher)	124
3.3.3.5	Kunststoffflaschen (K.-Flaschen).....	129
3.3.3.6	Kunststoffverbunde (K.-Vb)	135
3.3.3.7	Sonstige Kunststoffe (so. K.).....	141
3.3.3.8	Aluminium-Verbunde (Alu-Vb).....	147
3.3.3.9	Aluminium haltige Verbunde (Aluh.-Vb).....	151
3.3.3.10	Aluminium (Alu)	157
3.3.3.11	Weißblech (Wb)	162
3.3.3.12	Weißblechverbunde (Wb-Vb)	167
3.3.3.13	Papierkartonagenverbunde (PPK-Vb)	171
3.3.3.14	Flüssigkeitskartons (FKN)	177
3.3.3.15	Schlussfolgerungen.....	181
4	Vergleichende Untersuchungen ausgewählter Szenarien.....	184
4.1	Herleitung und Randbedingungen der Szenarien	184
4.2	Ableitung der Mengengerüste	187
4.2.1	Kosten-/Nutzenbetrachtung für die einzelnen Materialgruppen	187
4.2.2	Grundlagen der Mengenansätze zu den einzelnen Szenarien.....	191
4.3	Errechnung der Systemkosten	195
4.3.1	Berechnungsgrundlagen	195



Inhaltsverzeichnis

4.3.2	Ergebnisse	197
5	LITERATUR	202
ANHÄNGE		
	Anhang zum Kapitel 2.2	205
	Anhang zum Kapitel 3.1	210
	Anhang zum Kapitel 3.3	254

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.2.1: Spezifische Erfassungsquoten in vergleichender Darstellung gemäß Auswertung aus [HTP/INFA 1999].....	35
Abbildung 2.2.2: Exemplarisches Blockfließbild einer einfachen Sortieranlage mit überwiegend manueller Sortierung.....	41
Abbildung 2.2.3: Exemplarisches Blockfließbild einer Sortieranlage nach dem Stand der Technik (halbautomatisches Verfahren).....	42
Abbildung 2.2.4: Sortiertechnik Sortec (schematisch).....	46
Abbildung 2.2.5: Vereinfachte Darstellung der Materialflüsse, Verantwortlichkeiten und Schnittstellen im Dualen System.....	51
Abbildung 3.1.1: Massenbilanz und Wertstoffbilanz einer Zwei-Produktentrennung	58
Abbildung 3.1.2: spezifisches Ausbringen an RC-Produkten in der Variante Status quo.....	82
Abbildung 3.1.3: spezifisches Ausbringen an RC-Produkten in der Variante optimierter Status – alte Spezifikation.....	83
Abbildung 3.1.4: spezifisches Ausbringen an RC-Produkten in der Variante optimierter Status – neue Spezifikation.....	83
Abbildung 3.1.5: spezifisches Ausbringen an RC-Produkten in der Variante Sortec84	
Abbildung 3.2.1: Systemkosten für einzelne Verpackungsmaterialgruppen im Status quo (ohne Verwaltungskosten Systemträger).....	88
Abbildung 3.2.2: Systemkosten für einzelne Verpackungsmaterialgruppen im optimierten Status (ohne Verwaltungskosten Systemträger).....	90
Abbildung 3.2.3: Systemkosten für einzelne Verpackungsmaterialgruppen für die Variante Sortec (ohne Verwaltungskostenanteil Systemträger).....	91
Abbildung 3.3.1: Struktur des Modellansatzes zur ökobilanziellen Umsetzung der Massenbilanzen.....	96
Abbildung 3.3.2 Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo>A4 hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt)..	114

Inhaltsverzeichnis

Abbildung 3.3.3: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo>A4 hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotoxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). 115

Abbildung 3.3.4: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4 hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). ... 118

Abbildung 3.3.5: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4 hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotoxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). 119

Abbildung 3.3.6: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erhöhten energetischen Wirkungsgrades der MVA auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4..... 121

Abbildung 3.3.7: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erniedrigten Substitutionsfaktors auf den Vergleich zwischen SQ und Bes30/70 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4..... 122

Abbildung 3.3.8: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erniedrigten Substitutionsfaktors auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4..... 123

Abbildung 3.3.9: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss der Bilanzdaten für die rohstoffliche Verwertung in der SVZ für den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4..... 124

Abbildung 3.3.10: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). ... 126

Abbildung 3.3.11: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotoxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). 127

Abbildung 3.3.12: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erhöhten energetischen Wirkungsgrades der MVA auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher	129
Abbildung 3.3.13: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). ...	131
Abbildung 3.3.14: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).	132
Abbildung 3.3.15: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erniedrigten Substitutionsfaktors auf den Vergleich zwischen SQ und Bes30/70 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen.....	134
Abbildung 3.3.16: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erniedrigten Substitutionsfaktors auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen.....	135
Abbildung 3.3.17: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). ...	137
Abbildung 3.3.18: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).	138
Abbildung 3.3.19: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erhöhten energetischen Wirkungsgrades der MVA auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb.....	140
Abbildung 3.3.20: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe so. K. hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). ...	143

Abbildung 3.3.21: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe so. K. hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotoxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).	144
Abbildung 3.3.22: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erhöhten energetischen Wirkungsgrades der MVA auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe so. K.....	146
Abbildung 3.3.23: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). ...	148
Abbildung 3.3.24: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotoxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).	149
Abbildung 3.3.25: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Aluh.-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). ...	153
Abbildung 3.3.26: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Aluh.-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotoxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).	154
Abbildung 3.3.27: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erhöhten energetischen Wirkungsgrades der MVA auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe Aluh.-Vb	156
Abbildung 3.3.28: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). ...	158
Abbildung 3.3.29: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu hinsichtlich der Wirkungskategorien	

Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).	159
Abbildung 3.3.30: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erniedrigten Substitutionsfaktors auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe Aluminium	161
Abbildung 3.3.31: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). ...	163
Abbildung 3.3.32: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).	164
Abbildung 3.3.33: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss des Stahrecycling aus der MVA-Schlacke für den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe WB.....	166
Abbildung 3.3.34: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). ...	168
Abbildung 3.3.35: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).	169
Abbildung 3.3.36: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). ...	173
Abbildung 3.3.37: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).	174

Abbildung 3.3.38: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erhöhten energetischen Wirkungsgrades der MVA auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb	176
Abbildung 3.3.39: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe FKN hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt). ...	178
Abbildung 3.3.40: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe FKN hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).	179
Abbildung 3.3.41: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erniedrigten Substitutionsfaktors auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher	183
Abbildung 4.2.1: Zur Kosten-Nutzenanalyse Status quo	187
Abbildung 4.2.2: Zur Kosten-Nutzenanalyse opt. Status	188
Abbildung 4.2.3: Kosten je kWh eingesparte Energie im Status quo	189
Abbildung 4.2.4: Kosten je kWh eingesparte Energie im opt. Status	190
Abbildung 4.3.1: Systemkosten für Nullvariante und Szenarien EU-45 und EU-25 Status quo	199
Abbildung 4.3.2: Systemkostenmodellierung für unterschiedliche Mengenszenarien	200
Abbildung 4.3.3: Spezifische Produktkosten unterschiedlicher Szenarien	201

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1.1:	Verpackungsmaterialgruppen.....	27
Tabelle 2.1.2:	Durchschnittliche Zusammensetzung von LVP-Sammelgemisch ...	29
Tabelle 2.2.1:	Übersicht über potentielle Einflussfaktoren [HTP/INFA 1999]	31
Tabelle 2.2.2:	Modellkalkulationen zur LVP-Erfassung	38
Tabelle 2.2.3:	Kosten der Sortierung inkl. Entsorgungskosten ohne Verwertungskosten/ -erlöse	50
Tabelle 2.2.4:	Produktspezifikationen für die LVP-Sortierung	51
Tabelle 2.2.5:	Erlöse und Zuzahlungen für die Verwertung von Produkten der LVP-Sortierung.....	55
Tabelle 3.1.1:	Übergreifende Charakterisierung der Produkte.....	62
Tabelle 3.1.2:	Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Folien >DIN A4 bei unterschiedlichen Technologievarianten.....	63
Tabelle 3.1.3:	Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Folien < DIN A4 bei unterschiedlichen Technologievarianten.....	65
Tabelle 3.1.4:	Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Kunststoffflaschen bei unterschiedlichen Technologievarianten.....	66
Tabelle 3.1.5:	Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Kunststoffbecher bei unterschiedlichen Technologievarianten.....	68
Tabelle 3.1.6:	Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für sonstige Kunststoffe bei unterschiedlichen Technologievarianten.....	69
Tabelle 3.1.7:	Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Kunststoffverbunde bei unterschiedlichen Technologievarianten.....	71
Tabelle 3.1.8:	Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für sonst. PPK-Verbunde bei unterschiedlichen Technologievarianten.....	73
Tabelle 3.1.9:	Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für FKN bei unterschiedlichen Technologievarianten	74
Tabelle 3.1.10:	Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Weißblech bei unterschiedlichen Technologievarianten.....	75

Tabelle 3.1.11: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Weißblechverbunde bei unterschiedlichen Technologievarianten.....	75
Tabelle 3.1.12: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Aluminium bei unterschiedlichen Technologievarianten.....	77
Tabelle 3.1.13: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Verbunde auf Alubasis bei unterschiedlichen Technologievarianten	78
Tabelle 3.1.14: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für aluhaltige Verbunde bei unterschiedlichen Technologievarianten.....	79
Tabelle 3.3.1: Übersicht der bilanzierten Optionen	94
Tabelle 3.3.2: Anteil der Verpackungsmaterialgruppen am jährlichen LVP-Gesamtaufkommen.....	95
Tabelle 3.3.3: Zuordnung der verwendeten Datenquellen zu den bilanzierten Prozessen	98
Tabelle 3.3.4: Zusammenstellung der sekundären Produkte und Materialien und der entsprechenden Äquivalenzprozesse (= Gutschriften) sowie des jeweils verwendeten Substitutionsfaktors.....	102
Tabelle 3.3.5: Zuordnung der bilanzierten Äquivalenzprozesse zu den verwendeten Datenquellen	103
Tabelle 3.3.6: Betrachtete Wirkungskategorien	104
Tabelle 3.3.7: Zuordnung der verfügbaren Sachbilanzgrößen zu den Wirkungskategorien	105
Tabelle 3.3.8: Bewertungsvorschlag des UBA [2000] zur ökologischen Gefährdung und Abstand um Umweltziel	107
Tabelle 3.3.9: Grundlagen zur Ermittlung des spezifischen Beitrags – Gesamtemissionen und -verbräuche in Deutschland und die mittlere Belastung durch einen Einwohner pro Jahr.....	108
Tabelle 3.3.10: Gegenüberstellung der Bezeichnungen aus den Massenbilanzen und den Nutzentabellen.....	110
Tabelle 3.3.11: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Kunststofffolien > Din A4.....	112

Tabelle 3.3.12: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo>A4 unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag	116
Tabelle 3.3.13: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Kunststofffolien < Din A4.....	117
Tabelle 3.3.14: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4 unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag	120
Tabelle 3.3.15: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Kunststoffbecher	125
Tabelle 3.3.16 Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag	128
Tabelle 3.3.17: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Kunststoffflaschen.....	130
Tabelle 3.3.18: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag	133
Tabelle 3.3.19: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung der Verpackungsmaterialgruppe Kunststoffverbunde	136
Tabelle 3.3.20: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Betrag	139
Tabelle 3.3.21: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Sonstige Kunststoffe	141
Tabelle 3.3.22: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe so. K. unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag	145
Tabelle 3.3.23: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Verbunde auf Aluminiumbasis (Alu-Vb).....	147
Tabelle 3.3.24: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu-Vb unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag	150
Tabelle 3.3.25: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Aluminium haltige Verbunde	151
Tabelle 3.3.26: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Aluh.-Vb unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag	155

Inhaltsverzeichnis

Tabelle 3.3.27: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Aluminium	157
Tabelle 3.3.28: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag	160
Tabelle 3.3.29: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Weißblech.....	162
Tabelle 3.3.30: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag	165
Tabelle 3.3.31: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Weißblechverbunde	167
Tabelle 3.3.32: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb-Vb unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag	170
Tabelle 3.3.33: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Papierkartonagenverbunde	171
Tabelle 3.3.34: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag	175
Tabelle 3.3.35: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Flüssigkeitskartons	177
Tabelle 3.3.36: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe FKN unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag	180
Tabelle 3.3.37: Verdichtete Darstellung der Ergebnisse des ökologischen Vergleichs von Verwertung und Beseitigung der untersuchten Verpackungsmaterialgruppen	181
Tabelle 4.1.1: Übersicht über in der Diskussion befindlicher Szenarien zur Modifikation der Verpack V.....	185
Tabelle 4.2.1: Zur Herleitung der Mengengerüste zum Szenario VVO.....	192
Tabelle 4.2.2: Zur Herleitung der Mengengerüste der Szenarien EU-45.....	193
Tabelle 4.2.3: Zur Herleitung der Mengengerüste der Szenarien EU-25.....	194
Tabelle 4.3.1: Kalkulationsübersicht für die Szenarien EU 45 und EU-25	197

0 Zusammenfassung

In Folge eines Entschließungsantrages zur Verpackungsverordnung vom 27. August 1998 wurde eine Bund-Länder-Arbeitsgruppe eingesetzt mit dem Ziel, Randbedingungen zu erarbeiten, die dazu führen, dass nur noch ökologisch und ökonomisch sinnvoll verwertbare Verpackungen in das Duale System eingebracht werden.

Mit dem genannten Entschließungsantrag wurde eine seit geraumer Zeit schon geführte politische Diskussion um das Kosten-Nutzen-Verhältnis der LVP-Verwertung über das DSD aufgegriffen. In diesem Kontext wurde vom Umweltbundesamt (Berlin) vorliegende Studie beauftragt, um die Bund-Länder-Arbeitsgruppe mit fachlichen Grundlagen zu unterstützen.

Gegenstand des Vorhabens sind die Erarbeitung und Zusammenstellung von Grundlagendaten zu den verwertungsspezifischen Eigenschaften unterschiedlicher Verkaufsverpackungen sowie die Diskussion und Bewertung einzelner Packmittelsegmente im Hinblick auf die Sinnhaftigkeit ihrer Verwertung im Rahmen verschiedener realistischer technischer Szenarien.

Betrachtungsgegenstand sind hierbei nicht einzelne Verpackungen, sondern Verpackungsmaterialgruppen, die unter dem Kriterium „näherungsweise äquivalentes Verwertungsprofil“ aggregiert sind. Alle Aussagen nehmen Bezug auf gebrauchte Verpackungen mit den hierfür typischen Merkmalen wie Füllgutrestanhaftungen etc.

Die Auswertung und die Bereitstellung von Informationen zur Bewertung erfolgt für jede der Materialgruppen getrennt nach den 3 technologischen Verwertungsoptionen „Status Quo“, „Status Quo optimiert“ und „SORTEC“, die über die gesamte Verwertungskette, ausgehend von der Erfassung über Sortierung und Aufbereitung bis hin zum eigentlichen Verwertungsverfahren bilanziert werden.

Der derzeitige Stand (1998) der betrieblichen Praxis wird in der Verfahrensvariante „Status Quo“ wiedergespiegelt. Unter Annahme einer verbesserten Sortiertechnik gemäß dem Stand der Technik wird in „Status Quo optimiert“ der kurzfristigen Optimierungsmöglichkeit entsprochen. Unter „SORTEC“ wird ein kombiniertes, vollmechanisches Sortier- und Veredlungsverfahren als Zukunftsoption untersucht. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt hierbei nicht auf den Verfahren an sich, sondern in der Klassifizierung der einzelnen Materialgruppen vor dem Hintergrund sich verändernder technischer Rahmenbedingungen bezüglich ihrer ökonomischen und ökologischen Einstufung.

Die grundsätzlichen Verwertungseigenschaften von 13 einzelnen Materialgruppen werden anhand von Massenbilanzen (Wertstoffbilanzen) unter Angabe der Art der erzeugten Endprodukte quantifiziert.

Als übergreifendes Ergebnis dieser Betrachtung kann festgehalten werden, dass

- alle 13 Materialgruppen zum überwiegenden Anteil in Sekundärrohstoffe umgewandelt werden,
- der Grad der Recyclierbarkeit und die jeweils erzeugte Produktqualität nicht nur eine Funktion von Werkstoff und Produktdesign, sondern in hohem Maße technologieabhängig ist,
- eine Rangreihenfolge hinsichtlich der Verwertungseigenschaften nur vor dem jeweiligen technologischen Hintergrund zu formulieren ist,
- das Kriterium „kleinteilig“ als äquivalent mit schlecht verwertbar bei Verfahren nach dem Stand der Technik keine Gültigkeit besitzt,
- soweit Verpackungen mehr oder weniger übergreifend als schlecht verwertbar oder gar als schädlich in der Verwertung zu charakterisieren sind, dies nur individuell im Wesentlichen nach Werkstoffart in Abhängigkeit zum angestrebten Verwertungsweg festzulegen ist.

Übergeordnetes Kriterium zur Charakterisierung der quantitativen und qualitativen Verwertungseigenschaft einer Verpackung vor dem konkreten Hintergrund der jeweiligen technischen Systemausgestaltung ist also die Werkstoffart. Erst in zweiter Linie treten Überlagerungen mit dem Faktor Verpackungsdesign auf. Dies gilt in zunehmendem Maße mit wachsendem Technisierungsgrad der Sortierung/Aufbereitung. Entsprechend ist eine Klassifizierung nach Artikelgruppen nur unter Vorbehalten möglich.

Erstes zentrales Bewertungskriterium ist die ökonomische Klassifizierung der einzelnen Materialgruppen, die verbleibsorientiert anhand spez. Betriebskosten ausgewiesen wird.

Im Überblick aller hier diskutierter technischen Varianten erweist sich die Klassifizierung der einzelnen Materialgruppen nach dem Kostenkriterium technologieabhängig. Dies ist insoweit keine neue Erkenntnis, als dass die verfahrenstechnischen Entwicklungen mit einer allgemeinen Kostensenkung einhergehen. Im Sinne der Aufgabenstellung vorliegender Studie ist aber von besonderer Relevanz, dass wie bei der wertstoffbilanziellen Charakterisierung auch beim Kostenkriterium Verschiebungen in der Rang-

reihenfolge der Materialgruppen zu verzeichnen sind. Eine technologieunabhängige ökonomische Einstufung einzelner Verpackungen ist also allenfalls bedingt möglich.

Bei allen Vorbehalten gegen pauschale Klassifizierungen lassen sich aber übergreifend äquivalente Bereiche definieren. Auch hier gilt wieder, daß Abhängigkeiten in erster Linie werkstoffbedingt zu formulieren sind. So kann festgestellt werden, dass bei fast allen betrachteten 13 Materialgruppen die Beseitigungsoption grundsätzlich kostengünstiger ist als die Verwertungsvariante. Einzige Ausnahme sind die metallischen Verpackungen, die – anders als die übrigen Verpackungen – von den Ergebnisverbesserungen in der Sortiertechnologie kostenseitig profitieren und bereits an der Schnittstelle zur Veredlung die Schwelle zur Wertschöpfung durchschritten haben.

Der obere Kostenbereich wird generell von den Kunststoffverpackungen eingenommen, wobei höhere Veredlungstiefen trotz höherer Wertschöpfung i.d. Regel zu vergleichsweise höherer Kostenbelastung führen. Ausnahmen hiervon treten dann auf, wenn sich die Aufbereitung zum Regranulat oder zum Kunststoffersatzprodukt auf starre Verpackungen aus überproportional vertretenen Kunststoffarten konzentriert (z.B. PE-Flaschen). Da Wertschöpfung bei Kunststoffen erst mit der Veredlung erzielt wird, bildet sich insbesondere im Status quo noch der Effekt ab, dass nicht nur der Grad der Veredlung, sondern auch vergleichsweise bessere Sortierfähigkeit höhere Kosten nach sich ziehen, weil aussortierte Verpackungen anschließend einer kosten trächtigen Verwertung unterzogen werden.

Die Verbundmaterialien orientieren sich in der Kostenbewertung abgesehen von den aluminiumhaltigen Verbunden am jeweiligen Hauptmaterial und verursachen demgegenüber jeweils höhere Systemkosten. Hervorzuheben ist, dass ihre Aggregation nach dem Verbundmerkmal wie in der VerpackV festgeschrieben, unter dem Kostenkriterium wie schon unter bilanziellen Gesichtspunkten wenig sinnvoll erscheint, da Materialgruppen mit höchst unterschiedlichen Eigenschaftsmerkmalen subsumiert werden.

Aluminiumhaltige Verbunde und PPK-Verbunde nehmen eine Sonderstellung ein. Für die erstgenannte Materialgruppe besteht bei allen Verfahren eine Zielzuweisung zum Aluminiumprodukt, so dass sich für die einzelne Verpackung im Detail eine Differenzierung nach dem Aluminiumgehalt ableitet. Bei PPK-Verbunden fehlt im LVP-Bereich die korrespondierende Hauptmaterialgruppe. Übergreifend bildet sich in der Bewertung nach dem Kostenkriterium insbesondere im Vergleich zu dem annähernd stoffgleichen Getränkeverbunden ab, dass mengenmäßig unterproportional vertretene Fraktionen stets spezifisch hohe Aufwendungen auf sich vereinigen.

Die Bewertung hinsichtlich einer ökologisch sinnvollen Verwertung für einzelne Verpackungsmaterialgruppen werden in Form von ökobilanziellen Betrachtungen vorgenommen. Untersucht werden diesbezüglich drei Verwertungsoptionen (Status Quo, Status Quo optimiert, SORTEC) gegenüber einer als Nullvariante bezeichneten derzeitigen Beseitigungsoption (30% Müllverbrennungsanlage (MVA), 70% Deponierung) und zusätzlich einer möglichen Beseitigung zu 100% in der MVA. Hauptgegenstand der ökologischen Bewertung ist die Frage nach der ökologischen Vorteilhaftigkeit der Verwertung des Status Quo im Vergleich zur derzeitigen Beseitigungsoptionen innerhalb einer bestimmten Verpackungsmaterialgruppe.

Als Daten- und Modelliergrundlage dienen die entwickelten Massenbilanzen. Das Ziel der Verwertung von LVP-Abfällen ist die Erzeugung eines Nutzens. In allen Fällen besteht der Nutzen in einem marktgängigen Material oder Produkt, mit dem Güter aus primären Rohstoffen ersetzt werden können. Somit gilt für die Verwertungskette, dass immer bis zu dem Punkt bilanziert werden muss, an dem eine Gleichwertigkeit zu einem Primärrohstoff vorausgesetzt werden kann. Dem ökologischen Aufwand der Verwertung, der in die drei Teilprozesse Sortierung, Verwertung und Herstellung sekundärer Rohstoffe aufgegliedert wird, wird daher der ökologische Aufwand für die Herstellung äquivalenter Primärgüter gegenübergestellt und als Gutschrift zugewiesen. Die Gleichwertigkeit von Materialien trifft allerdings nur innerhalb gewisser Grenzen zu. In vielen Fällen ist eine gewünschte Produktqualität nur durch einen überproportionalen Anteil des Sekundärrohstoffs erreichbar oder der Einsatz nur für bestimmte Produktspezifikationen möglich. Dieser Tatsache wird durch Substitutionsfaktoren <1 Rechnung getragen.

Die ökologische Bewertung erfolgt ebenso wie die Bilanzierung in inhaltlich enger Anlehnung an die Methode der Ökobilanz und den damit verbundenen ISO-Normen ISO 14040-14043. Als Grundlage zur Bewertung dient die Auswertung von acht Wirkungskategorien (Aquatisches und Terrestrisches Eutrophierungspotential, Treibhauseffekt, Naturraumbeanspruchung, Versauerung, Ressourcenbeanspruchung, Fotochemische Oxidationbildung, Humantoxizität). Die Indikatorwerte aller Wirkungskategorien werden miteinander in Beziehung gesetzt und können so gegeneinander abgewogen werden. Als Hilfsmittel für diese Abwägung dient eine Einstufung der Wirkungskategorien hinsichtlich ihrer ökologischen Bedeutung und eine Berechnung der Größenordnung der Indikatorergebnisse im Verhältnis zu der Gesamtbelastung in Deutschland in Form von Einwohnerdurchschnittswerten (EDW).

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung für alle 13 untersuchten Verpackungsgruppen sind in der vorliegenden Arbeit gesondert aufgeführt. Die quantifizierten Nutzen in der Verwertung und der Beseitigung werden tabellarisch dargestellt. Des Weiteren erfolgt eine Wirkungsabschätzung anhand der acht aufgeführten Wirkungskategorien für jede betrachtete Verwertungs- und Beseitigungsoption in grafischer Form. Zur Auswertung der EDW werden die Ergebnisse klassifiziert und relativ zur jeweils besten Verwertungs- oder Beseitigungsoption in Form von Kreuztabellen veranschaulicht.

Aus dem Vergleich einer ausschließlichen Beseitigung der 13 Materialgruppen (Nullvariante: 30 % MVA; 70 % Deponie) mit der Verwertungsoption in Status-Quo-Technologie lassen sich im Grunde drei Aussagen ableiten:

- Die Beseitigungsoption weist bei keiner Verpackungsmaterialgruppe eindeutige ökologische Vorteile gegenüber der Verwertungsoption auf.
- Die metallhaltigen Verpackungsmaterialgruppen Aluminium, Verbunde auf Aluminiumbasis, aluminiumhaltige Verbunde, Weißblech, Weißblech-Verbunde und relativ großformatigen Verpackungen wie Kunststoffflaschen, Kunststofffolien > A4 und Flüssigkeitskartons weisen in der Verwertung eindeutige ökologische Vorteile gegenüber der Beseitigung auf.
- Für die Verpackungsmaterialgruppen Kunststoffbecher, Kunststofffolien < A4, Kunststoffverbunde, sonstige Kunststoffe und mit Einschränkungen Papierkartonagenverbunde sind keine eindeutigen ökologischen Vorteile der Verwertung gegenüber der Beseitigung erkennbar.

Zusätzlich werden in der vorliegenden Arbeit verschiedene Sensitivitätsbetrachtungen angestellt. Hierbei steht die Frage im Zentrum, inwieweit durch das Setzen anderer Rahmenbedingungen – in diesem Fall die gezielte Verbringung einzelner Verpackungsmaterialgruppen in eine MVA mit einem hohen thermischem Wirkungsgrad von 70% – andere Schlussfolgerungen gezogen würden. Dabei zeigt sich, dass ein Vergleich zwischen der Verwertung im Status Quo und der Beseitigung zu 100% in dieser MVA bei den Verpackungsmaterialgruppen, die schon im Standardvergleich nur geringe ökologische Unterschiede aufweisen (Kunststoffbecher, Kunststofffolien < A4, Kunststoffverbunde, sonstige Kunststoffe), ein eindeutiges ökologisches Patt eintritt.

Der in dieser Studie abgebildete Status Quo der Sortiertechnik aus dem Jahr 1998 wird noch außerordentlich stark durch händische Sortierarbeit charakterisiert, die nur in geringem Umfang und schwerpunktmäßig bei den metallhaltigen Fraktionen maschinell unterstützt wird. Die zur Zeit stattfindende Umrüstung der Anlagen auf weitge-

hend mechanisierte Abläufe mit höheren Kapazitäten erfasst Ende 2000 bereits die Hälfte des Mengenstroms. Sie wird, soweit keine anders lautenden politischen Entscheidungen eingreifen, bis 2003 abgeschlossen sein. Bei diesem optimierten Status Quo und mehr noch beim SORTEC-Verfahren wird die Verwertung der Kunststofffraktionen zunehmend von der rohstofflichen in die werkstoffliche Verwertung geleitet. Es stellt sich die Frage, in welchem Umfang die dabei hergestellten Sekundärkunststoffe die werkstofflichen Anforderungen des Marktes mit Blick auf den Ersatz von Primärkunststoffen erfüllen können. Diese Frage kann derzeit noch nicht abschließend beantwortet werden. Für die ökologische Bewertung der zukünftigen Verwertungsoptionen werden in dieser Studie konservative Annahmen zu den möglichen Substitutionsfaktoren getroffen. Dabei zeigt sich, dass im optimierten Status Quo und mehr noch bei der SORTEC-Option die ökologischen Vorteile der Verwertung anwachsen.

In der abschließenden Betrachtung werden nach einer vereinfachten Kosten-Nutzen-Analyse ökologische und ökonomische Kriterien zur Konfigurierung ausgewählter Szenarien eines Systemausschlusses miteinander verknüpft. Als Randbedingungen wurden dabei einmal die Quotenvorgaben der deutschen Verpackungsverordnung, zum anderen die geringeren Vorgaben der EU-Verpackungsrichtlinie berücksichtigt.

Auch hier erweist sich wieder, dass ein Ranking technologieabhängig ist. Als erheblich ist dies jedoch nur für die Kunststoffmaterialgruppen einzuschätzen. Im Wesentlichen bildet sich bei der verknüpften Beurteilung das Ergebnis der ökologischen Bewertung ab, da sich entscheidend die Gutschriften für erzeugte Produkte auswirken. Darüber hinaus wird auch an dieser Stelle ersichtlich, dass zumindest bei konsequenter Heranführung des Systems an den Stand der Technik die Konzentration der Diskussion auf den Systemausschluss kleinteiliger Kunststoffverpackungen ihre Grundlage verliert.

Die gebildeten Szenarien decken in der Diskussion befindliche Varianten einer flächendeckend einheitlichen Systemmodifizierung ab. Regionalspezifische Lösungen wurden vorgabegemäß nicht untersucht.

Bezüglich der zentralen Fragestellung nach möglichen System-Kostensenkungen, insbesondere durch Systemausschluss einzelner Materialgruppen lassen sich aus den Modellierungen folgende Ergebnisse ableiten:

- Auch bei ungeänderter Zusammensetzung der LVP-Fraktion sind schon jetzt Kostensenkungen auf Grund von technischen und vertraglichen Optimierungen ersichtlich, die die Systemkosten von derzeit 2,8 Mrd DM/a auf ca. 2 Mrd DM/a absenken.

- Zusätzlich lassen sich die unmittelbaren Systemkosten durch den Ausschluss einzelner Materialgruppen in geringerem Umfang reduzieren.
- Die Kosten für die im System verbleibenden Verpackungen werden umso stärker steigen, je weitgehender ein Systemausschluss vorgenommen wird.

Insofern ist es bei volkswirtschaftlicher Seheweise entscheidend, wie die jeweils ausgeschlossenen Materialgruppen kostenmäßig belastet werden. Erfolgt eine „virtuelle“ Beaufschlagung mit massenproportionalen Beseitigungskosten, verbleibt ein geringer ökonomischer Profit. Der Entschließungsantrag sieht allerdings vor, dass ausgeschlossene Verpackungen finanziell unattraktiv gemacht werden sollen. Dies impliziert, dass die Kosten für ausgeschlossene höher als für die im System verbleibende Verpackungen anzusetzen sind. Folglich werden die Gesamtkosten der Verpackungsentsorgung als Konsequenz eines partiellen Systemausschlusses steigen.

Offen bleiben bei den vorgenommenen Modellierungen die Frage, inwieweit ein selektiver Systemausschluss angesichts des Trennverhaltens von Systemnutzern praktisch nachvollzogen werden kann sowie die Frage nach der Gestaltung eines Nachweiswesens angesichts zunehmender Komplexität der resultierenden Abgrenzungsproblematik.

1 Einführung

1.1 Veranlassung und Aufgabenstellung

In der Sitzung vom 29.05.1998 hat der Bundesrat der Novellierung der Verpackungsverordnung unter der Maßgabe einer Reihe von Änderungen zugestimmt. Nach Zustimmung des Bundeskabinetts und Veröffentlichung im Bundesanzeiger konnte die novellierte Verpackungsverordnung damit am 27. August 1998 in Kraft treten. Hiermit hat die Bundesregierung zugleich die Umsetzung von zwei Entschließungsanträgen des Bundesrates zur Novelle der Verpackungsverordnung übernommen.

Gegenstand des vorliegenden Forschungsvorhabens ist die Erstellung einer Studie, die die Umsetzung eines dieser Entschließungsanträge unterstützen soll. In diesem Entschließungsantrag wird angeregt, das bestehende System der Einsammlung und Verwertung gebrauchter Verkaufsverpackungen mittelfristig zu überdenken und zu verändern. Insbesondere soll dazu eine Bund-Länder-Arbeitsgruppe eingerichtet werden, die u.a. Randbedingungen erarbeiten soll, die dazu führen, dass nur noch ökologisch und ökonomisch sinnvoll verwertbare Verpackungen in duale Systeme eingebracht werden und dass ökologisch und ökonomisch nicht sinnvoll verwertbare Verpackungen finanziell unattraktiv gemacht werden.

Unter der übergreifenden Aufgabenstellung einer Zusammenstellung und Erarbeitung von Grundlagen und Materialien, die geeignet sind, die Diskussionen in der o.g. Arbeitsgruppe vorzubereiten und zu begleiten, wurde im Februar 1999 die Arbeitsgemeinschaft HTP Aachen und IFEU Heidelberg durch das Umweltbundesamt beauftragt.

Ein zentraler Bearbeitungspunkt war darin definiert, ökologisch und ökonomisch sinnvoll bzw. nicht sinnvoll verwertbare Verkaufsverpackungen zu identifizieren.

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse waren darüber hinaus in Absprache mit dem Auftraggeber konkrete Szenarien für geänderte Systeme zu konfigurieren und hinsichtlich ihrer ökologischen und ökonomischen Auswirkungen zu beziffern.

1.2 Anmerkungen zu Methodik und Aufbau der Studie

Gegenstand des Vorhabens sind die Erarbeitung und Zusammenstellung von Grundlagendaten zu den verwertungsspezifischen Eigenschaften unterschiedlicher Verkaufsverpackungen sowie die Diskussion und Bewertung einzelner Packmittelsegmente im Hinblick auf die Sinnhaftigkeit ihrer Verwertung im Rahmen verschiedener realistischer technischer Szenarien.

Betrachtungsgegenstand sind hierbei nicht einzelne Verpackungen, sondern Verpackungsmaterialgruppen, die unter dem Kriterium „näherungsweise äquivalentes Verwertungsprofil“ aggregiert sind. Bei Bedarf erfolgt eine qualitative Differenzierung bis auf die Ebene einzelner Packmittelsegmente sowie nach weiteren Kriterien wie Formgebung und Größe. Alle Aussagen beziehen sich auf gebrauchte Verpackungen, d.h. insbesondere im Hinblick auf Massenangaben, dass hierbei stets Füllgutreste, Fremdanhaftungen, Feuchte, Etikettierung etc. eingeschlossen sind.

Grundlage aller Betrachtungen ist die realitätsnahe Abbildung des Verbleibs dieser einzelnen Materialgruppen in Form von Wertstoffbilanzen über die gesamte Verwertungskette, ausgehend von der (getrennten) Bereitstellung durch den Endverbraucher über Sortierung und Aufbereitung bis hin zur Rückführung in den Produktionsprozess. Die hierzu erforderlichen Daten wurden aus vorhandenen eigenen Untersuchungsergebnissen der Verfasser ergänzt um einschlägige Bilanzdaten aus dem Mengestromnachweis zusammengestellt bzw. errechnet.

Aufgrund der speziellen Fragestellungen vorliegender Studie wurde ein Teilbereich der Prozessstufe Erfassung, nämlich die Trennung in den Haushalten, nicht in die deskriptiven bilanziellen Betrachtungen eingeschlossen. Ausgangspunkt bzw. „Nullvariante“ bildet hier das etablierte System mit seinen derzeitigen Gegebenheiten. Gleichwohl werden die wichtigsten Gesetzmäßigkeiten der Erfassung dargestellt, da der grundlegende Ansatz des o.a. Entschließungsantrages auf einen Eingriff eben an dieser Stelle abzielt.

Spezifische Wertstoffbilanzen für einzelne Verpackungsmaterialgruppen wurden unter Berücksichtigung kurzfristig und mittelfristig absehbarer verfahrenstechnischer Entwicklungen erarbeitet, so dass neben einer Beurteilung gemessen am Status quo zwei weitere technische Optionen diskutiert werden. Dies ist erforderlich, um dem Anspruch einer Identifikation mehr oder weniger gut verwertbarer Verpackungen auch angesichts sich absehbarer verändernder technischer Rahmenbedingungen gerecht zu werden.

Die ökonomische Bewertung orientiert sich hinsichtlich des Blickwinkels der Betrachtung an den derzeitigen Schnittstellen des Dualen Systems. D.h. insbesondere, dass den Stufen Erfassung und Sortierung eine Kostenbetrachtung und bei der Veredlung, Verwertung und Beseitigung Preise zugrunde gelegt werden.

Wie die ökonomische Bewertung, passt sich auch die ökologische Bewertung der Verwertungswege in ihrer Differenzierung den o.a. Verpackungsmaterialgruppen an. Für jede der Materialgruppen sind die Stoffflüsse entsprechend den technischen Gegebenheiten des Status quo und zweier weiterer technischer Varianten modelliert.

Die Bearbeitung erfolgte in enger Anlehnung an die Methode der Ökobilanz und den damit verbundenen Normen (ISO EN DIN 14040, 14041, 14042, 14043), wobei die bewährten Übereinkünfte bei der Bearbeitung ähnlicher Fragestellungen übernommen wurden. Die Auswertung und die Bereitstellung von Informationen zur Bewertung erfolgt für jede der Materialgruppen. Die Präsentation von Ergebnissen pro Materialgruppe wird unterschieden nach den grundsätzlich technologisch verschiedenartigen Ansätzen (Status quo, 2 innovative technische Varianten) und den sich darin jeweils kontinuierlich veränderbaren Parametern.

Als Vergleichsbasis für die Bewertung der genannten Verwertungsoptionen soll nach Vorgabe des UBA¹ die Nullvariante gewählt werden. Als Nullvariante ist dabei ein Belassen der Leichtverpackungen im Restmüll und eine nachfolgende Beseitigung nach dem im Beauftragungsjahr realisierten Beseitigungssplit zu verstehen.

Mit dem genannten Entschließungsantrag wurde eine seit geraumer Zeit schon geführte politische Diskussion um das Kosten-Nutzen-Verhältnis der LVP-Verwertung über das DSD aufgegriffen. In seiner zusammenfassenden Bewertung des bisherigen Diskussionsstandes kommt dann auch der SRU² zur Empfehlung, kleinteilige Kunststoff-

¹ Leistungsbeschreibung des UBA

² Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, Umweltgutachten 2000 SW.503: „Der Umwelttrat sieht einen erheblichen Reformbedarf für das gegenwärtige System der Verwertung gebrauchter VerkaufsverpackungenKernpunkt des Reformvorschlags ist die Begrenzung der getrennten Erfassung und Verwertung von Kunststoffverpackungen auf großvolumige, gering verschmutzte und weitgehend sortenreine Hohlkörper und Folien. Kleinteilige Kunststoffverpackungen hingegen sollten in Zukunft grundsätzlich im Rahmen der kommunalen Restmüllentsorgung erfasst und in Müllverbrennungsanlagen energetisch verwertet werden.“

verpackungen in Zukunft grundsätzlich im Rahmen der kommunalen Restmüllentsorgung in Müllverbrennungsanlagen zu beseitigen.

Der Bedarf nach Informationen hinsichtlich einer ökologischen Einschätzung dieser Option war damit schon zu Beginn des Projektes absehbar, zumal ja auch die TA-Siedlungsabfall in naher Zukunft hier klare Rahmenbedingungen vorgibt. Die Auftragnehmer beschlossen daher, sich nicht allein auf eine Bilanzierung des derzeitigen Beseitigungsmixes (Deponie und MVA) zu beschränken, sondern über den beauftragten Rahmen hinausgehend eine 100% Beseitigung in der MVA zu bilanzieren.

Der Aufbau der Studie wurde angesichts der Komplexität des Themas dreigeteilt angelegt.

Der erste, allgemeine Teil gibt einen Überblick über das gesamte betrachtete System (Erfassung, Sortierung, Veredlung, Verwertung) einschließlich der Kosten, ohne nach einzelnen Verpackungsmaterialgruppen zu differenzieren. Hier werden allgemein geltende Randbedingungen, Einflussfaktoren und deren Wirkungsmechanismen diskutiert.

In einem zweiten, speziellen Teil werden die spezifischen Stoffbilanzen entwickelt und so die Wege einzelner Verpackungsabfälle nachvollziehbar gemacht. In der abschließenden Bewertung dienen diese spezifischen Daten als Grundlagen der ökonomisch-ökologischen Einstufung der einzelnen Verpackungsabfälle.

Der dritte Teil umfasst die Modellierung von Szenarien, die bei Systemausschluss derjenigen Verpackungsabfälle erwartet werden können, die unter den zugrundegelegten Kriterien die vergleichsweise niedrigsten Einstufungen erfahren.

Vorgabegemäß wird eine Reduzierung bei der Systemzuweisung nur insoweit vorgenommen, dass die Schwellenwerte der EU-Verpackungsrichtlinie an den quantitativen Systemerfolg der getrennten Verpackungsentsorgung eingehalten werden.

2 Allgemeiner Teil

2.1 Definitionen und Aufkommen der untersuchten Verpackungsmaterialgruppen

Die Verwertungseigenschaft einer Verpackung ist eine Funktion ihrer Materialbeschaffenheit im Hinblick auf die für die Recyclingtechnologie bedeutsamen physikalischen oder stofflichen Parameter. Solche Parameter sind beispielsweise Form, Farbe, Größe, elektrische und magnetische Eigenschaften, Verschmutzungsgrad, Stoffdichte, chemische Zusammensetzung etc.

Einzelne Verpackungen detailscharf abzubilden ist bei der Vielzahl von Ausprägungen bezüglich der genannten Parameter nicht möglich. Es ist somit notwendig, geeignete Gruppierungen vorzunehmen, auf deren Grundlage eine möglichst durchgängige Beschreibung vorgenommen werden kann.

In der derzeitigen Entsorgungspraxis des Dualen Systems erfolgt die Zuweisung einer Verkaufsverpackung zu einem Verwertungspfad idealerweise anhand von Artikelgruppen. Definitionen und Abgrenzungen dieser Artikelgruppen finden sich in den DSD-Produktspezifikationen [Uhlig 1993], die seit 1993 im Wesentlichen unverändert Bestand haben.

Nicht kongruent zu den Produktspezifikationen ist die Einteilungssystematik von Aufkommens- oder Verbrauchsstatistiken, die sich insbesondere an packstoff- oder packmittelproduktionsspezifischen Gesichtspunkten orientiert.

Da Gegenstand dieser Studie die Klassifizierung realer Verpackungsabfälle ist, sind die Verpackungsmaterialgruppen in erster Hierarchiestufe nach dem Kriterium der Produktspezifikationen geordnet. Innerhalb der einzelnen Produktspezifikationen sind allerdings unter verwertungsspezifischen Aspekten noch evidente Unterschiede zu beachten. Daher werden soweit wie möglich zusätzliche Differenzierungen vorgenommen, die u. a. auch eine Abgrenzung von Rein- und Verbundanteilen sicherstellen, wie sie nach dem Wortlaut der Verpackungsverordnung erforderlich ist.

Die gebildeten Materialgruppen und deren Beschreibung sind der nachfolgenden Tabelle 2.1.1 zu entnehmen. Glas-, Papier-, Pappe- und Kartonverpackungen sowie nicht-quotierte Verpackungen sind vorgabegemäß nicht Gegenstand dieser Studie. Alle aufgelisteten Materialgruppen sind der LVP-Fraktion zuzuordnen.

Allgemeiner Teil

Nr.	Verpackungs-materialgruppen	GVM Packmittelsegmente	Beispiele	Zuweisung nach DSD-Produktspezifikation		
1	Folien > DIN A4	Halbstarre Folien; Säcke; Tragetaschen und Tragebeutel; Ladensicherung; Bündelung; Folien, Beutel	Kunststofffolien, z.B. Tragetaschen, metallisierte Folien, Folien von der Fleisch- und Wursttheke, Tüten, Versandhüllen aus Folie, nicht enthalten sind Säcke und Beutel für Wertstoffsammlung und Müllbeutel		Kunststoff-Folienfraktion	
2	Folien < DIN A4		wie 1 Kriterium < DIN A4	Mischkunststofffraktion		
3	Flaschen < 5 l	Flaschen/geblasene Dosen; Kanister/Kannen	blasgeformte Kunststoffflaschen < 5 l, z.B. Waschmittelflaschen, Shampooflaschen u.a.		Hohlkörper Kunststofffraktion	
4	Becher < 1 l	Becher	Kunststoffbecher < 1 l, z.T. mit Al-Deckel, ohne Papiermantel, z.B. Joghurtbecher, Margarinebecher, Eisschalen	Mischkunststofffraktion	evtl. Becherfraktion	
5	EPS (Styropor)	Schaumstoffe	Verpackungen aus weißem EPS	Mischkunststofffraktion	evtl. EPS-Fraktion	
6	sonstige Kunststoffe	Tuben; gespritzte Dosen; Kästen/Steigen; Paletten; Einweggeschirr; Verschlüsse; Schnappdeckel; Gewebe; (Kunststoff/Kunststoff-Verbunde)	z.B. Blister, Servicebesteck, Strohhalme, Obst- und Gemüsebehältnisse, Pflanztöpfe, die beim Kauf einer Pflanze um die Erdballen sind	Mischkunststofffraktion		
7	Formkörper > 5 l	Fässer/Hobbocks; gespritzte Eimer	Behältnisse aus reinem Kunststoff, z.B. Mayonnaise, Kanister für Lebensmittel (Essig, Speiseöl)	Mischkunststofffraktion		
8	Aluminium rein	Dosen; Deckel; Tuben, Schalen; Folien und Bänder	Alu - Dosen: Konservendosen, Getränkedosen usw., Alu - Folie		Aluminiumfraktion	
9	Weißblech rein	Dosen, Eimer/Hobbocks; Kanister/Kannen; Verschlüsse ohne Dichtmasse	Konservendosen, Deckel ohne Dichtmasse			Weißblechfraktion
10	Flüssigkeitskartons	Flüssigkeitskartons mit Alu; Flüssigkeitskartons ohne Alu	Getränk kartons und Nachfüllkartons für Reinigungsmittel (z.B. Tetra-Pak, Combibloc)			Verbundfraktion
11	Alu-Verbunde (= Verbunde auf Alubasis)	Beschichtete Alu - Schalen	Alu - Schalen: z.B. Schalen für Tiernahrungsmittel (z.B. Sheba, Wiskas, Caesar)		Aluminiumfraktion	
		Aluminium-Aerosoldosen	Spraydosen (auch mit Kunststoffdüse)		Aluminiumfraktion	
		Laminattuben	Zahncremetuben aus Kunststoff mit Alu - Folie innen (zum Quetschen)		Aluminiumfraktion	
		Aluverschlüsse mit Dichtmasse; Flaschenkapseln mit PE-Anteil; Verschlussbänder mit Beschichtungen, Pharma-Durchdrückpackungen	z.B. Verschlüsse für Getränke (Mineralwasser), Tablettenverpackung und Kaugummiverpackung (Durchdrückstreifen)		Aluminiumfraktion	
12	Kunststoff-Verbunde (Alu-frei)	Kunststoff/Kork-Verbunde	Sektorkorken aus Kunststoff mit innenliegendem Korken	Mischkunststofffraktion		
		Folien mit Etikett	Wurstverpackungen mit Etikett (Salami in Folie), nicht enthalten sind beispielsweise Frischfleischverpackungen aus der SB-Theke und Wurstverpackung von der Fleischtheke mit angetackertem Preis	Mischkunststofffraktion		
13	PPK-Verbunde (Alu-frei)	Karton/Kunststoff-Becher	z.B. Joghurtbecher aus Karton mit Kunststoff beschichtet,			
		Sonstiger Karton mit Kunststoff	z.B. Tiefkühlverpackung, nicht enthalten sind Karton-EW-Geschirr			sonstige Verbunde PPK
		Papier mit Kunststoff	z.B. Cornflakesbeutel, Eiswickler, Nachfüllbeutel für Waschpulver			
		Wachspapier	Ladenverpackung für Wurst, Käse, Fleisch usw.			
14	Aluhaltige Verbunde PPK-Verbunde Alu-haltig	Kombidosen	z.B. Nesquikdosen, Gewürzdosen, Knack und Back		Aluminiumfraktion	
		Sonstiger Karton mit Alu	z.B. Lachsverpackungen aus Karton		Aluminiumfraktion	
	Kunststoff-Verbunde Alu-haltig	Papier mit Alu	z.B. Suppentüten, Zwiebackbeutel, Zigarettenpapier, Butterpapier		Aluminiumfraktion	
		Verbundfolie mit Alu	z.B. Kaffeetüte ohne Papiermantel, Fertiggetränkpulvertüten		Aluminiumfraktion	
		sonstige Kunststoff/Alu-Verbunde	z.B. Lippenstifte mit Alu - Hülse		Aluminiumfraktion	
15	Weißblech-Verbunde	Weißblech-Getränkedosen mit Aludeckel, Weißblechverschlüsse mit Dichtmassen	Getränkedosen mit Aluminiumdeckel, Kronkorken, Bajonettverschlüsse			Weißblechfraktion
		Aerosoldosen aus Weißblech	Weißblech-Spraydosen (auch mit			fraktion
16	trennbare Kombinationsverpackungen	Kunststoff/Weißblech	Obst und Gemüse netze mit Metallclips			
		Verbunde Papier und Alu/Papier	Zigaretten schachtel mit Kunststoff folie			
		Verbunde Papier+Kunststoff+Alu/Papier	z.B. Prinzenrolle			
		Verbunde Papier und Kunststoff	z.B. Keksschachtel bestehend aus Karton außen und Blister innen, Lättabecher			

Tabelle 2.1.1: Verpackungsmaterialgruppen

Tabelle 2.1.1 ist so aufgegliedert, dass für fast jede Materialgruppe eine Rückführung auf die verbrauchsstatistische Einteilung nach GVM³ ebenso möglich ist, wie ein Zusammenfassen nach dem Kriterium der derzeitigen verwertungsspezifischen Zuweisungen über die DSD-Produktspezifikationen. Zusätzlich sind Artikelbeispiele angeführt.

Sowohl die ökonomischen als auch die ökologischen Bewertungen sind im nennenswerten Maße abhängig vom absoluten Aufkommen bzw. dem Anteil einer Verpackungsmaterialgruppe am Sammelgemisch. Zum absoluten Aufkommen am LVP-Sammelgemisch sind zuverlässige Daten den Mengenstromnachweisen zu entnehmen. Um die Zusammensetzung zu beziffern, ist diese Quelle allerdings ungeeignet, da weder die notwendige Differenzierung gemäß o. g. Materialgruppenkatalog noch Ausgrenzungen von stoffidentischen Nichtverpackungen, Verunreinigungen etc. unmittelbar aus den Input- und Outputstatistiken des Mengenstromnachweises vorgenommen werden können.

Zu Grunde gelegt werden daher Daten aus Primärerhebungen. Die Verteilung der eigentlichen Verkaufsverpackungsanteile erfolgte nach den letzten bundesweit angelegten Stichprobenuntersuchungen 1997 / 98 [HTP / INFA 1999]. Da diese Untersuchungen eine Schwerpunktsetzung in problematischen Erfassungsgebieten hatten, wurde bezüglich der anzusetzenden Nicht-Verpackungsanteile auf Vorläuferstudien [Christiani 1997] zurückgegriffen. Die ermittelten Ergebnisse wurden einer Plausibilitätsprüfung anhand von geeigneten Leitparametern des Mengenstromnachweises unterzogen.

Tabelle 2.1.2 weist die weiteren Berechnungen zugrunde gelegte LVP-Zusammensetzung aus. Das Gesamtaufkommen an LVP-Sammelgemisch lag in den letzten 3 Jahren ohne nennenswerte Steigerungsraten bei ca. 2 Mio. t/a (24 bis 25 kg/E x a), so dass zur Bezifferung der ebenfalls in Tabelle 2.1.2 ausgewiesenen spezifischen Jahresfrachten von dieser Grundmenge ausgegangen wurde.

³Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung, Wiesbaden

Allgemeiner Teil

LVP - Sammelgemisch Zusammensetzung			
Stoffgruppe	Abkürzung	Anteil	Absolut
Weißblech	Wb	17,5%	350.000 t/a
Weißblechverbunde	Wb-Vb	4,7%	94.000 t/a
Aluminium	Alu	1,6%	32.000 t/a
Aluminiumverbunde	Alu-Vb	0,8%	16.000 t/a
Aluminiumhaltige Verbunde	Aluh.-Vb	1,2%	24.000 t/a
Flüssigkeitskartons	FKN	7,9%	158.000 t/a
Kunststofffolien > DIN A4	K.-Fo>A4	7,9%	158.000 t/a
Kunststofffolien < DIN A4	K.-Fo<A4	4,5%	90.000 t/a
Kunststoffflaschen	K.-Flaschen	5,0%	100.000 t/a
Kunststoffbecher	K.-Becher	5,6%	112.000 t/a
sonstige Kunststoffe	so.K.	5,2%	104.000 t/a
Kunststoffverbunde	K.-Vb	0,8%	16.000 t/a
Papier-Pappe-Kartonagen-Verbunde	PPK-Vb	1,2%	24.000 t/a
Formkörper >5l	Hk>5l	0,6%	12.000 t/a
Expandiertes Polystyrol	EPS	1,3%	26.000 t/a
trennbare Kombinationsverpackung		2,3%	46.000 t/a
Summe LVP-Verpackungen		68,1%	1.362.000 t/a
Kunststoffe		4,3%	86.000 t/a
Schaumstoff		0,1%	2.000 t/a
Fe-Metalle		1,0%	20.000 t/a
Alu-Metalle		0,3%	6.000 t/a
Summe stoffgleiche Nichtverpackungen		5,7%	114.000 t/a
PPK-Verpackungen		6,1%	122.000 t/a
Druckerzeugnisse		5,3%	106.000 t/a
Glas		3,5%	70.000 t/a
nicht-quotierte Verpackungen		0,1%	2.000 t/a
Summe nicht zugelassene Wertstoffe		15,0%	300.000 t/a
Störstoffe und Unrat		11,2%	224.000 t/a
Summe		100,0%	2.000.000 t/a

Tabelle 2.1.2: Durchschnittliche Zusammensetzung von LVP-Sammelgemisch

2.2 Charakterisierung der einzelnen Systemebenen

2.2.1 Getrennte Erfassung

Das derzeitige durchschnittliche Ergebnis der getrennten Wertstofferrfassung ist hinsichtlich der absoluten Größenordnung bereits im Zusammenhang mit Tabelle 2.1.2 charakterisiert. Im Mittel beträgt bei einer Sammelmenge von ca. 2.000.000 t/a aus den gelben Erfassungssystemen der Anteil systemkonformer Verkaufsverpackungen etwa zwei Drittel. Weitere ca. 5 - 6 Prozentpunkte entfallen auf stoffgleichen Nichtverpackungen aus Metall oder Kunststoff, die gemäß den Abstimmungserklärungen ebenfalls als systemkonform einzustufen sind.

Die Fehlbeschickungsrate beträgt also knapp unter 30 %. Die in Tabelle 2.1.2 vorgenommene Differenzierung der Fehlwurfanteile in nicht systemzugelassene Wertstoffe einerseits sowie Störstoffe und Unrat andererseits signalisiert die Komplexität der Vorgänge beim Systemnutzer; in Summe ist eine verhältnismäßig hohe Verunreinigung systemimmanent.

Hierfür sind vornehmlich zwei Ursachen anzuführen. Zum einen zeichnen sich Leichtverpackungen durch außerordentlich geringe Einzelgewichte bei niedrigem Gesamtaufkommen aus, so dass sich einzelne Fehleinträge anderer Haushaltsabfälle in einer massenanteiligen Darstellung bedeutend gravierender abzeichnen, als dies bei der Erfassung anderer Altstoffe wie Glas oder Papier der Fall ist.

Zum anderen handelt es sich bei der LVP-Erfassung um ein Mehrkomponenten-Sammelsystem, das auch in anderer Ausprägung (z.B. Grüne Tonne) erhöhte Störstoffanteile aufwies, was u.a. auf die Komplexität der Trennaufgabe für den Systemnutzer zurückzuführen sein dürfte.

Anhand der ausgewiesenen Zahlen zu Aufkommen und einzelnen Verpackungsanteilen lassen sich bedingt auch Ableitungen zu Erfassungsquoten formulieren.

Wie einleitend angeführt, ist die Systemebene Erfassung im Rahmen dieser Studie aber nicht Gegenstand einer massenbilanziellen Betrachtung; d. h. Anteile, die seitens der Endverbraucher im zur Zeit bestehenden System nicht dem Wertstoffsammelsystem, sondern dem Restmüll zugeordnet werden, bleiben unberücksichtigt. Methodisch gesehen, wird im weiteren also keine absolute ökonomische oder ökologische Bewertung für einzelne Verpackungen vorgenommen, sondern eine Differenz-Betrachtung, gemessen am Status quo der Erfassung.

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde dieser methodische Ansatz gewählt, da

- er der Zielsetzung des Entschließungsantrages entspricht, der explizit die Veränderung des bestehenden Systems thematisiert sowie
- Aussagen zur Sinnhaftigkeit der Verwertung unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten nicht in einem Bilanzrahmen sinnvoll sind, der die Alternative einer Beseitigung über den Restabfall bereits partiell umfasst.

Der Entschließungsantrag des Bundesrates zielt aber auf eine Änderung der Erfassungssystematik ab, so dass die wesentlichen Gesetzmäßigkeiten der getrennten Erfassung zumindest erörtert werden sollen.

2.2.1.1 Einflussfaktoren und allgemeine Abhängigkeiten

Tabelle 2.2.1 gibt einen vereinfachten Überblick über grundlegende Abhängigkeiten. Hier werden die systemzugelassenen Verpackungsanteile (Qualität) und die Erfassungsquote (Quantität) zunächst summarisch behandelt.

Verkürzt sollen einige prägnante Einflussfaktoren hervorgehoben werden, die in Entscheidungsprozessen Berücksichtigung finden müssen.

Einflußparameter für Qualität und Quantität des LVP-Sammelgemisches	
Siedlungs- u. Bevölkerungsstruktur	
Grobstruktur Stadt/Land	++
Bebauungsstruktur	++
Anschluß Industrie u. Gewerbe	+
sozio-ökonomische Faktoren	
Sozialstruktur	++*
Mentalität	+*
Restmüllfassung	
Behältergröße	○
Abfuhrhythmus	○
Gebührensysteem	○
Wertstofffassung	
LVP - System	++
PPK - Erfassung	++
Biotonne	—
Glas	○ +*
<small>++ = deutlicher Einfluß gegeben, + = Einfluß gegeben, - = kein Einfluß nachweisbar, ○ = nur in Einzelfällen darstellbar, * = Einfluß angen., im Rahmen des Projektes nicht stat.nachgewiesen</small>	

Tabelle 2.2.1: Übersicht über potentielle Einflussfaktoren [HTP/INFA 1999]

Die erste signifikante Einflussgröße ist die **Siedlungsstruktur**. Grundlegend für viele weitere Betrachtungen ist die Unterscheidung in ländliche und städtische Siedlungsstrukturen. Die Verpackungspotentiale (Verbrauch) sind in städtischen Siedlungsstrukturen deutlich höher als in ländlichen Regionen; gleiches gilt hinsichtlich der korres-

pondierenden Bebauungs- und Gebietsstrukturen. Entgegengesetzt verhalten sich Erfassungsquote und Gemischqualität.

Darüber hinaus sind in ländlichen Regionen sogar höhere Erfassungsmengen (netto, d.h. lediglich LVP-Anteile) zu verzeichnen. Auch wirken sich hier abfallwirtschaftliche Parameter grundsätzlich anders aus als in städtischen Strukturen. Während sich in städtischen Strukturen Einflüsse abfallwirtschaftlicher Parameter (Parallelerfassungssysteme, Gebühren) eindeutig nachweisen lassen, werden diese in ländlichen Gebieten durch nicht quantifizierbare individuelle Faktoren (Bevölkerungsstrukturen, Mentalität etc.) überlagert, so dass auch z.B. bei mutmaßlich ungünstigen Voraussetzungen vereinzelt sehr gute Ergebnisse festzustellen sind.

Innerhalb städtischer Gebiete sind insbesondere hochverdichtete Bebauungsstrukturen als problematisch einzustufen. Für die Großwohnanlagen hat sich die vielverbreitete These, dass hier lediglich geringe LVP - Qualitäten anzutreffen sind, allerdings nicht bestätigt. Als unbefriedigend erwiesen sich im Zuge differenzierter Analysen entweder Reinheit oder Erfassungsquote.

Die Art und Intensität der **Papierfassung** wirken unmittelbar auf den Papiergehalt im LVP-Sammelgemisch. Bei komfortablen Papierfassungssystemen lassen sich niedrigere Papiergehalte im Sammelgemisch unabhängig vom LVP-Erfassungssystem nachweisen. Extrem hohe Verunreinigungen der LVP-Sammelware mit graphischen Papieren, die insbesondere bei LVP-Behälterfassung auftreten können, lassen sich stets eindeutig auf ein unzureichendes Angebot zur Altpapierfassung zurückführen.

Dem **Restmüllerfassungssystem** (d.h. Behälterart, Behältergrößen, Abfuhrintervall) kann isoliert keine eindeutige Auswirkung auf die Qualität und Quantität des LVP-Sammelgemisches zugeschrieben werden. Zu beachten sind allerdings mittelbare Zusammenhänge, wie sie bspw. durch spezielle Ausgestaltung der Restmüllerfassung infolge von Gebührenmaßstäben gegeben sind.

Am Beispiel des Parameters „**Gebührensysteem**“ lassen sich Überlagerungen von Einflussfaktoren exemplarisch aufzeigen; Gebührenhöhe, aktuelle Gebührenstruktur, Sozialstruktur und viele andere infrastrukturelle Einflüsse wirken so individuell, dass sich Einflüsse nur in Einzelfallbetrachtungen nachweisen lassen.

Entgegen der vielverbreiteten Meinung, verursacherbezogene Gebührenmaßstäbe führten immer zu gravierenden Verschlechterungen der Ergebnisse der getrennten Wertstofffassung, weisen die Ergebnisse von Untersuchungen der Verfasser nach einer Umstellung der Gebühren immer auf einen direkten Einfluss auf das Restmüll-

aufkommen als auch auf die positiven Effekte bezüglich der erfassbaren Wertstoffmengen hin.

In jedem Einzelfall von neun untersuchten Umstellungsvarianten konnte eine Steigerung der Erfassungsmengen erzielt werden. Erfolgte die LVP-Erfassung über Sacksammlung, lässt sich aufzeigen, dass eine Umstellung des Gebührensystems auf verursachergerechte Gebühren keine Auswirkung auf die Qualität hat; bei allen anderen LVP-Systemen waren aber Einbußen bei der LVP-Qualität zu verzeichnen. Bei parallel steigender Beteiligungsquote wird die Qualität grundsätzlich nicht das gleiche Niveau halten können wie bei einem sehr niedrigen Anschlussgrad, so dass eine leichte Abnahme der Qualität bei gleichzeitig höheren Sammelmengen somit nicht als unmittelbares Folgeproblem von Gebührenanreizen einzustufen ist.

Dabei darf aber nicht übersehen werden, dass bei ungünstigen Konfigurationen massive qualitative Einbrüche auftreten, wie an Einzelbeispielen aufgezeigt werden kann.

Die unterschiedlichen **Erfassungssysteme** für Verkaufsverpackungen müssen vor dem Hintergrund der Notwendigkeit der in der Verpackungsverordnung vorgeschriebenen Pflicht zur Abstimmung mit den Gebietskörperschaften gesehen werden. Hieraus haben sich vielfältigste Lösungsansätze der bürgernahen Erfassung von Leichtstoffverpackungen entwickelt.

Mit Blick auf alle Verpackungsmaterialgruppen lassen sich an die 40 unterschiedliche Erfassungsvarianten beschreiben; für die Leichtstoffverpackungen handelt es sich hierbei im Wesentlichen um:

- Sack
- Behälter 120 l, 240 l und größer
- Mehrkammerbehälter (MEKAM in verschiedenen Kombinationen)
- kombiniertes Angebot Sack/Behälter
- Depotcontainer
- Wertstoffhof
- Beutel als Vorsortierangebot in Kombination mit Behältersystem
- Mischformen

Die Entscheidung für die jeweilige Systemvariante erfolgt unter sehr spezifischen und betriebsökonomischen Bedingungen der jeweiligen Entsorger und Vertragspartner vor Ort. Eine Optimierung örtlicher abfallwirtschaftlicher Maßnahmen erfolgt häufig **nicht** im Sinne einer abfallwirtschaftlichen Integration bzw. Systemoptimierung im LVP-Bereich.

Im Vergleich der wichtigsten Erfassungssysteme Sack und Behälter liefert erstgenannte deutlich bessere Gemischqualität unabhängig von der Gebietsstruktur. Im Mittel differiert die Reinheit in den untersuchten Fällen zwischen den beiden grundlegenden Varianten um ca. 20 Prozentpunkte. Ein Vorteil der Behältererfassung hinsichtlich der Netto-Erfassungsmenge ist zumindest für unverdichtete Bebauungsstrukturen nicht gegeben. Im übrigen zeigt sich die Sacksammlung deutlich stabiler bei ungünstigen abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

Zur Anpassung auf verdichtete Bebauungsstrukturen wurden „Beutel im Behälter“, und haushaltsnahes „hochverdichtetes Bringsystem“ als weitere LVP-Erfassungsvarianten eingeführt. Während die erstgenannte Variante insbesondere den Komfort innerhalb der Wohnungen erhöhten und zu einer höheren Akzeptanz führten, zeichnete sich für das „hochverdichtete Bringsystem“ die Tendenz ab, dass ähnliche Qualität und Quantität wie bei der Sacksammlung in vorstädtischen Gebietsstrukturen erzielt werden können, wenn alle Fraktionen, einschließlich Restmüll, in das System integriert werden. Die beiden genannten Systemvarianten, die sich einheitlich dadurch auszeichnen, dass sie bei geeigneter Ausgestaltung gezielt den besonderen gebietsstrukturellen Gegebenheiten Rechnung tragen, bergen erhebliche Optimierungspotentiale.

2.2.1.2 Verpackungsspezifische Erfassungsquoten und Bewertung der Selektivität der Erfassung

Eine gesonderte Betrachtung im Zusammenhang mit der speziellen Fragestellung vorliegender Studie verdient die Fragestellung, ob einzelne Verpackungen bereits durch die Haushalte von der Verwertung ausgeschlossen werden, indem sie im Wesentlichen dem Restabfall zugeordnet werden. In früheren Untersuchungen zur Einführung des Dualen Erfassungssystems wiesen Ergebnisse häufig auf unterschiedliche Erfassungsquoten in Abhängigkeit der Materialart hin (Christiani, 1997). So wurden generell die höchsten Erfassungsquoten für Weißblech ermittelt, das zum einen als einzige unter den LVP-Materialgruppen bereits in der kommunalen Wertstofferrfassung eine gewisse Tradition aufwies und zum anderen im Haushalt in Form einiger weniger, in der Regel gering verunreinigter Artikel anfällt. Am unteren Ende rangierte stets Aluminium, dessen Verwendung sich auf den bundesdeutschen Markt vorwiegend auf dem Sektor von Klein- und Verbundverpackungen für leicht verderbliche Lebensmittel erstreckt. Auf den ersten Blick kann hier ein differenziertes Trennverhalten der Haushalte bezüglich der einzelnen Materialarten angenommen werden.

Bei eingehender Betrachtung zeigt sich hingegen, dass vielmehr Faktoren wie Art des Füllguts, Restanhaftungen, Anfallstelle im Haushalt etc. Einfluss auf die jeweils individuellen Entscheidungen beim Systemnutzer für die Zuweisung zu Restmüll oder Wertstoffsammlung nehmen, so dass die Materialart ein nachrangiges Kriterium aus der Sicht der Verbraucher darstellt. Als plakatives Beispiel sei hier die verunreinigte Fischdose angeführt, die unabhängig von der Materialart immer eher im Restmüll als im LVP-System entsorgt wird.

Durch neuere Untersuchungen wird dieses diffuse Bild bezüglich materialspezifischer Präferenzen bei der Trennung in den Haushalten bestätigt.

Abbildung 2.2.1 zeigt eine Auswertung der in 1997/98 durchgeführten kombinierten -/LVP-Sortieranaysen, die eine unmittelbare Messung von Erfassungsquoten für die untersuchten Haushalte ermöglichen. Zum Zweck einer ganzheitlichen Darstellung wurden die Ergebnisse jeweils auf die Erfassungsquote für die Materialgruppe Weißblech normiert.

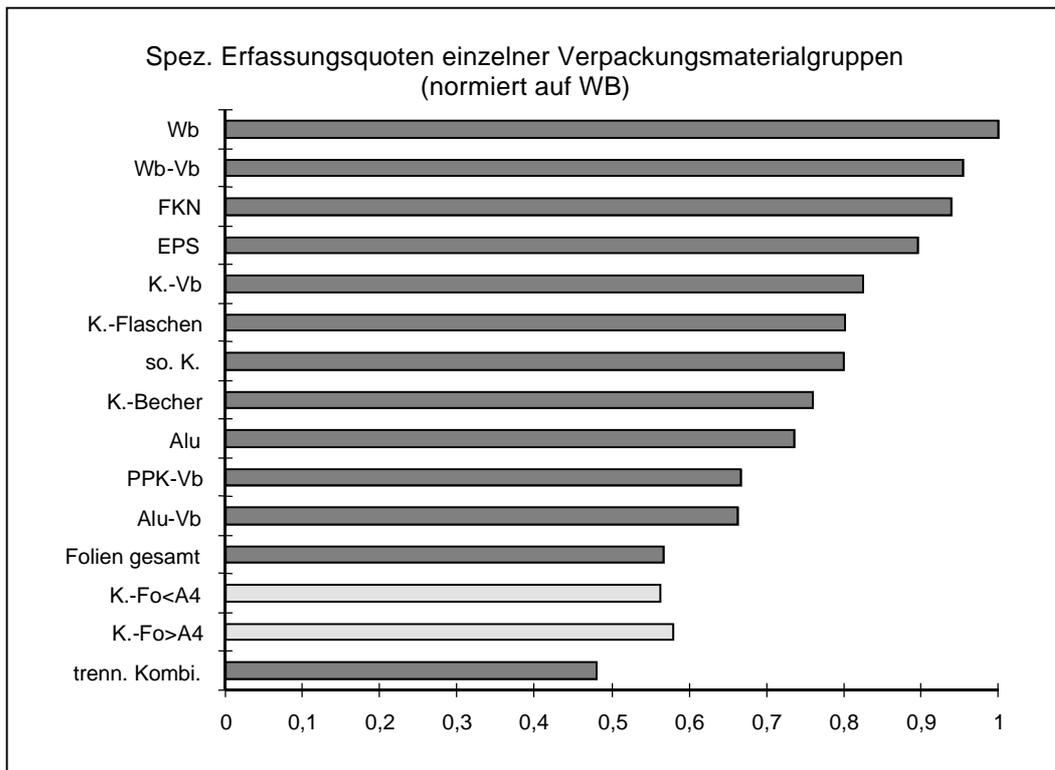


Abbildung 2.2.1: Spezifische Erfassungsquoten in vergleichender Darstellung gemäß Auswertung aus [HTP/INFA 1999]

Würde die Darstellung weniger differenziert in Obergruppen Weißblech, Verbund-, Kunststoff- und Aluminiumverpackungen erfolgen, zeigte sich auch hier wieder eine

Hierarchie in der Reihenfolge der Aufzählung. Eine unmittelbare Kausalität zwischen Materialart und Grad der Erfassung kann aber auch anhand von Abbildung 2.2.1 nicht hergeleitet werden. So werden bspw. aluhaltige Verbunde (Kaffeetüte etc.) eher der Wertstoffsammlung zugewiesen als Aluminiumverpackungen, obgleich letztgenannte durch die Systemnutzer nicht vom Weißblech zu unterscheiden sind. Offensichtlich spielt auch die Größe der Verpackung keine unmittelbare Rolle. So we - und Kleinfolien keinen Unterschied bezüglich der spezifischen Erfassungsquote auf.

Im Hinblick auf den impliziten Ansatz des Entschließungsantrages des Bundesrates, an der Schnittstelle der angeschlossenen Haushalte nicht sinnvoll verwertbare Verpackungen von der Erfassung auszuschließen, sind wesentliche Randbedingungen genannt und bei einer praktischen Umsetzung zu beachten. Die bisherigen Erfahrungen mit der getrennten Erfassung lassen sich zusammenfassend eben dahingehend interpretieren, dass

- sich die Systemnutzer nur bedingt an den Systemvorgaben orientieren,
- die Beschickung der Wertstoffsammlung eher nach subjektiver werkstofflicher Zuordnung als nach Zuweisung des Systemträgers erfolgt, hierbei aber
- das Ergebnis der Wertstofferrfassung einer Vielzahl individueller Faktoren unterliegt,
- die Zuweisungskriterien für den durchschnittlichen Systemnutzer offensichtlich bereits aktuell als sehr anspruchsvoll einzustufen sind,
- Steuerungsmöglichkeiten zwar gegeben sind, allerdings einer Vielzahl von Ab - n - glichkeiten und Überlagerungen unterliegen.

Bereits heute ist de facto eine gewisse Selektivität bei der Zuordnung zu Restmüll- oder Wertstofferrfassung nach subjektiven verwertungsspezifischen Kriterien zu unterstellen, wobei Praktikabilitäts- und Hygieneaspekte als überlagernde Einflussfaktoren eine Rolle spielen dürften.

Insoweit lassen sich Effekte, die bei Systemumstellungen zu berücksichtigen sind, auch nur mit hohen Unsicherheiten modellieren.

2.2.1.3 Kosten der Erfassung

Die Kosten der getrennten Wertstofferrfassung sind in erster Linie abhängig von der Siedlungsstruktur und dem Erfassungssystem. Hinsichtlich beider genannter Einflussgrößen existieren bundesweit höchst unterschiedliche Ausprägungen, ohne dass Daten verfügbar sind, die eine exakte Berechnung durchschnittlicher Kosten ermöglichen.

Die Erfassungskosten wurden daher auf Grundlage einzelner Modellrechnungen für unterschiedliche Erfassungssysteme in städtischen und ländlichen Strukturen kalkuliert. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 2.2.2.

Deutlich werden hieran die außerordentlich großen siedlungsstrukturell bedingten Kostendifferenzen, die auf die unterschiedlichen Leistungsansätze infolge der jeweiligen Verhältnisse von Ladezeit zu Fahrzeit zwischen den einzelnen Ladepunkten zur führen sind.

Auf Basis einer groben Abschätzung der Relevanz einzelner Systemkombinationen lassen sich die Erfassungskosten auf ca. 400 DM/t Sammelgemisch beziffern. Das Sammelgemisch besteht, wie bereits erläutert, nicht nur aus Verpackungen. Diese sind allerdings als einzige Kostenträger anzusehen, so dass die Sammelkosten in der abschließenden Auswertung lediglich auf die jeweiligen mittleren Anteile systemzugewandter Verpackungen bezogen werden. Als durchschnittlicher Kostensatz resultieren ca. 600 DM/t LVP-Verpackung.

Die bisherigen Ausführungen haben verdeutlicht, dass diese Abschätzung mit Unsicherheiten behaftet ist, wenn sie auch mit anderen Ansätzen aus der Literatur (600 - 700 DM/t) korrespondiert. Bei einer Schüttdichte des LVP-Sammelgemisches von 30-40 kg/m³ resultieren aus den o.g. Zahlen Erfassungskosten von 12 - 16 DM/m³.

Für die Restmüllabfuhr über die graue Tonne werden üblicherweise 100 - 150 DM/t angesetzt. Bei einer Schüttdichte von 100 kg/m³ entspricht dies 10 - 15 DM/m³. O.a. Kostenansätze für die LVP-Erfassung lassen sich über diese vergleichende Betrachtung plausibilisieren.

Wichtiger als die exakte Bezifferung der absoluten Erfassungskosten erscheint aber an dieser Stelle die Erörterung der Kostenstruktur und damit verbunden die Fragestellung, inwieweit spezifische Kostenansätze z.B. bei geänderten Mengenszenarien als Konstante angesehen werden können.



Allgemeiner Teil

Kostenstelle	ländliche Siedlungsstruktur						städtische Siedlungsstruktur					
	MGB 1201 1,4 tkg, 25 kg/IE*a	MGB 2401 4 wo 25 kg/IE*a	Sack 4 wo 25 kg/IE*a	Depotcontainer 1,4 tkg, 10 kg/IE*a	MGB 1201 1,4 tkg, 25 kg/IE*a	MGB 2401 4 wo 25 kg/IE*a	Sack 4 wo 25 kg/IE*a	Depotcontainer 1,4 tkg, 10 kg/IE*a	MGB 1201 1,4 tkg, 25 kg/IE*a	MGB 2401 4 wo 25 kg/IE*a	Sack 4 wo 25 kg/IE*a	Depotcontainer 1,4 tkg, 10 kg/IE*a
Anzahl Behälter: bei 3 P/HH bei 2,5 P/HH Sack (2,6 kg/Sack) Depotcont. 125kg/2,5 m³	333	333	667 Säcke	7,8	400	400	659 Säcke	400	400	659 Säcke	6,2	
Behälterkosten* *Einschreibung auf 8 Jahre/7,2 Zinsenid pro Behälter Sack Standplatz 100 DM/73 Beh. Summe	4,5 DM/a 0,17 DM/14 tkg	9,4 DM/a 0,48 DM/4wo	0,09 DM/Sack	50,6 DM/a 1,95 DM/2wo	4,5 DM/a 0,17 DM/14 tkg	9,4 DM/a 0,48 DM/4wo	0,09 DM/Sack	4,5 DM/a 0,17 DM/14 tkg	9,4 DM/a 0,48 DM/4wo	0,09 DM/Sack	50,6 DM/a 1,28 DM/Cont.2wo	
Fahrzeit/Lieferzeit Bammelzeit je Behälter Fahren zur Sortieranlage durchs. km zur Sortieranlage Zeitbedarf Fahrt zur SA Gesamtheit je Behälter Bammelleistung je Behälter Fahrzeug Ansatz: 92 DM/h Personal: 3 x 40 DM/h	0,8 min/Beh. 0,3 Fahrtdauer 16 km 7,0 min	0,8 min/Beh. 0,6 Fahrtdauer 16 km 13,9 min	0,31 min/Sack 0,6 Fahrtdauer 16 km 13,9 min	4,53 min/Depot. 0,1 Fahrtdauer 16 km 2,8 min	0,3 min/Beh. 0,3 Fahrtdauer 16 km 6,7 min	0,3 min/Beh. 0,6 Fahrtdauer 16 km 13,9 min	0,20 min/Sack 0,6 Fahrtdauer 16 km 13,9 min	0,3 min/Beh. 0,3 Fahrtdauer 16 km 13,9 min	0,3 min/Beh. 0,6 Fahrtdauer 16 km 13,9 min	0,20 min/Sack 0,6 Fahrtdauer 16 km 13,9 min	3,53 min/Depot. 0,1 Fahrtdauer 16 km 2,8 min	
Gesamtsumme Kosten für 1.000 E Kostentf. Kosten bez. auf VV-Anteil LVP-Anteil in Bammelwehrs Anteil Erfassung Sachl/MCB (Gesamtkosten LVP wie gesammelt Kosten bezogen auf VV-Anteil Stadt/Land Gesamtkosten LVP wie gesammelt Kosten bezogen auf VV-Anteil	20.580 DM 823 DM/4 1.268 DM/4 0,95/0,95	11.360 DM 451 DM/4 699 DM/4 0,65/0,65	11.377 DM 455 DM/4 535 DM/4 0,95/0,95	4.170 DM 417 DM/4 834 DM/4 0,5/0,5	13.479 DM 562 DM/4 1.129 DM/4 0,5/0,5	7.847 DM 331 DM/4 652 DM/4 0,5/0,5	7.847 DM 331 DM/4 652 DM/4 0,5/0,5	4.170 DM 417 DM/4 834 DM/4 0,5/0,5	13.479 DM 562 DM/4 1.129 DM/4 0,5/0,5	7.847 DM 331 DM/4 652 DM/4 0,5/0,5	4.170 DM 417 DM/4 834 DM/4 0,5/0,5	
		60/20				50/50			33/0			
		480 DM				330 DM			588 DM/4			

Tabelle 2.2.2: Modellkalkulationen zur LVP-Erfassung

Werden die einzelnen Kostenarten bzw. kalkulatorischen Ansätze in Tabelle 2.2.2 hinsichtlich ihrer Sensitivität bezüglich veränderter Sammelmengen geprüft, so wird deutlich, dass bei den Holsystemen lediglich der Fahrtkostenanteil zur Sortieranlage und spezifisch bei der Sacksammlung die Gefäßkosten mengenvariable Kosten sind. Der Anteil dieser Kostenarten an den Gesamtkosten ist gering. Etwas anders verhält es sich bei der Depotcontainererfassung, die einen verhältnismäßig hohen mengenvariablen Kostenanteil aufweist, der aber wegen des nicht proportionalen Zusammenhangs von Stellplatzdichte und Erfassungsmenge nur im Einzelfall zu beziffern ist.

Im Umkehrschluss wird aus den Ausführungen deutlich, dass spezifische Erfassungskosten in hohem Maße nicht mengenunabhängig sind. Hieraus folgt wiederum, dass sich Berechnungen in der (häufig praktizierten) Form

$$\Delta \text{Kosten} = \text{spez. Kosten} \times \Delta \text{Mengenaufkommen}$$

verbieten.

Vielmehr kann zumindest für kleine Mengenveränderungen bei der Erfassung über Holsysteme angesetzt werden, dass die absoluten Kosten in etwa konstant bleiben und sich die spezifischen Kosten umgekehrt proportional zur Mengenveränderung entwickeln.

2.2.2 Sortierung

Die Verwertungseigenschaften von Verpackungen sind nicht zuletzt eine Funktion der Recyclingtechnologie, deren erste Stufe die sog. LVP-Sortieranlagen bilden. Je nachdem, welche Techniken hier zum Einsatz kommen, variieren Produktanteile bzw. Sortierverluste einzelner Verpackungen. Zum Teil sind auch unterschiedliche Produktqualitäten zu berücksichtigen.

Die Verfahrenstechnik der LVP-Sortierung hat sich infolge mehrerer Innovationsschübe seit Mitte der neunziger Jahre zunehmend diversifiziert.

Sinnvoll erscheint folgende Einteilung:

1. Einfache Anlagen mit überwiegend manueller Produkterzeugung
2. Anlagen mit mechanisch gestützter Produkterzeugung
3. Halbautomatische Anlagen
4. Halbautomatische Anlagen mit Sortierung der Kunststoffartikel nach Kunststoffarten
5. Vollmechanische Anlagen mit integrierten Veredlung-/Verwertungsprozessen

Die unter 1. bis 3. genannten Anlagentypen bilden z. Z. den Schwerpunkt der installierten Anlagenkapazität. Sie werden im Weiteren unter „Status quo“ subsumiert und zur Unterscheidung in o.a. Reihenfolge als Variante 1 bis 3 bezeichnet.

Der unter 4. aufgelistete Anlagentyp unterscheidet sich vom Status quo, Variante 3, also den halbautomatischen Anlagen, lediglich dahingehend, dass im Bereich der Kunststoffe andere Produktgruppen erzeugt werden. Diese Produkte definieren sich nicht nach Artikelform, sondern nach Kunststoffart. Diese Modalität der Sortierung ist derzeit nicht über die üblichen Leistungsverträge abgedeckt und ist somit als Option aufzufassen, mit dem der Anteil werkstofflich zu verwertender Produkte gesteigert werden kann und Kunststoffverwertungskosten zu verringern sind. Im Weiteren wird diese technologische Option als „optimierter Status“ bezeichnet.

Als weitere Option ist die unter 5. aufgelistete Verfahrenstechnik zu verstehen. Hierbei wird im Gegensatz zu allen anderen bisher genannten Verfahren die Schnittstelle zwischen Sortierung, Veredlung und z.T. auch Verwertung anlagenintern überbrückt, was es ermöglicht, auf manuelle Sortierung zur Produktkonfektionierung gänzlich zu verzichten. Ausgeführt sind nach dieser Verfahrensphilosophie die Anlagen in Hilter und Hannover. Anhand des Zuschnitts letztgenannter sog. Sortec-Anlage wird hier stellvertretend untersucht, wie einzelne Verpackungen hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit bei einer solchen technologischen Variante zu klassifizieren sind. Im Folgenden wird diese technologische Option daher verkürzt als „Sortec“ bezeichnet.

Nachstehend werden die einzelnen technischen Varianten näher skizziert. Hauptaugenmerk richtet sich dabei auf diejenigen Randbedingungen, die jeweils über die Sortierbarkeit einzelner Verpackungen entscheiden.

2.2.2.1 Status quo

Unter Status quo verbirgt sich wie o. erläutert keine einheitliche Technologie, sondern der historisch gewachsene Stand der betrieblichen Praxis.

Der untere Standard des Status Quo wird nach wie vor von Handsortieranlagen definiert, wenn sie auch in ihrer Bedeutung ständig zurückgehen und zwischenzeitlich im Wesentlichen auf Standorte beschränkt sind, die nur über sehr geringe LVP-Kontingente verfügen. Abbildung 2.2.2 veranschaulicht eine Prozessführung solch einfachen Zuschnitts exemplarisch. Nach manueller, teils auch mechanischer Gebindeöffnung werden die nicht-metallischen Verpackungen manuell aussortiert. Bei einem Teil der Anlagen wird eine Absiebung bei 40 - 60 mm vorgeschaltet, die dazu dient,

manuell nicht sortierbare Kleinanteile vor der manuellen Sortierung zu entfernen. Weißblech wird mechanisch über Magnetscheider abgetrennt. Die früher fast ausschließlich manuell durchgeführte Aussortierung der Aluminiumfraktion ist zwischenzeitlich häufig durch Wirbelstromscheidung substituiert. Leistungen dieses Anlagentyps liegen zumeist zwischen 1 t/h - 2 t/h. Der spezifische Personaleinsatz an Sortierkräften liegt bei ca. 100 - 150 kg LVP-Input je Sortierer und Stunde.

Wichtigstes Stoffmerkmal, das über den Grad der Aussortierung entscheidet, ist die Stückgröße; daneben spielen die visuellen Eigenschaften eine gewisse Rolle. Dies gilt allerdings nicht für Weißblech und aluminiumhaltige Verpackungen, soweit letztgenannte mechanisch aussortiert werden. Die Verpackungsgröße spielt für die Trenneffizienz dieser Prozesse innerhalb der realen Bandbreite von Verpackungen keine Rolle.

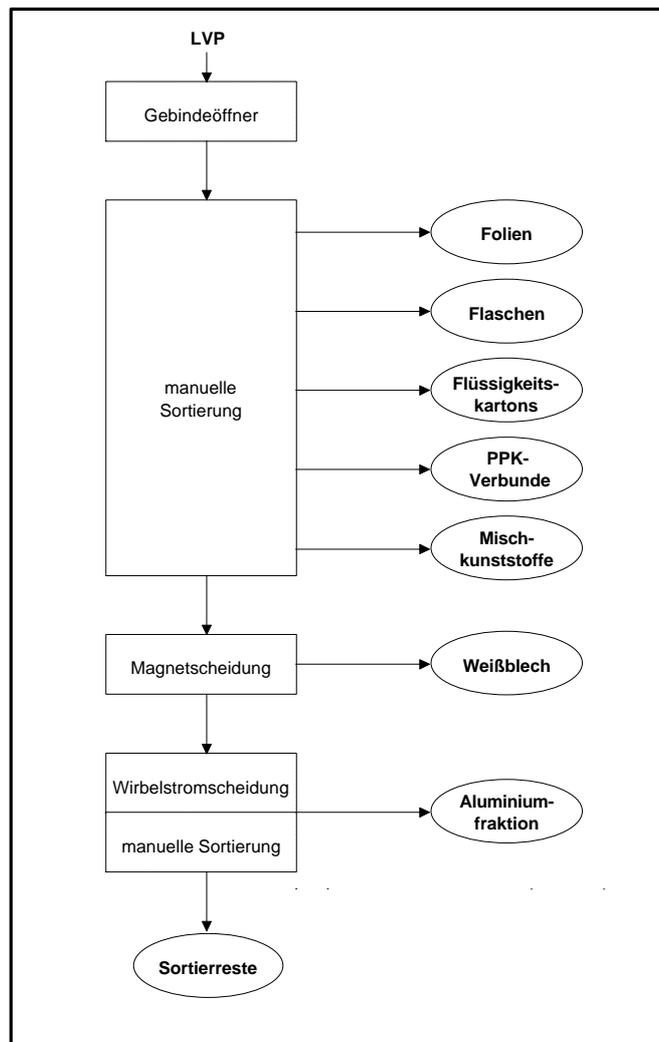


Abbildung 2.2.2: Exemplarisches Blockfließbild einer einfachen Sortieranlage mit überwiegend manueller Sortierung

Der obere Standard des Status quo wird aktuell durch halbautomatische Anlagen definiert. An die Stelle der Handsortierung treten mechanische oder automatische Verfahren; die manuelle Tätigkeit reduziert sich maßgeblich auf eine Kontrollsortierung der erzeugten Produkte zur Behebung technischer Unzulänglichkeiten.

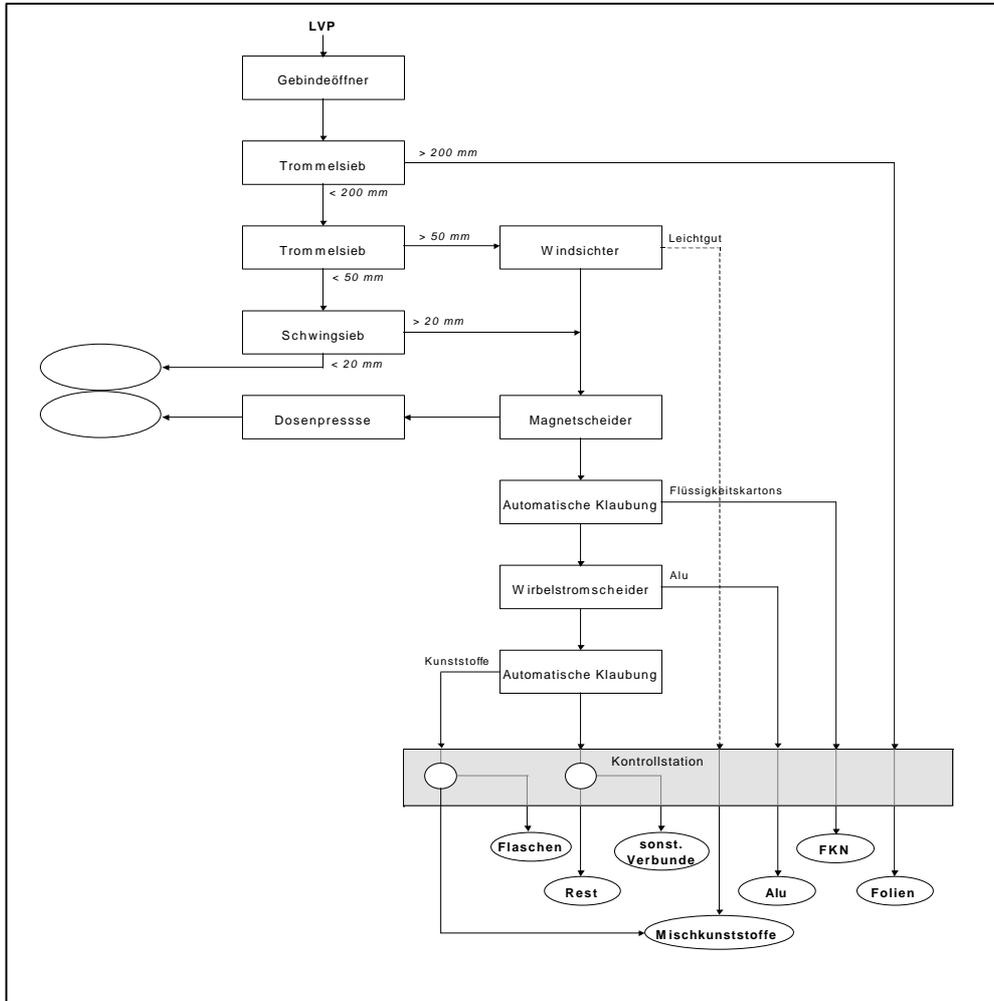


Abbildung 2.2.3: Exemplarisches Blockfließbild einer Sortieranlage nach dem Stand der Technik (halbautomatisches Verfahren)

Ermöglicht wurde dies durch die Neuentwicklung bzw. Weiterentwicklung leistungsfähiger Windsichter, automatischer Klaubeverfahren sowie der Wirbelstromscheidung. Hinsichtlich der Prozessführung der einzelnen Aggregate kristallisiert sich zunehmend eine Standardisierung in der in Abbildung 2.2.3 veranschaulichten Form heraus.

Nach einer Materialvorbereitung über Gebindeöffner sowie Fraktionierung und Voranreicherung über Siebmaschinen werden die einzelnen Produkte wie folgt gewonnen:

- Folienfraktion: durch Absiebung bei ca. 200 mm und manueller Nachsortierung oder durch Windsichtung
- Weißblech: durch Magnetscheidung
- MKS (flächig): durch Windsichtung
- MKS (körperförmig): durch automatische Klaubung (NIR-Detektion)
- Flüssigkeitskartons: durch automatische Klaubung (NIR-Detektion)
- Aluminium: durch Wirbelstromscheidung
- Kunststoffflaschen: durch automatische Klaubung (NIR-Detektion) und manueller Nachsortierung
- PPK-Verbunde: durch automatische Klaubung (NIR-Detektion) (erst in wenigen Einzelfällen eingeführt) oder manuell (s. Fließbild)

Die mechanischen bzw. automatischen Verfahrenskomponenten arbeiten wirkungsgradbehaftet, so dass die manuelle Sortierung nicht vollständig entfällt. Allerdings weist sie einen anderen Charakter auf als bei den Einfachanlagen, indem sich die Arbeiten in Richtung Produktkontrolle verschieben. Absolute und spezifische Leistungen solcher Verfahrenskonfigurationen liegen im Mittel um den Faktor 4 über denen von Einfachanlagen (Durchsatz 4 - 6 t/h, spezifische Leistung je Sortierkraft > 500 kg LVP-Input je Sortierer und Stunde).

Entsprechende Anlagenneu- oder umbauten wurden vorzugsweise betriebswirtschaftlich motiviert vorgenommen. Da die Fixkosten hochtechnisierter Anlagen steigen und demgegenüber variable Kosten sinken, finden sich halbautomatische Sortieranlagen nach dem Stand der Technik vorzugsweise an Standorten mit hohen Verarbeitungskapazitäten. Wie schnell sich die Entwicklung vollzieht, ist am Vergleich der Jahre 1998 und 1999 ersichtlich. Betrug der Anteil halbautomatischer Anlagen an der Gesamt-LVP-Verarbeitungskapazität bundesweit 1998 noch unter 7 %, ist er Ende 1999 bereits auf nahezu 40 % angewachsen.

Das Trennergebnis solcher Anlagen differiert z. T. in hohem Maße von dem manueller Sortieranlagen. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass die Stückgrößenreglementierung, der die Handsortierung unterliegt, für die mechanischen bzw. automatischen Verfahren nur geringe Bedeutung besitzt. (Daher wird bei dem in Abbildung 2.2.3 dargestellten Prozess auch auf die Absiebung von Kleinverpackungen vollständig verzichtet; die Feinabsiebung bei 20 mm dient nur zur Ausschleusung von anlagenschädlichen Nichtverpackungen (Sand, Kaffeesatz etc.)). Demgegenüber gewinnen andere Eigenschaften der Verpackung an Bedeutung. So werden bspw. schwarze oder dun-

kelblaue Verpackungen von der automatischen Klaubung mangels Reflexionsvermögen nicht detektiert.

Für die Trennung sind also physikalische Eigenschaften wie Kornform, Farbe oder elektrische Eigenschaften relevant, so dass sich für den zentralen Schnitt der Sortierung ein anderes Profil hinsichtlich der Verwertungseigenschaften von Verpackungen ergibt. Die Sortierung und damit die Produktbeschaffenheit ist durch die hohe Mechanisierung einerseits und die Produktkontrolle andererseits im Vergleich zum Status quo, Variante 1, bedeutend definierter, so dass die diffuse Verteilung von Verpackungsmaterialgruppen auf verschiedene nachgeschichtete Produktpfade weitgehend verschwindet.

Variante 1 und 3 stellen die Eckpunkte des Status quo dar. Daneben existieren wie vorne erwähnt als Variante 2 Übergangsformen, die sich hinsichtlich der Prozessführung nicht mehr einheitlich darstellen lassen, so dass an dieser Stelle auf eine eingehende Erörterung verzichtet wird.

2.2.2.2 Optimierter Status quo

Der neueste Entwicklungssprung ist auf dem Gebiet der NIR-Trenntechnik zu verzeichnen, wo nach der betrieblichen Bewährung von automatischen Kunststofftrennern nunmehr selektiv auf einzelne Polymergruppen zugeschnittene Sortiermaschinen am Markt eingeführt werden. Diese ermöglichen eine Auftrennung der Kunststoffverpackungen in PE, PP, PET und PS-Artikel. Derzeit sind zwei Anlagen (Trienekens, Wülf-rath und ART, Trier) in Betrieb, um die großtechnische Umsetzung zu erproben.

Die beiden Pilotanlagen unterscheiden sich in verfahrenstechnischen Details, die aber für die generelle Fragestellung an dieser Stelle ohne Bedeutung sind. Vom Grundprinzip sind beide Anlagen halbautomatische Anlagen entsprechend der in Kapitel 2.2.2 getroffenen Klassifizierung. Durch den Einsatz der selektiv arbeitenden Kunststofftrenntechnik verschiebt sich allerdings das Produktspektrum.

Bereitgestellt werden nicht mehr die Fraktionen

- Kunststoffflaschen
- Mischkunststoffe
- Folien

sondern

- PE-Fraktion
- PP-Fraktion
- PS-Fraktion
- PET-Fraktion
- Mischkunststoffe (verbleibender Anteil s. oben)
- Folien

wobei die neuen Fraktionen aus dem vormals erzeugten Produkt Kunststoffflaschen sowie den starren Verpackungen der Mischfraktion generiert werden.

Die o.g. Polymersorten sollen zur werkstofflichen Verwertung bereitgestellt werden, so dass die betroffenen Packmittelsegmente verwertungsspezifisch eine andere Einstufung erfahren. Betroffen sind entsprechend die unter Becher, Kunststoffflaschen und sonstige (formstabile) Kunststoffe subsumierten Verpackungsmaterialgruppen.

Von Seiten der Sortierung gelten für den optimierten Status die materialspezifischen Randbedingungen des Status quo, Variante 3. Diese wird daher im Weiteren auch als „opt. Status, alte Produktspezifikation“ gekennzeichnet.

2.2.2.3 Sortec

Als mittelfristige Perspektive ist die Sortec-Technologie einzuordnen, die zur Zeit mit der Anlage in Hannover den Pilotbetrieb aufgenommen hat.

Die Verfahrenstechnik besteht - wie in Abbildung 2.2.4 zu sehen - aus drei grundlegenden Verfahrensabschnitten: der trockenmechanischen Vorsortierung, der nassmechanischen Sortierung und der Kunststoffveredlung zu Granulaten und Agglomeraten.

Die trockenmechanische Vorsortierung erfolgt von der Prozessführung her wie die in Abbildung 2.2.3 skizzierte halbautomatische Anlagentechnik.

Gewonnen werden hier Flüssigkeitskartons sowie eine PET-Fraktion mittels automatischer Klaubesysteme. Weißblech wird ebenfalls dem weiteren Prozess entzogen und konventionell bereitgestellt. Die mittels Windsichtung erzeugte Folienfraktion wird nachfolgend ebenso wie das Schwergut der Windsichtung der nassmechanischen Aufbereitung zugeführt.

Allgemeiner Teil

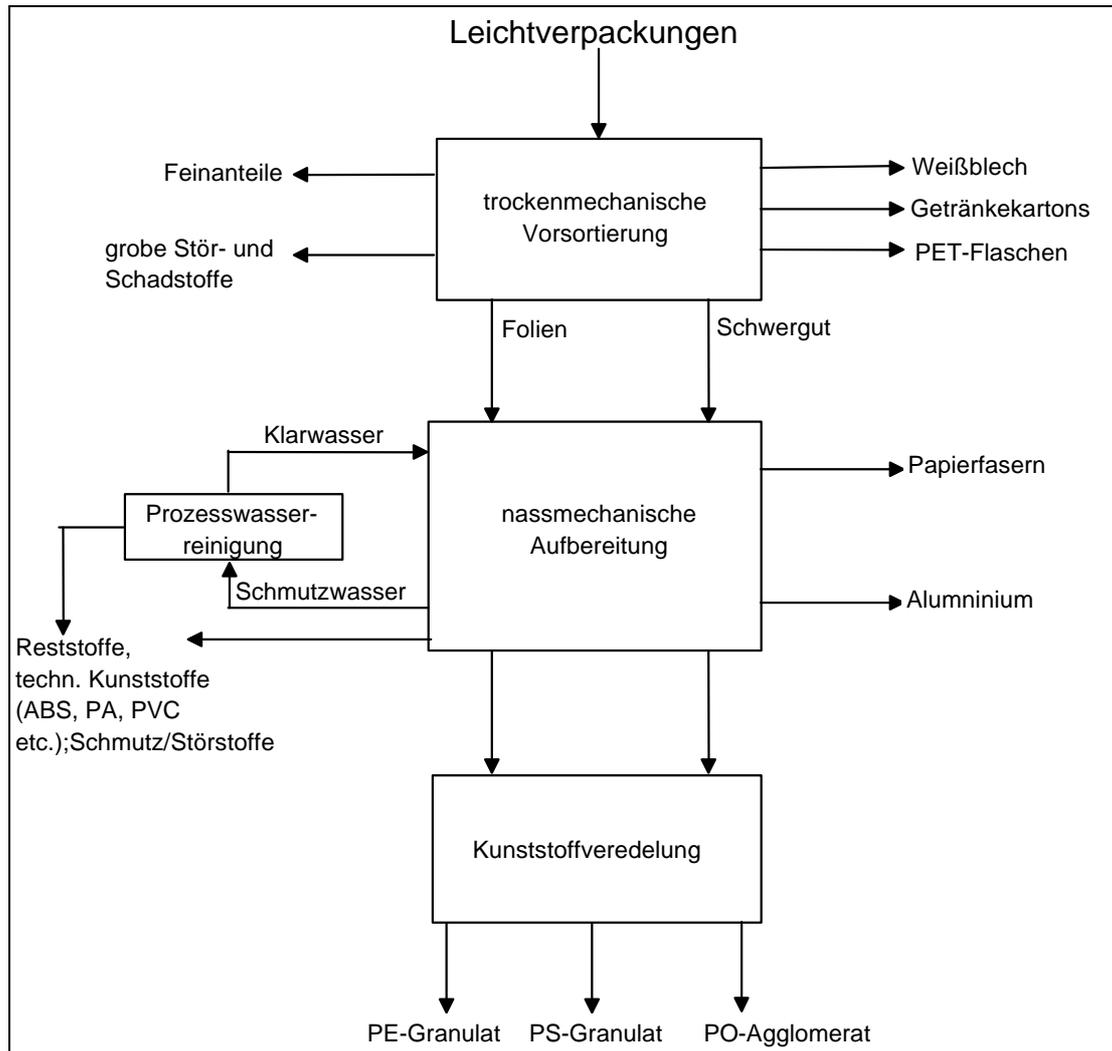


Abbildung 2.2.4: Sortiertechnik Sortec (schematisch)

Vor der eigentlichen Trennung werden die beiden Zwischenprodukte der trockenmechanischen Aufbereitung gewaschen. Die mit dem Waschwasser abgeführten Papierfasern werden herausfiltriert und als feuchte Faserfraktion bereitgestellt. Das verbleibende Kunststoff-Aluminiumgemisch mit Fremdanteilen wird nachfolgend zum möglichst weitgehenden Materialaufschluss zerkleinert.

Zur weiteren Trennung werden vorrangig Dichteunterschiede der einzelnen Kunststoffarten genutzt. Aus der Folienfraktion wird der Polyolefinanteil (überwiegend LDPE) abgetrennt und als PE-Regranulat konfektioniert.

Die Polyolefinanteile aus dem Windsichterschwergut werden als Agglomerat, die Polystyrolanteile zu Regranulat verarbeitet. Aluminium wird als gewaschenes Granulat frei von Papieranteilen und Anhaftungen über Wirbelstromscheidung aus dem Prozess geführt.

Die Besonderheit des Verfahrens liegt für die Fragestellungen der Untersuchung in der Zusammenführung von bisher separaten Anlagentypen, so dass die Schnittstellen zwischen Sortierung und Aufbereitung bzw. Verwertung entfallen. Somit entfallen auch die in nachgeschalteten externen Aufbereitungsprozessen zu verzeichnenden Materialverluste. Dies führt in der Konsequenz über die Gesamtbilanz zu einem höherem Wertstoff- bzw. Produktausbringen.

Durch die gegenüber den vorgenannten technischen Varianten deutlich unterschiedliche Produktpalette und Sortiertiefe ergeben sich in den materialgruppenspezifischen Zuweisungen z. T. gänzlich andere Verhältnisse.

Ausschlaggebend für die Entscheidung - rückgewinnbar oder nicht - ist bei der Variante Sortec als wesentliches Kriterium nur noch die Materialart. Artikelbezogene Eigenschaften wie Verpackungsgröße entfallen als Kriterium vollständig. Nicht rückgewonnen werden bspw. starre PVC-Verpackungen wie PVC-Kunststoffflaschen, die als Sinkgut der Dichtesortierung mit dem Sortierrest abgeführt werden.

2.2.2.4 Kosten der Sortierung

Die Sortierkosten lassen sich besser präzisieren als die Erfassungskosten, wenn auch hierfür gilt, dass es sich bei den im Weiteren genannten Zahlen um durchschnittliche Eckwerte handelt, die im Einzelfall aufgrund standortspezifischer Besonderheiten über- oder unterschritten werden.

Zur Ermittlung der Kosten wurden Betriebskostenberechnungen für die einzelnen technischen Varianten der LVP-Sortierung durchgeführt. Die wesentlichen Kostenarten und gewählte Ansätze werden im Folgenden erläutert.

a) Fixkosten

- **Miete Grund und Boden**

Die jeweils benötigte Fläche wurde anhand realisierter Anlagen abgeschätzt. Als kalkulatorische Kosten wurden $20 \text{ DM/m}^2 \times a$ angesetzt.

- **Kapitalkosten und Abschreibungen**

Die Investitionskosten für Gebäude und Infrastruktur sowie für Anlagentechnik wurden auf Grundlage ausgeführter Anlagen abgeschätzt. Als Abschreibungszeiträume sind für den Bauteil 25 Jahre und den Maschinenteil 8 Jahre zugrundegelegt. Der Zinssatz für die Ermittlung der Annuitäten ist einheitlich auf 7,0 % angesetzt.

- **Kosten für Reparaturen, Wartung, Instandhaltung (RWU)**

Bauteil: 2,0 % p.a. der Investitionskosten

Anlagentechnik: 7,0 % p.a. der Investitionskosten

b) variable Kosten

- **Personalkosten**

Der Anzahl der Beschäftigten liegen jeweils konkrete Durchschnittszahlen aus den Erhebungen von insgesamt 180 Anlagen zugrunde.

Für Sortierpersonal belaufen sich die Ansätze auf 70.000 DM/a, für sonstiges Personal durchschnittlich 90.000 DM/a.

- **Kosten für Energie**

Die Verbrauchswerte jeder Anlagenvariante wurden berechnet. Als Kostenansatz für elektrische Energie wurde ein Leistungspreis von 0,11 DM/kWh angesetzt.

- **Entsorgungskosten**

Bei den Kosten für die Entsorgung der Sortierreste sind hohe Streubreiten zu verzeichnen. Dies liegt zum einen daran, dass die Inputqualitäten und damit auch die Sortierrestanteile regionalspezifisch hohen Schwankungsbreiten unterworfen sind. Zum anderen sind Beseitigungskosten ebenfalls je nach bedienter Entsorgungsanlage höchst unterschiedlich. Um Anhaltswerte zu gewinnen, wurde eine Befragung von 10 Anlagen durchgeführt. Aus dem Mix der als Abfall zur Beseitigung und als Abfälle zur Verwertung abgegebenen Sortierrestanteile ergaben sich Entsorgungskosten inkl. Transportkosten von durchschnittlich 200 DM/t. Zur Ermittlung der absoluten Entsorgungskosten wurden die Sortierrestanteile auf eine durchschnittliche Inputzusammensetzung gemäß Tabelle 2.1.2 normiert.

- **Zuzahlungen bzw. Erlöse für die Verwertung von Produkten**

Kosten bzw. Erlöse für die Verwertung von Produkten werden bei der Ermittlung der Sortierkosten nicht berücksichtigt, da es sich hierbei, abgesehen von der Variante Sortec im Wesentlichen um externe Kostenpositionen handelt.

- **Verwaltungskosten**

Verwaltungskosten wurden mit 25 % anteilig der Personalkosten berücksichtigt.

c) Kalkulatorische Kosten

- **Unvorhergesehenes**

Als genereller Aufschlag für nicht berücksichtigte Kosten wurden 10 % der berechneten Betriebskosten zugrundegelegt.

- **Wagnis und Gewinn**

Die LVP-Sortierung ist eine Lohnaufbereitung für den Systemträger, als Marge und Risikoabdeckung wurden 15 % der berechneten Betriebskosten unterstellt.

d) Durchsatz der Anlagen

Die spezifischen Kosten der LVP-Sortierung hängen insbesondere bei den kapitalintensiven neuen Technologien in hohem Maße vom Jahresdurchsatz ab. Für die Varianten 2 und 3 des Status quo ist z.Z. (Stand 1999) bundesweit durchschnittlich eine zweischichtige Auslastung bei Nenndurchsatz gegeben, so dass der Kalkulation für konventionelle Sortieranlagen generell ein Zwei-Schicht-Modell zugrunde gelegt wurde. Für die Variante Sortec wurde abweichend ein Drei-Schicht-Modell gerechnet, da Anlagen mit nassmechanischer Sortierung aus technischen Gründen nur kontinuierlich betrieben werden.

Es sei explizit darauf hin gewiesen, dass dies im Sinne eines spezifischen Verfahrensvergleiches unzulässig wäre, der an dieser Stelle aber nicht von Interesse ist. Vielmehr geht es um eine realistische Einschätzung der Randbedingungen, unter denen sich zukunftsorientierte Alternativen zum Status quo herausbilden werden, um die Sensitivitäten der Bewertung einzelner Verpackungen in Bezug auf technische Varianten zu charakterisieren.

Tabelle 2.2.3 zeigt abschließend das Ergebnis der Betriebskostenberechnungen unter Aufschlüsselung der wesentlichen Kostenblöcke.

Innerhalb des Status quo bildet sich in gewisser Weise die historische Entwicklung seit Beginn der neunziger Jahre ab. Gegenüber der dort noch vorherrschenden Variante 1 haben sich die Betriebskosten bei einer Anlage nach dem Stand der Technik in etwa halbiert.

Die unmittelbare Gegenüberstellung der Sortierkosten der Status quo-Varianten mit den Optionen optimierter Status und Sortec ist nur unter Vorbehalten zulässig, da z.B. die Veredlungstiefe der Produkte nicht identisch ist und somit ein Kostenvergleich der Verfahren, der aber nicht Gegenstand dieser Studie ist, daher u.a. nur unter Berücksichtigung jeweiliger Verwertungskosten bzw. -erlöse als Gesamtsystemvergleich statthaft ist.

	Status quo			Optionen	
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Optimierter Status	Sortec
Investitionskosten	7.000.000 DM	9.550.000 DM	11.800.000 DM	14.510.000 DM	30.000.000 DM
Betriebskosten	DM/a	DM/a	DM/a	DM/a	DM/a
Fixkosten	1.282.480	1.769.530	2.212.180	2.568.380	6.007.460
Variable Kosten	3.679.687	4.144.751	3.887.341	3.900.818	5.426.001
kalkulatorische Kosten	962.542	1.103.445	1.227.030	1.345.699	2.277.490
Summe Betriebskosten	5.924.709	7.017.726	7.326.551	7.814.897	13.710.951
Durchsatz -t/a -	6.750	12.000	16.100	16.100	25.000
Anzahl d. Schichten	2	2	2	2	3
Summe der Kosten	878 DM/t	585 DM/t	455 DM/t	485 DM/t	548 DM/t

Tabelle 2.2.3: Kosten der Sortierung inkl. Entsorgungskosten ohne Verwertungskosten/ -erlöse

2.2.3 Veredlung und Verwertung

2.2.3.1 Technisches Szenario

Wie erläutert, besteht die Aufgabenstellung der Sortieranlagen (mit Ausnahme der Option Sortec, die bereits Aufbereitungsschritte enthält) in der Bereitstellung definierter Fraktionen für die weitere Veredlung bzw. Verwertung. In Tabelle 2.2.4 sind dazu die vorgegebenen Produktspezifikationen aufgelistet.

Allgemeiner Teil

Produktbezeichnung	Spezifikation	geforderte Reinheit
Weißblech	Weißblechverpackungen zzgl. max. 5 Prozentpunkte sonstige Fe-Bestandteile	93%
Aluminium	Aluminium und Aluminiumfolien enthaltende Verpackungen außer Flüssigkeitskartons	93%
Folien	Kunststofffolien > DIN A4 (z.B. Beutel, Tragetaschen, Schrumpffolien)	94%
Kunststoffflaschen (Hohlkörper)	Flaschen <5l Volumeneinheit (z.B. Waschmittel- und Haushaltsreinigerflaschen) mit Etiketten, Verschlüssen und Restinhalten	94%
Mischkunststoffe	Kunststoffverpackungen und kunststoffhaltige Artikel mit Ausnahme der in anderen Kunststofffraktionen sortierten Artikel	90%
Getränk kartons	Kartonverbundmaterialien (eckig) bestehend aus Karton/PE oder Karton/Aluminium/PE; weitgehend frei von Beimischungen und Fremdkörpern	90%
sonst. Verbunde	PPK - Verbunde	85%

Tabelle 2.2.4: Produktspezifikationen für die LVP-Sortierung

Abbildung 2.2.5 zeigt in vereinfachter Form die Verfahrensstufen und Materialströme, wie sie sich nach aktuellem Stand darstellen.

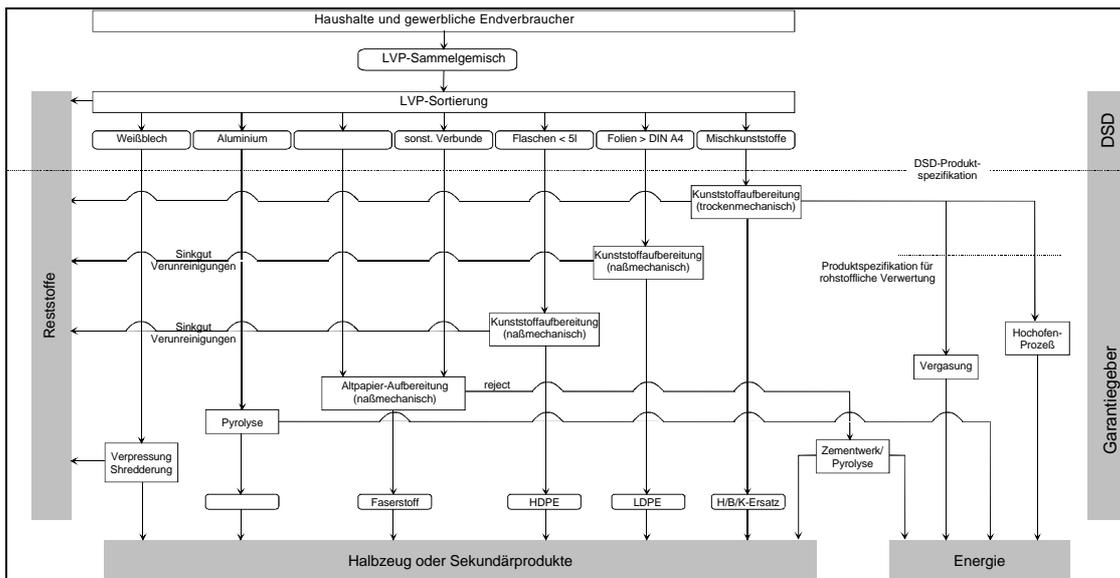


Abbildung 2.2.5: Vereinfachte Darstellung der Materialflüsse, Verantwortlichkeiten und Schnittstellen im Dualen System

Aufgenommen wurden nur die hauptsächlichen Pfade. Daneben sind die bedeutenden Schnittstellen vermerkt.

Die in den Sortieranlagen erzeugte Weißblechfraktion wird überwiegend lediglich verpresst und so unmittelbar an die Stahlwerke geliefert.

Flüssigkeitskartons werden nassmechanisch aufbereitet. Ziel der Aufbereitung ist die Abtrennung der Zellstofffasern, deren Anteil 75 % - 80 % beträgt. Der Rückstand die-

ser modifizierten Altpapieraufbereitung besteht aus PE-Aluminiumverbund, der zwischenzeitlich weitgehend energetisch verwertet wird.

Die Fraktion sonstige (PPK-)Verbunde wird ebenso weiterverarbeitet wie die Flüssigkeitskartons. Der einzige Unterschied liegt in Abnehmerstruktur und Produktpalette für den erzeugten Faserstoff.

Das an den Sortieranlagen bereitgestellte Aluminiumprodukt besteht auch bei Einhaltung der geforderten Spezifikation zum überwiegenden Anteil aus Nichtmetallen. Dies macht es erforderlich, das Produkt vor den für Sekundäraluminium üblichen Verfahrensschritten (Einschmelzen unter Schmelzsatz und Schmelzraffination) mittels mechanischer und / oder thermischer Verfahren anzureichern. Von Bedeutung ist derzeit in erster Linie die pyrolytische Aufbereitung der Aluminiumverpackungsgemische. Die Produktausbeute im Pyrolyserückstand beträgt ca. 35 % - 45 %; die Nutzung des als Nebenprodukt entstehenden Pyrolysegases ermöglicht eine vom Grundsatz her energieautarke Prozessführung.

Als Folge vielfältiger Einflussgrößen stellt sich die Situation für die Kunststofffraktionen außerordentlich komplex dar.

Unter den rohstofflich bedingten Einflussgrößen ist in erster Linie die Arten- und Sortenvielfalt der unter dem Begriff Kunststoff subsumierten Materialien mit recht unterschiedlichen verarbeitungstechnischen und aufbereitungstechnischen Eigenschaften zu nennen. Im Verpackungssektor kommen insbesondere die thermoplastischen Massenkunststoffe PE-HD und PE-LD, daneben PP, PS, PVC sowie vermehrt auch PET zur Anwendung. Die Herstellung von marktfähigen Rezyklaten für weitere Anwendungsbereiche setzt idealer Weise eine sortenreine Gewinnung, zumindest aber eine Trennung der einzelnen Kunststoffarten voraus.

Unter den unterschiedlichen Ansätzen einer Stofftrennung konnten einzig nassmechanische gravimetrische Verfahren zur Betriebsreife gebracht werden. Sie repräsentieren auch heute den Stand der Technik der Kunststoffaufbereitung. Die erforderliche Konditionierung für die eigentliche Trennung mittels statischer oder dynamischer Schwimm-/Sinkscheidung ist bei allen Verfahren ähnlich und umfasst die Prozessstufen:

- trockene Vorzerkleinerung
- Abtrennung metallischer Verunreinigungen
- Nachzerkleinerung in nass arbeitenden Schneidmühlen
- Friktion zur Reinigung der Oberflächen

Die Produkte werden nach Entwässerung mit Hilfe von Extrudern zu Regranulat umgeschmolzen; bei einigen Betrieben erfolgt auch eine unmittelbare Umformung zum Endprodukt.

Eine Reihe von technischen und marktreglementierenden Faktoren erschweren diese Form des Kunststoffrecyclings als generelles Verfahren.

Unter rein aufbereitungstechnischen Aspekten ist exemplarisch die begrenzte Trennbarkeit vermischter Kunststoffe mit leistungsfähigen Verfahren zu nennen.

Auf der Suche nach Alternativen wurde der sog. „Verwertungsmix“ konzipiert, der in der derzeitigen Produktdiversifizierung der Kunststoffe gemäß der in Tabelle 2.2.4 ausgewiesenen Hauptfraktionen bereits in den Sortieranlagen seinen Niederschlag findet.

Die Folien- und die Flaschenspezifikation sind dahingehend konfiguriert, dass geeignete Vorkonzentrate für die nassmechanische Kunststoffaufbereitung erzeugt werden sollen. Angereichert werden LDPE bzw. HDPE bedingt durch die relativ hohe Korrelation von Packmittelgruppen und Kunststoffart.

Folien werden zu etwas über 50 % zu Regranulat verarbeitet, weitere Verwertungswege sind der Einsatz als Ersatz für Holz/Betonprodukte. Nur ein geringer Teil wird über die Agglomerataufbereitung in die rohstoffliche Verwertung geführt (Stand 1998).

Die Flaschenfraktion wird vollständig der Regranulataufbereitung zugeführt.

Becher, die in den Sortieranlagen nur in Ausnahmefällen ein eigenständiges Produkt darstellen, aber in spezifischen Erfassungssystemen separat erfasst werden, werden ebenfalls nahezu vollständig bei Regranulataufbereitern weiterverarbeitet.

Der überwiegende Anteil der Kunststoffverkaufsverpackungen ist der Spezifikation Mischkunststoffe zuzuordnen. Mischkunststoffe werden zum überwiegenden Teil rohstofflich verwertet; nur ein geringer Anteil wird zu dickwandigen Produkten wie z.B. Paletten, Pfähle etc., umgeschmolzen und somit als Holz- oder Betonersatz werkstofflich verwertet.

Unter den konkurrierenden rohstofflichen Verarbeitungsalternativen sind derzeit vornehmlich die Festbettvergasung sowie der Einsatz im Hochofenprozess von Bedeutung. Zu den Rohstoffanforderungen an die Einsatzprodukte ist anzumerken, dass prozesstechnisch bedingt keines der genannten Verfahren geeignet ist, die in den Sortieranlagen erzeugten Mischkunststoffe unmittelbar zu verarbeiten. In Abwägung der im Einzelnen etwas unterschiedlichen Rohstoffanforderungen und dem Bestreben

nach Erhalt variabler Dispositionsmöglichkeiten seitens des Verwertungsgarantiegebers gelten für die Einsatzstoffe einheitliche Rohstoffspezifikationen.

Reglementiert sind im Wesentlichen die Parameter Asche- und Chorgehalt bei Obergrenzen von 4,5 % bzw. 2 %. Gefordert werden ferner ein maximaler Wassergehalt von 1 % sowie eine Mindestschüttdichte von 300 kg/m³.

Mit dem Ziel der Erzeugung entsprechender Agglomerate sind seit 1994 zentrale Aufbereitungskapazitäten installiert worden, die sich in ihrer Grobkonfiguration ähneln. Generell wurden trockenmechanische Verfahren mit einstufiger Primärzerkleinerung mittels Einwellenmaschinen konzipiert. Die nachgeschaltete Stofftrennung erfolgt durch mehr oder minder differenzierte Kombination von Siebklassierung und Windsichtung. Zur abschließenden Produktagglomeration werden Ringmatrizenpressen eingesetzt.

Aus den skizzierten technischen Zusammenhängen geht hervor, dass die Verwertungseigenschaften von Verpackungen in der hier diskutierten Systemebene sich fast ausschließlich durch die jeweilige stoffliche Zusammensetzung definieren. Der Rückschluss auf Verpackungsmaterialgruppen auf Artekelebene gestaltet sich entsprechend komplex.

Vereinfacht kann aber festgehalten werden, dass Aufbereitungsverluste auf der Ebene Veredlung und Verwertung im Allgemeinen diffus sind; d.h. es bestehen keine selektiven Trennprozesse im Hinblick auf Anteile spezifikationsgerechter Materialien.

Ausnahmen sind im Bereich der Flaschen- und Folienverarbeitung zu verzeichnen. Die Anlagen sind technisch so ausgerüstet, dass Nicht-PE- bzw. PP-Anteile als Aufbereitungsverluste anfallen. Betroffen sind hiervon im Status quo vornehmlich die PET-Flaschen, soweit sie in die Flaschenfraktion sortiert wurden.

Diese aktuellen Defizite werden z. Z. abgebaut. In den Optionen Sortec und optimierter Status quo sind sie bereits technisch kompensiert.

2.2.3.2 Kosten der Veredlung und Verwertung

Die Kosten der Veredlung und Verwertung, die den folgenden Auswertungen zugrunde gelegt werden, sind Tabelle 2.2.5 zu entnehmen.

Fraktionen	Kosten
1. Status quo	
Folienfraktion (Regranulataufbereiter)	560 DM/t
Flaschenfraktion (Regranulataufbereiter)	446 DM/t
Becherfraktion (Regranulataufbereiter)	510 DM/t
Mischkunststofffraktion inkl. Agglomerataufbereitung	585 DM/t
Mischkunststofffraktion werkstofflich	350 DM/t
Flüssigkeitskartons (inkl. Transportkosten)	30 DM/t
Weißblech (Erlöse frei Anlage), inkl. Transport, lose	-20 DM/t
Weißblech (Erlöse frei Anlage), inkl. Transport, paktiert	-60 DM/t
Aluminium (abhängig vom Alugehalt) hier 35 %	0 DM/t
sonstige Verbunde	380 DM/t
Transportkosten für rohstoffliche Verwertung	107 DM/t
Transportkosten für energetische Verwertung	50 DM/t
Transportkosten Flaschen, Becher, Kunststoffe	50 DM/t
Transportkosten EPS	650 DM/t
2. Sonderfraktionen optimierter Status	
PET	150 DM/t
PS	50 DM/t
PP	200 DM/t
PE	150 DM/t
3. Sonderfraktionen Sortec	
PE-Regranulat	-300 DM/t
PO-Agglomerat	0 DM/t
PS	-350 DM/t
PET	150 DM/t
Faser	80 DM/t

Tabelle 2.2.5: Erlöse und Zuzahlungen für die Verwertung von Produkten der LVP-Sortierung

Den Kosten für die Kunststoffverwertung und sonstiger Verbunde im Status quo liegen interne Auswertungen der DKR und DSD für 1999 zugrunde.

Die Kosten für die FKN-Verwertung haben ebenfalls als Bezugsbasis die Realkosten in 1999 und verstehen sich inkl. Transportkosten.

Die Metallfraktionen werden teilweise von den Sortieranlagen unmittelbar vermarktet und unterliegen entsprechenden Preisschwankungen.

Den angesetzten Verwertungskosten für Sonderfraktionen des optimierten Status quo liegen Schätzungen der Verfasser zugrunde.

Für die Option Sortec mussten, soweit die Endprodukte von den obigen Varianten abweichen, ebenfalls Abschätzungen getroffen werden. Hierbei wurden generell wie beim optimierten Status konservative Ansätze gewählt.

3 Spezieller Teil

3.1 Wertstoffbilanzen für einzelne Verpackungsmaterialgruppen

3.1.1 Vorgehensweise und Datengrundlage

Die ökologische Nutzung einer Verwertung von Altstoffen wird in hohem Maße durch Art und Umfang der aus dem jeweiligen Abfall gewonnenen Sekundärrohstoffe bestimmt.

Alljährlich dargestellt werden für den Bereich der getrennten Verpackungsentsorgung im sog. Mengenstromnachweis (MSN) Stoffstrombilanzen, die es ermöglichen, den Verwertungsweg ausgehend vom Sammelgemisch über die aus dem Gemisch gewonnene Fraktionen bis hin zum Letztempfänger (Verwerter) quantitativ zu beschreiben.

Diese Form der Bilanzierung, auch wenn sie in ihrem Detaillierungsgrad so für keinen anderen Abfall existiert, ist nicht ausreichend, um hiermit einzelne Verpackungsmaterialgruppen hinsichtlich ihres Verbleibs und somit ihrer verwertungsspezifischen Eigenschaften zu charakterisieren, da die Bezugsebene die im vorigen Kapitel definierten Fraktionen (z.B. Mischkunststoffe) und nicht einzelne enthaltene Verpackungen (z.B. Kunststoffbecher) sind.

In der verfahrenstechnischen Methodenlehre existieren zwei graduell unterschiedliche Arten der Bilanzierung von Massen in Gewinnungs- und Rückgewinnungsprozessen. Die gröbere Bilanzierungsart ist die Massenbilanz, die Aufschluss über die Input-Output-Beziehung der einzelnen Prozessströme gibt. Hier besteht Äquivalenz zur Darstellungsform des MSN.

Die detailliertere (Massen-)Bilanz, die einzelne Inhaltsstoffe (Wertstoffe) hinsichtlich ihrer Verteilung auf die Prozessströme abbildet, wird als Wertstoffbilanz bezeichnet. Kennzeichnende Größe aus der Wertstoffbilanz ist das Wertstoffausbringen, das denjenigen Anteil eines Inhaltsstoffs angibt, der in einen Produktstrom überführt wurde. Diese relative Größe ist am besten dazu geeignet, die Verwertungseigenschaften einer Komponente quantitativ zu charakterisieren.

Abbildung 3.1.1 veranschaulicht die beiden graduell unterschiedlichen Bilanzierungsarten am Beispiel einer Zweiproduktentrennung, in der der Input (A) in Produkt (C) und Reststoff (B) aufgetrennt wird. Im oberen Teil der Grafik ist die Beziehung der Massen zueinander erkennbar.

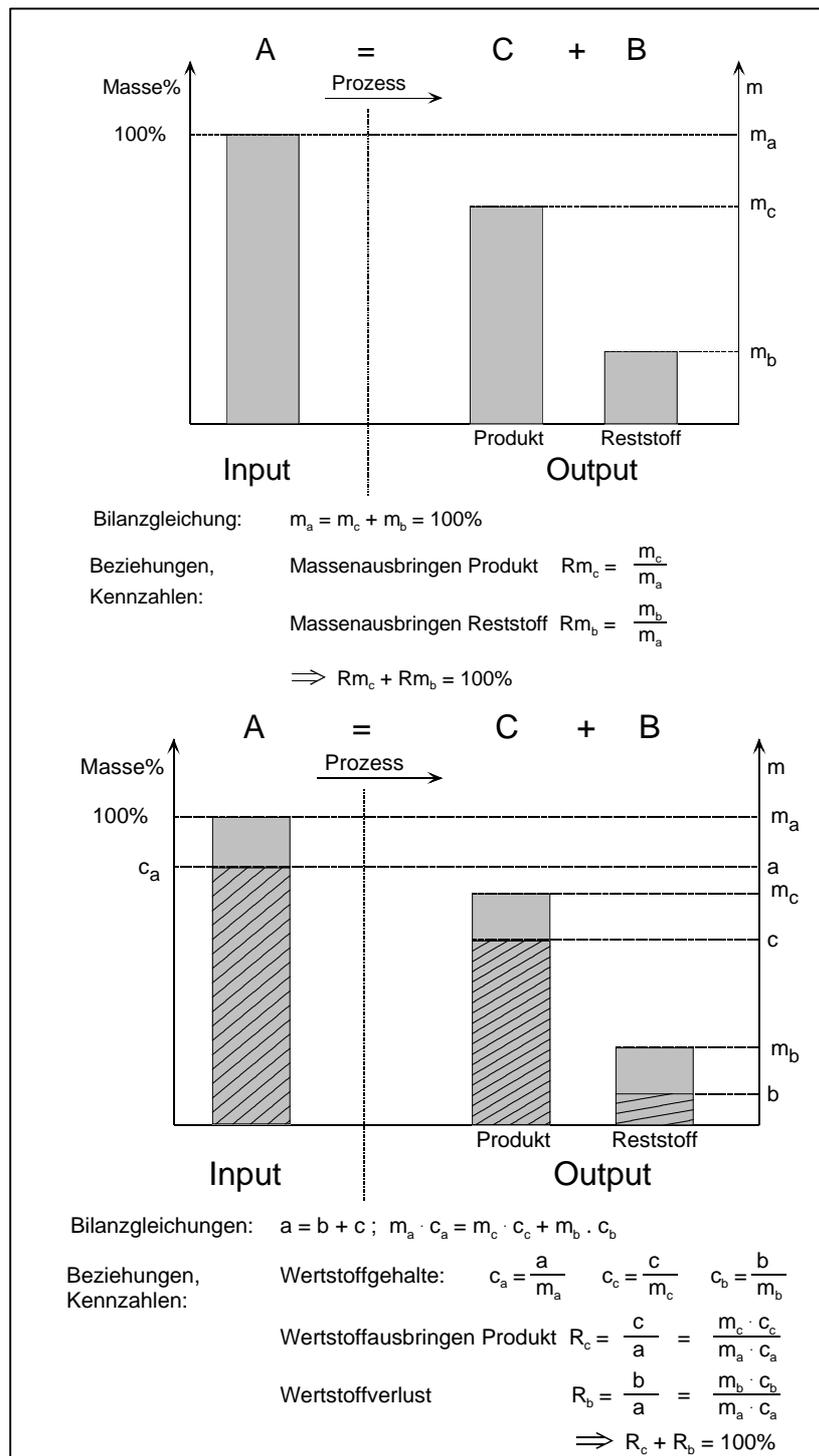


Abbildung 3.1.1: Massenbilanz und Wertstoffbilanz einer Zwei-Produktentrennung

Der untere Teil bildet die Verhältnisse der Wertstofffrachten (a,b,c) bzw. Wertstoffanteile (C_a , C_c , C_b) und die daraus abgeleitete Kennziffern für den selben Prozess ab. Die zentrale Kennziffer der Wertstoffbilanz - das Wertstoffausbringen R_c

(R für recovery; c für concentrate) mehrerer hintereinandergeschalteter Prozesse kann zur Gesamtbilanzierung unmittelbar multiplikativ verknüpft werden

$$R_{c \text{ gesamt}} = R_{c1} \times R_{c2} \times \dots \times R_{cN}$$

Die Ableitung der Ausbringenswerte für die einzelnen Verpackungsmaterialgruppen erfolgte für die einzelnen Systemebenen entsprechend der vorliegenden Datengrundlage auf unterschiedliche Weise. Modellierungen wurden hierbei soweit möglich vermieden; die Auswertungen beruhen im Wesentlichen auf dokumentierten Bilanzergebnissen.

Für die **Systemebene Sortierung** konnte der Status quo vollständig durch Messergebnisse aus Anlagenbilanzierungen bzw. Teilbilanzierungen beschrieben werden. Die Grundlage bilden die Ergebnisse vollständiger Abnahmebilanzen [HTP 1995 – 1999] sowie bundesweit durchgeführter Untersuchungen von Produkten und Sortierresten aus der LVP-Sortierung. Die Auswertung dieser Daten erfolgte geschichtet nach Stand der technischen Ausrüstung in der bereits an anderer Stelle [HTP 1999, HTP 2000] mit dem Umweltbundesamt abgestimmten Form. Im Gegensatz zu den vorgenannten Quellen erfolgt in vorliegender Studie allerdings keine Bezugsetzung zu den Produktionsmengen der Anlage, sondern die Darstellung der vollständigen Prozessbilanzierung analog Abbildung 3.1.1. Ergebnis ist eine vollständige Abbildung der Verteilung der einzelnen vorgegebenen Materialgruppen auf die einzelnen Fraktionen und Sortierreste.

Zu den besonderen Teilprozessen des optimierten Status quo existierten zum Zeitpunkt der Auswertung keine Messergebnisse aus empirischen Untersuchungen, auf einer zu oben äquivalenten Datengrundlage. Für die Berechnungen wurden daher Ausbringens-Garantiewerte von Herstellern zugrundegelegt, die sich zwischenzeitlich in praktischen Untersuchungen bestätigt haben.

Der Sortec-Prozess wurde hinsichtlich seiner Bilanzgleichungen für die integrierten Veredlungs- und Verwertungsprozesse vollständig modelliert. Dies ist notwendig, da die einzelnen Verpackungsartikel innerhalb des Prozesses ihre ursprüngliche Gestalt verlieren und somit in den Produkten nicht identifizierbar sind. Die Modellierung der integrierten Veredlungs- und Verwertungsprozesse wurde auf Grundlage der Bilanzdaten äquivalenter Kunststoffaufbereitungsprozesse analog der im Folgenden beschriebenen Methodik vorgenommen; Synergieeffekte sind entsprechend nicht berücksichtigt, so dass die vorgenommenen Abschätzungen als konservativ einzustufen sind.

Im Gegensatz zum Mengenstromnachweis, in dem der Bilanzrahmen lediglich bis zum Eingang Letztempfänger reicht, erfordert die Aufgabenstellung vorliegender Studie die vollständige Bilanzierung **der Systemebene Veredlung und Verwertung** bis zum Endprodukt. Eine Datenbasis auf Grundlage empirisch erhobener Messergebnisse wie für den Bereich der Sortieranlagen des Status quo existiert hierüber nicht. Eine einfache Modellierung anhand exemplarischer Anlagenkonfigurationen erschien den Verfassern insbesondere für den Bereich der Kunststoffe nicht ausreichend realitätsnah. Daher wurde methodisch wie folgt vorgegangen. In einem ersten Auswerteschritt wurde anhand der Folgeempfängerbilanzen die tatsächliche Zuordnung einzelner Fraktionen (Folienfraktion, Mischkunststoffe etc.) zu Veredlern und Letztempfängern vorgenommen. Als Bezugsjahr diente 1998. Zu jeder belieferten Anlage sind Kennwerte der Massenbilanz (sog. Produktausbeuten) sowie die Produktpalette bekannt, so dass sich produktseitig ein vollständiges Mengengerüst für jede einzelne aus der Sortierung bereitgestellte Fraktion errechnen lässt.

Die Übertragung der Bilanz von der Ebene der Fraktion auf die der Verpackungsmaterialgruppe musste modelliert werden. Hierbei wurden verfahrensspezifisch zwei Fälle unterschieden. Der erste Fall umfasst Anlagen, in deren Verfahrensgang keine Selektivität gegenüber einzelnen Materialgruppen besteht. Hierzu gehören z.B. die Agglomerataufbereiter. Für solchen Prozessen zugeführte Verpackungen wurde abzüglich eines Anteils von 5 % für Störstoffe und Bindedraht einheitlich die reale durchschnittliche Produktausbeute der Anlage zugrundegelegt (Produktausbeute $\approx R_c$).

Der zweite Fall umfasst Anlagen, in denen a priori eine Selektivität hinsichtlich der Behandlung einzelner Verpackungen oder Verpackungsanteile besteht. Dies trifft bei allen nassmechanischen Veredlungs- und Verwertungsprozessen aber auch bei der pyrolytischen Verwertung der Aluminiumfraktion zu. Hierfür wurden Trennmodelle auf Grundlage der stofflichen Zusammensetzung der jeweils zugeführten Verpackungsmaterialgruppen entwickelt und anhand der durchschnittlichen Produktausbeute der Anlage plausibilisiert. Die erforderlichen Daten zur stofflichen Zusammensetzung der einzelnen Verpackungsmaterialgruppen entstammen Auswertungen von GVM [GVM 1999].

Aufgrund der methodischen Vorgehensweise und der Komplexität der Datenstruktur sind der deskriptiven Darstellung übergreifend folgende Feststellungen vorauszusprechen:

- Die Anteile von Hilfs- und Einsatzstoffen sowie die Verwertung von Nebenprodukten, deren Massenstrom weniger als 2 % des dem jeweiligen Prozess zugeführten Massenstroms beträgt, werden vernachlässigt.
- Grundsätzlich vernachlässigt sind diffuse Wege; d.h. bspw. eine Kunststoffolie, die über den Weißblechstrom fehlausgetragen wird, ist nicht bilanziell berücksichtigt.
- Da sie auf Grundlage von Bilanzierungsdaten realer Abfallbehandlungsprozesse generiert wurden, gilt für die ausgewiesenen Zahlenwerte, dass sie sich auf Altstoffe, also auf gebrauchte Verpackungen beziehen. Dies bedeutet, dass die Grundmenge
 - Restinhalte,
 - Rohfeuchte des Abfalls sowie
 - Anhaftungen von Begleitkomponenten
 - Etikettierung etc.

beinhaltet, die je nach Prozess im Vorlauf der Prozesskette partiell oder vollständig abgetrennt werden.

3.1.2 Darstellungsform

Die spez. Wertstoffbilanzen werden im Anhang in vereinfachten Blockfließbildern dargestellt, aus denen die auf jeder Systemebene zu verzeichnenden Produktanteile und Wertstoffverluste prozentual bezogen auf die ins System eingebrachte Menge ersichtlich ist.

Die Darstellung berücksichtigt im Wesentlichen nur den Feststoffanteil jeweils in Bezug auf die rohfeuchte Inputmenge. Lediglich bei der trockenmechanischen Kunststoffaufbereitung (z.B. MKS-Agglomerataufbereitung) sind die Trocknungsverluste explizit ausgewiesen. Bei Nassverfahren wurde aus Gründen der Vereinfachung eine ausgeglichene Wasserbilanz unterstellt; dies führt methodisch dazu, dass die Aufbereitungsverluste gegenüber Trockenverfahren überbewertet sind. Diese systematische Verzerrung wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit in Kauf genommen, zumal für die ökologische Bewertung im Wesentlichen die Produktanteile und weniger die Reststoffanteile relevant sind.

Die jeweilige Produktpalette und Produktanteile sind auf den Diagrammen nochmals zusammenfassend tabellarisch zusammengestellt. Besonderheiten in der Produktsammensetzung, die in der ökobilanziellen Bewertung Berücksichtigung finden, sind

der tabellarischen Darstellung zu entnehmen. Auf die Ausweisung von Abgängen wurde in der tabellarischen Darstellung aus o.a. Gründen verzichtet.

Die zusammenfassende tabellarische Darstellung findet sich im nachfolgenden Textteil wieder.

Da die Bilanzierungsschnittstellen je nach Produktpfad etwas unterschiedlich sind, sollen die einzelnen Produkte für den Status quo an dieser Stelle übergreifend charakterisiert werden (s. Tabelle 3.1.1).

Bezeichnung	Erläuterung/Bemerkung	Schnittstelle der massenbilanziellen Bewertung
Weißblech	originäre Abfallkonsistenz	Eintrag Stahlwerk
Faserstoff	Trockensubstanz	Produkt Nassaufbereitung
rejects	entwässert	Austrag Altpapieraufbereitung
Aluminium	Sekundäraluminium	erschmolzener Metallanteil
werkstoffliche Verwertung Holz-/Betonersatz	Dickwandige Kunststoffprodukte	Produkt Kunststoffletztempfänger
Regranulat		Produkt Kunststoffletztempfänger
Agglomerat (SVZ, SB)	rohstoffliche Verwertung Festbettvergasung, Stahlwerke	Eingang Kunststoffletztempfänger

Tabelle 3.1.1: Übergreifende Charakterisierung der Produkte

Die Verwertungseigenschaften einer Altverpackung sind über Art und Umfang der aus ihr erzeugten stofflich verwerteten Produkte definiert. Ihre Darstellung erfolgt zunächst rein deskriptiv, d.h., ohne Bewertung der qualitativen Produktmerkmale, die später nach ökologischen Kriterien bemessen werden.

3.1.3 Charakterisierung der Verwertungseigenschaften einzelner Verpackungsmaterialgruppen

3.1.3.1 Folien >DIN A4

Die Materialgruppe umfasst größere Kunststoffartikel wie Tüten, Folien und Tragetaschen. Verwendete Kunststoffart ist mit knapp 90 % PE und ca. 10 % PP. PS und PET sind im Bereich größerer Folien von untergeordneter Bedeutung [GVM 1999].

Der Anteil am Sammelgemisch lässt sich im Mittel auf ca. 7,9 % entsprechend ca. 158.000 t/a beziffern.

Die Materialgruppe bildet im Dualen System eine eigenständige Spezifikation, die wegen der hohen Entsprechung von Artikel und Kunststoffart konfiguriert wurde. In der

realen Verwertungskette bestehen Synergien mit stoffgleichen Nichtverpackungen wie Abfallsäcke u.a., die allerdings bei der Wertstoffbilanz nicht berücksichtigt sind.

Hinsichtlich ihrer Verwertungseigenschaften ist die Materialgruppe verhältnismäßig homogen. In der konventionellen Sortierung gelangen die großflächigeren Anteile überwiegend in die Folienfraktion; soweit diese einer nassmechanischen Veredlung zugeführt wird, fallen die Nicht-PO- (PE und PP) Anteile als Aufbereitungsreste an.

Mit abnehmender Größe erfolgt eine zunehmende Verschleppung in die Mischkunststofffraktion. Der Anteil, der in die Sortierreste gelangt, ist gering.

Die ermittelten Produktsorten und Produktanteile aus den Wertstoffbilanzen für die unterschiedlichen technischen Varianten (vgl. Anhang 3.1.1 - 3.1.3) sind Tabelle 3.1.2 zu entnehmen.

Folien >DIN A4			Produkte
Status quo	optimierter Status	Sortec	
31,3%	39,0%	61,3%	Regranulat
2,7%	3,4%		werkstoffl. Verwertung Kunststoffersatz
15,9%	19,4%		werkstoffl. Verwertung Holz/Betonersatz
22,8%	17,2%		Agglomerat (SVZ/SB)
		13,2%	PO-Agglomerat

Tabelle 3.1.2: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Folien >DIN A4 bei unterschiedlichen Technologievarianten

Die Ergebnisse im Status quo sind geprägt von den tatsächlichen Dispositionen des Verwertungsgarantiegebers auf einzelne Produktpfade. Im optimierten Status wird sich die Produktbilanz zugunsten hochveredelter Produkte verschieben, da Folien definierter in die Folienfraktion überführt werden. Für die Option Sortec gilt dies in noch höherem Maße, da hier der Weg in die Regranulierung anlagenintern vorgegeben ist. Bezogen auf 100 % Verpackungsaltsfolien sinkt die Gesamtproduktausbeute allerdings gegenüber den Status-Varianten, da alle Endprodukte in gewaschener und getrockneter Form erzeugt werden und der Anteil an Feuchte und Restanhaftungen infolge der hohen spezifischen Oberflächen bei Altfolien groß ist.

Zusammenfassend ist die Materialgruppe unter quantitativen und qualitativen Aspekten als stofflich gut verwertbar einzustufen. Diese Aussage ist wenig sensitiv gegenüber technischen Veränderungen - ist aber in Abhängigkeit zur verwendeten Kunststoffart zu sehen.

3.1.3.2 Folien < DIN A4

Die Materialgruppe umfasst kleinere flexible, flächige Verpackungsartikel wie Beutel, Einwickelfolien etc. Verwendete Kunststoffarten sind zu etwa 25 % PE, 35 % PP, PS und PET mit jeweils ca. 15 % sowie sonstige Kunststoffe mit ca. 10 % [GVM 1999].

Der Anteil am Sammelgemisch lässt sich im Mittel auf ca. 4,5 % entsprechend ca. 90.000 t/a beziffern.

Die Materialgruppe ist im Dualen System der Spezifikation Mischkunststoffe zuzuordnen. In der realen Verwertungskette bestehen Synergien mit stoffgleichen Nichtverpackungen wie Gefrierbeutel u.ä., die allerdings bei der Wertstoffbilanz nicht berücksichtigt sind.

Hinsichtlich ihrer Verwertungseigenschaften ist die Materialgruppe nach Kunststoffart und Technologievariante bedingt differenziert zu betrachten.

Im Status quo gelangen die „Kleinfolien“ zwischenzeitlich überwiegend in den Produktstrom Mischkunststoffe und werden hierüber den spezifischen Verwertungswegen zugeführt. Ein geringer Anteil wird mit der Folienfraktion „fehlausgetragen“. Bei Sortierung nach dem Stand der Technik im optimierten Status erhöhen sich die Produktanteile nochmals deutlich, da die Artikelgrößen- Reglementierung der Handsortierung entfällt und die mechanische Sortierung mit hohem Wirkungsgrad erfolgt. Bei einer Sortierung nach dem Muster Sortec spielt nur die Kunststoffart für die Produktzuweisung eine Rolle. Stofflich verwertbar sind PE-, PP- und PS-Folien. Kleinfolien weisen überdurchschnittlich hohe Anteile an Restanhaftungen etc. auf, so dass mit steigender Veredlungstiefe die Produktausbeute sinkt. Die quantitativen Verhältnisse (vgl. Anhang 3.1.4 – 3.1.6) sind Tabelle 3.1.3 zu entnehmen.

Folien < DIN A4			Produkte
Status quo	optimierter Status	Sortec	
5,4%	4,0%		Regranulat
0,4%	0,3%		werkstoffl. Verwertung Kunststoffersatz
4,2%	4,1%		werkstoffl. Verwertung Holz/Betonersatz
45,2%	59,0%		Agglomerat (SVZ/SB)
		40,8%	PO-Agglomerat
		8,3%	PE-Regranulat
		8,5%	PS-Regranulat

Tabelle 3.1.3: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Folien < DIN A4 bei unterschiedlichen Technologievarianten

Zusammenfassend sind für die Materialgruppe Kleinfolien hinsichtlich ihrer Verwertungseigenschaften unter quantitativen und qualitativen Aspekten gegenüber den Großfolien in allen Varianten nennenswerte Abstriche zu verzeichnen. Hierbei spielt aber weniger die Größe eine Rolle als vielmehr die Kunststoffartenvielfalt in dieser Materialgruppe.

3.1.3.3 Kunststoffflaschen < 5l

Die Materialgruppe umfasst kleinere blasgeformte Verpackungsartikel wie Getränke- oder Shampooflaschen.

Während Anfang der neunziger Jahre Kunststoffflaschen fast ausschließlich aus HDPE hergestellt wurden, sind heute im Wesentlichen die drei Kunststoffarten PE, PET und PP von Relevanz. Hierbei stellt PE mit ca. 65 % immer noch den größten Anteil. Der PP-Anteil liegt bei ca. 9 %. Die Bedeutung von PET als Flaschenwerkstoff nimmt stark zu und liegt derzeit bei ca. 23 %, wobei es sich hierbei um zusätzliche Kunststoffmengen als Folge der Substitution von Einwegglasflaschen handelt. Übrige Kunststoffe wie PS und PVC spielen mit in Summe ca. 3 % für Füllgüter wie Kleber u.ä. eine untergeordnete Rolle [GVM 1999].

Der Anteil von Kunststoffflaschen im Sammelgemisch lässt sich auf etwa 5 % entsprechend ca. 100.000 t/a beziffern.

Hinsichtlich ihrer Verwertungseigenschaften ist die Materialgruppe differenziert nach Kunststoffart zu betrachten. Sortiertechnisch stellen sich Kunststoffflaschen bereits im Status quo verhältnismäßig unproblematisch dar, da die relativ hohen Einzelstückgewichte auch eine manuelle Sortierung verhältnismäßig effizient ermöglichen. Nicht in

die Flaschenfraktion aussortierte Anteile finden sich überwiegend in der Mischkunststofffraktion. Die Sortierverluste sind gering.

Bei den Wertstoffbilanzen des Status quo sowie der Variante optimierter Status - alte Spezifikationen schlägt allerdings negativ zu Buche, dass PET-, PS- und PVC-Flaschen innerhalb der Kunststoffaufbereitung als Reststoffe anfallen. Dieses Defizit ist in den technischen Optionen „optimierter Status“ und „Sortec“ infolge der veränderten Produktpalette kompensiert, so dass die Produktanteile bei diesen Varianten entsprechend höher sind. Tabelle 3.1.4 zeigt die Ergebnisse der quantitativen Auswertung (vgl. Anhang 3.1.7 – 3.1.10).

Flaschen			Produkte
Status quo	optimierter Status		
	alte Spezifikation	neue Spezifikation	
44,8%	49,2%		
0,6%	0,0%		werkstoffl. Verwertung Kunststoffersatz
1,1%	0,8%		werkstoffl. Verwertung Holz/Betonersatz
11,8%	18,2%		Agglomerat (SVZ/SB)
		44,4%	PE-Regranulat
			62,2%
		5,8%	PO-Agglomerat
		16,0%	PP-Regranulat
			15,4%
			PET-Mahlgut
			1,6%
			PS-Regranulat

Tabelle 3.1.4: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Kunststoffflaschen bei unterschiedlichen Technologievarianten

3.1.3.4 Hohlkörper > 5l

Die Materialgruppe umfasst größere Kunststoffgebilde wie Eimer und Kanister. Als Werkstoffe finden ausschließlich PE (ca. 64 %) und PP (ca. 36 %) Anwendung.

Der Anteil am Sammelgemisch lässt sich auf etwa 0,6 % entsprechend ca. 12.000 t/a beziffern.

Die Materialgruppe ist im Dualen System der Spezifikation Mischkunststoffe zuzuordnen; teilweise wird auch eine eigenständige Fraktion (sog. Mischkunststoffe II) bereitgestellt.

Hinsichtlich ihrer Verwertungseigenschaften ist die Materialgruppe homogen. Stückgröße und hohe Einzelstückgewichte lassen eine ausreichend 100-prozentige Aussortierung auch bei rein manueller Produktgewinnung zu. Wegen der spezifischen Werkstoffeigenschaften ist aber eine Veredlung zu hochwertigen Regranulaten nur bedingt möglich; hieraus resultiert die Abgrenzung zur Flaschenfraktion über die Größenreglementierung. Füllgutreste (Lösungsmittel, Farben, Mineralöle etc.) bilden in dieser Materialgruppe ein zusätzliches spezifisches, nicht in der Grobclusterung zu behandelndes Problemfeld.

Bekanntermaßen hat die DSD AG wegen der Kunststoffübermengenproblematik die Kunststoffbereitstellungsmengen gedeckelt. Dies führt bei der Materialgruppe Hohlkörper > 5 l je nach spezifischer Mengensituation der Sortieranlage dazu, dass Großgebilde entweder nahezu zu 100 % in den Produkten bereitgestellt oder mit Teilen der stoffgleichen Nichtverpackungen (sog. techn. Kunststoffe) außerhalb des Dualen Systems entsorgt werden.

Eine Darstellung der Materialflüsse analog zu den übrigen Materialgruppen ist daher methodisch weder möglich noch zur Bewertung sinnvoll.

3.1.3.5 Becher

Die Materialgruppe Becher umfasst tiefgezogene Kunststoffverpackungen für Lebensmittel wie Joghurt oder Margarine.

Becher sind entweder aus PP oder PS gefertigt. Das Verhältnis beider Kunststoffarten beträgt derzeit ca. 50 % zu 50 % [GVM 1999].

Der Anteil von Bechern am Sammelgemisch lässt sich im Mittel auf etwa 5,6 % entsprechend ca. 112.000 t/a beziffern.

Die Materialgruppe ist innerhalb des Dualen Systems der Spezifikation Mischkunststoffe zuzuordnen. Als eigenständige Fraktion aus Sonderverträgen werden Becher partiell auch separat bereitgestellt.

Hinsichtlich ihrer Verwertungseigenschaften ist die Materialgruppe im Vergleich zu anderen Kunststoffen als sehr homogen zu bezeichnen. Für die manuelle Sortierung sind speziell die kleineren Gebindegrößen grenzwertig, so dass die Ergebnisse im Status quo noch durch nennenswerte spezifische Sortierverluste gekennzeichnet sind. Mit automatischen Sortierverfahren sind Becher überproportional gut abzutrennen, so dass in den opt. Status-Varianten mit maximalen Sortierverlusten von 15 % zu rechnen ist. Den höchsten Veredlungsgrad erzielt man für die Materialgruppe mit der Option

opt. Status, da hierin beide vertretenen Kunststoffarten zu Regranulaten aufbereitet werden, gefolgt von der Option Sortec, in der der PS-Anteil als Regranulat und der PP-Anteil über das PO-Agglomerat verwertet wird.

Bei der unmittelbaren Gegenüberstellung der Produktanteile für die einzelnen Verfahrensvarianten in Tabelle 3.1.5 (vgl. Anhang 3.1.11 – 3.1.14) ist zu berücksichtigen, dass Becher i.d.R. relativ hohe Füllgutrestanhaftungen aufweisen. Hierdurch wird die Produktausbeute mit wachsendem Anteil höher veredelter Produkte von der Tendenz her geringer.

Becher				Produkte
Status quo	optimierter Status		Sortec	
	alte Spezifikation	neue Spezifikation		
0,4%	0,5%	0,1%		Regranulat
2,2%	2,8%	0,3%		werkstoffl. Verwertung Holz/Betoners.
47,7%	59,8%	7,0%		Agglomerat (SVZ/SB)
2,8%		28,0%		PP-Regranulat
			36,1%	PO-Agglomerat
2,8%		28,0%	36,0%	PS-Regranulat

Tabelle 3.1.5: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Kunststoffbecher bei unterschiedlichen Technologievarianten

3.1.3.6 Sonstige Kunststoffe

In der Stoffgruppe „sonstige Kunststoffe“ sind eine Reihe verschiedenster Verpackungen subsummiert (z.B. Tuben, gespritzte Dosen, Kästen/Steigen, Paletten, Einweggeschirr, Verschlüsse, Blister, Strohhalm, Obst- und Gemüsebehältnisse, Pflanztöpfe, Kartoffelsäcke).

Entsprechend der Artikelvielfalt sind in dieser Materialgruppe auch die verschiedenartigsten Polymerarten anzutreffen. Mit ca. 30 % ist PP der wichtigste Werkstoff; nennenswerte Anteile entfallen im Weiteren auf PS mit ca. 19 %, PE mit ca. 14 % und Verbunde unterschiedlicher Kunststoffarten mit ca. 30 %.

Der Anteil der Materialgruppe am Sammelgemisch lässt sich auf etwa 5,2 % entsprechend ca. 104.000 t/a beziffern.

Die Materialgruppe ist der Spezifikation Mischkunststoffe zuzuordnen.

Hinsichtlich ihrer Verwertungseigenschaften ist die Materialgruppe durch ihre Artikel- und Werkstoffvielfalt verhältnismäßig heterogen. Je nach Form, Farbe, Gr Werkstoff wären zusätzliche Differenzierungen in Abhängigkeit zu jeder einzelnen technischen Variante sinnvoll, die mangels geeigneter Datenbasis nur qualitativ geleistet werden kann.

Tabelle 3.1.6 zeigt das Ergebnis der Berechnungen zum mittleren Produktausbringen für die Materialgruppe (vgl. Anhang 3.1.15 – 3.1.18).

Sonstige Kunststoffe			Produkte
Status quo	optimierter Status		
	alte Spezifikation	neue Spezifikation	
0,7%	0,9%	0,2%	Regranulat werkstoffl. Verwertung Kunststoffersatz werkstoffl. Verwertung Holz/Betonersatz Agglomerat (SVZ/SB) PE-Regranulat PO-Agglomerat PP-Regranulat PET-Mahlgut PS-Regranulat
0,0%			
1,8%	2,1%	0,6%	
43,2%	50,6%	13,7%	
		8,5%	
		19,5%	
		1,7%	
		11,7%	
			57,5%
			2,8%
			21,6%

Tabelle 3.1.6: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für sonstige Kunststoffe bei unterschiedlichen Technologievarianten

Im Status quo ist die Produktausbeute verhältnismäßig gering, wobei die Verluste im Wesentlichen auf den Sortierprozess zurückzuführen sind. Prozessbestimmend ist hierbei vornehmlich die Stückgröße der Verpackung, da der Status quo noch relativ stark von den Möglichkeiten der Handsortierung geprägt ist.

Da ausschließlich eine Zuordnung zu der Mischkunststofffraktion erfolgt, spiegelt sich im erzeugten Produktmix der Materialgruppe 1 : 1 der der Mischfraktion wider.

Bei einer halbautomatischen Sortierung ist das Trennverhalten der Materialgruppe im Mittel nicht unwesentlich schlechter zu bewerten als das von Bechern oder Flaschen. Bei unveränderten Spezifikationen wird die Produktpalette wiederum durch die spezifischen Verwertungspfade der Mischkunststofffraktion definiert.

Bei der Variante opt. Status erfolgt eine zusätzliche Differenzierung nach Verpackungsartikelform.

Annähernd gilt, dass die flächigen, flexibleren Anteile der Materialgruppe in die Mischfraktion überführt und die formstabilen Anteile, soweit aus PE, PS, PP oder PET höher veredelt werden. Schwarze oder sehr dunkel eingefärbte Verpackungen fallen generell als Reste an.

Bei der Option „Sortec“ spielen Form, Farbe und Artikelgröße ausgenommen der PET-Verpackungen keine Rolle für das Bilanzergebnis. Rückgewonnen werden die PE, PP und PS-Altverpackungen abzüglich der durch den Waschprozess abgetrennten Verschmutzungen, Restinhalte und Etiketten.

Die Materialgruppe beinhaltet Verpackungen, die aus Gründen ihres Störstoffpotentials gesondert anzusprechen sind. Dies sind zum einen Kunststoffbänder und Netze, die teilweise gezielt in den Anlagen entnommen werden, da sie mechanische Schäden an Lagern etc. hervorrufen können. Zum anderen sind Silikon oder Acrylkartuschen anzuführen. Hier ist nicht die Verpackung an sich das Problem, sondern der häufig zu verzeichnende Restinhalt, der beim Kunststoffaufbereiter massive Schäden verursachen kann.

3.1.3.7 Kunststoffverbunde

Die Materialgruppe wird im Wesentlichen durch etikettierte Folienverpackungen repräsentiert. Stofflich besteht die Materialgruppe zu etwa 94 % aus Kunststoff und zu ca. 6 % aus Papier, so dass sie knapp dem Verbundkriterium (95 : 5) unterliegt.

Mit ca. 1,2 % entsprechend etwa 24.000 t/a stellen Kunststoffverbunde einen relativ unbedeutenden Anteil am Sammelgemisch.

Kunststoffverbunde sind im Dualen System der Spezifikation Mischkunststoffe zuzuordnen.

Bezüglich ihrer Verwertungseigenschaften sind Kunststoffverbunde in etwa mit den Kleinfolien zu vergleichen. Nur unzureichend manuell sortierbar, hat sich die Ausbringensrate durch die Einführung von Windsichtern zur Erzeugung eines Teils Mischkunststofffraktion in modernen Anlagen maßgeblich erhöht. Der Status quo ist aber immer noch von verhältnismäßig hohen Verlusten geprägt.

Die Bilanz verbessert sich bei ausschließlicher Berücksichtigung des Standes konventioneller Sortiertechnik in der Variante opt. Status.

Bei der Option Sortec erfolgt eine vollständige Überführung in die Nassaufbereitung, wobei Kunststoff- und Papierfaser voneinander getrennt werden und jeweils mit dem korrespondierenden Produktströmen verwertet werden.

Tabelle 3.1.7 zeigt die Ergebnisse der quantitativen Auswertung (vgl. Anhang 3.1.19 – 3.1.21).

Kunststoffverbunde			Produkte
Status quo	optimierter Status	Sortec	
0,8%	1,0%		Regranulat
1,9%	2,5%		werkstoffl. Verwertung Holz/Betonersatz
45,0%	58,6%		Agglomerat (SVZ/SB)
		83,0%	PO-Agglomerat
		4,5%	Faserstoff
6,9%	9,0%		Feuchteverluste

Tabelle 3.1.7: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Kunststoffverbunde bei unterschiedlichen Technologievarianten

3.1.3.8 EPS

Die Materialgruppe EPS umfasst Kunststoffartikel aus expandiertem Polystyrol, die in Platten - oder Chipform sowie als Formteile in unterschiedlichen Größen teils auch vorgebrochen auftritt. Eine Unterscheidung von Verkaufsverpackungen und anderen Herkunftsbereichen (z.B. Bauplatten) ist am realen Abfallstrom nicht gesichert möglich.

EPS stellt mit ca. 1,2 % entsprechend ca. 26.000 t/a einen mengenmäßig relativ unbedeutenden aber aufgrund der geringen Rohdichte von nur ca. 7 - 10 kg/m³ einen volumetrisch nennenswerten Anteil am LVP-Gemisch.

EPS bildet, soweit weiß und unverschmutzt, im Dualen System eine eigenständige Fraktion, die aber aus dem Gemisch so gut wie nicht bereitgestellt wird, da die Aussortierung betriebskostenmäßig unververtretbar ist. Darüber hinaus ist EPS eine zulässige Komponente in der Mischkunststofffraktion.

EPS ist, soweit es an der Anfallstelle oder dieser Wertstoffhöfe als separate Fraktion bereitgestellt wird, als quantitativ stofflich verwertbar einzustufen. Aus dem Altmaterial wird Mahlgut verschiedener Körnungen erzeugt, das als Substitut von Neuware in

Bauprodukten (Wärmedämmputze, Porensteine) Einsatz findet. Völlig unklar ist wegen der o.a. Abgrenzungsprobleme, inwieweit diese Form der Veredlung den Verkaufsverpackungsanteilen gutgeschrieben werden kann.

Auf eine quantitative Modellierung wird daher verzichtet.

Einmal als Gemischkomponente mit LVP erfasst, werden die Verwertungseigenschaften von EPS näherungsweise durch die Artikelgruppe „sonstige Kunststoffe“ repräsentiert, wobei die spezifischen Aufwendungen für EPS-Verwertung aufgrund seines extrem niedrigen Raumgewichtes überproportional hoch zu bewerten sind.

3.1.3.9 PPK-Verbunde

Die Materialgruppe PPK-Verbunde umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher Verpackungspartikel, die zum überwiegenden Anteil aus Papier bestehen. Typische Vertreter dieser Materialgruppe sind Wachspapier, Einwickler und andere Tiefkühlverpackungen sowie Kombidosen.

Stofflich bestehen die Verpackungen dieser Materialgruppe zu etwa 90 % aus Papier und zu 10 % aus Kunststoff. Kombidosen weisen darüber hinaus i.d.R. einen Weißblechboden sowie eine eingewickelte Aluminiumfolie auf.

PPK-Verbunde sind im Sammelgemisch zu etwa 1,2 % entsprechend ca. 24.000 t/a vertreten.

Die Materialgruppe bildet innerhalb des Dualen Systems eine eigenständige Spezifikation, wobei Überlagerungen zur Aluminiumspezifikation bestehen. Es gibt in der praktischen Verwertung sehr hohe Synergien mit PPK-Fehlwürfen, die aber in den weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt werden.

Die Materialgruppe ist bezüglich ihrer Verwertungseigenschaften verhältnismäßig homogen. Lediglich Kombidosen sind separat zu erörtern, da sie sich als Folge ihrer Materialzusammensetzung auf die Teilströme Weißblech, Aluminiumfraktion und PPK-Verbunde mehr oder minder nach Zufallgesichtspunkten verteilen.

Die Produktausbeuten in den unterschiedlichen technischen Varianten sind geprägt von der Höhe der Verlustarten in der ersten Behandlungsstufe.

Dass im Status quo die Ausbringensrate in die eigentliche Zielfraktion der Sortierung nur bei ca. 50 % liegt, zeugt von der Schwierigkeit, PPK-Verbunde manuell auszusortieren. Es kommt darüber hinaus zu nennenswerten Verschleppungen in der Mischkunststofffraktion. Für konventionelle Sortieranlagen nach dem Stand der Technik

wurden Ausbringenswerte von ca. 70 % ermittelt, was durch die insgesamt bessere Materialvorbereitung zu begründen ist. In beiden Varianten erfolgt die stoffliche Verwertung des Faseranteils im Zuge einer nassmechanischen Altpapieraufbereitung. Zur Variante Sortec ist anzumerken, dass die Trennung ausschließlich im Nassverfahren vorgenommen wird, o.a. Verlustquellen insofern entfallen und somit eine nahezu vollständige Fraktionierung in Fasern und PE-Folie erfolgt.

Das quantitative Ergebnis der unterschiedlichen technischen Varianten in Bezug auf die Rückgewinnung der Materialgruppe PPK-Verbunde ist Tabelle 3.1.8 zu entnehmen (vgl. Anhang 3.1.22 – 3.1.24).

PPK-Verbunde			Produkte
Status quo	optimierter Status	Sortec	
33,5%	58,3%	83,0%	Faserprodukt
7,0%	12,3%		Zementindustrie
0,2%	0,2%	0,2%	Aluminium
0,1%	0,1%		Regranulat
0,2%	0,2%		werkst. Verwertung Holz/Betonersatz
5,3%	5,6%		Verwertung SVZ/SB
		8,5%	PO-Agglomerat
0,8%	0,8%	0,8%	Weißblech (mit 6% Wb-Anteil)

Tabelle 3.1.8: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für sonst. PPK-Verbunde bei unterschiedlichen Technologievarianten

3.1.3.10 Flüssigkeitskartons

Die Materialgruppe umfasst Flüssigkeitskartons mit und ohne Aluminiumfolienbeschichtung. Stofflich bestehen Flüssigkeitskartons im Mittel aus 75 % Papier, ca. 21 % Kunststoff und ca. 3 - 4 % Aluminium [GVM 1999].

Im Sammelgemisch beträgt der Anteil der Materialgruppe ca. 7,9 % entsprechend ca. 158.000 t/a.

Innerhalb des Dualen Systems bilden die Flüssigkeitskartons eine eigenständige Spezifikation.

Die Materialgruppe ist bezüglich ihrer Verwertungseigenschaften sehr homogen.

Flüssigkeitskartons sind auch manuell mit gutem Ergebnis aussortierbar, so dass im Status quo bereits Ausbringenswerte in das Zielprodukt von über 85 % erzielt werden. Flüssigkeitskartons sind auch über Wirbelstromscheidung abtrennbar, so dass in Anlagen älteren Zuschnitts ein (unerwünschter) Austrag in die Aluminiumfraktion in nennenswerter Größenordnung zu verzeichnen ist.

Sowohl in der konventionellen Sortierung nach dem Stand der Technik als auch beim Sortec-Verfahren erfolgt die Abtrennung von Flüssigkeitskartons in der ersten Stufe über NIR-Klaubesysteme. Bei beiden Verfahrensvarianten werden die Ausbringensverluste durch die weitere Verfahrensweise minimiert. Bei Sortierprozessen nach dem Muster opt. Status wird der Anteil der FKN-Fraktion durch Nachsortierung des Wirbelstromscheiderproduktes gesteigert. Beim Sortec-Prozess werden die nicht von der NIR-Detektion erfassten Verpackungen nassmechanisch über die Produkte Faserstoff und Aluminiumverbundfraktion verwertet.

Wie aus Tabelle 3.1.9 zu ersehen, ist Produktausbeute bzw. die Verwertungseigenschaft der Materialgruppe wenig sensitiv gegenüber der technischen Variatenbetrachtung (vgl. Anhang 3.1.25 – 3.1.27).

FKN			Produkte
Status quo	optimierter Status	Sortec	
56,6%	63,3%	69,5%	Faserprodukt
23,4%	26,2%	19,0%	Zementindustrie
0,1%		0,3%	Aluminium

Tabelle 3.1.9: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für FKN bei unterschiedlichen Technologievarianten

3.1.3.11 Weißblech und Weißblechverbunde

Die Materialgruppe Weißblech umfasst Verpackungen aus Eisenblechen wie Konservendosen, Eimer, Kanister etc. sowie Verschlüsse ohne Dichtmasse.

Weißblechverpackungen weisen einen Metallanteil von ca. 98 % auf; ca 2 % entfallen auf Papieretiketten.

Unter Weißblechverbunden werden im Wesentlichen Getränkedosen sowie Deckel und Verschlüsse mit Dichtmasse zusammengefasst, deren Fremdmaterialanteil -

Aluminium oder Kunststoff - über 5 % beträgt. Stofflich besteht die Materialgruppe aus ca. 91 % Weißblech, ca. 7 % Aluminium und ca. 2 % Kunststoff [GVM 1999].

Summarisch wird der Anteil beider Materialgruppen am Sammelgemisch auf ca. 22,2 % entsprechend ca. 444.000 t/a beziffert (350.000 t/a WB; 94.000 t/a WB-Vb).

Beide Materialgruppen bilden im Dualen System die Spezifikation Weißblech. Synergien zu stoffgleichen Nichtverpackungen sind im nennenswerten Maße gegeben, werden aber bilanziell im Weiteren außer Acht gelassen.

Hinsichtlich ihrer Verwertungseigenschaften sind beide Materialgruppen in sich homogen und annähernd vergleichbar.

Dank der ferromagnetischen Eigenschaft von Weißblech werden die Verpackungsartikel unabhängig von der technischen Variante der LVP-Sortierung quasi vollständig aus dem Gemisch durch Magnetscheidung abtrennen.

Tabelle 3.1.10 zeigt die Bilanzierungsergebnisse für Weißblech (vgl. Anhang 3.1.28 – 3.1.30), Tabelle 3.3.10 für Weißblechverbunde (vgl. Anhang 3.1.31 – 3.1.33).

Weißblech			Produkt
Status quo	Optimierter Status	Sortec	
97,8%	99,0%	99,0%	Weißblech

Tabelle 3.1.10: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Weißblech bei unterschiedlichen Technologievarianten

Weißblechverbunde			Produkt
Status quo	Optimierter Status	Sortec	
95,5%	99,0%	99,0%	Weißblech

Tabelle 3.1.11: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Weißblechverbunde bei unterschiedlichen Technologievarianten

Es ist zu beachten, dass in keiner Variante die Altverpackung in ihrem Stoffbestand verändert wird, so dass die Nichteisenanteile wie z.B. Restinhalte erst im Rahmen der ökobilanziellen Schnittstellenbetrachtung berücksichtigt werden.

3.1.3.12 Aluminium

Die Materialgruppe umfasst Verkaufsverpackungen aus reinem Aluminium wie Dosen und Folien.

Der Anteil an Aluminiumverpackungen am Sammelgemisch lässt sich auf ca. 1,6 % entsprechend 32.000 t/a beziffern.

Gemeinsam mit Alu-Verbunden und aluhaltigen Verbunden werden Reinaluminiumverpackungen im Dualen System der Spezifikation Aluminium zugeordnet. Es bestehen Synergien zu stoffgleichen Nichtverpackungen (Haushaltsartikel), die aber im Weiteren nicht berücksichtigt sind.

Aluminium ist in Folge verhältnismäßig kleiner Stückgrößen manuell nur begrenzt sortierbar. Für die heutige Praxis spielt dies allerdings kaum mehr eine Rolle, da die Sortierung zwischenzeitlich weitgehend mechanisch über Wirbelstromscheider erfolgt. Gemäß des Funktionsprinzips dieser Maschinen wird das Trennverhalten maßgeblich von der Kornform der Artikel bestimmt. Einschränkungen existieren im Bereich der Verpackungssortierung nur für geknüllte Alufolie. Die Partikelgröße ist ohne Einfluss.

Die Aluminiumfraktion - und mit ihr die aussortierten Aluminiumverpackungen wird generell einer pyrolytischen Nachbehandlung (ggf. nach nochmaliger mechanischer Anreicherung) unterzogen. Am Ende der Prozesskette wird durch Einschmelzen des Pyrolyserückstands elementares Aluminium erzeugt.

Für die Beurteilung der stofflichen Verwertbarkeit einzelner aluminiumhaltiger Verpackungen ist die Schmelzausbeute an Reinmetall maßgeblich. Pyrolyse und Schmelze wurden daher in die Wertstoffbilanzierung einbezogen. Untersuchungsergebnisse, die eine differenzierte Ableitung ermöglichen, liegen durch neuere Arbeiten der VAW [VAW, 2000] vor.

Tabelle 3.1.12 weist die Ergebnisse der Wertstoffbilanzen hinsichtlich der aus der Materialgruppe erzeugten Produktanteile für die drei technischen Varianten aus (vgl. Anhang 3.1.34 – 3.1.36).

Aluminium			Produkte
Status quo	optimierter Status	Sortec	
71,1%	79,6%	84,7%	Aluminium

Tabelle 3.1.12: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Aluminium bei unterschiedlichen Technologievarianten

Das Ergebnis im Status quo ist noch gekennzeichnet von dem Anteil an Sortieranlagen ohne mechanische Aluminiumabtrennung. Daher ist bei Anlagen nach dem Stand der Technik nochmals eine graduell deutliche Verbesserung zu verzeichnen.

Beim Sortec-Verfahren durchläuft der Materialstrom vom Grundsatz her zwei Aluminiumtrennstufen in Reihe; daher zeigt sich das Ergebnis gegenüber dem opt. Status

3.1.3.13 Aluminium-Verbunde

Die Materialgruppe umfasst Verkaufsverpackungen, die überwiegend aus Aluminium bestehen wie Aluschalen, Aerosoldosen und Flaschenverschüsse.

Aluminium-Verbundverpackungen bestehen im Mittel zu über 82 % aus Aluminium; Nebenmaterialien mit nennenswerten Anteilen sind Kunststoff mit ca. 13 % und Weißblech mit etwas über 4 % [GVM, 1999].

Der Anteil der Materialgruppe am Sammelgemisch lässt sich auf ca. 0,8 % entsprechend 16.000 t/a beziffern.

Aluminiumverbunde sind im Dualen System der Spezifikation Aluminium zugeordnet.

Die Verwertungseigenschaften von Aluminium-Verbunden werden wie die reiner Aluminiumverpackungen vornehmlich durch die Artikelform sowie dem spezifischen Aluminiumgehalt definiert. Die Stückgröße spielt mit zunehmender Verbreitung von Wirbelstromscheidern eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 3.1.13 weist die Ergebnisse der Wertstoffbilanzen hinsichtlich der aus der Materialgruppe erzeugten Produktanteile aus (vgl. Anhang 3.1.37 – 3.1.39).

Spezieller Teil

Verbunde auf Alubasis			Produkte
Status quo	optimierter Status	Sortec	
40,3% 5,6%	61,6%	67,7%	Aluminium MKS-Agglomerat

Tabelle 3.1.13: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für Verbunde auf Alubasis bei unterschiedlichen Technologievarianten

Wie bei der Materialgruppe Aluminium ist auch hier das Reinmetallausbringen bezogen auf 100 % Altverpackung angegeben. Ansonsten unterscheiden sich Aluminiumverbunde in ihrem Trennverhalten grundsätzlich nicht von Voll-Alu-Verpackungen, so dass sich von den Bilanzergebnissen überwiegend der geringere Metallgehalt den Verpackungen widerspiegelt.

Aufgrund suboptimaler Prozessführung kommt es bei der Status quo Variante zu Verschleppungen von Alu-Verbunden in die Mischkunststofffraktion.

3.1.3.14 Aluminiumhaltige Verbunde

Die Materialgruppe umfasst Verpackungen mit der Nebenmaterialkomponente Aluminium. Typische Verpackungsartikel sind Kaffeetüte, Suppentüte, Tablettenblister sowie Kombidosen. Der Aluminiumgehalt von Verpackungen dieser Materialgruppe liegt im Mittel bei ca. 18 - 20 %.

Der Anteil der Materialgruppe im Sammelgemisch lässt sich auf ca. 1,2 % entsprechend etwa 24.000 t/a beziffern.

Die Materialgruppe lässt sich keiner Spezifikation des Dualen Systems eindeutig zuordnen. In erster Linie umfasst aber die Spezifikation der Aluminiumfraktion alle aufgezählten Verpackungen. Je nach Hauptmaterialkomponente (Papier oder Kunststoff) ist aber auch eine Zuweisung zu anderen Fraktionen (Mischkunststoffe, PPK-Verbunde) zulässig.

Hinsichtlich ihrer verwertungsspezifischen Eigenschaften zeigt die Materialgruppe entsprechend ein etwas diffuses Bild. Quantität und Qualität der erzeugten Produkte hängen ganz wesentlich von der verfahrenstechnischen Prozessführung ab. Relevanz für Art und Umfang der stofflich gewonnenen Anteile bewirken quasi alle Stoffmerkmale wie Stückgröße, Aluminiumanteil, Form, etc.

Kennzeichnend sind entsprechend komplexe Materialflüsse, die in den stark diversifizierten Produktbilanzen in Tabelle 3.1.14 ihre Niederschlag finden (vgl. Anhang 3.1.40 – 3.1.42).

Aluminiumhaltige Verbunde			Produkte
Status quo	optimierter Status	Sortec	
6,4%	13,2%	12,2%	Aluminium
3,4%	1,5%	28,0%	Faserstoff
6,0%	2,6%		reject (mit 70 % TS)
0,1%	0,1%		Regranulat
0,3%	0,1%		werkstoffl. Verwert. Holz/Betonersatz
6,9%	3,0%		Verwertung SVZ/SB
0,3%	0,7%	2,2%	Pyrolysekoks
4,5%	2,0%	1,5%	Stahlwerk mit 6 % WB-Gehalt

Tabelle 3.1.14: Produktanteile aus der Wertstoffbilanz für aluhaltige Verbunde bei unterschiedlichen Technologievarianten

Der hauptsächliche Verwertungspfad ist bei allen Varianten der der Aluminiumrückgewinnung. Da die Metallanteile aber verhältnismäßig gering sind, resultieren hieraus nur bei zielgerichteter Prozessführung nennenswerte Produktanteile.

Bei der Variante Sortec spielen die Verbundeigenschaften nicht mehr eine ganz so entscheidende Rolle, da innerhalb des Verfahrens ein Teilaufschluss erfolgt und somit durch die Fraktionierung in Alu-Kunststoffverbund einerseits und Faseranteil andererseits eine relative Maximierung der Produktausbeute mit homogeneren Produkteigenschaften erzielt wird.

3.1.3.15 Trennbare Kombinationsverpackungen

Die Materialgruppe umfasst nicht durch den Endverbraucher in Einzelkomponenten zerlegte, nicht fest verbundener Verpackungsbestandteile. Typische Beispiele sind Zigarettenschachteln oder Pralinschachteln.

Weder in Verbrauchsmengenstatistiken noch in der Lizenzmengenstatistik des Dualen Systems existiert eine vergleichbares Packmittelsegment, da in diese Statistiken die Einzelkomponenten separat einfließen. Die Praxis zeigt aber, dass eine Aufteilung der Verpackung und separate Zuführung zu ggf. unterschiedlichen Erfassungssystemen allenfalls partiell stattfindet.

Insofern erklärt sich ein relevanter Anteil dieser Materialgruppe am Sammelgemisch, der sich auf ca. 2,3 % bzw. 46.000 t/a beziffern lässt.

Bilanziell ist das Phänomen auf Grundlage bisheriger Erhebungen nicht zu beschreiben. Es fehlen nicht nur die Bezugsmengen, es ist auch unklar, welcher Anteil über das PPK-Sammelsystem erfasst wird. Darüber hinaus lässt sich analytisch nicht ermitteln, welcher Anteil an Einzelkomponenten separat entsprechend der Systemvorgaben eingebracht wird, da eine nachträgliche Identifizierung als (ehemaliger) Bestandteil der Materialgruppe praktisch nicht leistbar ist.

Auf eine quantitative Darstellung wird daher zugunsten einer qualitativen Einschätzung verzichtet.

Trennbare Kombinationsverbunde sind in der LVP-Sortierung unerwünschte Bestandteile und unterliegen in der konventionellen Sortierung entsprechend keiner Spezifikation. Da sie stofflich überwiegend aus PPK bestehen, werden sie in der Fraktion PPK-Verbunde toleriert.

In der konventionellen Artikelsortierung ist ihr Verbleib aber überwiegend über die Sortierreste definiert. Daneben fallen sie als Verunreinigungen maschinell erzeugter Artikelfraktionen an. Ursache hierfür ist, dass eine der Verpackungskomponenten ein gleiches Eigenschaftsmerkmal aufweist wie die jeweils spezifikationsgerechten Verpackungen. Am Beispiel der Zigarettenschachtel mit aluminiumbeschichtetem Papier und Kunststofffolienumhüllung ist dies am besten zu konkretisieren. Diese findet aufgrund vergleichbarer Oberflächeneigenschaften (PE-Folie/Papier) partiell in der durch NIR-Trennung erzeugten Flüssigkeitskartonfraktion, aufgrund des Aluminiumanteils sind partiell Fehleinträge in die durch Wirbelstromscheidung erzeugten Aluminiumfraktion zu verzeichnen und letztendlich findet partiell eine Aussortierung in automatisch erzeugte Kunststofffraktionen aufgrund des PE-Anteils statt.

Im Großen und Ganzen ist aber der PPK-Anteil für die Einstufung der Materialgruppe trennbare Kombinationsverbunde charakterisierend, so dass sie bilanziell näherungsweise durch die Ergebnisse der Materialgruppe PPK-Verbunde repräsentiert werden kann.

Im Sortec-Verfahren ist der Verbundcharakter der Materialgruppe prozessspezifisch ohne besondere Relevanz; durch die nassmechanische Stofflösung wird für die Materialgruppe eine Fraktionierung gemäß stofflicher Beschaffenheit der Einzelkomponenten erzielt.

3.1.4 Vergleichende Gegenüberstellung der einzelnen Materialgruppen nach dem Kriterium stoffliche Verwertbarkeit

Zusammenfassend sollen die Ergebnisse der bilanziellen Betrachtungen für die einzelnen Materialgruppen vergleichend gegenübergestellt werden.

Als vereinfachte kennzeichnende Größe soll hier das summarische Produktausbringen herangezogen werden.

Diese Größe definiert sich aus der Summe der aus jeder Materialgruppe erzielten Sekundärproduktanteile und beschreibt somit die Recyclingfähigkeit einer gebrauchten Verpackung rein quantitativ. Berücksichtigt werden nur stofflich verwertete Anteile.

Das summarische Produktausbringen ist keine unmittelbare Größe der Bewertung, die nach Aufgabenstellung gemäß ökologischer und ökonomischer Kriterien und nicht nach dem spezifischen Grad der Wiederverwertung vorzunehmen ist. Dennoch bilden sich hierin vorbehaltlich qualitativer Unterschiede der Produkte die ökologische Einstufung bereits mittelbar ab, da diese wesentlich vom Grad eingesparter Primärrohstoffe abhängt.

Dargestellt sind in den folgenden Abbildungen 3.1.2 bis 3.1.5 die jeweiligen spezifischen Ausbringenswerte. Bezugsgröße bildet die ins System eingebrachte jeweilige Verpackungsmaterialgruppe für die technischen Varianten der LVP - Verwertungskette. In jeder Grafik sind die Ergebnisse der Größe nach geordnet. Daneben ist zur Orientierung der arithmetische Mittelwert als durchgehende Linie angezeigt. Bei Kunststoffverpackungen sind zur rohstofflichen Verwertung erzeugte Sekundärprodukte von werkstofflich verwerteten Anteilen unterschieden. Aus o.a. Gründen fehlen entsprechende Auswertungen für die Materialgruppen Hohlkörper > 5l, EPS und trennbare Kombinationsverpackungen.

Durch die vergleichende Darstellung werden zwei zentrale Aussagen nochmals nachvollziehbar:

- 1. Der Grad der Recyclierbarkeit einer Verpackung ist nicht nur eine Funktion von Werkstoff und Verpackungsdesign, sondern in hohem Maße technologieabhängig.**

Vergleicht man die Ergebnisse des Status quo mit denen moderner Verfahrenskonfigurationen der konventionellen Sortierung nach dem Stand der Technik oder der mittelfristigen Perspektive wie dem Sortec-Verfahren, wird deutlich, dass mit dem Einzug innovativer Verfahrenstechnik nicht nur der Grad der Verwertung insgesamt

gesteigert wird, sondern auch die graduellen Unterschiede zwischen den einzelnen Verpackungsarten abnehmen.

2. Die Recyclierbarkeit einzelner Verpackungen ist in ihrer hierarchischen Reihenfolge technologieabhängig.

In Bezug auf die jeweilige Rangreihenfolge zeigen sich die Auswertungsergebnisse uneinheitlich. D.h., im relativen Vergleich gibt es bei jeder Technologieänderung „Gewinner und Verlierer“. Extrembeispiele sind die Einordnung der PPK-Verbunde im Vergleich von Status quo und Sortec oder der werkstofflich verwertete Produktanteil von Bechern je nach Sortiertiefe bei den Stand der Technik Varianten opt. Status im Vergleich alter/neuer Produktspezifikationen.

Wie später noch gezeigt werden wird, ist die Fragestellung einer Identifizierung ökologisch-ökonomisch nicht sinnvoll verwertbarer Verpackungen in erster Linie relativer Natur. In Bezug zur unter 2. formulierten Aussage heißt dies, dass eine Klassifizierung (verhältnismäßig) „nicht sinnvoll verwertbar“ immer nur unter gesetzten verfahrenstechnischen Randbedingungen Geltung besitzt.

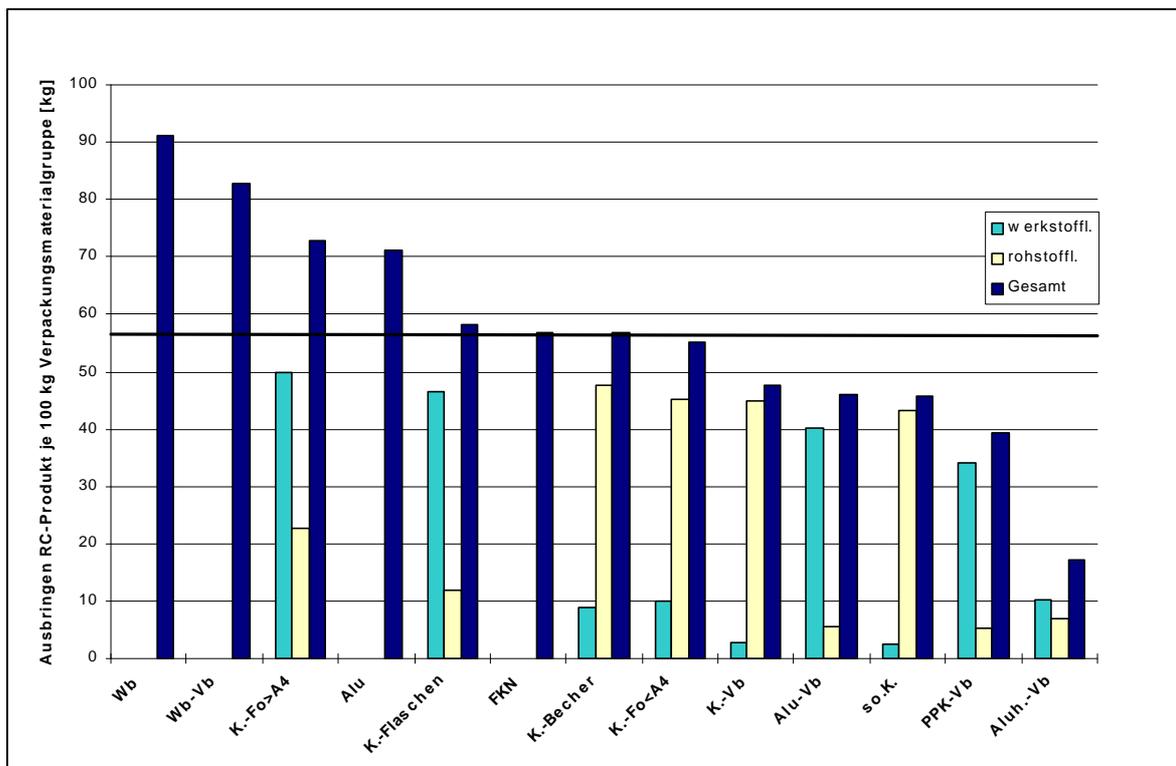


Abbildung 3.1.2: spezifisches Ausbringen an RC-Produkten in der Variante Status quo

Spezieller Teil

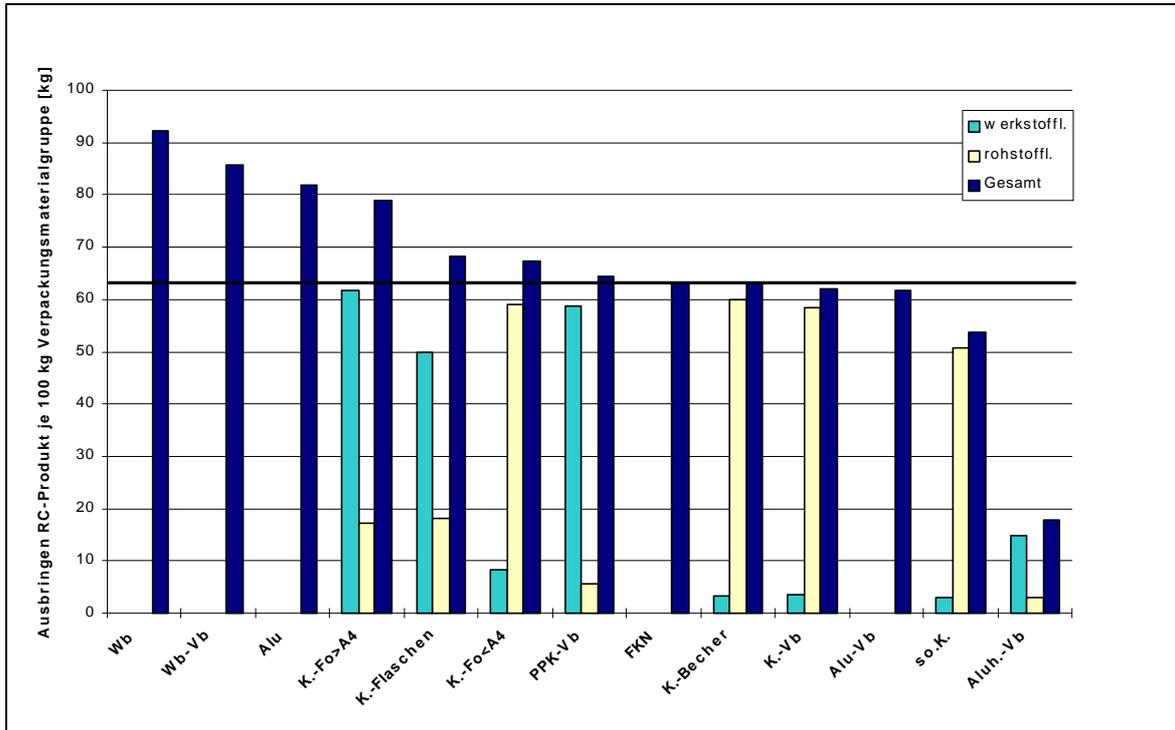


Abbildung 3.1.3: spezifisches Ausbringen an RC-Produkten in der Variante optimierter Status – alte Spezifikation

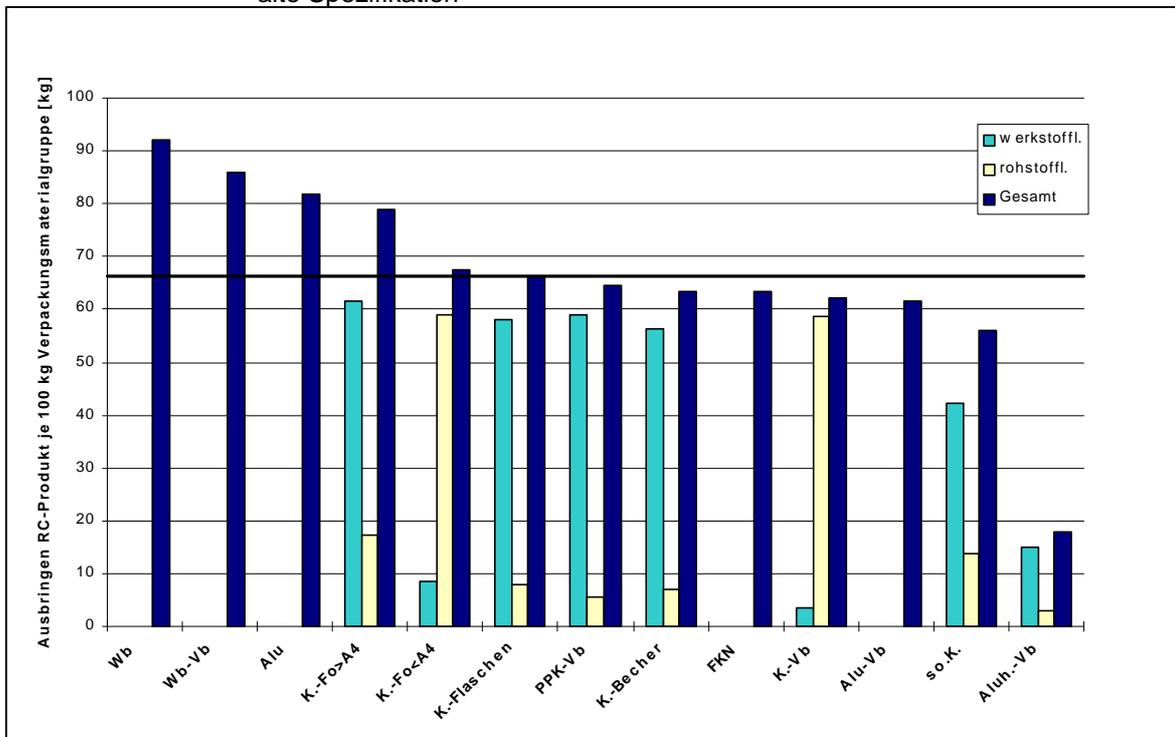


Abbildung 3.1.4: spezifisches Ausbringen an RC-Produkten in der Variante optimierter Status – neue Spezifikation

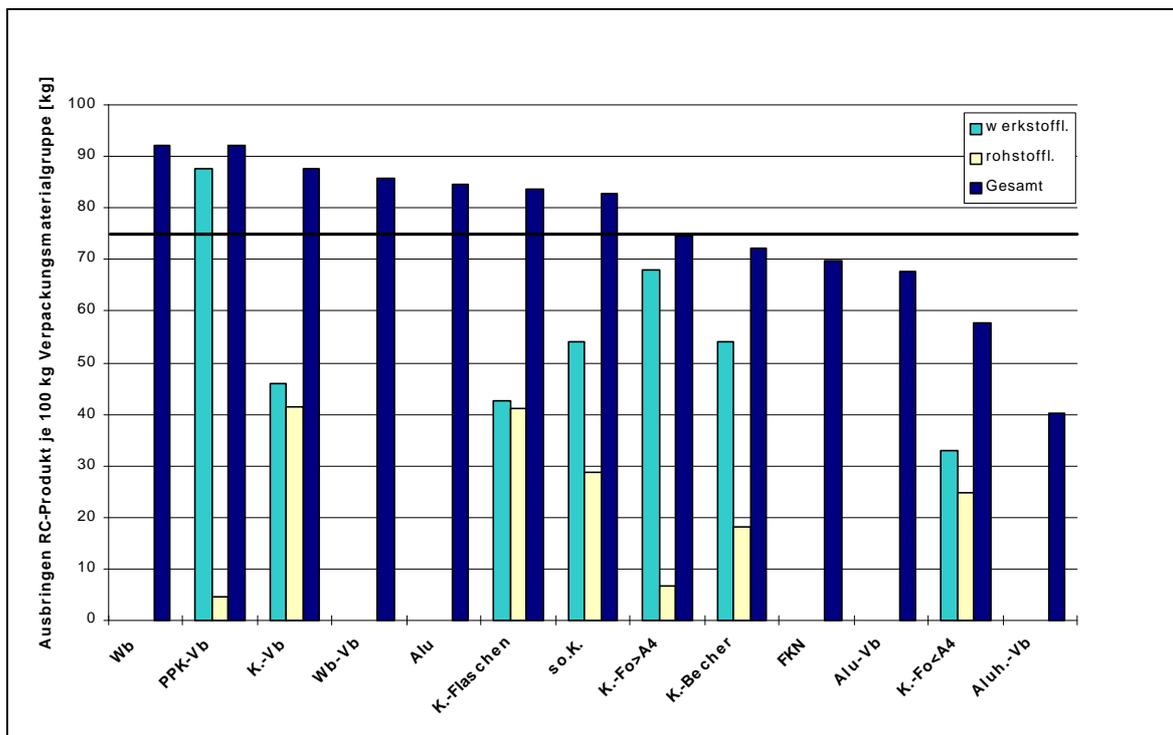


Abbildung 3.1.5: spezifisches Ausbringen an RC-Produkten in der Variante Sortec

3.2 Spezifische Verwertungskosten einzelner Verpackungsmaterialgruppen

3.2.1 Vorgehensweise zur Ermittlung spezifischer Kosten

Grundlagen und Randbedingungen der Ermittlung von Durchschnittskosten für die Erfassung und LVP-Sortierung sowie die mittleren Folgekosten bzw. Erlösansätze für die in der Sortierung erzeugten Fraktionen wurden bereits im Kapitel 2 dargestellt. Diese bilden auch die Basiszahlen zur Berechnung materialgruppenspezifischer Kosten.

Um der Zielsetzung, Kosten verursachungsgerecht einzelnen Materialgruppen zuzuweisen, annähernd realitätsnah zu entsprechen, wurde für die einzelnen Systemebenen folgendes Vorgehen gewählt:

A Erfassung

Die Erfassungskosten wurden massenanteilig umgelegt; d.h. es ergibt sich undifferenziert ein einheitlicher Betrag für jede einzelne Materialgruppe. Zu rechtfertigen wäre auch eine partielle Differenzierung nach Volumenbedarf in dem Maße, in dem einzelne Kostenarten volumenabhängig sind (z.B. Gefäßkosten Sacksammlung). Mangels belastbarer Datengrundlagen über die realen Volumenverbräuche einzelner Material-

gruppen in den relevanten Zustandsformen (verdichtet, verpresst) bei der Sammlung wurde auf eine solche Teildifferenzierung verzichtet.

Synergien für die Miterfassung von Fehlwürfen und stoffgleichen Nichtverpackungen sind nicht berücksichtigt, so dass gemäß der in Tabelle 2.2.2 getroffenen Abschätzung ein einheitlicher Betrag von 600,- DM/t zugrundegelegt wird.

B Sortierung

Die Sortierung einzelner Materialgruppen erfordert unterschiedliche Aufwendungen. Da im Rahmen der Sortierung aber nicht einzelne Materialgruppen im Sinne der hier getroffenen Abgrenzungen, sondern Fraktionen gemäß DSD-Spezifikationen bereitgestellt werden, ist eine Kostenzuweisung zunächst nur auf dieser Ebene vorzunehmen.

Zu unterscheiden sind fraktionsweise zuweisbare Kosten einerseits und nicht zuweisbare Kosten andererseits.

Fraktionsweise zuweisbare Kosten sind an dieser Stelle dadurch definiert, dass hierin die Aufwendungen für Maschinen, Personal und Betriebsmittel abgebildet werden, die funktional zur Erzeugung und Konfektionierung eines bestimmten Teilstroms (z.B. Weißblechfraktion, Folienfraktion) benötigt werden.

Zuweisen lassen sich jeweils Kapitalkosten für bestimmte Funktionsmaschinen, Personalkosten für Sortierer anhand ihrer Funktion, anteilige Verpresskosten, anteilige Kapitalkosten für die Sortierkabine (je nach Personalbedarf) etc. sowie unmittelbar hiermit in Zusammenhang stehende Verbrauchs- und Unterhaltungskosten. Den Investitionskostenansätzen für die jeweiligen Funktionsgruppen liegen mittlere Preise aus der Vergabe ausgeführter Anlagen zugrunde [z.B. HTP 1997, HTP 1998, HTP 1998 (2)]. Für jede Fraktion und jede Verfahrensvariante wurde der spez. zuweisbare Betriebskostenanteil analog der in Kapitel 2.2.2 formulierten Ansätze errechnet.

Nicht zuweisbare Kosten sind an dieser Stelle dadurch definiert, dass sie nicht streng produktfunktional zuzuordnen sind. Dies sind nach Abzug der zuweisbaren Kosten alle verbleibenden Kapitalkosten für Maschinen und sonst. technische Ausrüstung des allgemeinen Bedarfs (z.B. Gebindeöffner, allg. Fördertechnik und allg. Stahlbau, Anlagensteuerung etc.) sowie die hiermit verbundenen Betriebsmittelverbräuche, Bauteil- und Bauteilunterhaltungskosten, Personalkosten für Betriebsführung und Maschinisten, kalkulatorische Kosten, Kosten für die Entsorgung von Nichtverpackungen etc.

Die nicht zuweisbaren Kosten belaufen sich je nach Verfahrensvariante auf 30 - 40 % der gesamten Betriebskosten. Sie wurden massenanteilig gemäß durchschnittlicher

Inputverteilung der einzelnen Zielfraktionen zugewiesenen Materialgruppen (s. Tabelle 2.1.1) umverteilt.

Ergebnis der Berechnungen bilden für eine durchschnittliche Sammelgemischzusammensetzung mittlere Fraktionskosten, in denen sich die Aufwendungen widerspiegeln, die zur definierten Zuweisung von Verpackungen zum jeweiligen vorgesehenen Teilstrom vorgehalten werden.

Aus den Fraktionskosten lassen sich in einem zweiten Teilschnitt die materialgruppenspezifischen Kosten errechnen. Die Berechnung orientiert sich am Verbleib der einzelnen Materialgruppen in der Sortierung. Mathematisch wurde hierbei so verfahren, dass die einzelnen Materialgruppen entsprechend ihrer Verteilung auf die einzelnen Sortierfraktionen anteilig mit den jeweiligen Fraktionskosten belastet wurden.

C Veredlung und Verwertung

Die einzelnen Fraktionen der LVP-Sortierung verursachen unterschiedliche Folgekosten in den nachgeschalteten Prozessen. Zum Teil werden auch Erlöse erzielt.

Hinsichtlich der Zuweisung von Zuzahlungen bzw. Erlösen einzelner Fraktionen zu Materialgruppen wurde wie oben bereits beschrieben verfahren. D.h., in den materialgruppenspezifischen Verwertungskosten sind anteilig der Verteilung einer einzelnen Materialgruppe auf die einzelnen Sortierfraktionen deren mittlere Verwertungskosten aggregiert.

Allen Berechnungen liegen die bereits in Tabelle 2.2.3 aufgelisteten Kostensätze zugrunde. Von Prognosen hinsichtlich der Kostenentwicklung wurde abgesehen. Zwar ist zu vermuten, dass sich insbesondere die Zuzahlungen für die Verwertung der Kunststofffraktionen mit Auslaufen der derzeit geltenden Verträge erniedrigen werden; dies größenordnungsmäßig zu berücksichtigen, erschien den Verfassern dieser Studie aber zu spekulativ. In ihrer absoluten Größenordnung sind die Kunststoffverwertungskosten allerdings aus diesem Grunde als konservativ anzusehen.

Abgesehen von den Folgekosten, die die Verwertung der Kunststofffraktionen verursachen, sind Veredlungs- und Verwertungskosten gemessen an den Kosten für Sammlung und Sortierung verhältnismäßig unbedeutend. Insofern sind die errechneten Gesamtsystemkosten einzelner Materialgruppen wenig sensitiv gegenüber Marktpreisschwankungen. Diese wurden daher ebenfalls außer Acht gelassen.

Bei der skizzierten Methodik der Berechnung wird unterstellt, dass einzelne Materialgruppen innerhalb einer Fraktion identische Aufwendungen nach sich ziehen. Dies ist

nicht vorbehaltlos anzunehmen. So sind bspw. Folienkunststoffe in der Mischkunststoffaufbereitung durchsatzreglementiert; gegenüber starren Kunststoffverpackungen wäre demzufolge eine überproportionale Zuweisung von Aufbereitungskosten gerechtfertigt. Die Entwicklung empirisch gestützter Modelle zur quantitativen Differenzierung solcher Abhängigkeiten war aber aus Aufwandsgründen nicht Bestandteil der Studie. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist die vorgenommene Vereinfachung zu berücksichtigen.

Von dem pauschalen Berechnungsverfahren wurde nur im Fall der Aluminiumfraktion abgewichen. Zuzahlungen bzw. Erlöse richten sich bei der pyrolytischen Behandlung nach dem Aluminiumgehalt.

Abhängig vom Aluminiumpreis beginnt bei ca. 35 % Al-Gehalt die Erlöszone. Die über die Aluminiumfraktion der Pyrolyse zugeführten Verpackungsmaterialgruppen unterscheiden sich bezüglich ihres Al-Anteils erheblich. Mit durchschnittlich unter 20 % sind die aluhaltigen Verbunde dem Zuzahlungsbereich zuzuordnen. Hohe spezifische Erlöse sind der Materialgruppe Aluminium gutzuschreiben; Alu-Verbunde befinden sich ebenfalls deutlich im Erlösbereich. Der Fraktionspreis ist also ein Mischpreis, dessen -Gehalt abgebildet werden kann. Eckwerte sind über den Nulldurchgang (hier bei 35 % Al) und den Erlös für Reinaluminium definiert, der mit 1800 DM/t angesichts aktueller Vermarktungserlöse konservativ angesetzt wurde. Erlösgutschriften bzw. Verwertungskosten für die Verpackungsmaterialgruppen wurden durch lineare Inter- bzw. Extrapolation anhand der o.a. Eckwerte ermittelt.

3.2.2 Spezifische Kosten und Kostenvergleich

In vergleichbarer Darstellungsform wie bei der wertstoffbilanziellen Auswertung sind aus den nachfolgenden Abbildungen 3.2.1 bis 3.2.3 die errechneten spezifischen Gesamtsystemkosten für die einzelnen Materialgruppen zu entnehmen. Zusammenge stellt sind als Balkendiagramm die absoluten Beträge für die Verarbeitung einer Tonne durch die Endverbraucher getrennt bereitgestellter Verpackungen bis zum fertigen Sekundärrohstoff/-produkt jeweils für eine technische Variante. Neben den Gesamtkosten, die jeweils als hierarchisches Ordnungskriterium die Rangreihenfolge der einzelnen Materialgruppen von links nach rechts in der Abbildung bestimmen, sind differenziert die Teilbeiträge zu ersehen, die für die einzelnen Systemebenen Erfassung und Sortierung einerseits und Veredlung bis zum Endprodukt andererseits zu Buche schlagen. Da wie erläutert für die Erfassung ein einheitlicher Kostenansatz zugrunde gelegt wurde, wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit auf eine Differenzierung von

Erfassungskosten und Sortierkosten verzichtet. Die Differenzen zwischen den Balkenhöhen sind entsprechend ausschließlich auf unterschiedliche Sortierkosten zurückzuführen. Exakte errechnete Zahlenwerte sowie deren mathematische Ableitung sind dem Anhang zu entnehmen.

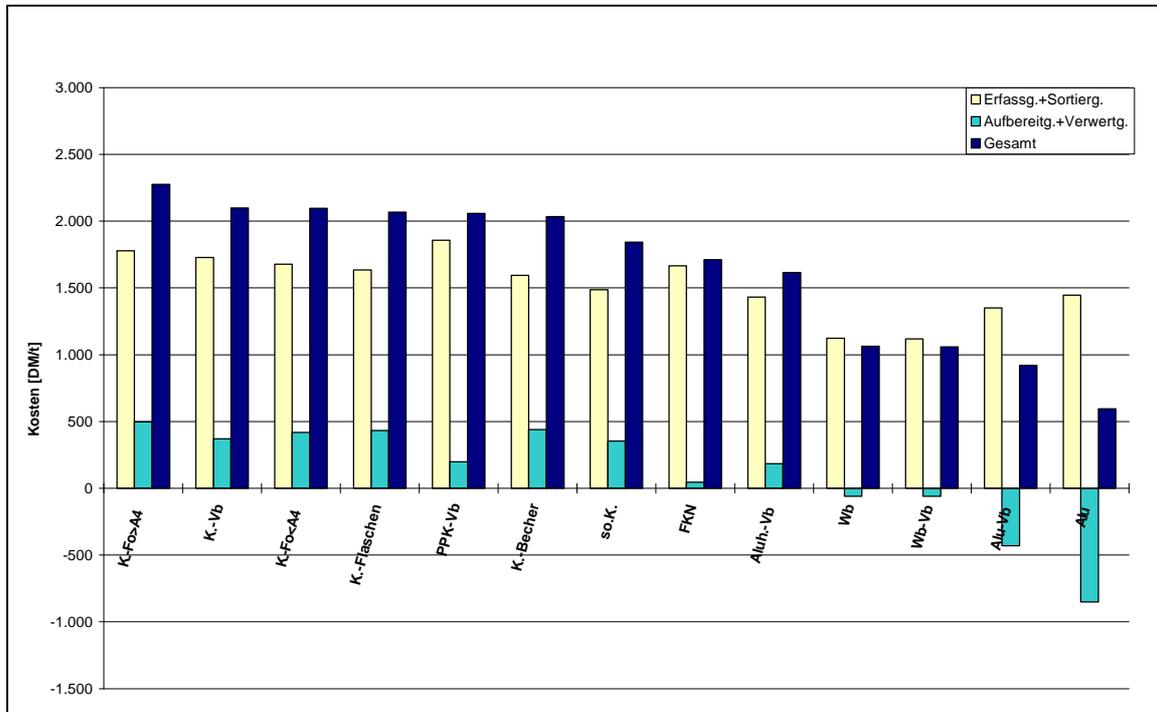


Abbildung 3.2.1: Systemkosten für einzelne Verpackungsmaterialgruppen im Status quo (ohne Verwaltungskosten Systemträger)

Abbildung 3.2.1 zeigt die aktuelle Kostensituation für die technische Variante Status quo. Bei den Gesamtkosten zeigt sich eine Spanne von in etwa Faktor 5 zwischen der teuersten und der kostengünstigsten Materialgruppe. Im oberen Drittel befinden sich alle Kunststoffverpackungen, wobei bei vergleichbarem Verwertungspfad flexible Verpackungen jeweils etwas höhere Kosten verursachen als starre. Die Kosten bewegen sich hierbei im Bereich von 2.000 -2.300 DM/t. Ähnlich hohe Kosten verursachen die PPK-Verbunde. Verzerrt wird die isolierte Aussagekraft der Darstellung allerdings durch einen massenbilanziell verursachten Effekt, der am geeignetsten an der Materialgruppe sonstige Kunststoffe erläutert werden kann. Wie der Abbildung zu entnehmen, schneidet diese Materialgruppe unter dem reinen Kostengesichtspunkt im Vergleich zu anderen Kunststoffverpackungen relativ gut ab. Dies rührt im Wesentlichen aber daher, dass für diese Gruppe überproportional hohe Sortierverluste zu verzeichnen sind, die sich bei verursachungsgerechter Kostenrechnung angesichts der hohen Diskrepanz zwischen Verwertungs- und Beseitigungskosten stark kostenmindernd

auswirken. Grundsätzlich besteht also bei reiner Kostenbetrachtung nach dem Verursachungsprinzip eine Benachteiligung recyclinggerecht gestalteter Verpackungen immer dann, wenn deren Verwertung teurer ist als ihre Ausschleusung und Beseitigung.

Bei den metallischen Verpackungen trifft letztgenannte Voraussetzung nicht zu, so dass sich hier Ausbringensverluste kostensteigernd auswirken. Die hiermit verbundene Schiefelage einer Gegenüberstellung verursachungsgerechter Kosten lässt sich methodisch wie faktisch an dieser Stelle nicht verhindern; sie erfährt ihre Auflösung aber in der späteren kombinierten ökologisch-ökonomischen Bewertung, da hier Ausbringensverluste zu entsprechender Minderung bei den Gutschriften führen.

Wird von dieser systematischen Verzerrung einmal abstrahiert, zeigt sich in Abbildung 3.2.1 ein sehr schmaler Übergangsbereich zwischen hohem und niedrigem Kostenniveau, der durch die Flüssigkeitsverbunde und die aluhaltigen Verbunde repräsentiert wird. Die Stellung der Flüssigkeitskartons ist auf relativ hohem Sortierkostenniveau vornehmlich auf die niedrigen Folgekosten für die sortierte Fraktion zurückzuführen. Aluhaltige Verbunde profitieren vom hohen Mechanisierungsgrad der Sortierung in Verbindung mit einer Wertschöpfung aus ihrem wenn auch geringen Metallanteil.

Die metallischen Verpackungen schneiden erwartungsgemäß im Vergleich am kostengünstigsten ab. Die Aufwendungen in der Sortierung für Aluminium und Aluminiumverbunde sind zwar aufgrund ihres kleinen Anteils am Sammelgemisch spezifisch relativ hoch. Aufgrund der hohen Wertschöpfung wird dieser Nachteil gegenüber den korrespondierenden Fe-haltigen Materialgruppen in der Gesamtkostenbetrachtung überkompensiert.

Abbildung 3.2.2 veranschaulicht die Verhältnisse im optimierten Status. In Folge der ausschließlichen Berücksichtigung von leistungsfähigen Sortieranlagen nach dem Stand der Technik in dieser Variante, zeigt sich im Vergleich zu Abb. 3.2.1 zunächst ein generell niedrigeres Kostenniveau. Von der Automatisierung der Kunststoffsortierung profitieren im direkten Vergleich der Kunststoffmaterialgruppen die starren, körperförmigen Verpackungen wie Becher und Flaschen, die sich deutlich von den Folienkunststoffen absetzen und mit FKN und aluhaltigen Verbunden dem mittleren Kostenniveau zuzuordnen sind. Die höchsten Systemkosten sind in dieser Variante den PPK-Verbunden zuzuschreiben. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass die für diese Materialgruppe vorgehaltene Sortiertechnik auf einen spezifisch kleinen Gemischanteil zu beziehen ist.

Spezieller Teil

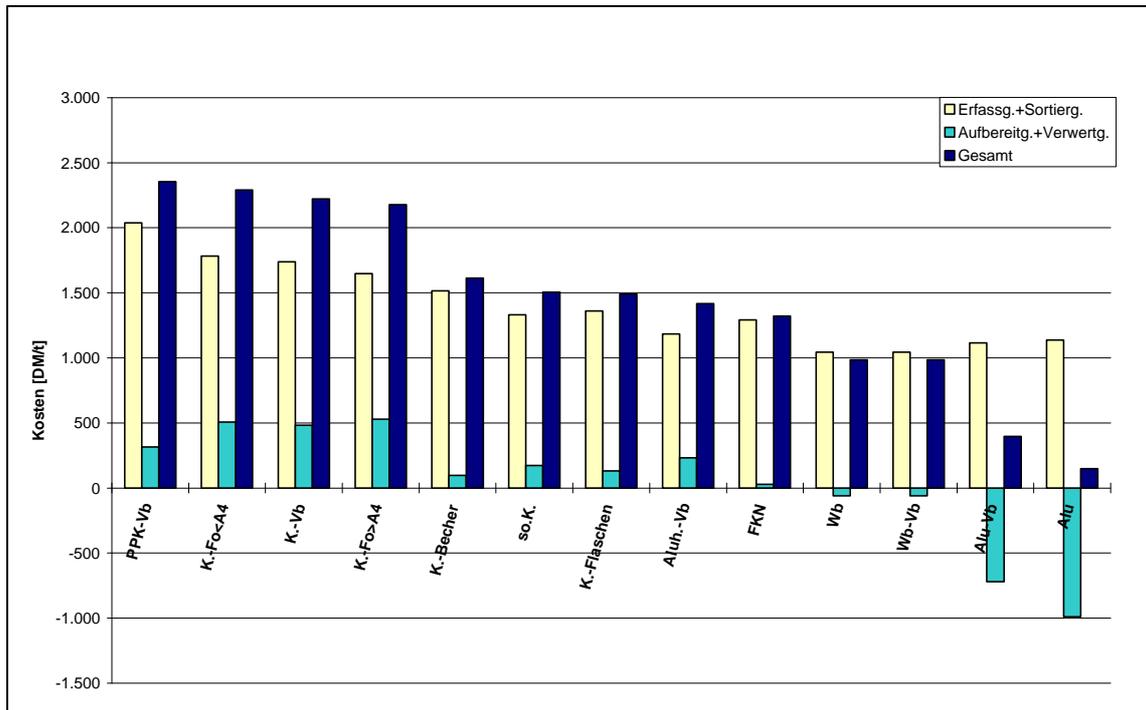


Abbildung 3.2.2: Systemkosten für einzelne Verpackungsmaterialgruppen im optimierten Status (ohne Verwaltungskosten Systemträger)

Im Vergleich der metallhaltigen Verpackungen untereinander, die wie in der Statusvariante die kostengünstigsten Materialgruppen bilden, zeigen sich nur quantitative Veränderungen, die vorrangig die Konsequenz der höheren Ausbringenswerte an Aluminiumverpackungen widerspiegeln.

Abbildung 3.2.3 veranschaulicht die Systemkostenverhältnisse für die Sortec-Variante. Augenfällig ist zunächst, dass die treppenartige Staffelung der beiden vorgenannten Varianten zugunsten eines kontinuierlichen Verlaufs der Systemkosten entfällt. Bezüglich der Rangreihenfolge sind im Vergleich zum opt. Status nur geringfügige Änderungen zu verzeichnen. Diese betreffen die Stellung der Kunststoffe untereinander. Die spezifisch höchsten Kosten verursachen unter den Kunststoffen bei der Sortec-Variante Kunststoffbecher, da für die Herstellung des Polystyrol-Regranulates, das im Wesentlichen aus dieser Materialgruppe generiert wird, überproportional hoher technischer Aufwand betrieben wird. Diesem ist nur eine geringe Erlöserwartung entgegengesetzt.

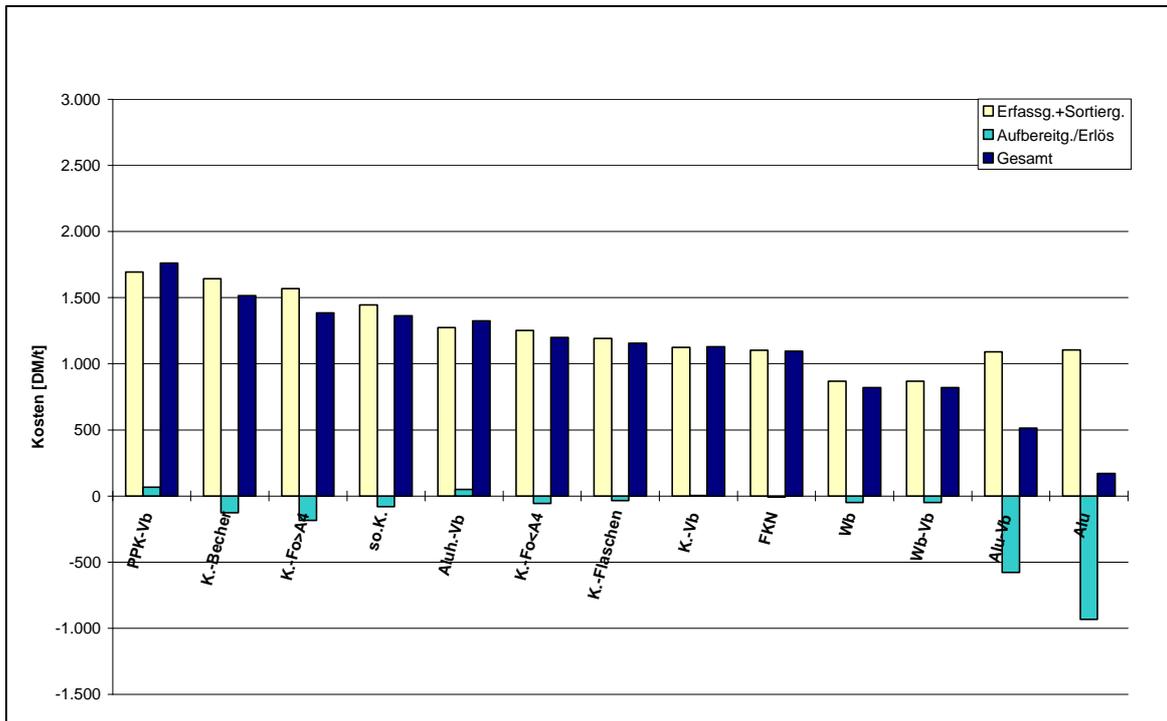


Abbildung 3.2.3: Systemkosten für einzelne Verpackungsmaterialgruppen für die Variante Sortec (ohne Verwaltungs-kostenanteil Systemträger)

In Summe lassen integrierte Verfahren wie die Sortec-Technologie gegenüber dem Stand der Technik konventioneller Sortierung nochmals nennenswerte Kostenreduzierungen bei im Mittel höherer Veredlungstiefe erwarten.

Aus der Abbildung ist erkennbar, dass sich dieser Kostenvorteil gegenüber anderen innovativen Verfahren weder aus einer gravierenden Verbilligung der Sortierkosten noch aus übermäßigen Produkterlösen herleitet, sondern vielmehr aus dem Entfallen externer Veredlungs- und Verwertungskosten resultiert.

Im Überblick aller hier diskutierter technischen Varianten erweist sich die Klassifizierung der einzelnen Materialgruppen nach dem Kostenkriterium technologieabhängig. Dies ist insoweit keine neue Erkenntnis, als dass die verfahrenstechnischen Entwicklungen mit einer allgemeinen Kostensenkung einhergehen. Im Sinne der Aufgabenstellung vorliegender Studie ist aber von besonderer Relevanz, dass wie bei der wertstoffbilanziellen Charakterisierung auch beim Kostenkriterium Verschiebungen in der Rangreihenfolge der Materialgruppen zu verzeichnen sind. Eine technologie unabhängige ökonomische Einstufung einzelner Verpackungen ist also allenfalls bedingt möglich.

Bei allen Vorbehalten gegen pauschale Klassifizierungen lassen sich aber übergreifend äquivalente Bereiche ablesen. Eindeutig setzen sich die metallischen Verpackun-

gen von den übrigen Verpackungen ab. Kostenseitig profitieren sie auch von Ergebnisverbesserungen in der Sortiertechnologie, da sie an der Schnittstelle zur Veredlung bereits die Schwelle zur Wertschöpfung durchschritten haben.

Der obere Kostenbereich wird generell von den Kunststoffverpackungen eingenommen, wobei höhere Veredlungstiefen trotz höherer Wertschöpfung i.d. Regel zu vergleichsweise höherer Kostenbelastung führt. Ausnahmen hiervon treten dann auf, wenn sich die Aufbereitung zum Regranulat oder zum Kunststoffersatzprodukt auf starre Verpackungen aus überproportional vertretenen Kunststoffarten konzentriert. Da Wertschöpfung bei Kunststoffen erst mit der Veredlung erzielt wird, bildet sich insbesondere im Status quo noch der Effekt ab, dass nicht nur der Grad der Veredlung, sondern auch vergleichsweise bessere Sortierfähigkeit höhere Kosten nach sich ziehen. (Weil die Sortierrestebeseitigung billiger ist als die Verwertung.) Der Status quo mit seinem uneinheitlichen und teilweise unzureichenden Ergebnissen eignet sich daher auch weniger als Vergleichsbasis.

Die Verbundmaterialien orientieren sich in der Kostenbewertung abgesehen von den aluminiumhaltigen Verbunden am jeweiligen Hauptmerkmal und verursachen demgegenüber jeweils höhere Systemkosten. Hervorzuheben ist, dass ihre Aggregation nach dem Verbundmerkmal wie in der VerpackV festgeschrieben, unter dem Kostenkriterium wie schon unter bilanziellen Gesichtspunkten wenig sinnvoll erscheint.

Aluminiumhaltige Verbunde und PPK-Verbunde nehmen eine Sonderstellung ein.

Für die erstgenannte Materialgruppe besteht bei allen Verfahren eine Zielzuweisung zum Aluminiumprodukt, so dass sich für die einzelne Verpackung im Detail eine Differenzierung nach dem Aluminiumgehalt ableitet.

Bei PPK-Verbunden fehlt im LVP-Bereich die korrespondierende Hauptmaterialgruppe. Übergreifend bildet sich in der Bewertung nach dem Kostenkriterium insbesondere im Vergleich zu dem annähernd stoffgleichen Getränkeverbunden ab, dass mengenmäßig überproportional vertretene Fraktionen stets spezifisch hohe Aufwendungen auf sich vereinigen.

Diese wären bspw. geringer, würden die PPK-Verbunde in einer Fraktion gemeinsam mit Getränkeverbunden verwertet. Sie würden dann von dem Kostenvorteil verhältnismäßig großer Massenströme profitieren.

Gerade dieses Beispiel macht nochmals deutlich, dass die ausgewiesenen absoluten spezifischen Kosten nur vor dem Hintergrund der zugrunde gelegten Prämissen bezüglich Systemkonfiguration und Mengengerüst Bestand haben. Da zudem Synergien

der Verwertung jeweils stoffidentischer Nichtverpackungen unberücksichtigt sind, handelt es sich um idealisierte Werte, die nur dem unmittelbaren Vergleich im Sinne des hier zu behandelnden ersten Teils der Aufgabenstellung dienen.

Im Hinblick auf den zweiten Teil der Aufgabenstellung, die Konsequenzen eines Systemausschlusses stofflich unter ökologischen und ökonomischen Kriterien nicht sinnvoll verwertbarer Verpackungen zu simulieren, ist nochmals hervorzuheben, dass ein Systemabschluss einzelner Materialgruppen kostenseitig nicht pauschaliert unter Bezugnahme auf die angegebenen spez. Systemkosten abgebildet werden kann. Diese verlieren bei geändertem Mengenszenarien ihre Gültigkeit. Es bedarf jeweils einer vollständigen Neuberechnung der Systemkosten zur Bezifferung der ökonomischen Einsparung.

3.3 Ökologische Bewertung

3.3.1 Grundlagen der Bilanzierung

3.3.1.1 Darstellung der Untersuchungsoptionen

Aus den dargestellten Rahmenbedingungen ergibt sich, dass für jede Verpackungsmaterialgruppe neben den drei technischen Verwertungsoptionen jeweils zwei Beseitigungsoptionen in Form von Szenarien bilanziert wurden. Dabei wird zum einen der derzeitige ungefähre Anteil an Müllverbrennung (MVA 30%) und Deponierung (70%) untersucht. Zum anderen wird in einer weiteren Option der Einsatz der untersuchten Verkaufsverpackungen zu 100 % in einer MVA angenommen. Der Wirkungsgrad der MVA wurde in diesen beiden Fällen mit einem Anteil von 10% elektrischer Energie und 30% thermischer Energie angesetzt.

Die untersuchten Optionen sind in Tabelle 3.3.1 mit den im weiteren Text verwendeten Abkürzungen aufgelistet. Bei jeder Verpackungsmaterialgruppe wurde sowohl für die Verwertungs- als auch für die Beseitigungsoptionen eine Ausgangsmenge von 1000 kg zu entsorgender Verpackung festgelegt.

Szenariooption	Abkürzung
Status Quo (Verwertung)	SQ
Optimierter Status Quo (Verwertung)	SQopt
SORTEC (Verwertung)	SORTEC
Beseitigung im Beseitigungsmix	Bes30/70
Beseitigung in der MVA	Bes100

Tabelle 3.3.1: Übersicht der bilanzierten Optionen

Es wird hier noch mal darauf hingewiesen, dass die Verwertungsoptionen keine „Monoverwertungen“, (etwa im Hochofen) sondern einen für jede Technikstufe charakteristischen Mix von Verwertungswegen darstellen. Das bedeutet, dass jede Verpackungsmaterialgruppe in die Stoffströme aufgespalten wird, die sich aus den prozentualen Angaben der Massenbilanzen ergeben.

Natürlich sind die einzelnen Verpackungsmaterialgruppen in Wirklichkeit nicht in gleichen Massenanteilen in der LVP-Gesamtfraktion enthalten. Wie Tabelle 3.3.2 zeigt, sind sie sogar recht unterschiedlich im DSD-Sammelaufkommen gewichtet. Für die untersuchte Frage, ob eine bestimmte Verpackungsmaterialgruppe aus ökologischen Gesichtspunkten besser zu verwerten als zu beseitigen ist, spielt dies aber keine Rolle. Die Angaben in Tabelle 3.3.2 sind dennoch nützlich, um in einem nachfolgenden

Schritt abzuschätzen, wie sich die Erkenntnisse, die sich aus der Bewertung der einzelnen Verpackungsmaterialgruppen ergeben, auswirken, wenn sie auf die LVP-Gesamtfraction übertragen werden.

Verpackungsmaterialgruppe	Abkürzung	[%]	[1000 kg]	[kg Einw ⁻¹] *
Aluminium	Alu	1,6	32.000	0,390
Aluminiumhaltige Verbunde	Aluh.-Vb	1,2	24.000	0,293
Flüssigkeitskartons	FKN	7,9	158.000	1,927
Kunststoffbecher	K.-Becher	5,6	112.000	1,366
Kunststoffflaschen	K.-Flaschen	5,0	100.000	1,220
Kunststofffolien < DIN A4	K.-Fo<A4	4,5	90.000	1,098
Kunststofffolien > DIN A4	K.-Fo>A4	7,9	158.000	1,927
Kunststoff-Verbunde	K.-Vb	0,8	16.000	0,195
sonstige Kunststoffe	so. K.	5,1	102.000	1,244
PPK-Verbunde	PPK-Vb	1,2	24.000	0,293
Aluminium-Verbunde	Alu-Vb	0,8	16.000	0,195
Weißblech	Wb	17,5	350.000	4,268
Weißblech-Verbunde	Wb-Vb	4,7	94.000	1,146
Reste		34,9	698.000	8,512
Styropor **		1,3	26.000	0,317
Summe		100	2.000.000	24,390

* Basis der Berechnung ist eine Einwohneranzahl von 82.000.000 in der BRD

** Wird in der vorliegende Studie nicht untersucht

Tabelle 3.3.2: Anteil der Verpackungsmaterialgruppen am jährlichen LVP-Gesamtaufkommen

3.3.1.2 Modellierungs- und Datengrundlagen

Mit Blick auf die Massenbilanzen kann die Gewinnung eines Nutzens aus getrennt bereitgestellten Abfallstoffen in die drei Schritte Sortierung, Aufbereitung und Herstellung sekundärer Rohstoffe unterteilt werden. Im Abschnitt Sortierung wird die zu verwertende Verpackungsmaterialgruppe unter Einsatz von elektrischer Energie von den nicht verwertbaren Bestandteilen, den Sortierresten, getrennt. Produkte des Sortierprozesses sind Materialien wie z.B. Mischkunststoffe, Kunststoffflaschen oder aluminiumhaltige Verbunde, die in weiteren Verarbeitungsschritten zu Zwischen- bzw. Endprodukten verarbeitet werden. Dabei können schon auf der Stufe der Aufbereitung Endprodukte entstehen. Im genannten Beispiel sind dies vor allem Regranulate auf Polymer- bzw. Misch-Polymerbasis. Zwischenprodukte der Aufbereitung hingegen, wie beispielsweise MKS-Agglomerate sowie Fraktionen die Aluminium, Weißblech oder Papier enthalten, werden in weiteren Verarbeitungsschritten zu Endprodukten wie Methanol, Aluminium oder Weißblech verarbeitet.

Die Unterscheidung in drei Prozessstufen innerhalb der Verwertungskette ist je nach Verpackungsmaterialgruppe und je nach Technologieszenarium nicht immer eindeutig zuzuordnen. Sie ist daher letztlich nur ein Hilfskonstrukt, das aber die Strukturierung und modellierungstechnische Umsetzung der zum Teil doch recht verzweigten Verwertungspfade erleichtert. Die innerhalb der Verwertungskette erforderlichen Transportvorgänge sind in der Modellierung ebenfalls berücksichtigt.

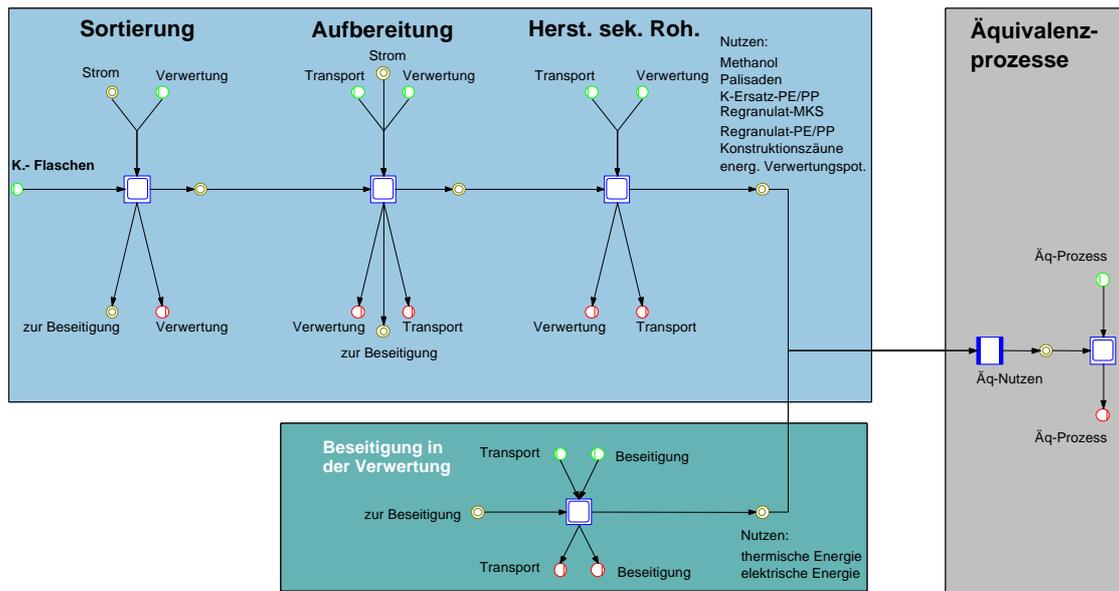


Abbildung 3.3.1: Struktur des Modellansatzes zur ökobilanziellen Umsetzung der Massenbilanzen (Screenshot aus Umberto 3.5)

Für die ökologische Bewertung der einzelnen Verkaufsverpackungen wurde eine ökobilanzielle Untersuchung mit dem Softwarepaket Umberto 3.5 erstellt. Der in Abbildung 3.3.1 ersichtliche Modellansatz zeigt auf der Benutzeroberfläche die genannten Prozessstufen, die in darunter gelegenen Hierarchiestufen weiter aufgesplittet werden.

Die Beseitigung der im Laufe der Verwertungskette anfallenden Sortier- und Aufbereitungsreste wird in einem gesonderten Modul „Beseitigung in der Verwertung“ bilanziert. Auch hier wird ein Beseitigungssplit von 30% MVA und 70% Deponierung angenommen.

Der Modellansatz enthält eine weitere Komponente, die „Äquivalenzprozesse“, die im nachfolgenden Kapitel erläutert werden.

Für die Modellierung der Verwertungswege werden in der vorliegenden Arbeit im Wesentlichen fünf Datenquellen herangezogen:

1. Daten zu den Bereichen Sortierung wurden von HTP errechnet⁴.
2. Daten zu Aufbereitungs- und Verwertungsprozessen wurden von HTP erarbeitet und zusammengestellt und mit Datensätzen aus der Literatur bzw. in Einzelfällen durch Erhebungen bei Verwertern ergänzt.
3. Angaben zu Transportentfernungen zwischen den einzelnen Abschnitten in der Verwertung sowie Angaben zum Energieverbrauch in der Aufbereitung basieren auf internen Auswertungen der DKR.
4. Allgemeine Prozesse wie die Beseitigung, Energiebereitstellung, Gütertransporte und Mülltransporte wurden aus der in Umberto 3.5 implementierten Datenbank entnommen.
5. Die elementare Zusammensetzung zur materialspezifischen Bilanzierung der Abfallverbrennung sowie der rohstofflichen Verfahren wurden aus Heyde und Kremer [1999] abgeleitet.

Die Grundlage der im einzelnen verwendeten Prozessdatensätze ist in Tabelle 3.3.3 zusammengefasst.

Vor allem bei den Technikvarianten Status Quo und Status Quo optimiert sind die verschiedenen Verwertungsprozesse häufig räumlich getrennt. Die damit verbundenen Materialtransporte von der Sortierung zur Aufbereitung sowie von der Aufbereitung zur Sekundärmaterialherstellung wurden ebenfalls hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen berücksichtigt.

⁴ Es handelt sich dabei hauptsächlich um Stromverbräuche. Detailliertere Angaben dazu befinden sich im Anhang I. Spezifische Emissionswerte der Sortierprozesse lagen nicht vor.

Prozess	Datengrundlage
Sortierung	
Sortierung (Status Quo)	HTP ^{b)}
Sortierung (Status Quo optimiert)	HTP ^{b)}
Sortierung (SORTEC)	HTP ^{b)}
Aufbereitung und Herstellung von Sekundärrohstoffen	
Aufbereitung von Verbundkarton	UBA-Ökobilanz Getränkeverpackung II ^{c)}
Aluminium-Pyrolyse	Erhebung bei der Aluminiumindustrie ^{d)}
Einsatz von PE/Al-Rejekten im Zementwerk	UBA-Ökobilanz Abfallwirtschaft ^{e)}
Weißblech-Kompaktierung	UBA-Ökobilanz Getränkeverpackung I ^{f)}
Recycling von Weißblech im Elektrolichtbogenofen	UBA-Ökobilanz Getränkeverpackung II ^{c)}
Verarbeitung sortierter Flaschen	HTP ^{b)}
Verarbeitung sortierter Becher	HTP ^{b)}
Nassverarbeitung sortierter Folien	HTP ^{b)}
Verarbeitung sortierter Kunststofffraktionen (PP,PE,PS) zu Regranulat ^{a)}	HTP ^{b)}
Verarbeitung von MKS zu Holz-/Betonersatz bzw. Regranulat	HTP ^{b)}
Verarbeitung von Agglomeraten (PO/PS) zu Holz-/Betonersatz	Ökobilanz Kunststoffabfälle IVV ^{g)}
Verarbeitung von sortierten PET-Flaschen zu PET-Mahlgut	HTP ^{b)}
Aufbereitung von MKS zu MKS-Agglomerat	HTP ^{b)}
Festbettvergasung von MKS in der SVZ	UBA-Ökobilanz Altöl ^{e,g)}
Einsatz von MKS im Hochofen	UBA-Ökobilanz Abfallwirtschaft ⁱ⁾

^{a)} Annahme: Stromverbrauch wie bei Flaschenverarbeitung [HTP 2000]
^{b)} [HTP 2000], ^{c)} [UBA 2000b], ^{d)} [ifeu 2000], ^{e)} [UBA 1999], ^{f)} [UBA 1995],
^{g)} [Heyde und Kremer 1999], ^{h)} [UBA 2000c], ⁱ⁾ [ÖKO 1995]

Tabelle 3.3.3: Zuordnung der verwendeten Datenquellen zu den bilanzierten Prozessen

Entsprechend der jeweiligen Verwertungswege ergeben sich unterschiedliche Transportentfernungen zwischen durchschnittlich 200 km und 600 km. Die gängigen Transportmittel sind LKWs. Deren gewichtsmäßige Auslastung wurde entsprechend der durchschnittlichen Dichte des zu transportierenden Materials unter Berücksichtigung des Kompaktierungsgrades bestimmt. Die LKW-Rückfahrten wurden unter Annahme von Speditionsverkehr mit einer optimistischen Auslastung im Speditionsverkehr auf 90% festgelegt.

Die Transporte spielen im Rahmen der ökologischen Bilanzierung der genannten Verwertungswege keine vorrangige Rolle. Detaillierte Angaben zu den gewählten Entfernungen und Auslastungsgraden finden sich im Anhang I.

Bilanzierung der Prozesse zur rohstofflichen Verwertung

Hinsichtlich der Bilanzierung der rohstofflichen Verwertung von Mischkunststoffen besteht das Problem, dass sowohl für die Festbettdruckvergasung als auch den Einsatz als Reduktionsmittel im Hochofen die vorliegenden Daten jeweils nur einen Standort abbilden. Daher ist es nicht möglich, die Validität der Daten durch einen Vergleich mit denen der „Branche“ zu überprüfen. Dazu kommt, dass die verfügbaren Daten in der Regel vertraulicher Natur sind und nur in aggregierter Form bereitgestellt werden. Die Berechnungsgrundlagen sind aus den genannten Vertraulichkeitsgründen nicht zugänglich und damit auch die Daten nicht transparent.

Zum Zeitpunkt, als die vorliegende Arbeit durchgeführt wurde, lag bereits eine Ökobilanz vor, in der die Verwertung von Mischkunststoffen im Sekundärstoffverwertungszentrum Schwarze Pumpe (SVZ) bilanziert und dokumentiert worden war [Heyde und Kremer 1999]. Ein Datensatz, aus dem ein direkter Bezug auf den Einsatzstoff MKS möglich gewesen wäre, lag aber aufgrund der angewandten Nutzenkorbmethode in der veröffentlichten Form nicht vor. Auch aus einer Studie des AGVU zum Vergleich der rohstofflichen und energetischen Verwertung von Verpackungstoffen [AGVU 1999] waren kein entsprechender Datensatz verfügbar.

Daher wurde in unserer Bilanzierung auf die uns aus einem anderen Projektzusammenhang vorliegenden Daten der SVZ zurückgegriffen und in Verbindung mit dem Zahlenmaterial aus [Heyde und Kremer 1999] ein Datensatz zur MKS-Verwertung abgeleitet und in den Standardszenarien verwendet.

In der Zwischenzeit wurde eine neue Untersuchung zur MKS-Verwertung in der SVZ durchgeführt [IVV 2001]. Die dort verwendeten Datengrundlagen wurden uns zur Verfügung gestellt und zur Abschätzung der Sensitivität unseres Standarddatensatzes verwendet.

Allerdings können aus unserer Sicht auch diese neuen Daten die Zweifel hinsichtlich der Belastbarkeit der verfügbaren SVZ-Daten nicht ausräumen. Dies gilt umso mehr in Anbetracht der Tatsache, dass die Daten, die vom SVZ selbst in der Öffentlichkeit vorgestellt wurden [SVZ 2000], sowohl in der Emissions- als auch der Nutzenbilanz erheblich von denen der IVV-Studie abweichen.

Die Bereitstellung von konsistenten und transparenten Daten zur SVZ ist dringend erforderlich, da ansonsten mit Blick auf die vorangegangenen Ausführungen in Zukunft von einer Einbeziehung dieser Verwertungsoption bei ökologischen Vergleichsbetrachtungen abgeraten werden muss. Dies gilt insbesondere dann, wenn diese Daten als

Grundlage zur politischen Entscheidungsfindung hinsichtlich der ökologischen Einstufung von Verwertungswegen herangezogen werden.

Auch die Daten der Stahlwerke Bremen, die hier zur Bilanzierung der MKS-Verwertung im Hochofen herangezogen wurden, lagen uns nur in vertraulicher, nicht überprüfbarer Form vor. Die Transparenz muss hier ebenfalls als unzureichend eingestuft werden und eine Aktualisierung der Daten in nachvollziehbarer und belastbarer Form ist dringend erforderlich.

3.3.1.3 Bilanzierung des Nutzens

Das Ziel der Verwertung von LVP-Abfällen ist die Erzeugung eines Nutzens. Der Nutzen kann dabei je nach Abfallcharakteristik und Verwertungsziel auf verschiedenen Wertschöpfungsstufen erzielt werden. So kann es sich um ein konkretes Produkt (z.B. Palisaden aus Mischkunststoffen als Holz- und Betonersatz) oder um ein weiterverarbeitbares Sekundärmaterial (z.B. PE-Reggranulat oder MKS-Agglomerat) handeln. In allen Fällen besteht der Nutzen in einem marktgängigen Gut, mit dem Güter aus primären Rohstoffen ersetzt werden können.

Daher wird im Sinne der Kreislaufwirtschaft in der vorliegenden Bilanzierung dem ökologischen Aufwand für die Verwertung der ökologische Aufwand für die sonst herzustellenden Primärgüter gegenübergestellt und in Form einer Gutschrift angerechnet. Die Prozesskette, die zu einem äquivalenten Nutzen aus Primärrohstoffen führt, wird dabei in ihrer Gesamtheit als Äquivalenzprozess bezeichnet. Sie ist wie die Verwertungskette durch einen spezifischen Material- und Energieaufwand gekennzeichnet. Für die Verwertungskette gilt, dass immer bis zu dem Punkt bilanziert werden muss, an dem eine Gleichwertigkeit zu einem Primärrohstoff vorausgesetzt werden kann.

Soweit es sich um eine werkstoffliche Verwertung handelt, ist für einen Teil der sekundären Produkte oder Rohstoffe der Begriff der Gleichwertigkeit allerdings nur innerhalb gewisser Grenzen zutreffend. In vielen Fällen ist eine gewünschte Produktqualität nur durch einen überproportionalen Anteil des Sekundärrohstoffs erreichbar oder nur der Einsatz für bestimmte Produktspezifikationen möglich. Dieser Tatsache soll durch sogenannte Substitutionsfaktoren Rechnung getragen werden. Die Festlegung solcher Faktoren ist aber keineswegs trivial, da sie sich schon für einen einzelnen Sekundärrohstoff je nach beabsichtigter Verwendung unterscheiden können. Dazu kommt, dass es sich hier um subventionierte Güter handelt und technische Kriterien des Marktgeschehens, wie etwa die schon genannten Anforderungen an die Materialspezifikation, durch ökonomische Aspekte überlagert werden können.

Da eine detaillierte Analyse der gezeigten Problemlage im Rahmen des Projektes nicht vorgesehen war, erfolgte die näherungsweise Festlegung der Substitutionsfaktoren auf der Basis plausibler Annahmen. Dabei wurde auch die in [Heyde und Kremer 1999] zu dem Thema geführte Diskussion um die Produkte Waschmittelflaschen aus Rezyklaten der Flaschenfraktion sowie Kabelhüllen und Kunststofffolien aus Rezyklaten der Folienfraktion aufgegriffen. Bei diesen Produkten entsprachen die Substitutionsfaktoren nach Herstellerangaben einem Wert von eins, der von [Heyde und Kremer 1999] in den ersten beiden Fällen auch so übernommen wurde. Für die Herstellung von Kunststofffolien wurde in Laborversuchen eine Streubreite der funktionellen Äquivalenz von 0,55 bis 0,83 im Verhältnis zum Primärmaterial festgestellt. Daraus wurde bei [Heyde und Kremer 1999] ein Substitutionsfaktor für Rezyklate aus der Folienfraktion von 0,7 abgeleitet. Dieser Faktor wurde in der vorliegenden Studie für Sekundärkunststoffe mit geringer Spezifikation wie die MKS-Reggranulate und PET-Agglomerate angesetzt. Ausgehend davon wurden die „sortenreinen„ Kunststoffreggranulate mit einem Faktor von 0,9 belegt.

Die im werkstofflichen Recycling gewonnenen Produkte sind eigentlich noch nicht am Ende ihres Lebensweges angekommen, sondern können nach der ersten Recycling-Nutzungsphase mindestens noch einer Verbrennung unterzogen werden. Potentiell sind sogar weitere Nutzungskaskaden denkbar. Die Untersuchung solcher Nutzungskaskaden war im Projekt weder vorgesehen noch im Rahmen der gegebenen Möglichkeiten machbar und so wurden die Systemgrenzen der untersuchten Verwertungswege am Ende der ersten Recycling-Nutzungsphase gesetzt.

Selbstverständlich wurden nicht nur den Verwertungsoptionen sondern auch den Beseitigungsoptionen Nutzenäquivalente gutgeschrieben. Hierbei wurde angenommen, dass die in der Abfallbeseitigung durch die Verbrennung von Deponiegas bzw. der heizwertreichen Fraktion der Abfälle ausgekoppelte Energie zum Ersatz von fossilen Brennstoffen dient.

In Tabelle 3.3.4 sind die verwendeten Substitutionsfaktoren für die im einzelnen aus der Bilanzierung der Untersuchungsoptionen hervorgehenden Nutzen zusammengefasst.

Spezieller Teil

Sekundärnutzen		Substituiertes Primärprodukt	Substitutionsfaktor
Regranulat PP	[kg]	PP-Granulat	0,90
Regranulat-PS	[kg]	PS-Granulat	0,90
Regranulat-PE	[kg]	PE-Granulat	0,90
K-Ersatz	[kg]	PO-Granulat	0,90
Regranulat-PO	[kg]	PO-Granulat	0,70
Regranulat MKS	[kg]	PO-Granulat	0,70
Agglomerat-PET	[kg]	PET-Granulat	0,70
Konstruktionszaun	[kg]	Zement-Bauzaun	5,60
Palisaden (aus Kunststoff)	[kg]	Holz-Palisaden 50% Zement-Palisaden 50%	0,75 2,60
Methanol	[kg]	Methanol	1,00
Klinkerbildungspotential	[kg]	Klinkerbildungspotential	1,00
Bauxitersatz	[kg]	Bauxit	1,00
Altpapierstoff	[kg]	Zellstoff 50% Holzstoff 50%	1,00 1,00
Aluminium	[kg]	Aluminium	1,00
Weißblech	[kg]	Weißblech	1,00
Reduktionsmittel (Hochofen)	[kJ]	Reduktionsmittel	1,00
Energie, elektr. (MVA/Dep.)	[kJ]	Energie elektrisch	1,00
Energie, therm. (MVA/Dep.)	[kJ]	Energie thermisch	1,00

Tabelle 3.3.4: Zusammenstellung der sekundären Produkte und Materialien und der entsprechenden Äquivalenzprozesse (= Gutschriften) sowie des jeweils verwendeten Substitutionsfaktors

Ferner wurde als Konvention festgelegt, dass Inertstoffe als Eingangsmaterialien in die Beseitigungsverfahren keine Gutschrift erhalten. Dies ist besonders bei Aluminium und Stahl haltigen Verpackungsmaterialgruppen von Ergebnisrelevanz. Dieses Vorgehen ist damit begründet, dass nach Kenntnis der Projektnehmer die aus den Verbrennungsrückständen gewonnenen Stahl- und Aluminiumanteile für die Herstellung von Rezyklaten zum Ersatz von Primärmaterialien nicht von Bedeutung sind.

Zur Bilanzierung der Äquivalenzprozesse wurde auf eine Reihe von in der Literatur verfügbaren Datensätzen zurückgegriffen. Die verwendeten Quellen sind in Tabelle 3.3.5 zusammengefasst.

Prozess	Datengrundlage
Granulate aus Primärkunststoff	APME ^{a)} / BUWAL 250 ^{b)}
Produkte aus Holz und Beton	Ökobilanz Kunststoffabfälle IVV ^{g)}
Aluminium, primär	UBA-Ökobilanz Getränkeverpackung II ^{c)}
Weissblech, primär	UBA-Ökobilanz Getränkeverpackung II ^{c)}
Herstellung Primärfasern (Zellulose bzw. Holzstoff)	UBA-Ökobilanz Graphische Papiere ^{d)}
Methanol aus Raffinerie	UBA-Ökobilanz Altöl ^{f)}
Hochofen mit Schweröleinsatz	UBA-Ökobilanz Abfallwirtschaft ^{e)}
Zementwerk mit Steinkohlefeuerung	UBA-Ökobilanz Abfallwirtschaft ^{e)}

^{a)} [APME], ^{b)} [UBA 2000b], ^{c)} [ifeu 2000a], ^{d)} [UBA 2000], ^{e)} [UBA 1999a], ^{f)} [UBA 2000c], ^{g)} [Heyde und Kremer 1999]

Tabelle 3.3.5: Zuordnung der bilanzierten Äquivalenzprozesse zu den verwendeten Datenquellen

3.3.1.4 Sensitivitätsbetrachtungen

1. Energetischer Wirkungsgrad der MVA

In Zukunft kann bei einer verbesserter Anlagentechnik von erhöhten bundesdurchschnittlichen Wirkungsgraden in den MVAs ausgegangen werden. Auf Wunsch des Bund-Länder-Arbeitskreises wurde mit Sensitivitätsanalysen untersucht, welcher zusätzliche ökologische Vorteil mit einer Verbringung von LVP-Abfällen in eine MVA bei einem thermischen Wirkungsgrad von 70% (elektrischer Wirkungsgrad 0%) gegenüber der standardmäßig im Projekt verwendeten MVA verbunden ist.

2. Substitutionsfaktoren

Die festgelegten Substitutionsfaktoren für Sekundärkunststoffe basieren auf Annahmen. Andererseits können sie in abfallwirtschaftlichen ökobilanziellen Untersuchungen durchaus ergebnisrelevant sein, da sie das Ausmaß der Gutschriften mitbestimmen. Um den Einfluss der in der vorliegenden Studie standardmäßig eingesetzten Substitutionsfaktoren auf die Ergebnisse einschätzen zu können, wurden Sensitivitätsbetrachtungen durchgeführt, bei denen die Substitutionsfaktoren für Sekundärkunststoffe einheitlich auf 0,5 gesetzt wurden.

3. Recycling von Stahlschrotten aus der MVA-Schlacke

Ein Teil der Stahlschrotte, die im Zuge der Abfallverbrennung in die MVA-Schlacke gelangen, wird zurückgewonnen und in der Stahlherstellung eingesetzt. Da Stoffstrom spezifische Angaben nicht vorliegen, ist nicht bekannt, welche Anteile des Stahlabfalls im Abfallstrom letztendlich in die Schlackeaufbereitung gelangen. Aufgrund der fehlenden Informationen wurde die im vorigen Kapitel genannte Konvention getroffen. Die

Ergebnisrelevanz dieser Festlegung wurde durch Sensitivitätsbetrachtungen überprüft, bei denen 25% bzw. 50% Recycling des Stahlschrotts aus der MVA-Schlacke angenommen wurden.

3.3.2 Vorgehensweise bei der ökologischen Bewertung

Die ökologische Bewertung erfolgt ebenso wie die Bilanzierung inhaltlich in enger Anlehnung an die Methode der Ökobilanz und den damit verbundenen ISO-Normen ISO 14040-14043. Im Sinne einer verbesserten Lesbarkeit und in Hinsicht auf die Zielgruppe des Bund-Länderarbeitskreises wird auf einige ISO-Detailanforderungen formaler Natur verzichtet bzw. werden bestimmte Dokumentationspflichten ohne ausführliche Kommentierung in Anhänge verlegt.

3.3.2.1 Wirkungsabschätzung

Bei einer Projektbesprechung am 7.6.00 beim BMU wurde die Vereinbarung getroffen, die Bewertung auf der Leitgröße KEA aufzubauen. Damit sollte Arbeitskapazität für zusätzliche Sensitivitätsszenarien freigehalten werden. Im Rahmen der Projektsitzung am 27.7.00 wurde von der Bund-Länder-Arbeitsgruppe allerdings gefordert, neben dem Ressourcenverbrauch weitere Umweltwirkungen vollständig in die Bewertung einzubeziehen.

Daher wurden die nachfolgend aufgelisteten Wirkungskategorien ausgewertet, die abgesehen vom Krebsrisiko bisher auch in den aktuellen Produkt-Ökobilanzen des UBA im Zentrum der Bewertung standen. Die Berücksichtigung der Humantoxizität, und als deren Repräsentant das potentielle Krebsrisiko, wird von den Auftragnehmern als eine wichtige Ergänzung zu den restlichen Wirkungskategorien angesehen.

Wirkungskategorie
Treibhauseffekt
Naturraumbeanspruchung
Terrestrisches Eutrophierungspotential
Versauerung (aquatisch und terrestrisch)
Aquatisches Eutrophierungspotential
Ressourcenbeanspruchung (Knappheit fossiler Energieträger)
Fotochemische Oxidationbildung / Sommersmog
Krebsrisiko

Tabelle 3.3.6: Betrachtete Wirkungskategorien

Die einzelnen Wirkungskategorien werden über so genannte Wirkungsäquivalente bestimmt. Dabei wird ein Stoff in äquivalenten Mengen eines anderen Stoffes, z.B. die Treibhauswirkung des Methans in Wirkungsäquivalenten des Kohlendioxids, ausgedrückt. Ausgangspunkt sind dabei die Ergebnisse der Sachbilanz⁵, die mit den erwähnten Wirkungsäquivalenzwerten verrechnet werden. Für jede Wirkungskategorie liegt dann ein Gesamtwirkungswert, der sogenannte Indikatorwert vor. Beispielsweise wird die gesamte Treibhauswirkung als Summe der CO₂-Äquivalente dargestellt.

Allerdings liegen solche Äquivalenzwerte nur für eine begrenzte Menge an Sachbilanzgrößen vor. Die im vorliegenden Projekt ausgewerteten Sachbilanzgrößen sind in Tabelle 3.3.8 geordnet nach den Umweltwirkungen, zu denen sie beitragen, aufgelistet.

Naturraum-beanspruchung	Ressourcen-beanspruchung	Treibhauseffekt	Fotooxidantien-bildung	Terrestrische Eutrophierung ¹⁾	Aquatische Eutrophierung ¹⁾	Versauerung	Humantoxizität ³⁾
Fläche	Erdöl	CO ₂ fossil	NO _x	NO _x	CSB	NO _x	As ²⁾
Deponie-	Erdgas	CH ₄	CH ₄	NH ₃	N ⁴⁾	NH ₃	BaP ²⁾
Volumen	Braunkohle	N ₂ O	NMVOC		NH ₄ ⁺	SO ₂	Cd ²⁾
	Steinkohle		Benzol		NO ₃ ⁻	H ₂ S	Cr ^{2,4)}
			Formaldehyd		P ⁴⁾	HCl	Dioxin ²⁾
						HF	Ni ²⁾

- 1) eigentlich handelt es sich hier um Eutrophierung und Sauerstoffzehrung. Bei NO_x (als NO₂) und NH₃ kommt das Eutrophierungspotenzial über den Lufteintrag auf Böden (terrestrische Eutrophierung) zustande
- 2) Parameter werden in Form von Arsen-Äquivalenten zum Krebsrisikopotenzial aggregiert
- 3) alle Stoffe als luftseitige Emissionen
- 4) N: Gesamtstickstoff; P: Gesamtphosphor
- 5) als Chrom VI

Tabelle 3.3.7: Zuordnung der verfügbaren Sachbilanzgrößen zu den Wirkungskategorien

3.3.2.2 Auswertung

Für eine ökologische Bewertung der Untersuchungsoptionen, wie sie im vorliegenden Vorhaben verfolgt wird, ist es notwendig, die Indikatorwerte aller Wirkungskategorien

⁵ Die Sachbilanzergebnisse sind als Excel-Dokument auf der beiliegenden CD-ROM tabellarisch abgelegt

zueinander in Beziehung zu setzen, um so die gegebenenfalls gegenläufigen Aussagen aus den unterschiedlichen Wirkungskategorien gegeneinander abzuwägen.

Als Hilfsmittel für diese Abwägung dient eine Einstufung der Wirkungskategorien hinsichtlich ihrer ökologischen Bedeutung und eine Berechnung der Größenordnung der Indikatorergebnisse im Verhältnis zu der Gesamtbelastung in Deutschland.

3.3.2.2.1 Ökologische Bedeutung

Als Grundlage zur Beurteilung der ökologischen Bedeutung der Wirkungskategorien dient der Bewertungsvorschlag des Umweltbundesamtes [UBA 2000], in dem die Wirkungskategorien in einer 5-stufigen ordinalen Skala mit von A bis E abnehmender ökologischer Gefährdung bzw. zunehmendem Abstand zum Umweltziel eingestuft werden⁶. Mit der Einstufung bezüglich der ökologischen Gefährdung werden die betrachteten Wirkungskategorien hinsichtlich ihrer Tragweite für die Umwelt hierarchisiert. Die Bewertungsgröße „Abstand zum Schutzziel“, drückt aus, wie weit wir von den uns politisch gesteckten Zielen derzeit noch entfernt sind. Je größer die ökologische Gefährdung und der Abstand zum Umweltziel sind, desto schwerer ist eine zusätzliche erhöhte Umweltlast durch eine Option des Ökobilanzvergleichs zu werten.

Für die Zwecke dieser Studie wurde die UBA-Liste der Wirkungskategorien adaptiert und ein Gesamtrang abgeleitet⁷. Die verwendete Rangbildung und deren Herleitung ist in Tabelle 3.3.8 zusammengefasst.

⁶ Es soll darauf hingewiesen werden, dass aufgrund unterschiedlicher Werthaltungen und Interessenslagen eine solche Prioritätenliste zwangsläufig subjektiver Natur ist und daher immer im jeweiligen gesellschaftlichen Kontext betrachtet werden muss. Die Einstufung der einzelnen Kriterien durch das Umweltbundesamt erfolgt unter Berücksichtigung des Stands der Wissenschaft sowie auch der Sensibilität der Bevölkerung oder der Politik.

⁷ als Basis dienten Vorarbeiten im Rahmen einer abfallwirtschaftlichen Ökobilanzierung für das Land Nordrhein-Westfalen [ifeu 1999],

Wirkungskategorie	Einordnung UBA		Diese Studie Gesamt- bewertung
	ökologische Gefährdung	Abstand zum Umweltziel	
Treibhauseffekt	A	A	A
Krebsrisiko ²⁾	-	-	A ²⁾
Terrestrisches Eutrophierungspotential	B	B	B
Naturraumbeanspruchung	A	B ¹⁾	B
Versauerung (aquatisch und terrestrisch)	B	B	B
Aquatisches Eutrophierungspotential	B	C	C
Fotochemische Oxidationbildung / Sommersmog	D	B	C
Ressourcenbeanspruchung (Knappheit fossiler Energieträger)	C	B	C

1) Differenzierung laut Umweltbundesamt für bewirtschaftete Forstflächen „A“, und für Wildnisflächen bzw. unbewirtschaftete Waldflächen „C“; hier als Mittel „B“, angesetzt.

2) Krebsrisikopotenzial: gravierende, nicht reversible gesundheitliche Wirkung, keine Wirkungsschwelle, die betrachteten Stoffe persistieren und akkumulieren in der Umwelt, Emissionen zwar rückläufig, aber Abstand zu Zielwerten (z.B. LAI) noch weit → A

Tabelle 3.3.8: Bewertungsvorschlag des UBA [2000] zur ökologischen Gefährdung und Abstand um Umweltziel

3.3.2.2.2 Normierung

Die Normierung bezeichnet die Berechnung der Größenordnung der Indikatorergebnisse im Verhältnis zu einem Referenzwert. Der Beitrag der durch das untersuchte Produktsystem verursachten Umweltwirkungen kann damit auf bereits existierende Umweltbelastungen bezogen werden.

Es wird hier die Vorgehensweise gewählt, die bisher in den ökobilanziellen Projekten des Umweltbundesamtes angewendet wird. Entsprechend der gewählten Methode stellt der verwendete Referenzwert die aktuelle Situation der Umweltbelastung auf dem Territorium der Bundesrepublik Deutschland dar. Man berechnet, wie groß z.B. das Treibhauspotential ist, das durch die derzeitigen Emissionen in der BRD innerhalb eines bestimmten Zeitraums verursacht wird. Dazu setzt man das Treibhauspotential einer bestimmten Untersuchungsoption ins Verhältnis und erhält somit den spezifischen Beitrag der gewählten Option. Bezieht man diese Zahl auf die Einwohnerzahl Deutschlands, so erhält man die sogenannten Einwohnerdurchschnittswerte (EDW).

Am Ende dieser Stufe liegen die spezifischen Beiträge der verschiedenen untersuchten Optionen bezüglich der jeweiligen Umweltwirkungen vor. Die spezifischen Beiträge können dann als Parameter für den ökologischen Vergleich der Optionen herangezogen

gen werden. Der spezifische Beitrag gibt dabei an, bei welchen Umweltwirkungen die größten Reduktionseffekte bezogen auf die untersuchten Systeme möglich sind.

In der folgenden Tabelle sind die in dieser Arbeit verwendeten Gesamtbelastungen der BRD und die auf den Einwohner bezogenen Mengen zur Berechnung der Einwohnerwerte aufgeführt.

	Deutschland		Quelle	Belastung durch einen Einwohner in Deutschl. ^{e)}	
Gesamtfläche BRD ^{e)}	35.697.000	ha	b)	4.353	m ²
Ressourcenbeanspruchung als KEA, fossil gesamt	12.722.000	TJ/a	a)	155.124	MJ
Treibhauspotential	1.079.884.000	t CO ₂ -Äq/a	c)	13.167	kg
Versauerung	4.574.580	t SO ₂ -Äq/a	c)	56	kg
Terrestrische Eutrophierung	466.916	t PO ₄ -Äq/a	c)	5,7	kg
Aquatische Eutrophierung	639.900	t PO ₄ -Äq/a	c)d)	7,8	kg
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	1.168.474	t NcPOCP/a	c)	14	kg
Humantoxizität als Krebsrisikopotential (Luft)	473	t As-Äq/a	d)f)	0,0058	kg
a)	BMW i 1998 – Bundesministerium für Wirtschaft (Hrsg.): Energiedaten '97/'98				
b)	Daten zur Umwelt 1997 für das Jahr 1995				
c)	UBA 1998 Umweltdaten 1998 Stand Februar 1998				
d)	Daten zur Umwelt 1996 für das Jahr 1995				
e)	Basis für EDW: 82.012.000 Einwohner der BRD nach c)				
f)	ifeu 1998: Ermittlung von Emissionen und Minderungsmaßnahmen für POP in der BRD, UBA-Texte 74/98				

Tabelle 3.3.9: Grundlagen zur Ermittlung des spezifischen Beitrags – Gesamtemissionen und -verbräuche in Deutschland und die mittlere Belastung durch einen Einwohner pro Jahr

3.3.3 Ökologische Bewertung

Gegenstand der ökologischen Bewertung ist die Frage nach der ökologischen Vorteilhaftigkeit der Verwertung einer bestimmten Verpackungsmaterialgruppe im Vergleich zu den jeweiligen Beseitigungsoptionen. Dazu werden im Kapitel 3.3.3 zunächst die 13 untersuchten Verpackungsmaterialgruppen nacheinander abgearbeitet und anschließend in einer Zusammenfassung mögliche Schlussfolgerungen diskutiert.

3.3.3.1 Bewertung der einzelnen Verpackungsmaterialgruppen

Zur Bewertung werden die Ergebnisse jeder Verpackungsmaterialgruppe komprimiert dargestellt. Dazu werden aus dem Gesamtbestand der Ergebnisse aus Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung folgende Informationen extrahiert:

1. eine tabellarische Übersicht zum quantifizierten Nutzen der Entsorgung der jeweiligen Verpackungsmaterialgruppe
2. Grafiken zu den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung
3. eine tabellarische Auswertung des Optionsvergleichs unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag
4. Grafiken zur Auswertung der Sensitivitätsanalysen

Die Darstellung des quantifizierten Nutzen soll transparent machen, welche Produkte in welchen Mengen bei Verwertung und Beseitigung je nach eingesetzter Technologie entstehen. In jeder Tabelle sind zunächst die in den Technikvarianten von Verwertung bzw. Beseitigung auftretenden energetischen Gutschriften dargestellt. In der Verwertung produzierte Güter wie beispielsweise Methanol, Regranulate oder Palisaden sind jeweils im mittleren Teil der Tabelle mit der jeweiligen Produktmenge abgebildet. In dieser Rubrik lässt sich auch der Anteil des werkstofflichen Recyclings ersehen. Daneben erhält man durch die Angabe der Sortierreste im unteren Tabellenteil auch Informationen zur Verwertungseffizienz.

Die entsprechenden Tabellen sind im Zusammenhang mit den Massenbilanzen zu sehen, gehen aber über eine bloße Wiedergabe dieser hinaus. Dies hängt damit zusammen, dass zum Erreichen der funktionalen Äquivalenz mit einem Primärprodukt zum Teil noch weitere Prozessschritte an die Produkte der Massenbilanzen angeschlossen werden müssen. So können beispielsweise die MKS-Agglomerate erst nach der rohstofflichen Verwertung zu Methanol einem Primärprodukt, nämlich dem petrochemisch hergestellten Methanol, gegenüber gestellt werden.

Mit Tabelle 3.3.11 wird eine Art von Schnittstelle zwischen den Massenbilanzen und schon angesprochenen Tabellen mit dem quantifizierten Nutzen geschaffen. In der linken Spalte finden sich jeweils die Produktbezeichnungen und in der rechten Spalte die jeweiligen Entsprechungen der Nutzentabellen. In der mittleren Spalte sind die gegebenenfalls zusätzlich an die Produkte angehängten Prozesse bzw. Behandlungssplits zu erkennen.

Spezieller Teil

Angaben aus Massenbilanzen: Letztempfänger bzw. Produkt	Prozesse/ Aufsplittung	Bezeichnung in Nutzentabellen
Regranulat PP		Regranulat PP
Regranulat-PSb)		Regranulat-PS
Regranulat-PE		Regranulat-PE
Agglomerat (aus Flaschen bzw. Folien)		Agglomerat-POa)
K-Ersatz		K-Ersatz
H/B-Ersatz		50%Konstruktionszaun 50% Palisaden
Mahlgut-PETc)		Mahlgut-PET
Agglomerate PO	Bilanzierungssplit: 25% K-Ersatz 25% Palisaden 50% Hochofen	K-Ersatz Palisaden Reduktionsmittel
Regranulat (von MKS-Aufbereiter)		Regranulat MKS
Agglomerat MKS (von MKS-Agglomerat- Aufbereiter)	50% Hochofen 50% SVZ	Reduktionsmittel Methanol
Al/PE-Reject bzw. Zementindustrie	Zementwerk	Al-Anteil: Bauxitersatz PE-Anteil: Klinkerbil- dungspotential
Faserstoff bzw. Faserprodukte		Altpapierstoff
Aluminium (nach Sortieranlage) d)	Pyrolyse	Aluminium
Weißblech (kompaktiert) bzw. Stahlwerk	Elektrolichtbogenofen	Weißblech

a) wenn nicht weiter nach Kunststoffsorte spezifizierbar

b) ~ auch PS-Produkt

c) ~ auch wenn nur PET angegeben

d) für ifeu-Bilanz dient Aluminium nach Sortieranlage als Input für den Pyrolyseprozess

Tabelle 3.3.10: Gegenüberstellung der Bezeichnungen aus den Massenbilanzen und den Nutzentabellen

In den Grafiken zur Wirkungsabschätzung werden jeweils die 8 ausgewählten Wirkungskategorien (vgl. Tabelle 3.3.6) ausgewertet. Dabei werden die Ergebnisse in einem für vergleichende Darstellungen geeigneten Format aufbereitet. Für die Interpretation dieser Grafiken kann es aber unter Umständen nützlich sein, die Herleitung dieses Formats vor Augen zu haben. Abgeleitet wurden sie aus den in Anhang III dargestellten Ergebnisgrafiken. Dort sind für jede Option jeweils Balken für die Belastungen durch den Entsorgungsweg selbst als auch für die Entlastungen durch die Gutschrift ausgewiesen. Daneben findet sich immer auch ein sogenannter „Nettowertbalken“, in dem die saldierte Verrechnung der beiden vorgenannten Balken dargestellt ist. Diese Nettowertbalken können aber von der Nulllinie aus gesehen prinzipiell sowohl nach oben als auch nach unten weisen, was eine vergleichende Betrachtung er-

schwert. Daher wurde für jede Wirkungskategorie die Option mit dem besten Nettowert auf Null gesetzt, so dass die Mehrbelastungen der anderen Optionen zu dieser „Nullwert-Option“, in den nur mehr nach oben gerichteten Balken zum Ausdruck kommen. Ein Beispiel dafür ist Abbildung 3.3.2.

Zur Auswertung werden die Einwohnerdurchschnittswerte der jeweils 5 Optionen bei den 8 Wirkungskategorien in einer Kreuztabelle zusammengeführt (z.B. Abbildung 3.3.12). Als Basis dienen die EDW Tabellen in Anhang III. Die EDW werden nachfolgend allerdings nicht numerisch sondern durch grafische Elemente ausgedrückt, wobei ein Element jeweils eine bestimmte Anzahl an EDW repräsentiert. Damit können die spezifischen Beiträge optisch erfasst und verglichen werden. Zu beachten ist, dass auch hier die jeweils beste Option auf „Null“ gesetzt wurde. Die durch Balken oder Kacheln ausgedrückten Unterschiede können aus Unterschieden in der Nettobelastung oder der Nettoentlastung resultieren. Sie zeigen daher nur die EDW-Unterschiede zwischen den Vergleichsoptionen.

Die ökologische Bedeutung der Wirkungskategorien ist durch unterschiedliche Farbgebung bzw. Grauschattierungen im Schwarz-Weiß-Druck⁸ gekennzeichnet. Damit besteht eine Grundlage, um die Vor- und Nachteile der einzelnen Optionen im direkten Vergleich zu diskutieren. Die Kategorien Aquatische Eutrophierung und Naturraumbeanspruchung sind in den Graphiken ausgewiesen, sie sind aber nur bei den Verpackungsmaterialgruppen PPK und FKN von ökologischer Bedeutung. Sie werden dementsprechend auch nur dort diskutiert.

Der Einfluss sensitiver Annahmen auf die Belastbarkeit der Ergebnisse wird mit T-Diagrammen untersucht (z.B. Abbildung 3.3.6:). Die Referenzoption wird dabei als Nulllinie gesetzt und die Option, die aufgrund der sensitiven Annahmen verändert wird, als Balken dargestellt. Die Balkenlänge drückt dann den Unterschied zur Referenzoption in Form von EDW aus. Bei mehreren Sensitivitätsszenarien innerhalb einer Verpackungsmaterialgruppe wurde auf die gleiche EDW-Skalierung geachtet.

⁸ Die Grauschattierungen sind in Abhängigkeit von Drucker bzw. Kopiergerät nicht immer deutlich zu unterscheiden. Im elektronischen pdf-Dokument sind besser lesbare Farbbilder enthalten.

3.3.3.2 Kunststofffolien > DIN A4 (K.-Fo>A4)

Bei der Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo>A4 besteht der Nutzen im Status Quo vor allem durch die Bereitstellung von Reduktionsmittel und Methanol im Zuge der rohstofflichen Verwertung. Der größte Posten an werkstofflichem Produkt ist PO-Regranulat. Dies gilt im Grunde auch für den optimierten Status Quo, wobei sich hier die Verwertungsschienen etwas von der rohstofflichen zur werkstofflichen Verwertung hin bewegen. Im SORTEC-Verfahren wird im Zuge der Verwertung überwiegend PE-Regranulat gewonnen. Allerdings sind dort auch die nicht verwerteten Sortierreste größer. Detaillierte Angaben befinden sich in Tabelle 3.3.11.

Produkt	Verwertung	Beseitigung			
		Status Quo	Status Quo optimiert	30% MVA 70% Dep.	100% MVA
Energie, elektr. [GJ]	0,27	0,21	0,28	1,09	3,64
Energie, therm. [GJ]	0,73	0,56	0,75	2,94	9,81
Energ. Verw.pot. [GJ]	3,99	3,01	2,31		
K-Ersatz [kg]	27,4	34,4	33,0		
Konstruktionszaun [kg]	70,2	85,1			
Methanol [kg]	123,1	92,9			
Palisaden [kg]	70,2	85,1	25,8		
Regranulat-MKS [kg]	40,8	48,0			
Regranulat-PE [kg]			613,0		
Agglomerat-PO [kg]	291,8	365,9			
Sortierreste [kg]	182,5	176,9	256,1		

Tabelle 3.3.11: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Kunststofffolien > Din A4

Im Vergleich der Umweltwirkungen (Abbildung 3.3.2 und Abbildung 3.3.3) schneiden die Verwertungsoptionen bei den Kategorien Terrestrische Eutrophierung, Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung und Versauerung günstiger ab als die Beseitigungsoptionen. Das liegt hauptsächlich an den erzielten Gutschriften für den Ersatz von Kunststoff sowie - in geringerem Maß - Konstruktionszaun aus Zement, Methanol sowie schwerem Heizöl im Hochofen. Aufgrund des hohen Anteils an werkstofflicher Verwertung ist daher auch SORTEC die beste Option in den genannten Kategorien.

Beim Treibhauseffekt stehen die Belastungen aus den Verwertungswegen ungefähr im Gleichgewicht mit den erzielten Gutschriften. Die Beseitigungsoptionen sind vergleichsweise ungünstiger, da die in der MVA verursachten CO₂-Emissionen die über die Energieauskopplung erzielte CO₂-Einsparung deutlich übertreffen.

Hinsichtlich der Aquatischen Eutrophierung und der Humantoxizität stellt sich die MVA als günstigste Option dar, da ja durch die MVA keine Wassereinleitungen verursacht werden. Zudem wird die mit mehr Schadstoffen belastete Energie aus fossilen Energieträgern durch die bei hohem Emissionsstandard ausgekoppelte Energie der MVA ersetzt.

Spezieller Teil

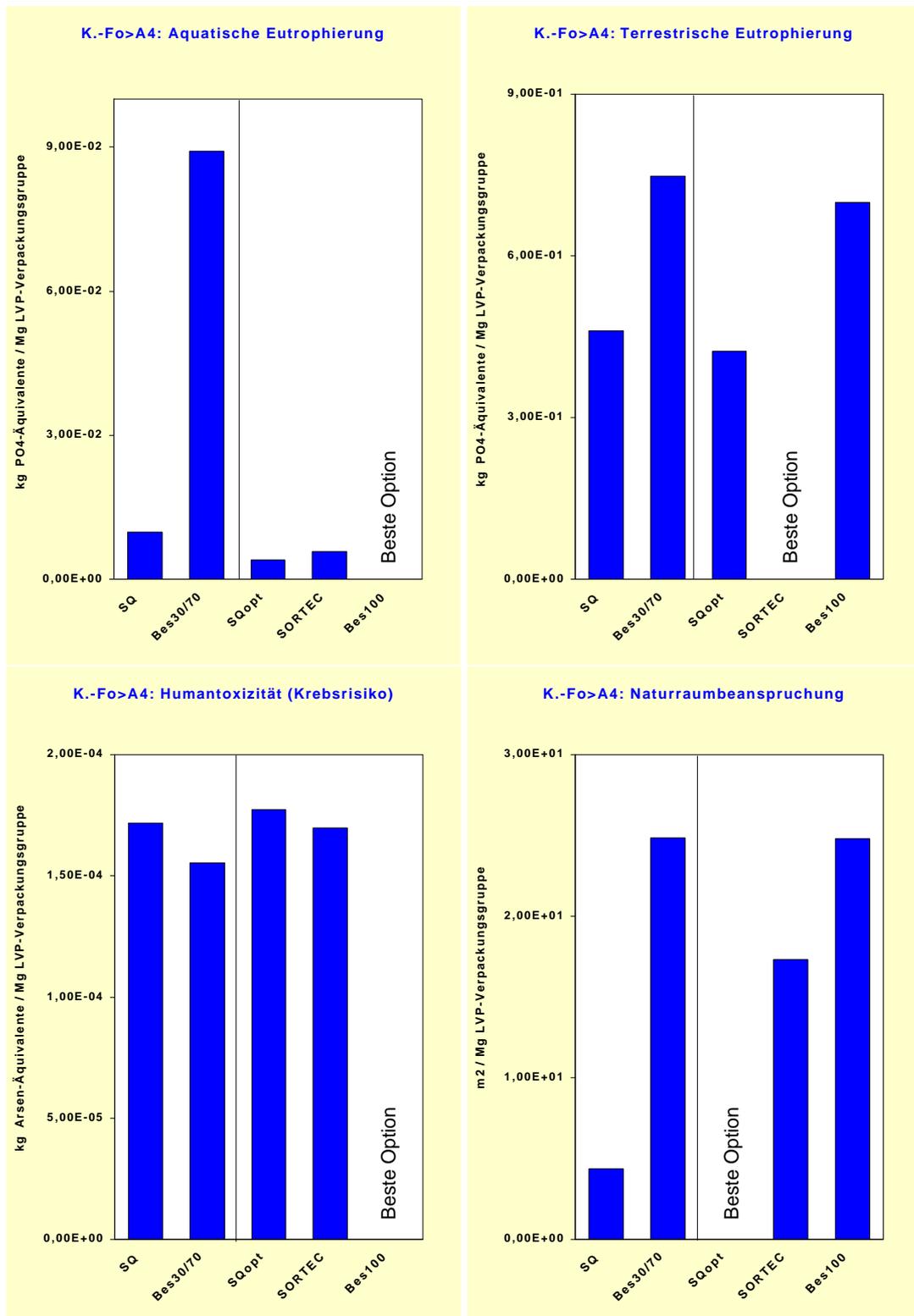


Abbildung 3.3.2 Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo>A4 hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

Spezieller Teil

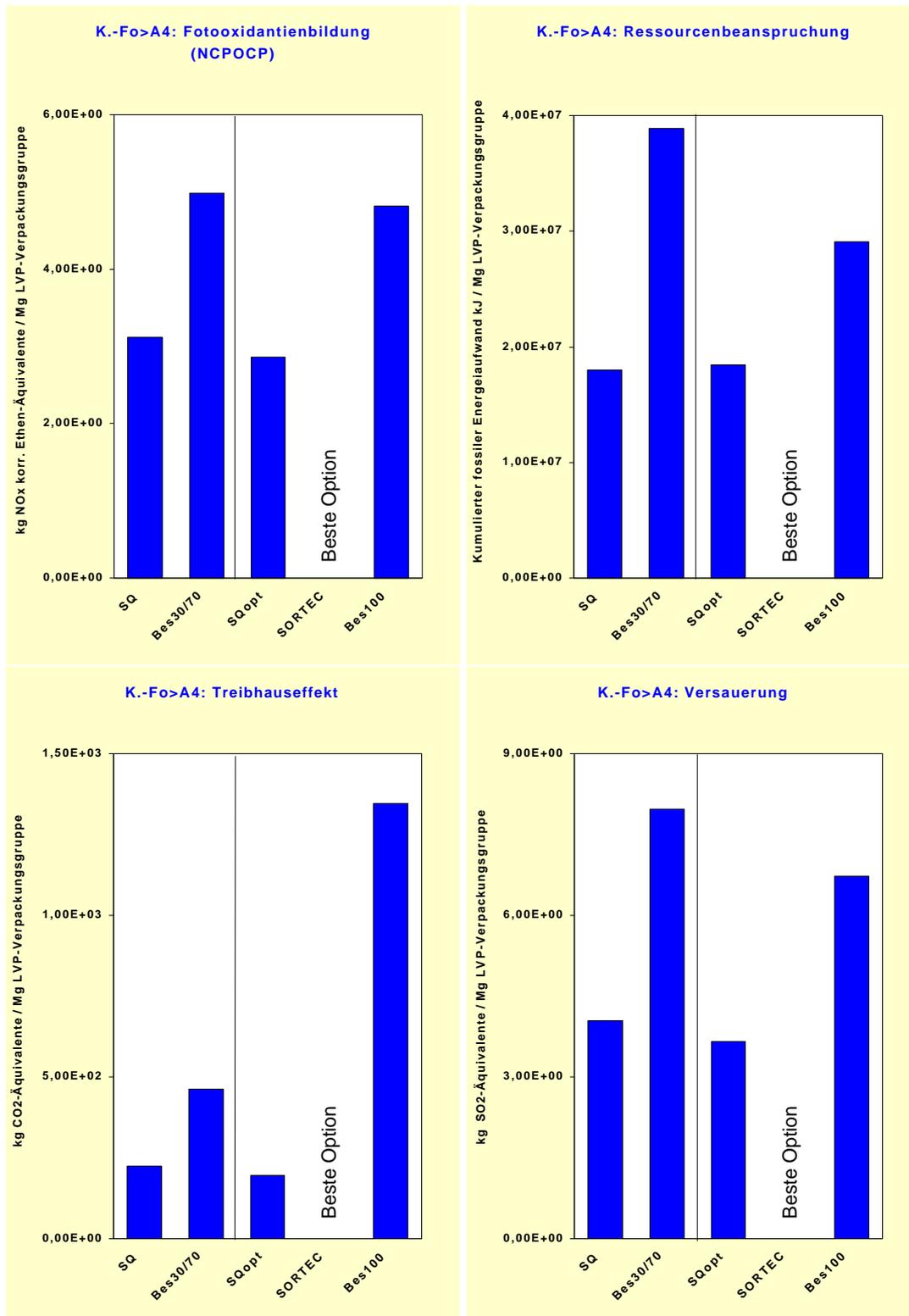


Abbildung 3.3.3: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo>A4 hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

SQ versus Bes30/70 und Bes100

Der direkte Vergleich der EDW des Status Quo von Verwertung und Beseitigung (s. Tabelle 3.3.12) zeigt, dass SQ und Bes30/70 bei den Kategorien von sehr großer Bedeutung vergleichbar abschneiden, der SQ bei den sonstigen Kategorien aber günstiger liegt.

Dies gilt ebenso für den Vergleich von SQ mit Bes100. Bes100 ist zwar die günstigste Option hinsichtlich der Humantoxizität, der höhere Nachteil beim Treibhauseffekt gleicht dieses Vorteil allerdings mehr als aus.

Szenario	Humantoxizität (Krebsrisiko)	Treibhauseffekt	Terrestrische Eutrophierung	Naturumbeanspruchung	Versauerung	Aquatische Eutrophierung	Photoxidantienbildung (NCPOP)	Ressourcenbeanspruchung
SQ	■	■	■■■	●	■■	●	■■■■■■■■	■■■■
Bes30/70	■	■	■■■■	●	■■■■■	●●	■■■■■■■■ ■■■■	■■■■■■■ ■
SQopt	■	●●	■■	Beste Option	■■	●	■■■■■■	■■■■
SORTEC	■	Beste Option	Beste Option	●	Beste Option	●	Beste Option	Beste Option
Bes100	Beste Option	■■■	■■■■	●	■■■■■	Beste Option	■■■■■■■■ ■■■■	■■■■■■■

Spezifischer Beitrag: Abstand zum jeweils besten Szenario: (■) entspricht 5.000 EDW (gerundet).

"Beste Option" = 0 EDW; 0 EDW < (●) < 1250 EDW; 1250 EDW < (●●) < 2.500 EDW

Ökologische Bedeutung: (■ ●) sehr groß, (■■ ●) groß, (■■■ ●) mittel.

Tabelle 3.3.12: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo>A4 unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag

Die Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo>A4 weist unter den gegebenen Rahmenbedingungen ökologische Vorteile gegenüber einer Beseitigung auf. Zukunftstechniken wie mit SQopt und SORTEC bilanziert, würden wie in Tabelle 3.3.12 ersichtlich, diesen Vorteil eher verstärken.

3.3.3.3 Kunststofffolien < DIN A4 (K.-Fo<A4)

Bei der Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4 besteht der Nutzen sowohl im Status Quo als auch optimierten Status Quo vor allem in den Produkten der rohstofflichen Verwertung. Im SORTEC-Verfahren wird im Zuge der Verwertung überwiegend K-Ersatz gewonnen. Insgesamt sind bei allen Verwertungsoptionen die Anteil-

le an nicht verwerteten Sortierresten deutlich größer als bei der im vorher gehenden Kapitel diskutierten Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo>A4. Detaillierte Angaben befinden sich in Tabelle 3.3.13.

Produkt		Verwertung			Beseitigung	
		Status Quo	Status Quo optimiert	SORTEC	30% MVA 70% Dep.	100% MVA
Energie, elektr.	[GJ]	0,4,2	0,27	0,47	1,09	3,64
Energie, therm.	[GJ]	1,13	0,72	1,26	2,94	9,81
Reduktionsmittel	[GJ]	7,90	10,32	8,67		
K-Ersatz	[kg]	4,1	2,6	123,3		
Konstruktionszaun	[kg]	18,7	18,3			
Methanol	[kg]	243,8	318,4			
Palisaden	[kg]	18,7	18,3	96,2		
Regranulat-PE	[kg]			83,0		
Regranulat-MKS	[kg]	15,	17,1			
Agglomerat-PO	[kg]	43,9	28,0			
Sortierreste	[kg]	377,5	235,5	428,1		

Tabelle 3.3.13: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Kunststofffolien < Din A4

Der Vergleich der Umweltwirkungen (Abbildung 3.3.4 und Abbildung 3.3.5) zeigt bei den Kategorien Terrestrische Eutrophierung, Fotooxidantienbildung, Versauerung ein heterogenes Bild. Einerseits schneidet die Verwertungsoption SORTEC aufgrund der durch den werkstofflichen Ersatz von Kunststoff erzielbaren Gutschriften am günstigsten ab. Durch die insgesamt relativ hohe Quote von Sortierresten bei den Verwertungsverfahren weist die MVA hier allerdings bessere Netto-Indikatorergebnisse als die beiden anderen Verwertungsoptionen auf.

Während die Bes100 bei der Humantoxizität sogar die vorteilhaftesten Nettoindikatorwerte aufweist, ist sie beim Treibhauseffekt die ungünstigste Option. Hier sind zwar auch bei den Verwertungsoptionen die Belastungen aus den Verwertungswegen etwas höher als die erzielten Gutschriften, andererseits dominieren die in der MVA verursachten CO2-Emissionen die Bilanz. Allerdings ist hier die Option Bes30/70 geringfügig vorteilhafter als der SQ.

Spezieller Teil

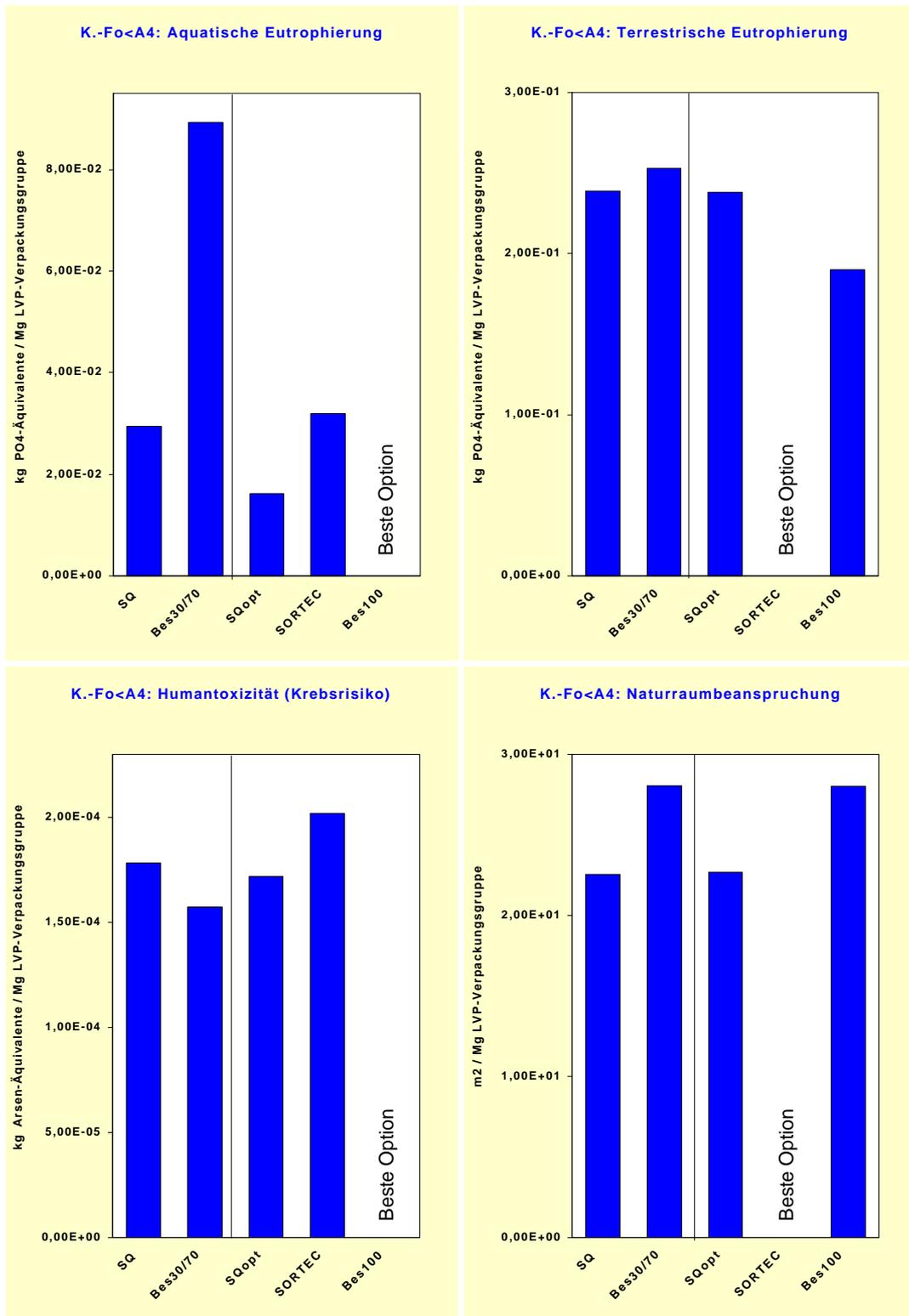


Abbildung 3.3.4: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4 hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

Spezieller Teil

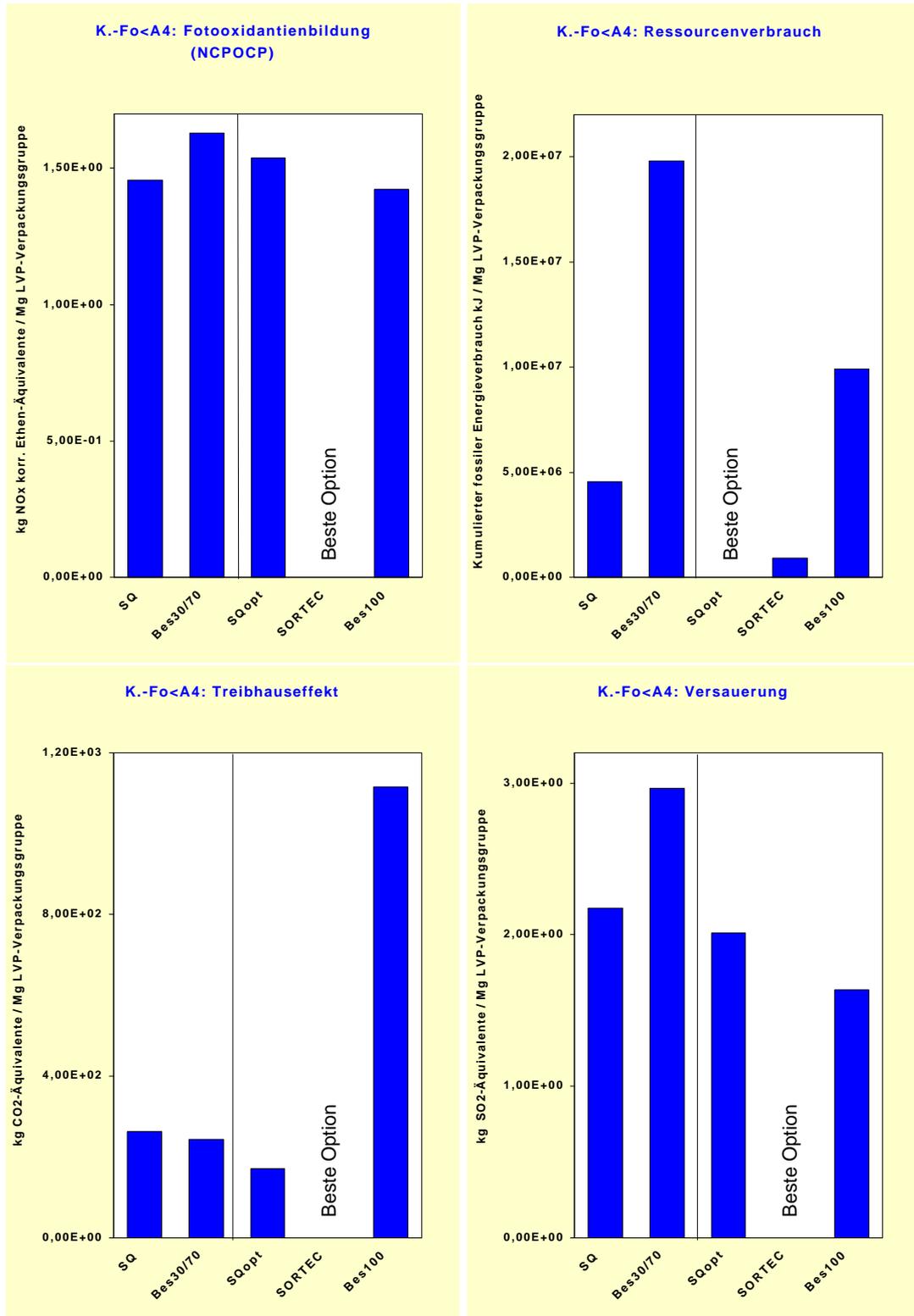


Abbildung 3.3.5: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4 hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

SQ versus Bes30/70 und Bes100

Der direkte Vergleich der EDW des Status Quo von Verwertung und Beseitigung (s. Tabelle 3.3.14) zeigt, dass SQ und Bes30/70 unter den Kategorien von sehr großer Bedeutung beim Treibhauseffekt vergleichbar abschneiden, die Bes30/70 aber bei der Humantoxizität etwas vorteilhafter ist. Bei den Kategorien Versauerung, Fotooxidantienbildung und Ressourcenbeanspruchung weist der SQ geringe Vorteile gegenüber der Bes30/70 auf.

Im Vergleich von SQ mit Bes100 ist Bes100 die günstigere Option hinsichtlich der Humantoxizität, weist aber höhere Nachteile beim Treibhauseffekt auf. Bei den Kategorien mittlerer Bedeutung, der Terrestrischen Eutrophierung und der Versauerung, hat die Option Bes100 Vorteile, bei der Ressourcenbeanspruchung Nachteile.

Szenario	Humantoxizität (Krebsrisiko)	Treibhauseffekt	Terrestrische Eutrophierung	Naturraumben- anspruchung	Versauerung	Aquatische Eutrophierung	Fotooxidantien- bildung (NCFOP)	Ressourcenbe- anspruchung
SQ	■■■	■■	■■■■	•	■■■■	•	■■■■■■■■■■	■■■
Bes30/70	■■	■■	■■■■	■	■■■■■	■	■■■■■■■■■■	■■■■■■■■
SQopt	■■■	■	■■■■	•	■■■	•	■■■■■■■■■■	■
SORTEC	■■■	Beste Option	Beste Option	Beste Option	Beste Option	•	Beste Option	Beste Option
Bes100	Beste Option	■■■■■■■■■	■■■	■	■■■	Beste Option	■■■■■■■■■■	■■■■■■■■

Spezifischer Beitrag: Abstand zum jeweils besten Szenario: (■) entspricht 1.000 EDW (gerundet).

“Beste Option“ = 0 EDW gesetzt; 0 EDW < (•) < 250 EDW; 250 EDW (••) < 500 EDW

Ökologische Bedeutung: (■ •) sehr groß, (■ •) groß, (■ •) mittel.

Tabelle 3.3.14: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4 unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag

Die Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4 weist unter den gegebenen Rahmenbedingungen geringe ökologische Vorteile gegenüber einer Beseitigung im derzeitigen Beseitigungsmix auf. Die größten Vorteile des SQ liegen in der Kategorie der Ressourcenbeanspruchung. Im Verhältnis zur einer Verbrennung in der MVA sind ebenfalls nur geringe ökologischen Vorteile ableitbar.

Eine Verwertung im SORTEC-Verfahren wäre der Verbrennung unter ökologischen Gesichtspunkten deutlich vorzuziehen, während SQopt gegenüber der Verbrennung eher geringe ökologische Vorteile aufweisen würde.

Sensitivitätsanalysen

1. MVA mit höherem energetischen Wirkungsgrad

In Abbildung 3.3.6: ist ersichtlich, wie sich die Beseitigung der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4 in der MVA im Vergleich zur Verwertung im Status Quo darstellt, wenn die Verbrennung nicht mit dem standardmäßig verwendeten energetischen Wirkungsgrad der MVA von 40% erfolgt, sondern der Abfall in eine energetisch optimierte MVA mit einem energetischen Wirkungsgrad von 70% verbracht würde.

Die größten Unterschiede zwischen SQ und Bes100 liegen im Standardansatz bei den Kategorien Humantoxizität, Treibhauseffekt und Ressourcenbeanspruchung. Hier verbessert sich die Bes100 bei erhöhtem energetischen Wirkungsgrad wie auch bei der Versauerung - deutlich. Im Vergleich aller Kategorien weist der SQ insgesamt gegenüber dieser Option keine ökologischen Vorteile mehr auf.

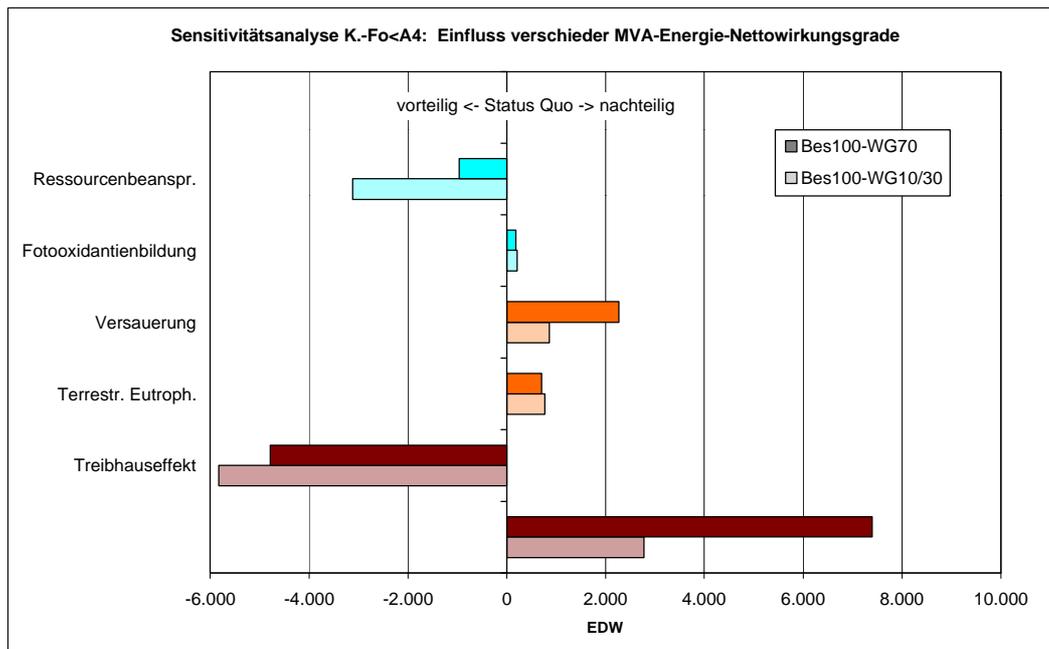


Abbildung 3.3.6: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erhöhten energetischen Wirkungsgrades der MVA auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4

2. Veränderte Substitutionsfaktoren für die werkstoffliche Verwertung

Im Status Quo sind die werkstofflichen Produkte K-Ersatz sowie MKS- und PO-Regranulat, deren Substitutionsfaktoren mit Hilfe von Annahmen abgeleitet wurden und bei 0,7 bzw. 0,9 liegen. Insgesamt ist deren Anteil am gesamten erzielten Sekundär-Nutzen allerdings gering, da die Verwertung hauptsächlich über die rohstofflichen Verwertungspfade erfolgt. Dennoch ist der werkstoffliche Anteil unter den Verpa-

ckungsmaterialgruppen, die im ökologischen Vergleich relativ nahe an der Beseitigung liegen, bei den Kunststofffolien < A4 noch am höchsten.

Daher wurde diese Verpackungsmaterialgruppe für diese Sensitivitätsbetrachtung herangezogen. Dabei wurde für die genannten werktstofflichen Produkte der Substitutionsfaktor im Sinne einer Grenzbetrachtung einheitlich auf 0,5 gesetzt. Als Vergleich wurden die beiden Beseitigungsoptionen herangezogen.

Wie Abbildung 3.3.7: und Abbildung 3.3.8: zeigen, sind die Auswirkungen der Substitutionsfaktoren auf die EDW-Werte der Verwertung im Status Quo sehr gering. Verändert man diese Faktoren, bleibt weiterhin der ökologische Vorteil des SQ gegenüber der Beseitigung im Beseitigungsmix bzw. in der MVA erhalten.

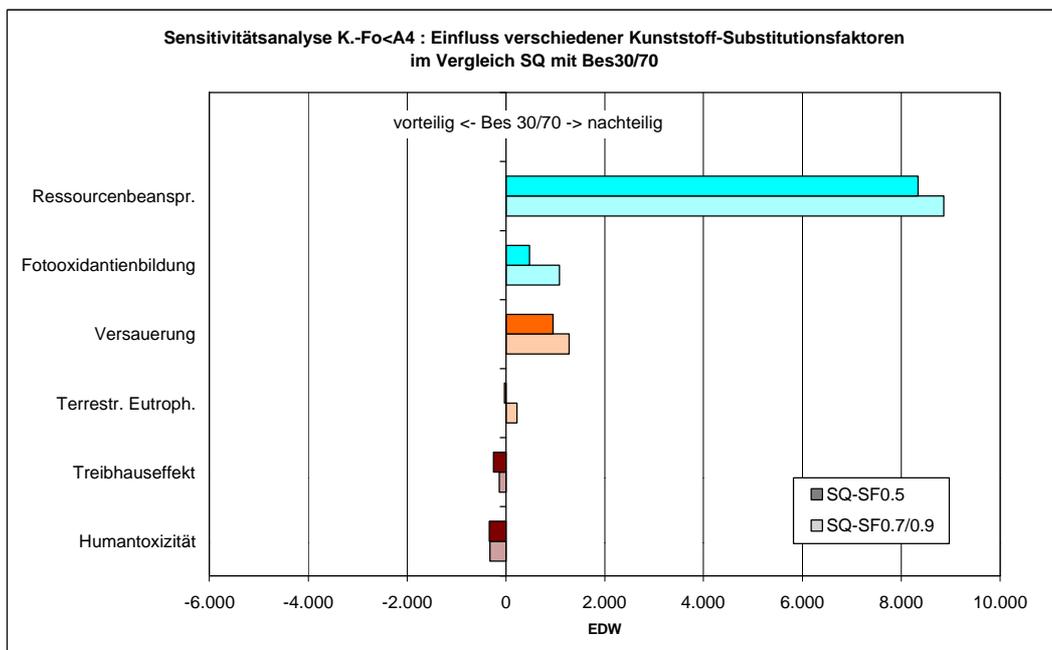


Abbildung 3.3.7: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erniedrigten Substitutionsfaktors auf den Vergleich zwischen SQ und Bes30/70 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4

Spezieller Teil

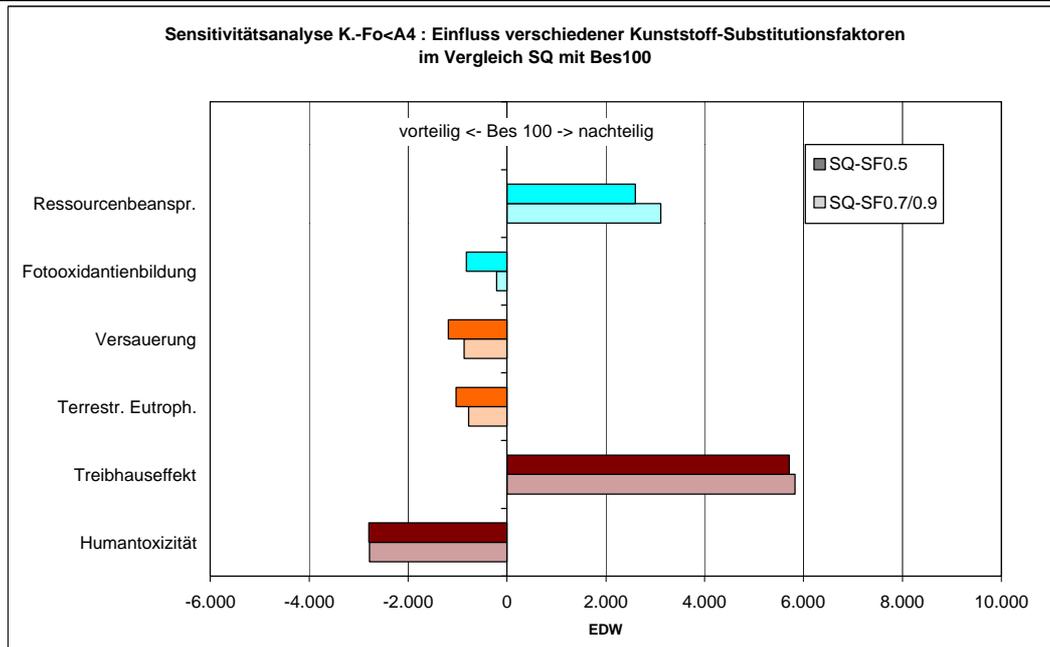


Abbildung 3.3.8: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erniedrigten Substitutionsfaktors auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4

3. Variation der Prozessdaten für die rohstoffliche Verwertung via SVZ

Aufgrund der im Kapitel 3.3.1.2 genannten Problemen bezüglich der Datenlage zum SVZ-Prozess wurde eine Sensitivitätsberechnung durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Datensätze auf die Gesamtergebnisse abzuschätzen. Die Verpackungsmaterialgruppe der Kunststofffolien < A4 wurde dabei wegen des relativ hohen Anteils der rohstofflichen Verwertung im Gesamtverwertungsstrom herangezogen.

Im Vergleich zum Standarddatensatz führt die Verwendung der alternativen SVZ-Daten zu Nachteilen bei den Wirkungskategorien Ressourcenbeanspruchung, Versauerung, terrestrischer Eutrophierung und Humantoxizität. Vorteile liegen bei der Fotooxidantienbildung und dem Treibhauseffekt (Abbildung 3.3.9).

Die Balken zeigen die Vor- bzw. Nachteile des Status quo bei Verwendung des Standard SVZ-Datensatzes an im Vergleich zu dem alternativen SVZ-Datensatz.

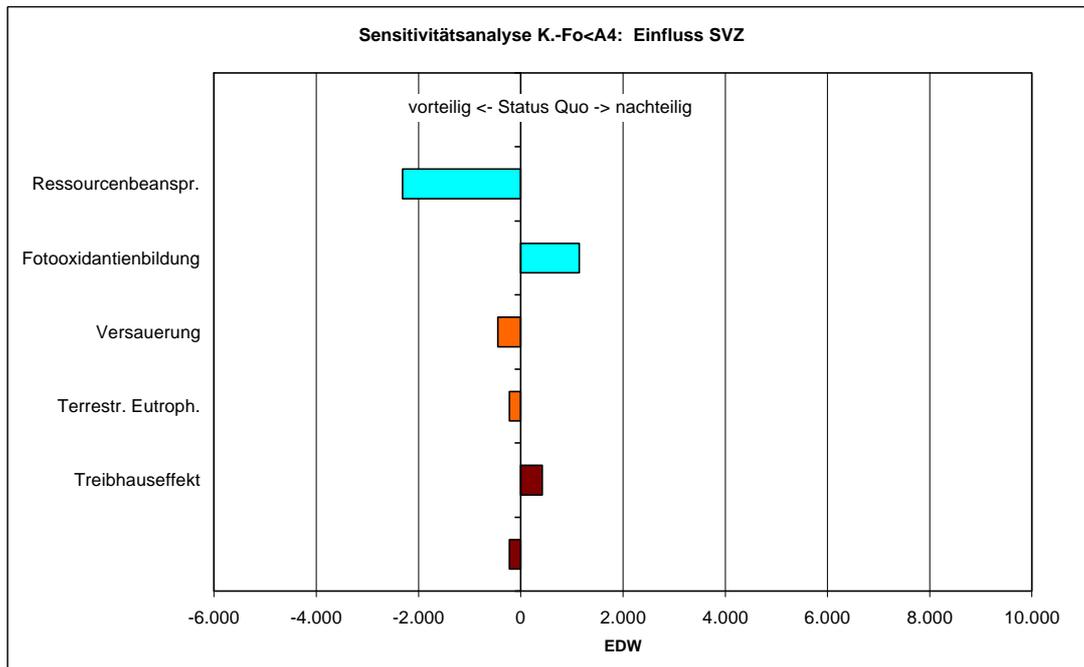


Abbildung 3.3.9: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss der Bilanzdaten für die rohstoffliche Verwertung in der SVZ für den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4

Überträgt man die Ergebnisse in die Darstellungsform von Tabelle 3.3.14 so ergeben sich im Status quo Änderungen bei der Bewertung des Treibhauseffekts (1 Kachel anstelle von 2 Kacheln), der Fotooxidantienbildung (8 Kacheln anstelle von 9 Kacheln) und der Ressourcenbeanspruchung (5 Kacheln anstelle von 3 Kacheln).

Diese Veränderungen führen allerdings nicht zu einer anderen Bewertung der Gesamtaussagen im Vergleich der Verwertung im Status Quo und den Beseitigungsvarianten⁹.

3.3.3.4 Kunststoffbecher (K.-Becher)

Bei der Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher besteht der Nutzen im Status Quo überwiegend in den Produkten der rohstofflichen Verwertung.

⁹ Hinweis: Die SVZ ist hier nur ein Teil des gesamten Stoffstroms. Bei einem alleinigen direkten Vergleich der SVZ mit einer anderen Verwertungsoption könnten sich die unterschiedlichen Daten durchaus als Ergebnis relevant erweisen.

Spezieller Teil

Produkt		Verwertung			Beseitigung	
		Status Quo	Status Quo optimiert	SORTEC	30% MVA 70% Dep.	100% MVA
Energie, elektr.	[GJ]	0,38	0,37		1,10	3,65
Energie, therm.	[GJ]	1,03	1,01		2,94	9,80
Reduktionsmittel.	[GJ]	8,34	1,23			
Palisaden	[kg]	11,1	1,3			
Konstruktionszaun	[kg]	11,1	1,3			
Methanol	[kg]	257,3	38,0			
Regranulat-MKS	[kg]	9,5	1,6			
Regranulat-PE	[kg]	28,7	277,0			
Agglomerat-PO	[kg]			359,7		
Regranulat-PS	[kg]	28,7	277,0	358,6		
Sortierreste	[kg]	361,2	360,6	281,7		

Tabelle 3.3.15: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Kunststoffbecher

Im Zuge der Verwertung werden im optimierten Status Quo zu mehr als 50% und im SORTEC-Verfahren zu mehr als 70% Regranulate gewonnen. Bei SQ und SQopt entstehen etwa 35% und bei SORTEC etwa 28% Sortierreste. Detaillierte Angaben befinden sich in Tabelle 3.3.15.

Im Vergleich der Umweltwirkungen (Abbildung 3.3.10 und Abbildung 3.3.11) schneiden die Verwertungsoptionen SQopt und SORTEC bei den Kategorien Terrestrische Eutrophierung, Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung und Versauerung günstiger ab als die Verwertung im Status Quo und die Beseitigungsoptionen. Das liegt hauptsächlich an den erzielten Gutschriften für die in der werkstofflichen Verwertung hergestellten Regranulate. SQ und MVA sind in den genannten Wirkungen ähnlich, allein beim Ressourcenverbrauch sind Vorteile zugunsten der SQ-Verwertung zu ersehen.

Beim Treibhauseffekt sind die Belastungen aus den Verwertungswegen bei SQ durch die rohstoffliche Verwertung höher als bei der in SQopt und Status Quo überwiegenden werkstofflichen Verwertung. Bei vergleichbaren Gutschriften schneiden daher SQopt und SORTEC im Netto-Indikatorwert besser ab. Die Beseitigungsoptionen sind vergleichsweise ungünstiger, da die in der MVA verursachten CO₂-Emissionen die über die Energieauskopplung erzielte CO₂-Einsparung deutlich übertreffen.

Hinsichtlich der Humantoxizität ist die MVA die vorteilhafteste Option, da durch die bei hohem Emissionsstandard ausgekoppelte Energie hier hohe Gutschriften erbringt.

Spezieller Teil

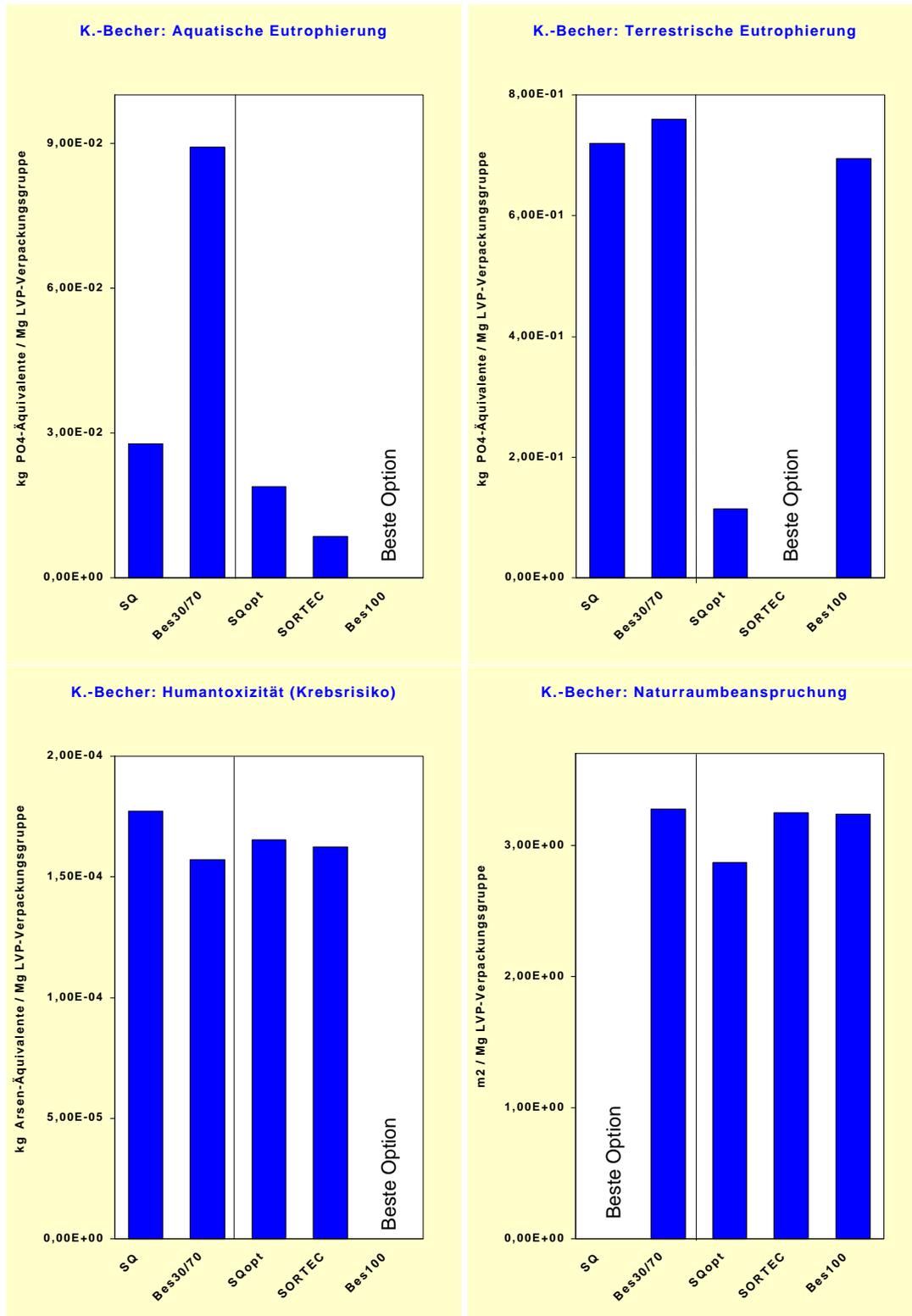


Abbildung 3.3.10: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

Spezieller Teil

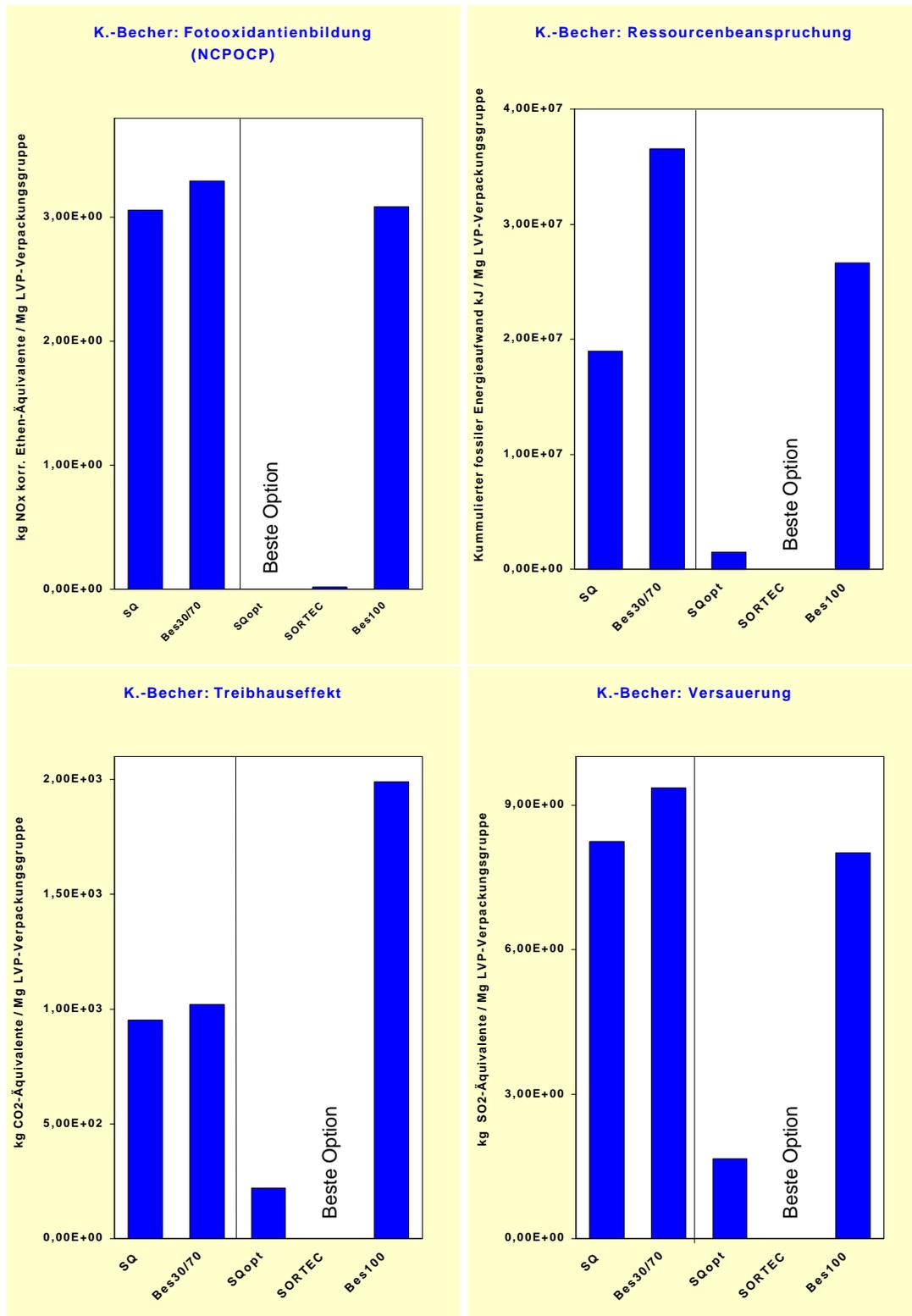


Abbildung 3.3.11: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

SQ versus Bes30/70 und Bes100

Der direkte Vergleich der EDW des Status Quo von Verwertung und Beseitigung (s. Tabelle 3.3.16) zeigt, dass bei SQ und Bes30/70 die EDW bei den Kategorien von sehr großer Bedeutung vergleichbar sind. Bei den Kategorien Versauerung und Ressourcenbeanspruchung weist der SQ geringe Vorteil gegenüber der Bes30/70 auf.

Im Vergleich von SQ mit Bes100 ist Bes100 die günstigere Option hinsichtlich der Humantoxizität, weist aber höhere Nachteil beim Treibhauseffekt auf. Bei den Kategorien von großer Bedeutung, der Terrestrischen Eutrophierung und der Versauerung, sind die beiden Optionen gleichwertig. Bei den Kategorien von mittlerer Bedeutung hat die Option Bes100 im Falle der Ressourcenbeanspruchung geringfügige Nachteile.

Insgesamt sind die spezifischen Beiträge bei den Kategorien mittlerer Bedeutung am höchsten.

Szenario	Humantoxizität (Krebsrisiko)	Treibhauseffekt	Terrestrische Eutrophierung	Naturraumbanspruchung	Versauerung	Aquatische Eutrophierung	Photoxidantienbildung (NCPOP)	Ressourcenbeanspruchung
SQ	■	■■	■■■	Beste Option	■■■	•	■■■■■	■■■
Bes30/70	■	■■	■■■	•	■■■■	••	■■■■■	■■■■■
SQopt	■	••	••	•	■	•	Beste Option	•
SORTEC	■	Beste Option	Beste Option	•	Beste Option	•	•	Beste Option
Bes100	Beste Option	■■■	■■■	•	■■■	Beste Option	■■■■■	■■■

Spezifischer Beitrag: Abstand zum jeweils besten Szenario: (■) entspricht 5.000 EDW (gerundet).

“Beste Option“ = 0 EDW gesetzt; 0 EDW < (•) < 1250 EDW; 1250 EDW < (••) < 2.500 EDW

Ökologische Bedeutung: (■ •) sehr groß, (■■ •) groß, (■■■ •) mittel.

Tabelle 3.3.16 Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag

Die SQ-Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher weist unter den gegebenen Rahmenbedingungen nur geringe ökologische Vorteile gegenüber einer Beseitigung im derzeitigen Beseitigungsmix bzw. in der MVA auf.

Eine Verwertung mit optimiertem Status Quo bzw. im SORTEC-Verfahren wäre der Beseitigung unter ökologischen Gesichtspunkten vorzuziehen .

Sensitivitätsanalysen

1. MVA mit höherem energetischen Wirkungsgrad

In Abbildung 3.3.11 ist ersichtlich, wie sich die Beseitigung der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher in der MVA im Vergleich zur Verwertung im Status Quo darstellt, wenn die Verbrennung nicht mit dem standardmäßig verwendeten energetischen Wirkungsgrad der MVA von 40% erfolgt, sondern der Abfall in eine energetisch optimierte MVA mit einem energetischen Wirkungsgrad von 70% verbracht würde.

Die größten Unterschiede der EDW zwischen SQ und Bes100 lagen im Standardansatz bei den Kategorien Humantoxizität, Treibhauseffekt und Ressourcenbeanspruchung. Hier verbessert sich die Bes100 bei erhöhtem energetischen Wirkungsgrad wie auch bei der Versauerung - deutlich. Im Vergleich aller Kategorien weist der SQ insgesamt gegenüber dieser Option keine ökologischen Vorteile mehr auf.

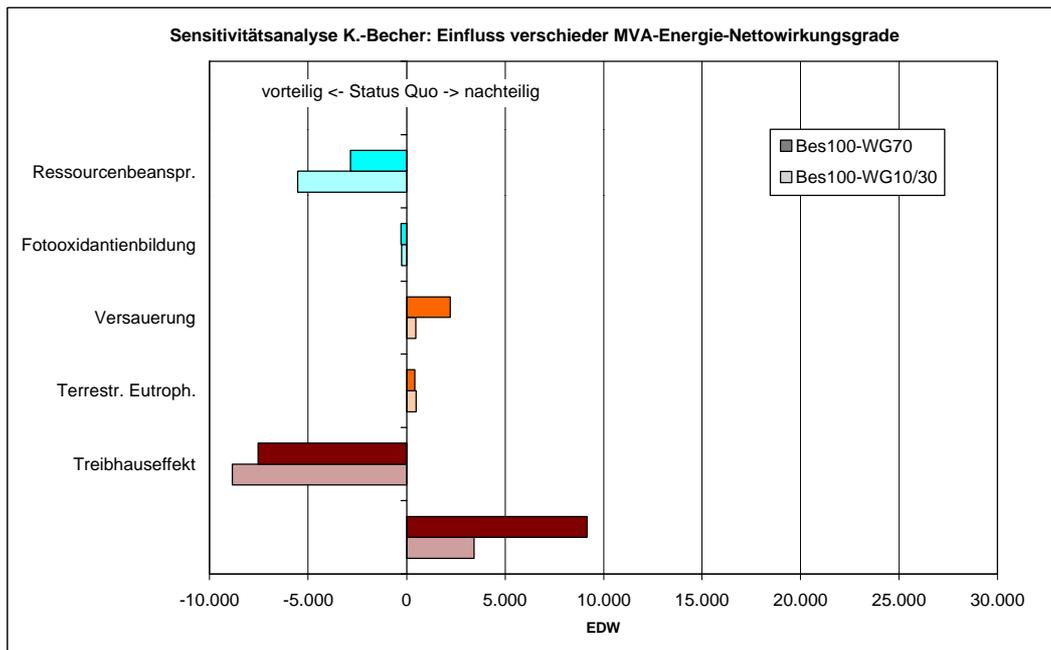


Abbildung 3.3.12: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erhöhten energetischen Wirkungsgrades der MVA auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher

3.3.3.5 Kunststoffflaschen (K.-Flaschen)

Bei den drei Verwertungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen besteht der Nutzen überwiegend in den Produkten der werkstofflichen Verwertung. Den höchsten Anteil hat dabei mit über 65% der optimierte Status Quo. Bei SQ und SQopt

entstehen etwa 30% und bei SORTEC etwa 17% Sortierreste. Detaillierte Angaben befinden sich in Tabelle 3.3.17.

Produkt		Verwertung			Beseitigung	
		Status Quo	Status Quo optimiert	SORTEC	30% MVA 70% Dep.	100% MVA
Energie, elektr.	[GJ]	0,36	0,34		1,23	4,11
Energie, therm.	[GJ]	0,96	0,92		3,29	10,98
Reduktionsmittel.	[GJ]	2,07		10,25		
Mahlgut-PET	[kg]		159,6	157,6		
K-Ersatz	[kg]	4,6		165,3		
Konstruktionszaun	[kg]	2,2				
Methanol	[kg]	63,8				
Palisaden	[kg]	2,2		128,9		
Regranulat-MKS	[kg]	2,5				
Regranulat-PE	[kg]		443,6			
Agglomerat-PE/PP	[kg]	448,8				
Regranulat-PP	[kg]		58,3			
Regranulat-PS	[kg]			21,5		
Sortierreste	[kg]	297,0	286,0	165,2		

Tabelle 3.3.17: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Kunststoffflaschen

Im Vergleich der Umweltwirkungen (Abbildung 3.3.13 und Abbildung 3.3.14) schneiden die Verwertungsoptionen bei den Kategorien Terrestrische Eutrophierung, Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung und Versauerung günstiger ab als die Beseitigungsoptionen. Das liegt hauptsächlich an den erzielten Gutschriften für die in der werkstofflichen Verwertung hergestellten Regranulate und Agglomerate sowie die Konsumprodukte K-Ersatz und Palisaden.

Beim Treibhauseffekt sind die Belastungen aus den Verwertungswegen ungefähr im Gleichgewicht mit den erzielten Gutschriften. Die Beseitigungsoptionen sind vergleichsweise ungünstiger, da die in der MVA verursachten CO₂-Emissionen die über die Energieauskopplung erzielte CO₂-Einsparung deutlich übertreffen.

Hinsichtlich der Humantoxizität ist die MVA die vorteilhafteste Option, da durch die bei hohem Emissionsstandard ausgekoppelte Energie hier hohe Gutschriften erbringt.

Spezieller Teil

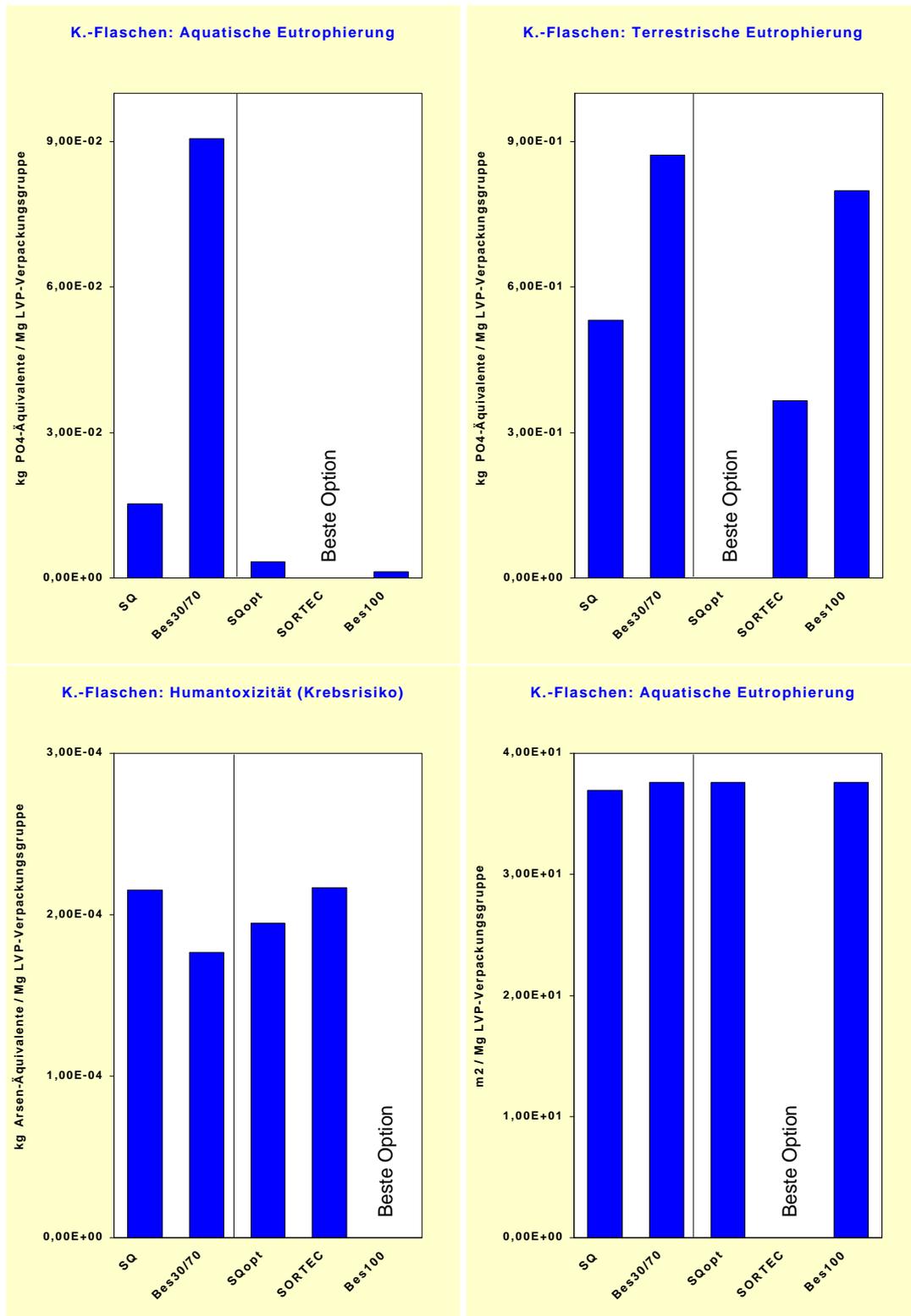


Abbildung 3.3.13: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

Spezieller Teil

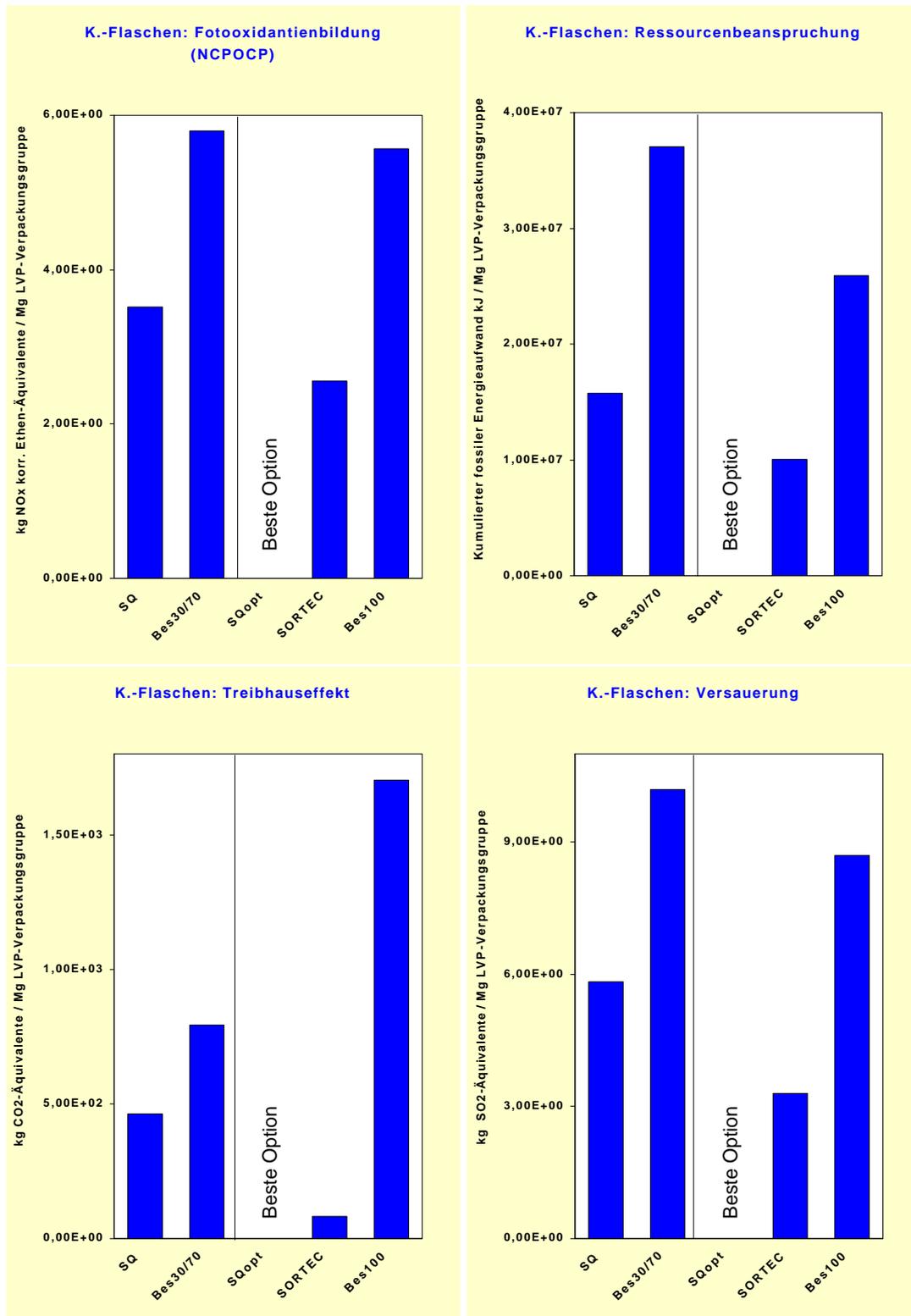


Abbildung 3.3.14: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

mehr als die Hälfte aus. Die die restliche Verwertung erfolgt hauptsächlich über den rohstofflichen Weg.

Für die genannten werkstofflichen Produkte wurde der Substitutionsfaktor im Sinne einer Grenzbetrachtung einheitlich auf 0,5 gesetzt. Als Vergleichsoption wurden die Beseitigungsoptionen Bes30/70 und Bes100 herangezogen.

Wie die Abbildung 3.3.14 und Abbildung 3.3.15 zeigen, sind die Auswirkungen der Substitutionsfaktoren auf die EDW-Werte der Verwertung im Status Quo erheblich. Bei den Kategorien Ressourcenbeanspruchung, Fotooxidantienbildung, Versauerung und Terrestrische Eutrophierung verringern sich die ökologischen Nachteile der Beseitigungsoptionen gegenüber der Status Quo Verwertung um bis zu 25%. Allerdings bleiben die Gutschriften weiterhin so hoch, dass - auch unter Einbeziehung der durch die reduzierten Substitutionsfaktoren bewirkten Verringerungen der Gutschrift - das Gesamturteil der ökologischen Vorteilhaftigkeit der Verwertung gegenüber der Beseitigung Bestand hat.

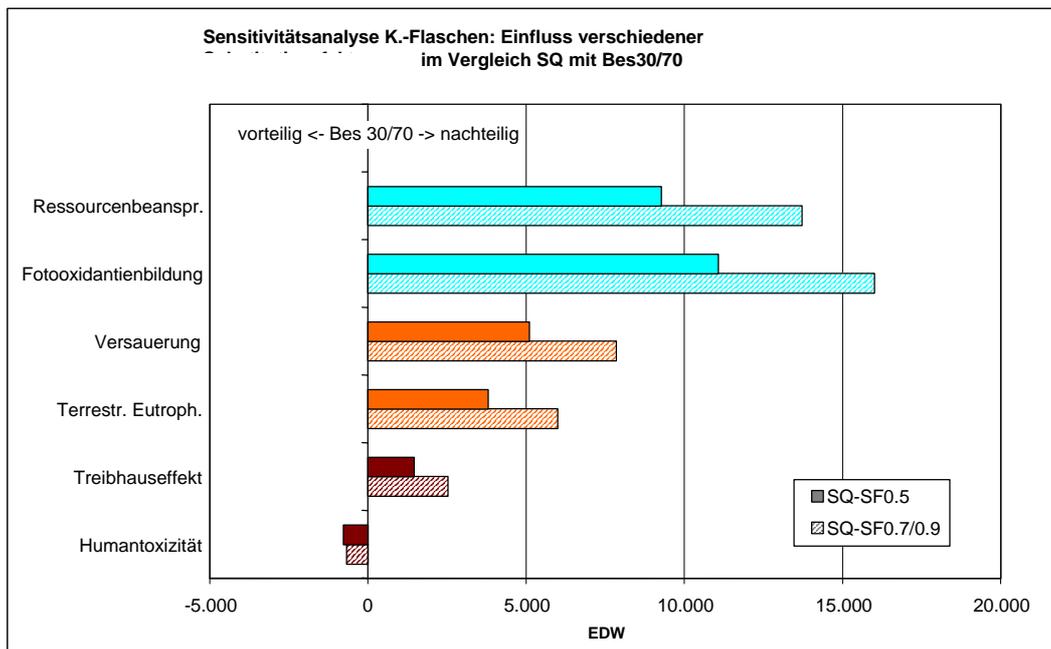


Abbildung 3.3.15: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erniedrigten Substitutionsfaktors auf den Vergleich zwischen SQ und Bes30/70 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen

Spezieller Teil

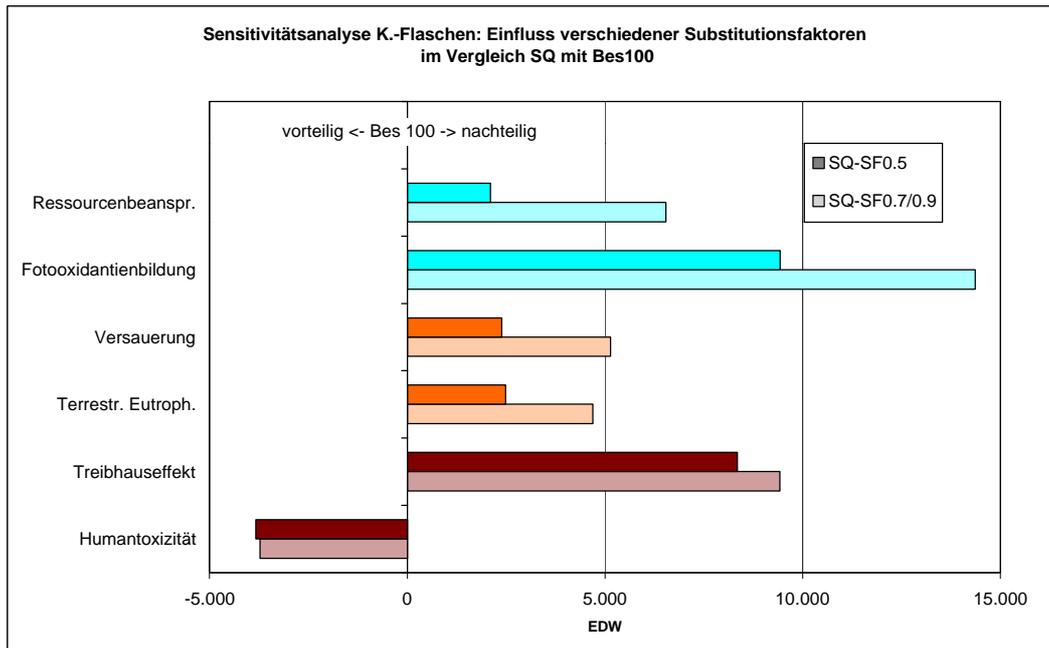


Abbildung 3.3.16: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erniedrigten Substitutionsfaktors auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen

3.3.3.6 Kunststoffverbunde (K.-Vb)

Die drei Verwertungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb erbringen ihren Nutzen vor allem in den Produkten der rohstofflichen Verwertung. Im SORTEC-Verfahren stellt auch die Herstellung von Palisaden und K-Ersatz einen nennenswerten Anteil an der Produktpalette dar. Der Anteil der Sortierreste unterscheidet sich je nach Verwertungsoption erheblich. Während er im Status Quo bei 45% liegt, beträgt er im optimierten Status Quo rund 29% und bei SORTEC nur 14%. Detaillierte Angaben befinden sich in Tabelle 3.3.19.

Der Vergleich der Umweltwirkungen (Abbildung 3.3.17 und Abbildung 3.3.18) zeigt bei den Kategorien Terrestrische Eutrophierung, Fotooxidantienbildung, Versauerung und Ressourcenbeanspruchung ein heterogenes Bild. Einerseits schneidet die Verwertungsoption SORTEC aufgrund der hohen Verwertungsquote und der durch den werkstofflichen Ersatz von Kunststoff erzielbaren Gutschriften am günstigsten ab. Andererseits weist die MVA hier mit Ausnahme der Ressourcenbeanspruchung bessere Netto-Indikatorergebnisse als die Verwertungsoptionen SQ und SQopt auf.

Spezieller Teil

Produkt		Verwertung			Beseitigung	
		Status Quo	Status Quo optimiert	SORTEC	30% MVA 70% Dep.	100% MVA
Energie, elektr.	[GJ]	0,46	0,29	0,14	1,02	3,41
Energie, therm.	[GJ]	1,26	0,80	0,39	2,79	9,30
Energ. Verw.pot.	[GJ]	7,87	10,26	14,53		
Mahlgut-PET	[kg]			36,0		
K-Ersatz	[kg]			207,5		
Konstruktionszaun	[kg]	8,7	11,0			
Methanol	[kg]	243,0	316,6			
Palisaden	[kg]	8,7	11,0	161,9		
Regranulat-MKS	[kg]	9,9	12,8			
Sortierreste	[kg]	454,2	288,8	140,8		

Tabelle 3.3.19: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung der Verpackungsmaterialgruppe Kunststoffverbunde

Während die MVA bei der Humantoxizität sogar die vorteilhaftesten Nettoindikatorwerte aufweist, ist sie beim Treibhauseffekt die ungünstigste Option. Hier sind zwar wie bei der Beseitigung auch bei den Verwertungsoptionen SQ und SQopt die Belastungen aus den Verwertungswegen etwas höher als die erzielten Gutschriften, andererseits dominieren die in der MVA verursachten CO₂-Emissionen die Bilanz.

Spezieller Teil

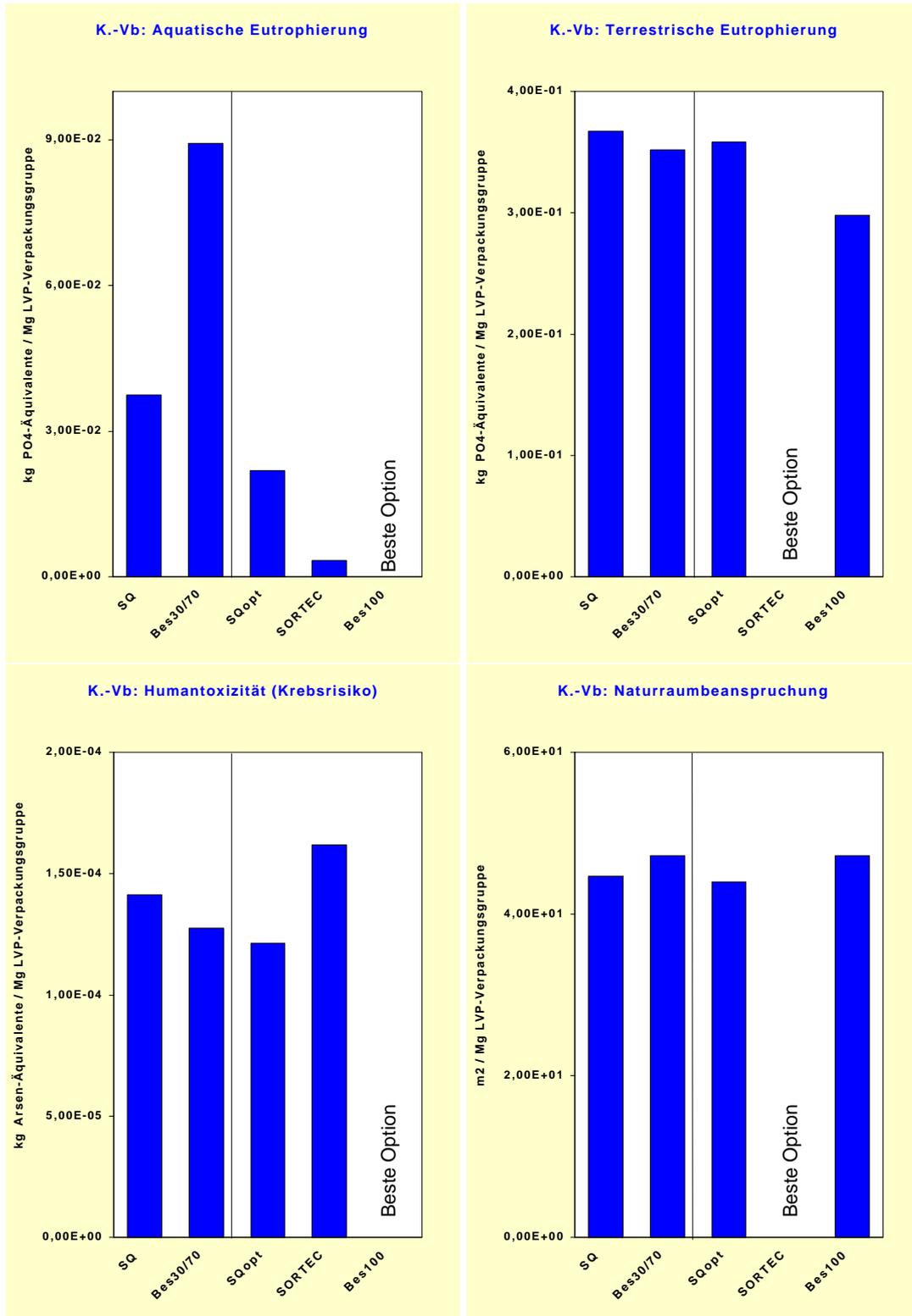


Abbildung 3.3.17: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

Spezieller Teil

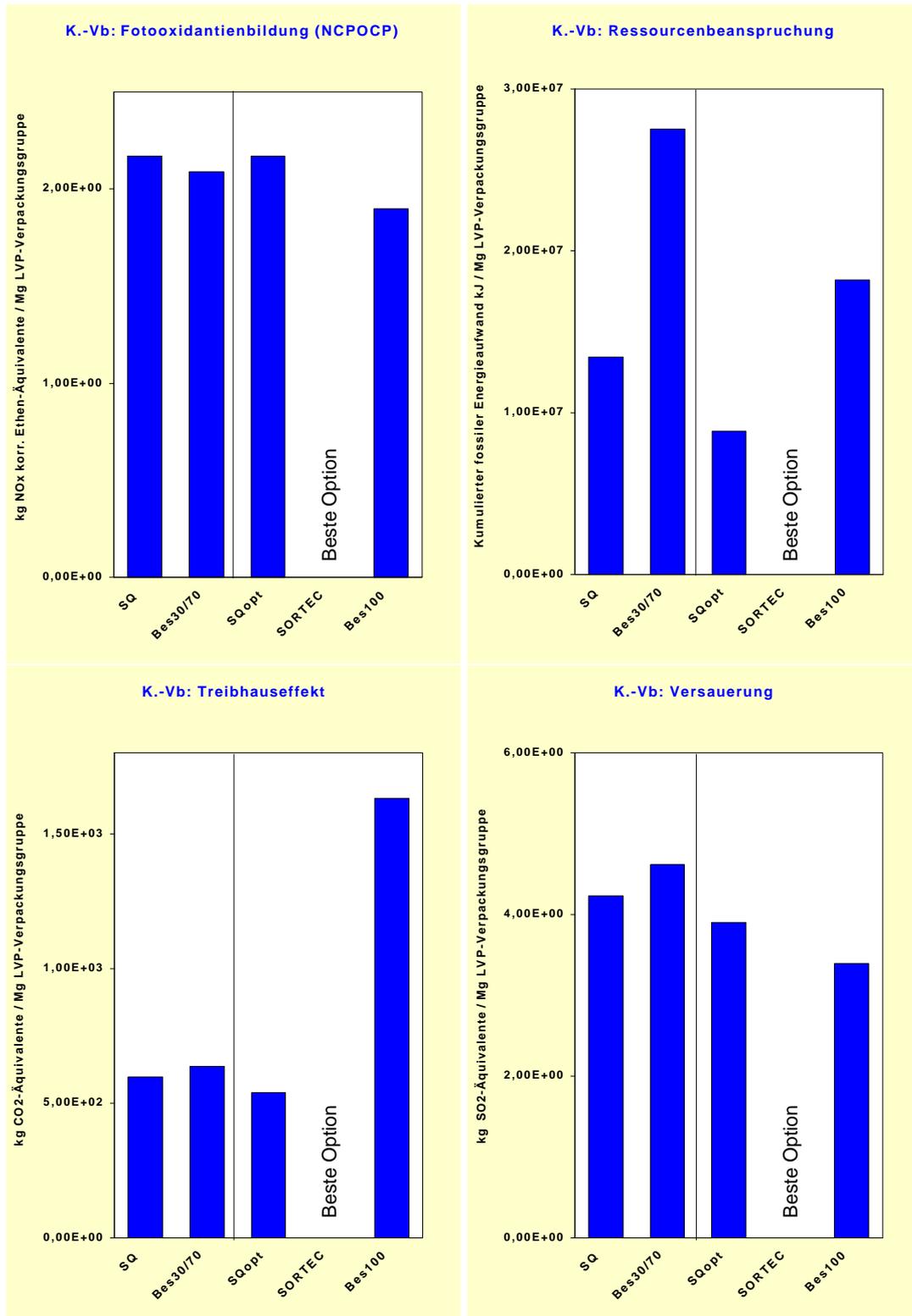


Abbildung 3.3.18: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

SQ versus Bes30/70 und Bes100

Der direkte Vergleich der EDW des Status Quo von Verwertung und Beseitigung (s. Tabelle 3.3.20) zeigt, dass bei SQ und Bes30/70 die EDW bei den Kategorien von sehr großer Bedeutung vergleichbar sind. Bei den Kategorien Ressourcenbeanspruchung weist der SQ geringe Vorteile gegenüber der Bes30/70 auf.

Im Vergleich von SQ mit Bes100 ist Bes100 die günstigere Option hinsichtlich der Humantoxizität, weist aber einen Nachteil beim Treibhauseffekt auf. Bei den Kategorien von großer Bedeutung, der Terrestrischen Eutrophierung und der Versauerung, sind die beiden Optionen gleichwertig. Bei den Kategorien von mittlerer Bedeutung hat die Option Bes100 im Falle der Ressourcenbeanspruchung geringfügige Nachteile.

Szenario	Humanoxizität (Krebsrisiko)	Treibhauseffekt	Terrestrische Eutrophierung	Naturraumbenutzung	Versauerung	Aquatische Eutrophierung	Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	Ressourcenbeanspruchung
SQ	••	■	■	•	■	•	■	■
Bes30/70	••	■	■	•	■	•	■	■
SQopt	••	■	■	•	■	•	■	■
SORTEC	••	Beste Option	Beste Option	Beste Option	Beste Option	•	Beste Option	Beste Option
Bes100	Beste Option	■	■	•	■	Beste Option	■	■

Spezifischer Beitrag: Abstand zum jeweils besten Szenario: (■) entspricht 1.000 EDW (gerundet).

“Beste Option“ = 0 EDW gesetzt; 0 EDW < (•) < 250 EDW; 250 EDW (••) < 500 EDW

Ökologische Bedeutung: (■ •) sehr groß, (■ •) groß, (■ •) mittel.

Tabelle 3.3.20: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Betrag

Die Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb weist unter den gegebenen Rahmenbedingungen nur geringe ökologische Vorteile gegenüber einer Beseitigung im derzeitigen Beseitigungsmix auf. Im Verhältnis zur einer Verbrennung in der MVA rteile - wenn überhaupt ableitbar - noch geringer.

Eine Verwertung im SORTEC-Verfahren wäre der Beseitigung unter ökologischen Gesichtspunkten vorzuziehen, während SQopt im Vergleich zu SQ keine nennenswerte Verbesserung gegenüber der Beseitigung bringt.

Sensitivitätsanalysen

1. MVA mit höherem energetischen Wirkungsgrad

In Abbildung 3.3.19 ist ersichtlich, wie sich die Beseitigung der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb in der MVA im Vergleich zur Verwertung im Status Quo darstellt, wenn die Verbrennung nicht mit dem standardmäßig verwendeten energetischen Wirkungsgrad der MVA von 40% erfolgt, sondern der Abfall in eine energetisch optimierte MVA mit einem energetischen Wirkungsgrad von 70% verbracht würde.

Die größten Vorteile des SQ hinsichtlich der EDW gegenüber Bes100 lagen im Standardansatz bei den Kategorien Treibhauseffekt und Ressourcenbeanspruchung. Hier werden die Vorteile des SQ bei erhöhtem energetischen Wirkungsgrad der MVA geringer. Bei Versauerung und Humantoxizität nehmen die Vorteile der Bes100 zu. Im Vergleich aller Kategorien weist der SQ gegenüber der Bes100 bei der WK-70-Option keine ökologischen Vorteile mehr auf.

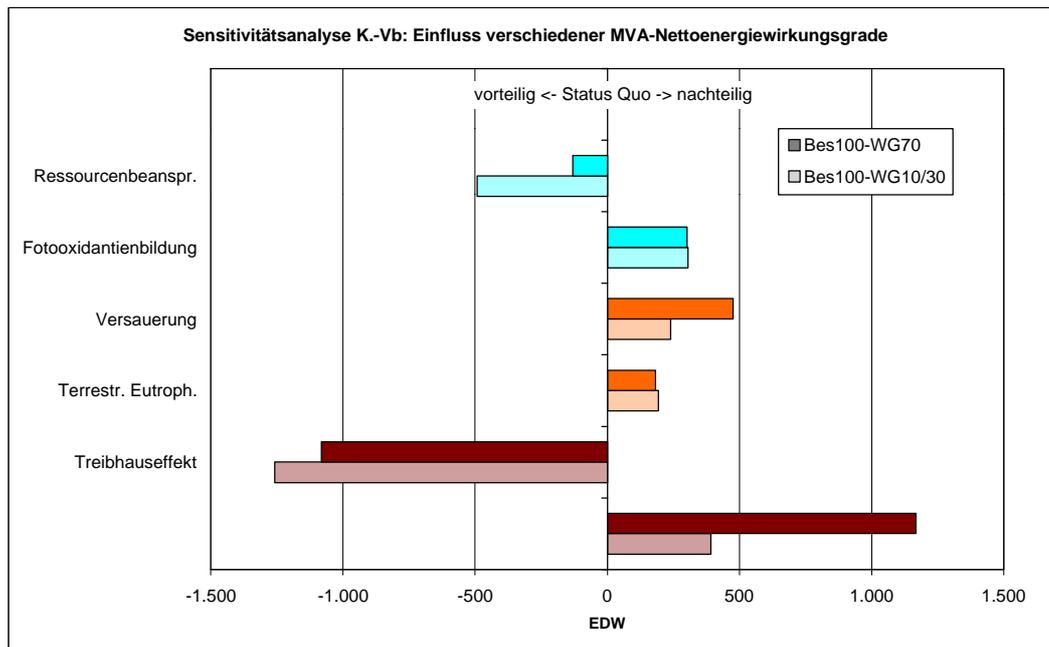


Abbildung 3.3.19: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erhöhten energetischen Wirkungsgrades der MVA auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb

3.3.3.7 Sonstige Kunststoffe (so. K.)

Bei der Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe Sonstige Kunststoffe besteht der Nutzen im Status Quo überwiegend in den Produkten der rohstofflichen Verwertung. Im Zuge der Verwertung werden im optimierten Status Quo zu etwa 40% und im SORTEC-Verfahren zu etwa 50% Regranulate, PET-Agglomerate und Sekundärprodukte auf Kunststoffbasis gewonnen. Zusätzlich wird in der Option SORTEC ein nennenswerter Anteil rohstofflich verwertet.

Bei SQ und SQopt entstehen mehr als 40% und bei SORTEC etwa 19% Sortierreste. Detaillierte Angaben befinden sich in Tabelle 3.3.21.

Produkt	Verwertung	Status Quo		SORTEC	Beseitigung	
		Status Quo	Status Quo optimiert		30% MVA 70% Dep.	100% MVA
Energie, elektr. [GJ]		0,48	0,42	0,19	1,02	3,41
Energie, therm. [GJ]		1,32	1,16	0,53	2,79	9,30
Reduktionsmittel. [GJ]		7,55	2,40	10,35		
Mahlgut-PET [kg]			17,4	28,8		
K-Ersatz [kg]				143,8		
Konstruktionszaun [kg]		8,3	2,4			
Methanol [kg]		233,1	74,0			
Palisaden [kg]		8,3	2,4	112,2		
Regranulat-MKS [kg]		9,4	3,0			
Regranulat-PE [kg]			85,3			
Regranulat-PP [kg]			195,1			
Regranulat-PS [kg]			116,9	216,0		
Sortierreste [kg]		476,5	419,0	189,9		

Tabelle 3.3.21: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Sonstige Kunststoffe

Im Vergleich der Umweltwirkungen (Abbildung 3.3.20 und Abbildung 3.3.21) schneiden die Verwertungsoptionen SQopt und SORTEC bei den Kategorien Terrestrische Eutrophierung, Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung und Versauerung günstiger ab als die Verwertung im Status Quo und die Beseitigungsoptionen. Das liegt hauptsächlich an den erzielten Gutschriften für die in der werkstofflichen Verwertung hergestellten Regranulate und Sekundärprodukte. Die MVA hat bei den genannten Wirkungen mit Ausnahme des Ressourcenverbrauchs Vorteile gegenüber der SQ-Verwertung.

Beim Treibhauseffekt sind die Belastungen aus den Verwertungswegen bei SQ durch die rohstoffliche Verwertung höher als bei der in SQopt und SORTEC überwiegenden werkstofflichen Verwertung. Bei Verrechnung der Gutschriften schneiden daher SQopt und SORTEC im Netto-Indikatorwert besser ab. Die Beseitigungsoptionen sind vergleichsweise ungünstiger, da die in der MVA verursachten CO₂-Emissionen die über die Energieauskopplung erzielte CO₂-Einsparung deutlich übertreffen.

Hinsichtlich der Humantoxizität ist die MVA die vorteilhafteste Option, da durch die bei hohem Emissionsstandard ausgekoppelte Energie hier hohe Gutschriften erbringt.

Spezieller Teil

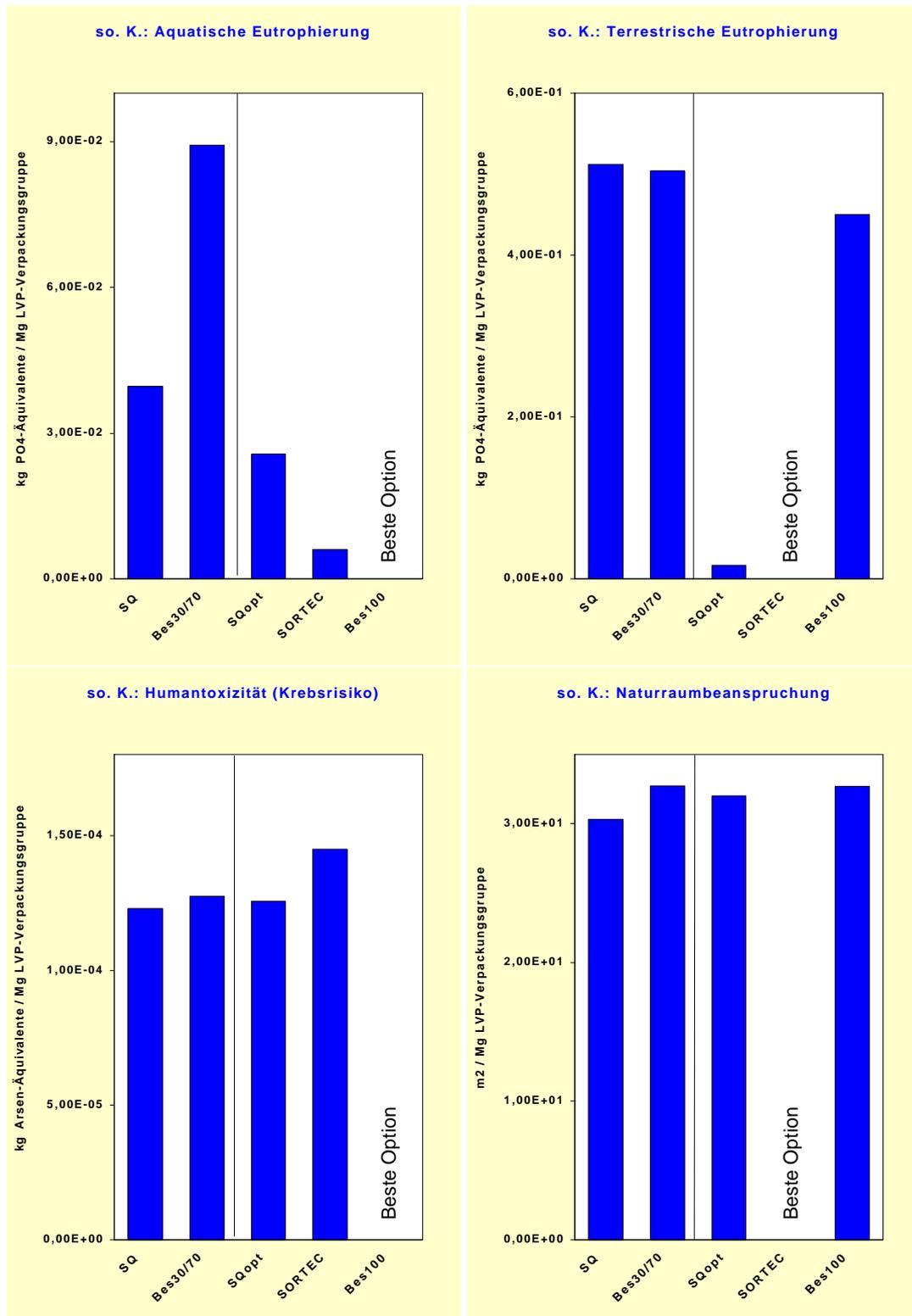


Abbildung 3.3.20: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe so. K. hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

Spezieller Teil

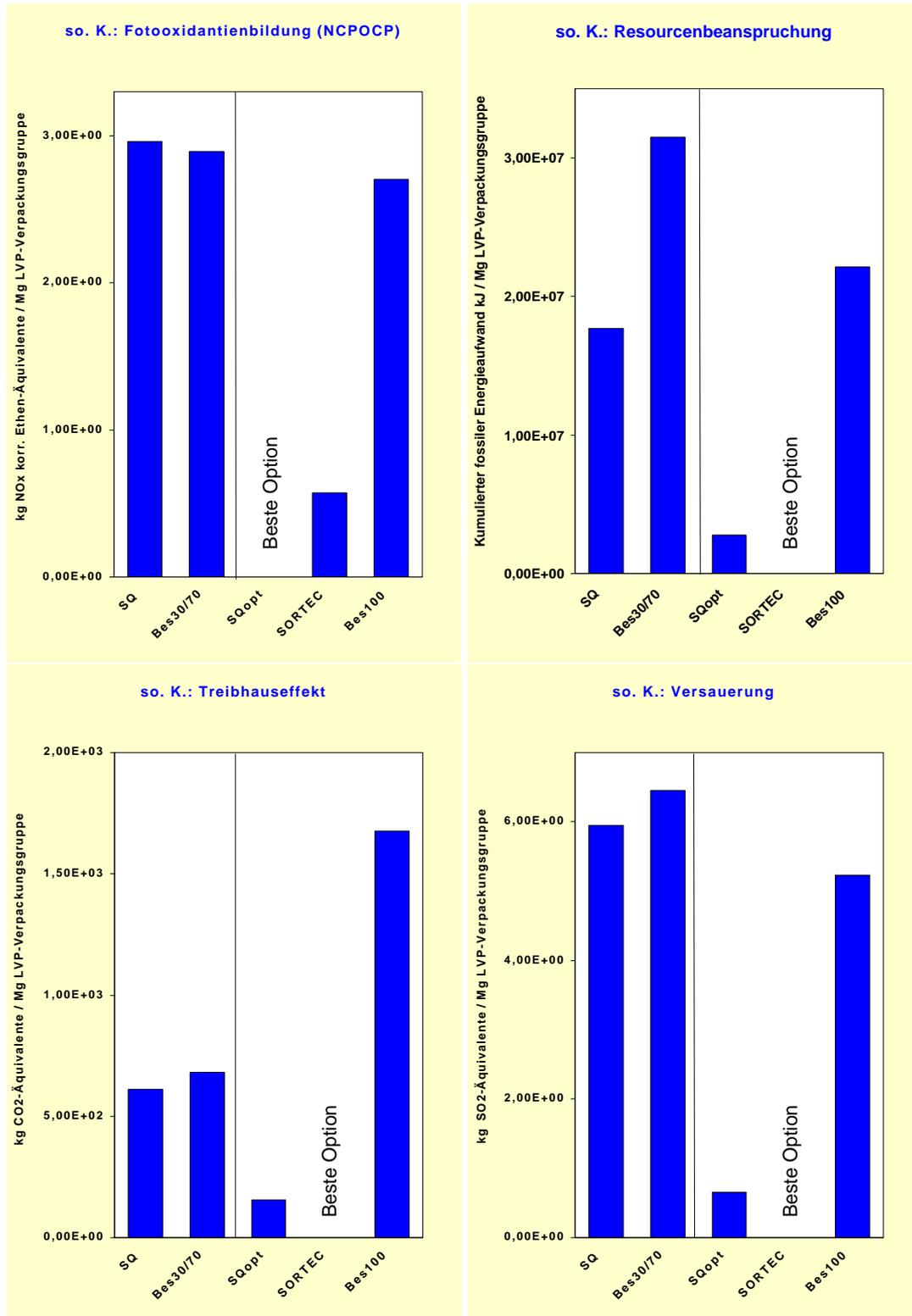


Abbildung 3.3.21: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe so. K. hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

SQ versus Bes30/70 und Bes100

Der direkte Vergleich der EDW des Status Quo von Verwertung und Beseitigung (s. Tabelle 3.3.22) zeigt, dass bei SQ und Bes30/70 die EDW bei den Kategorien von sehr großer und großer Bedeutung vergleichbar sind. Allein bei der Kategorie Ressourcenbeanspruchung weist der SQ geringe Vorteile gegenüber der Bes30/70 auf.

Im Vergleich von SQ mit Bes100 ist Bes100 die günstigere Option hinsichtlich der Humantoxizität, weist aber höhere Nachteil beim Treibhauseffekt auf. Bei den Kategorien von großer Bedeutung, der Terrestrischen Eutrophierung und der Versauerung, sind die beiden Optionen gleichwertig. Bei den Kategorien von mittlerer Bedeutung hat die Option Bes100 im Falle der Ressourcenbeanspruchung geringfügige Nachteile.

Insgesamt sind die spezifischen Beiträge bei den Kategorien mittlerer Bedeutung am besten.

Szenario	Humantoxizität (Krebsrisiko)	Treibhauseffekt	Terrestrische Eutrophierung	Naturraumbenanspruchung	Versauerung	Aquatische Eutrophierung	Photoxidantienbildung (NCPOCP)	Ressourcenbeanspruchung
SQ	••	■	■ ■	•	■ ■	•	■ ■ ■ ■	■ ■
Bes30/70	••	■	■ ■	•	■ ■	•	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■
SQopt	••	•	•	•	•	•	Beste Option	••
SORTEC	■	Beste Option	Beste Option	Beste Option	Beste Option	•	■	Beste Option
Bes100	Beste Option	■ ■ ■	■ ■	•	■ ■	Beste Option	■ ■ ■ ■	■ ■ ■

Spezifischer Beitrag: Abstand zum jeweils besten Szenario: (■) entspricht 5.000 EDW (gerundet).

“Beste Option“ = 0 EDW gesetzt; 0 EDW < (•) < 1250 EDW; 1250 EDW < (••) < 2.500 EDW

Ökologische Bedeutung: (■ •) sehr groß, (■ •) groß, (■ •) mittel.

Tabelle 3.3.22: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe so. K. unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag

Die SQ-Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe der Sonstigen Kunststoffe weist unter den gegebenen Rahmenbedingungen nur geringe ökologische Vorteile gegenüber einer Beseitigung im derzeitigen Beseitigungsmix bzw. in der MVA auf.

Eine Verwertung mit optimiertem Status Quo bzw. im SORTEC-Verfahren wäre der Beseitigung unter ökologischen Gesichtspunkten vorzuziehen .

Sensitivitätsanalysen

1. MVA mit höherem energetischen Wirkungsgrad

In Abbildung 3.3.22 ist ersichtlich, wie sich die Beseitigung der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb in der MVA im Vergleich zur Verwertung im Status Quo darstellt, wenn die Verbrennung nicht mit dem standardmäßig verwendeten energetischen Wirkungsgrad der MVA von 40% erfolgt, sondern der Abfall in eine energetisch optimierte MVA mit einem energetischen Wirkungsgrad von 70% verbracht würde.

Die größten Vorteile des SQ hinsichtlich der EDW gegenüber Bes100 lagen im Standardansatz bei den Kategorien Treibhauseffekt und Ressourcenbeanspruchung. Hier werden die Vorteile des SQ bei erhöhtem energetischen Wirkungsgrad der MVA geringer. Bei Versauerung und Humantoxizität nehmen die Vorteile der Bes100 zu. Im Vergleich aller Kategorien weist der SQ gegenüber der Bes100 bei der WK-70-Option keine ökologischen Vorteile mehr auf.

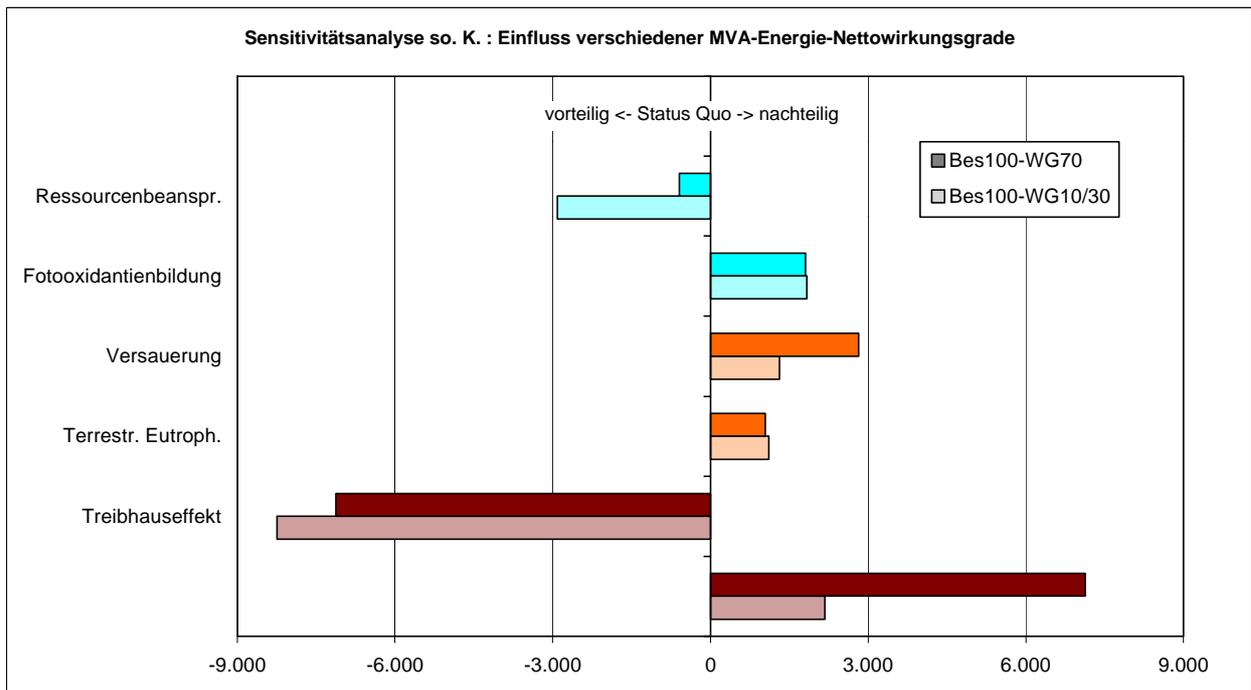


Abbildung 3.3.22: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erhöhten energetischen Wirkungsgrades der MVA auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe so. K.

3.3.3.8 Aluminium-Verbunde (Alu-Vb)

Für die Verpackungsmaterialgruppe Verbunde auf Aluminiumbasis ist der wesentliche oder gar ausschließliche Verwertungsweg die Pyrolyse.

Produkt		Verwertung			Beseitigung	
		Status Quo	Status Quo optimiert	SORTEC	30% MVA 70% Dep.	100% MVA
Energie, elektr.	[GJ]	0,38	0,15	0,15	0,23	0,78
Energie, therm.	[GJ]	1,05	0,42	0,41	0,64	2,13
Energ. Verwertungspotential	[GJ]	0,98				
Aluminium	[kg]	387,6	592,6	650,8		
Methanol	[kg]	30,4				
Sortierreste	[kg]	375,4	150,0	145,0		

Tabelle 3.3.23: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Verbunde auf Aluminiumbasis (Alu-Vb)

Nach den Massenflussdiagrammen bestehen die in der Sortierung gewonnenen Fraktionen zur Pyrolyse zu mehr als 80% aus Aluminium. Der Unterschied zwischen den Verwertungsoptionen besteht im Wesentlichen in den unterschiedlichen Anteilen an Sortiergut, die vom SQ (ca. 38%) über den SQopt (ca. 60%) zu SORTEC (ca. 65%) hin zunehmen. Entsprechend nehmen die Sortierreste in der gleichen Reihenfolge ab. Detaillierte Angaben befinden sich in Tabelle 3.3.23.

Im Vergleich der Umweltwirkungen (Abbildung 3.3.23 und Abbildung 3.3.24) schneiden die Verwertungsoptionen bei den Kategorien Terrestrische Eutrophierung, Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Versauerung und Treibhauseffekt günstiger ab als die Beseitigungsoptionen. Das liegt hauptsächlich an den hohen Gutschriften für Primäraluminium durch das in der Pyrolyse gewonnene Sekundäraluminium.

Die Beseitigung in der MVA verursacht durch den geringen Anteil an Kohlenstoffhaltigen Komponenten im Verhältnis relativ wenig CO₂-Emissionen, erhält aber andererseits praktisch keine Gutschriften, da mit dem geringen C-Gehalt auch kaum Heizwert in die Verbrennung eingebracht wird.

Hinsichtlich der Humantoxizität ist die Beseitigung am vorteilhaftesten, sowohl bei Bes30/70 als auch bei Bes100. Dies liegt nicht nur an dem hohem Emissionsstandard der MVA, sondern insbesondere an dem hohen Beitrag zu dieser Wirkung aus dem Pyrolyseprozess in den Verwertungsoptionen.

Spezieller Teil

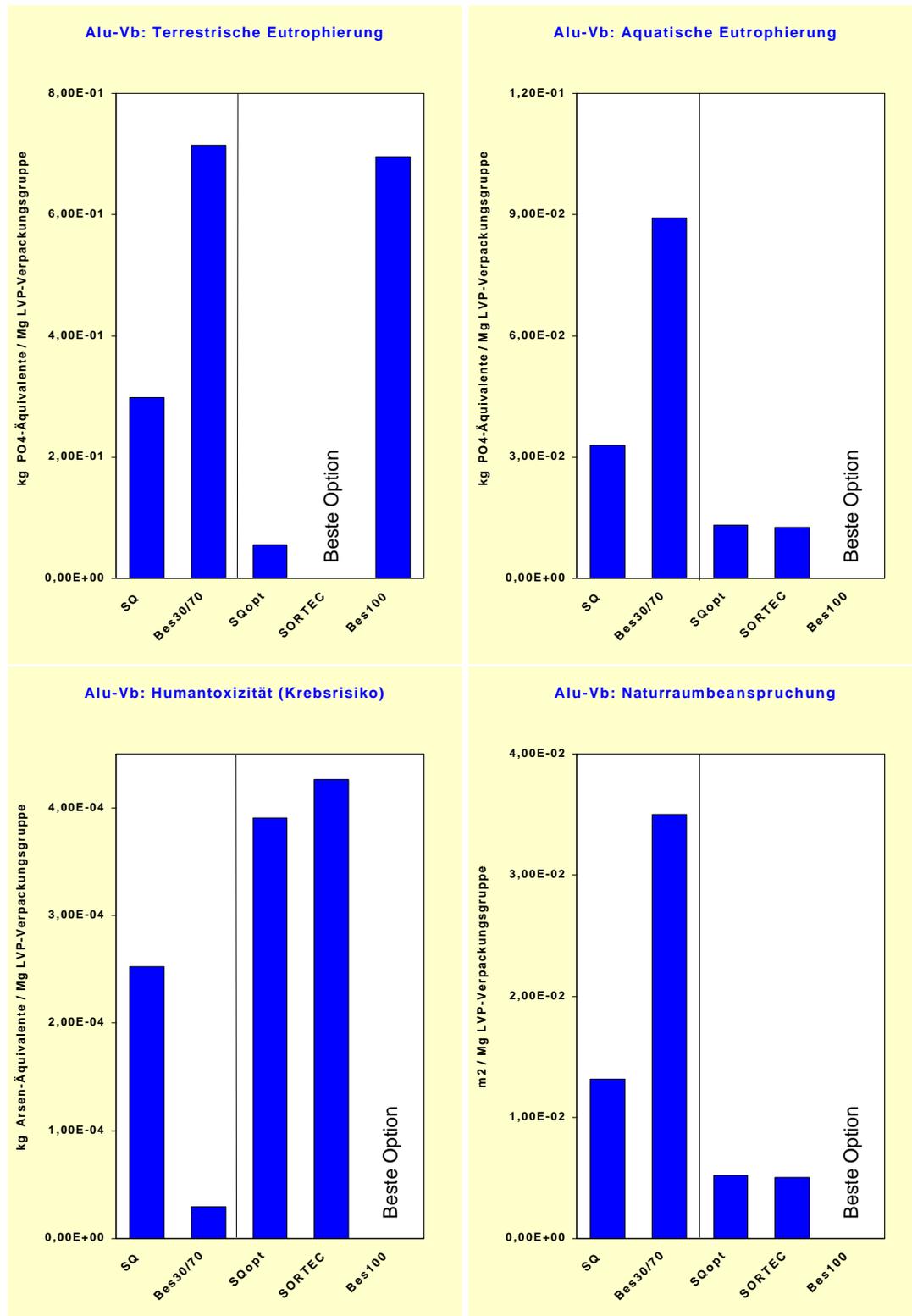


Abbildung 3.3.23: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

Spezieller Teil

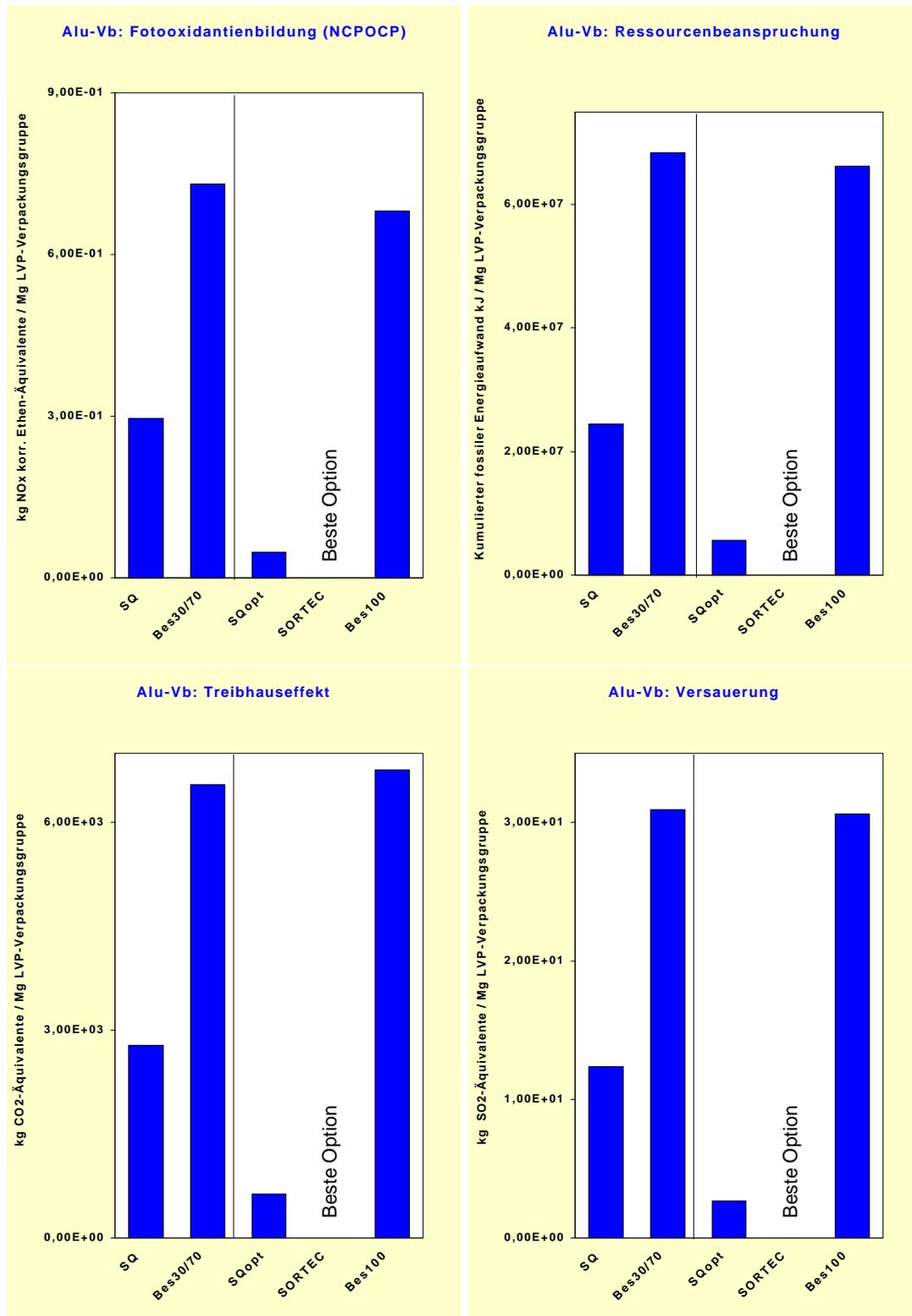


Abbildung 3.3.24: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

SQ versus Bes30/70 und Bes100

Der direkte Vergleich der EDW des Status Quo von Verwertung und Beseitigung (s. Tabelle 3.3.24) zeigt, dass SQ gegenüber Bes30/70 bei den Kriterien Treibhauseffekt, Terrestrische Eutrophierung, Versauerung und Ressourcenbeanspruchung besser abschneidet, während beide Optionen bei den anderen Kategorien gleichwertig sind.

Für den Vergleich von SQ mit Bes100 gilt, dass Bes100 zwar die günstigste Option hinsichtlich der Humantoxizität ist, der höhere Nachteil beim Treibhauseffekt diesen Vorteil allerdings ausgleicht. Ansonsten gelten die gleichen Vorteile von SQ wie sie schon bei Bes30/70 genannt wurden.

Szenario	Humantoxizität (Krebsrisiko)	Treibhauseffekt	Terrestrische Eutrophierung	Naturraumbeanspruchung	Versauerung	Aquatische Eutrophierung	Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	Ressourcenbeanspruchung
SQ	•	■	••	•	■	•	•	■
Bes30/70	•	■■	■	•	■■■	•	•	■■■
SQopt	••	•	•	•	•	•	•	•
SORTEC	••	Beste Option	Beste Option	•	Beste Option	•	Beste Option	Beste Option
Bes100	Beste Option	■■	■	Beste Option	■■■	Beste Option	•	■■■

Spezifischer Beitrag: Abstand zum jeweils besten Szenario: (■) entspricht 5.000 EDW (gerundet).

“Beste Option“ = 0 gesetzt; 0 EDW < (•) < 1250 EDW; 1250 EDW (••) < 2.500 EDW

Ökologische Bedeutung: (■ •) sehr groß, (■ •) groß, (■ •) mittel.

Tabelle 3.3.24: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu-Vb unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag

Die Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe Alu-Vb weist unter den gegebenen Rahmenbedingungen ökologische Vorteile gegenüber einer Beseitigung auf. Zukunftstechniken wie mit SQopt und SORTEC bilanziert, würden wie in Tabelle 3.3.24 ersichtlich, diesen Vorteil noch ausweiten.

3.3.3.9 Aluminium haltige Verbunde (Aluh.-Vb)

Die Verwertungswege der Verpackungsmaterialgruppe Aluminium haltige Verbunde sind auf verschiedene Materialstränge verzweigt. Hinsichtlich der Gutschrift sind die wesentlichen Verwertungsprodukte Sekundäraluminium und Altpapierstoff. Im Status Quo werden etwa 5,9% Aluminium und 8% Altpapierstoff, im optimierten Status Quo 12% Aluminium und 3,4% Altpapierstoff und in SORTEC 12% Aluminium und 26% Altpapierstoff erhalten. Nach den Massenflussdiagrammen bestehen die in der Sortierung gewonnenen Aluminium-Fraktionen bei SQ und SQopt zu 20%, bei SORTEC zu 31,5% aus Aluminium.

Der Unterschied zwischen den Verwertungsoptionen besteht auch in den unterschiedlichen Anteilen an Sortierresten, die vom SQ (ca. 44%) zum SQopt (ca. 19%) abnehmen, bei SORTEC mit ca. 27% allerdings wieder zunehmen. Detaillierte Angaben befinden sich in Tabelle 3.3.25.

Produkt	Verwertung	Beseitigung				
		Status Quo	Status Quo optimiert	30% MVA 70% Dep.	100% MVA	
Energie, elektr. [GJ]		0,41	0,15	0,27	0,83	2,53
Energie, therm. [GJ]		1,01	0,31	0,74	2,13	6,98
Energ. Verw.pot. [GJ]		1,21	0,51			
Altpapierstoff [kg]		80,0	34,4	260,4		
Aluminium [kg]		58,7	121,5	117,0		
Konstruktionszaun [kg]		1,1	0,3			
Methanol [kg]		37,2	15,9			
Palisaden [kg]		1,1	0,3			
Regranulat-MKS [kg]		1,3	0,6			
Weißblech [kg]		2,3	1,0	0,8		
Zementklinker [kg]		68,0	29,2	221,3		
Sortierreste [kg]		437,6	187,0	265,0		

Tabelle 3.3.25: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Aluminium haltige Verbunde

Im Vergleich der Umweltwirkungen (Abbildung 3.3.25 und Abbildung 3.3.26) schneiden die Verwertungsoptionen bei den Kategorien Terrestrische Eutrophierung, Ressourcenbeanspruchung, Versauerung und Treibhauseffekt günstiger ab als die Beseitigungsoptionen. Bei der Fotooxidantienbildung ist die MVA günstiger als SQ und SQopt. Die Ergebnisse sind in erster Linie durch die Aluminium- und zu einem Teil auch die Faserstoffgutschriften bestimmt. Bei der Terrestrischen Eutrophierung und

dem Treibhauseffekt kommen allerdings besonders im SQ die Belastungen aus der Verwertung in die Größenordnung der Entlastungen durch die Gutschrift.

Bei der Fotooxidantienbildung sind in SQ und SQopt die Belastungen aus der Verwertung selbst höher als die Gutschriften, während sie für die MVA bei vergleichbaren Gutschriften geringer sind.

Spezieller Teil

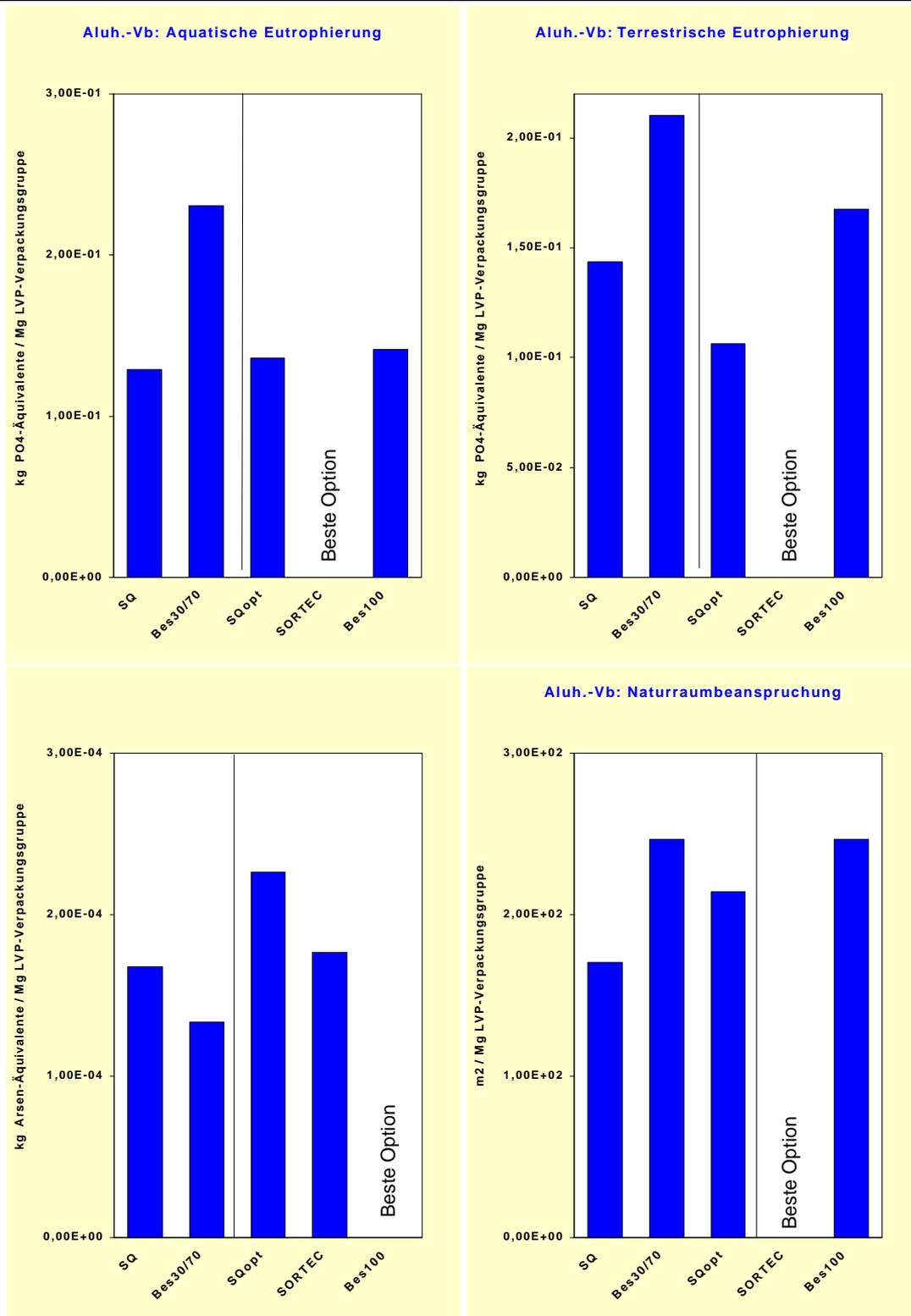


Abbildung 3.3.25: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Aluh.-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

Spezieller Teil

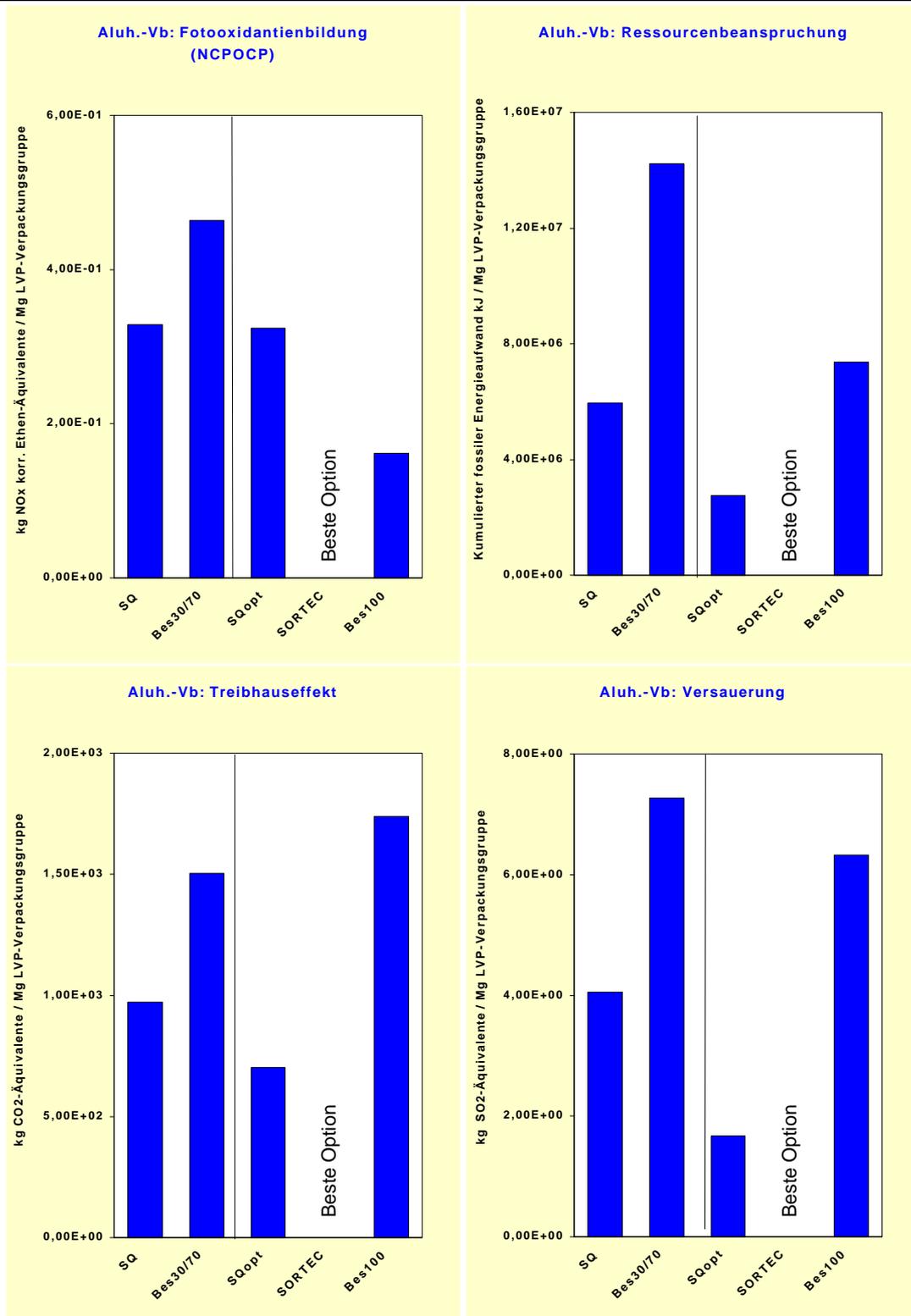


Abbildung 3.3.26: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Aluh.-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

Hinsichtlich der Humantoxizität ist die Beseitigung in der MVA am vorteilhaftesten. Dies liegt nicht nur an dem hohem Emissionsstandard der MVA, sondern insbesondere an dem hohen Beitrag zu dieser Wirkung aus dem Pyrolyseprozess selbst.

SQ versus Bes30/70 und Bes100

Der direkte Vergleich der EDW des Status Quo von Verwertung und Beseitigung (s. Tabelle 3.3.26) zeigt, dass SQ gegenüber Bes30/70 bei den Katerien Treibhauseffekt, Versauerung und Fotooxidantienbildung besser abschneidet, während beide Optionen bei den anderen Kategorien gleichwertig sind.

Für den Vergleich von SQ mit Bes100 gilt, dass Bes100 zwar die günstigste Option hinsichtlich der Humantoxizität ist, aber Nachteile beim Treibhauseffekt aufweist. Ansonsten gibt es weitere Vorteile für den SQ bei der Versauerung, während Bes100 bei den restlichen Kategorien gleichwertig ist.

Szenario	Humantoxizität (Krebsrisiko)	Treibhauseffekt	Terrestrische Eutrophierung	Naturraumbanspruch	Versauerung	Aquatische Eutrophierung	Fotooxidantienbildung (NCPOCF)	Ressourcenbeanspruchung
SQ	••	■	••	■	■	••	••	■
Bes30/70	••	■ ■	••	■	■ ■	••	■	■
SQopt	■	■	••	■	••	••	••	••
SORTEC	••	Beste Option	Beste Option	Beste Option	Beste Option	Beste Option	Beste Option	Beste Option
Bes100	Beste Option	■ ■	••	■	■ ■	••	•	■

Spezifischer Beitrag: Abstand zum jeweils besten Szenario: (■) entspricht 1.000 EDW (gerundet).

“Beste Option“ = 0 EDW gesetzt; 0 EDW < (•) < 250 EDW; 250 EDW (••) < 500 EDW

Ökologische Bedeutung: (■ •) sehr groß, (■ •) groß, (■ •) mittel.

Tabelle 3.3.26: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Aluh.-Vb unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag

Die Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe Alu-Vb weist unter den gegebenen Rahmenbedingungen ökologische Vorteile gegenüber einer Beseitigung auf, wenn diese auch im Vergleich zu Bes100 recht gering sind. Zukunftstechniken wie mit SQopt und SORTEC bilanziert, würden wie in Tabelle 3.3.26 ersichtlich, den bislang geringen Vorteil deutlicher ausprägen.

Sensitivitätsanalysen

1. MVA mit höherem energetischen Wirkungsgrad

In Abbildung 3.3.27 ist ersichtlich, wie sich die Beseitigung der Verpackungsmaterialgruppe Aluh.-Vb. in der MVA im Vergleich zur Verwertung im Status Quo darstellt, wenn die Verbrennung nicht mit dem standardmäßig verwendeten energetischen Wirkungsgrad der MVA von 40% erfolgt, sondern der Abfall in eine energetisch optimierte MVA mit einem energetischen Wirkungsgrad von 70% verbracht würde.

Die wesentlichen Vorteile des SQ hinsichtlich der EDW gegenüber der Bes100 lagen im Standardansatz bei den Kategorien Treibhauseffekt und Versauerung. Hier werden die Vorteile des SQ bei erhöhtem energetischen Wirkungsgrad der MVA etwas geringer. Bei der Humantoxizität nehmen die Vorteile der Bes100 deutlich zu. Im Vergleich aller Kategorien weist der SQ gegenüber der Bes100 bei der WK-70-Option weiterhin ökologische Vorteile auf.

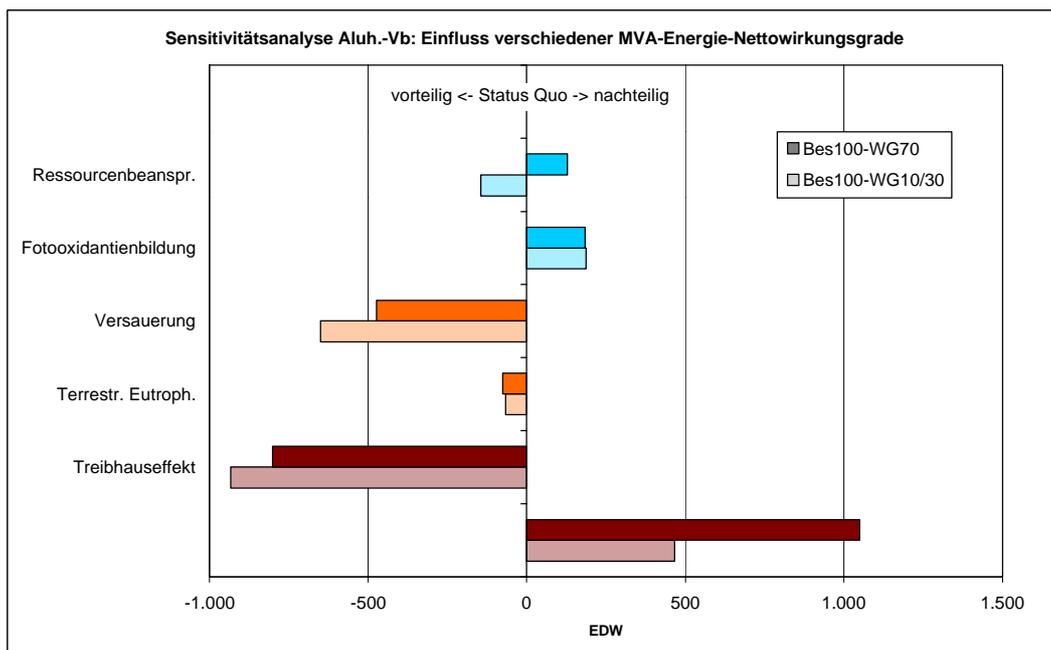


Abbildung 3.3.27: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erhöhten energetischen Wirkungsgrades der MVA auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe Aluh.-Vb

3.3.3.10 Aluminium (Alu)

Für die Verpackungsmaterialgruppe Aluminium ist der ausschließliche Verwertungsweg die Pyrolyse. Nach den Massenflussdiagrammen bestehen die in der Sortierung gewonnenen Fraktionen zur Pyrolyse zu mehr als 80% aus Aluminium. Der Unterschied zwischen den Verwertungsoptionen besteht im Wesentlichen in den unterschiedlichen Anteilen an Sortierresten, die beim SQ ca. 19%, beim SQopt ca. 5,8% und bei SORTEC ca. 15% betragen. Detaillierte Angaben befinden sich in Tabelle 3.3.27.

Produkt	Verwertung	Beseitigung			
		Status Quo	Status Quo optimiert	30% MVA 70% Dep.	100% MVA
Energie, elektr. [GJ]	0,20	0,06	0,15	0,23	0,78
Energie, therm. [GJ]	0,53	0,16	0,41	0,64	2,13
Aluminium [kg]	638,5	742,6	650,8		
Sortierreste [kg]	190,0	58,0	145,0		

Tabelle 3.3.27: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Aluminium

Im Vergleich der Umweltwirkungen (Abbildung 3.3.28 und Abbildung 3.3.29) schneiden die Verwertungsoptionen bei den Kategorien Terrestrische Eutrophierung, Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Versauerung und Treibhauseffekt günstiger ab als die Beseitigungsoptionen. Das liegt an den hohen Gutschriften für Primäraluminium durch das in der Pyrolyse gewonnene Sekundäraluminium.

Hinsichtlich der Humantoxizität ist die Beseitigung am vorteilhaftesten, sowohl bei Bes30/70 als auch bei Bes100. Dies liegt nicht nur an dem hohem Emissionsstandard der MVA, sondern insbesondere an dem hohen Beitrag zu dieser Wirkung aus dem Pyrolyseprozess selbst.

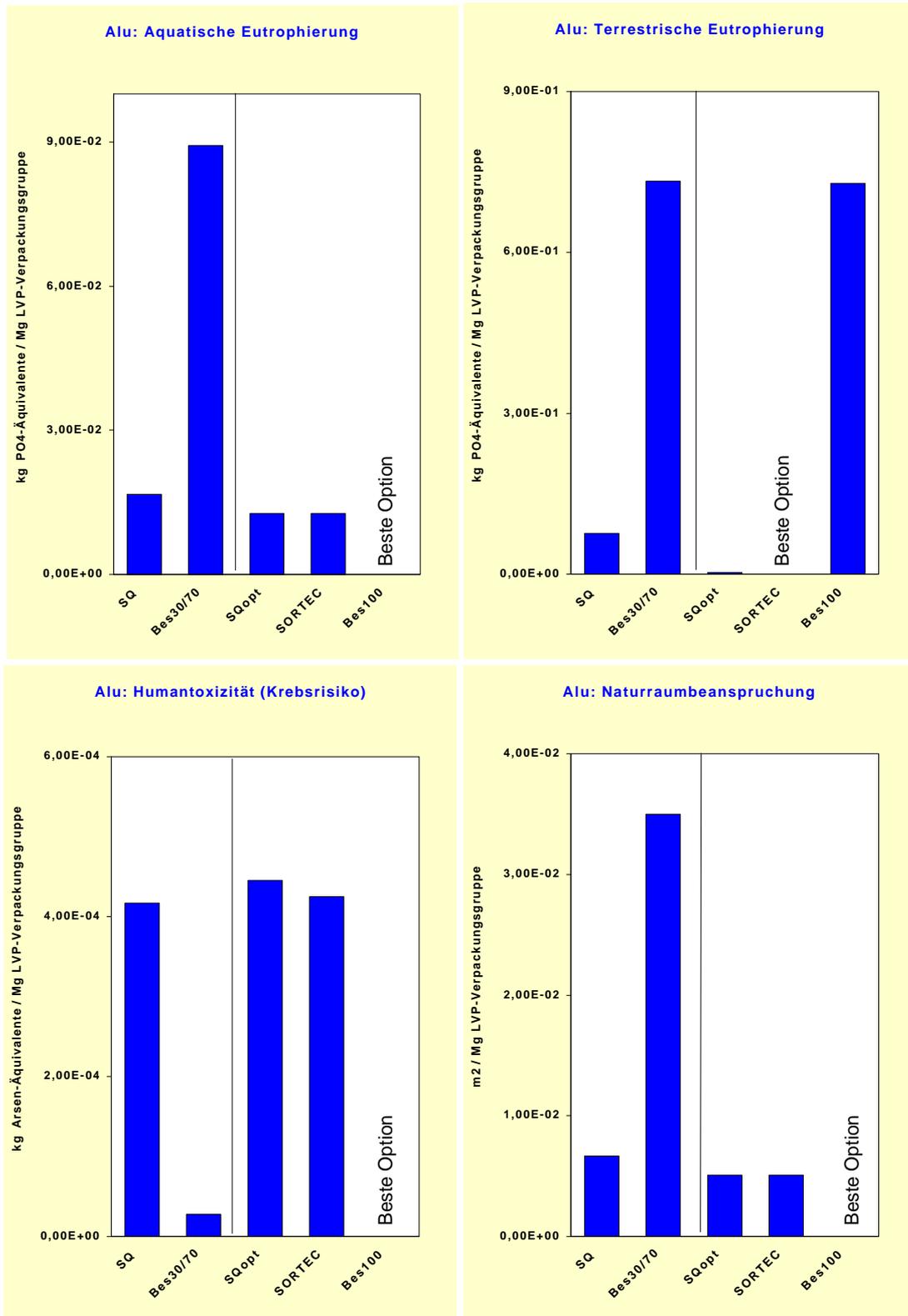


Abbildung 3.3.28: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

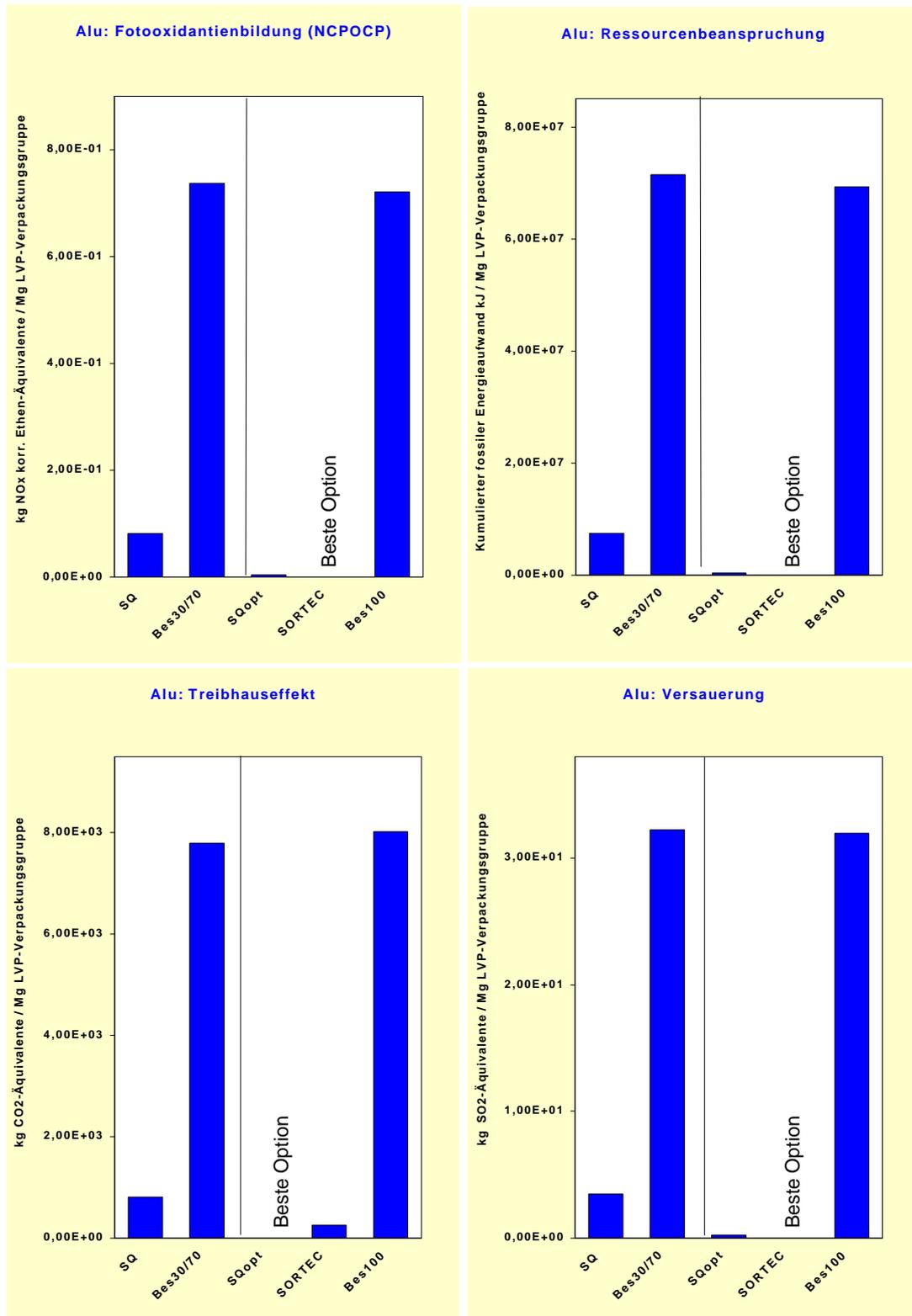


Abbildung 3.3.29: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

SQ versus Bes30/70 und Bes100

Der direkte Vergleich der EDW des Status Quo von Verwertung und Beseitigung (s. Tabelle 3.3.28) zeigt, dass SQ gegenüber Bes30/70 bei den Kriterien Treibhauseffekt, Terrestrische Eutrophierung, Versauerung und Ressourcenbeanspruchung besser abschneidet, während beide Optionen bei den anderen Kategorien weitgehend gleichwertig sind.

Für den Vergleich von SQ mit Bes100 gilt, dass Bes100 zwar die günstigste Option hinsichtlich der Humantoxizität ist, andererseits ein ausgeprägter Nachteil beim Treibhauseffekt vorliegt. Ansonsten gelten die gleichen Vorteile von SQ wie sie schon bei Bes30/70 genannt wurden.

Szenario	Humantoxizität (Krebsrisiko)	Treibhauseffekt	Terrestrische Eutrophierung	Naturraumbenutzung	Versauerung	Aquatische Eutrophierung	Fotooxidantienbildung (NCP/OP)	Ressourcenbeanspruchung
SQ	■	■■	•	•	■	•	•	••
Bes30/70	•	■■■■	■	•	■■■■	•	••	■■■
SQopt	■	Beste Option	•	•	•	•	•	•
SORTEC	■	•	Beste Option	•	Beste Option	•	Beste Option	Beste Option
Bes100	Beste Option	■■■■	■	Beste Option	■■■■	Beste Option	••	■■■

Spezifischer Beitrag: Abstand zum jeweils besten Szenario: (■) entspricht 5.000 EDW (gerundet).

“Beste Option“ = 0 EDW gesetzt; 0 EDW < (•) < 1250 EDW; 1250 EDW ? (••) < 2.500 EDW

Ökologische Bedeutung: (■ •) sehr groß, (■ •) groß, (■ •) mittel.

Tabelle 3.3.28: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag

Die Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe Aluminium weist unter den gegebenen Rahmenbedingungen deutliche ökologische Vorteile gegenüber einer Beseitigung auf. Zukunftstechniken wie mit SQopt und SORTEC bilanziert, würden wie in Tabelle 3.3.28 ersichtlich, diesen Vorteil kaum noch steigern.

Sensitivitätsanalysen

1. Energiegutschrift aus der Oxidation von Aluminium in der MVA

Aufgrund des Fehlens geschlossener Stoffstrombilanzen gibt es keine Anhaltspunkte für die Effizienz des Recyclings von NE-Metallen aus der MVA-Schlacke bezogen auf den Abfallinput. Andererseits ist zu vermuten, dass ein Anteil der NE-Metalle – in Abhängigkeit der Foliendicke – während des Verbrennungsprozesses oxidiert wird. Der

Einfluss einer möglichen vollständigen thermischen Verwertung der betrachteten Aluminiumabfälle aus Verpackungen wurde in Form einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Dabei zeigt sich, dass der Nachteil der MVA-Variante gegenüber der Verwertung im Status Quo durch den erhöhten energetischen Ertrag abnimmt (s. Abbildung 3.3.30). Insgesamt kommt es dadurch aber nicht zu einer anderen Bewertung im Vergleich der technischen Varianten.

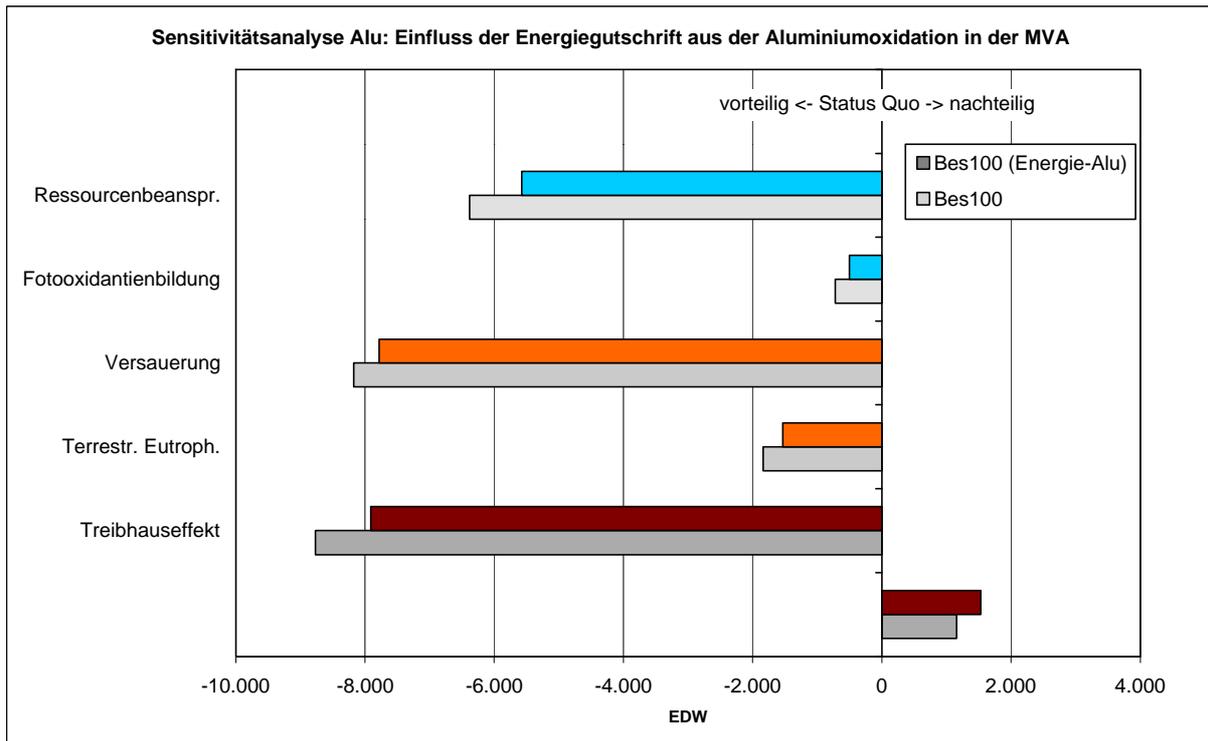


Abbildung 3.3.30: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erniedrigten Substitutionsfaktors auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe Aluminium

3.3.3.11 Weißblech (Wb)

Für die Verpackungsmaterialgruppe Weißblech ist der ausschließliche Verwertungsweg die Stahlschmelze. Zwischen den Verwertungsoptionen besteht dabei im Grunde kein Unterschied hinsichtlich des in allen 3 Optionen erhaltenen hohen Anteils an Sekundärstahl. Die Sortierreste sind mit 1-2% durchgängig gering. Detaillierte Angaben befinden sich in Tabelle 3.3.29.

Produkt		Verwertung			Beseitigung	
		Status Quo	Status Quo optimiert	SORTEC	30% MVA 70% Dep.	100% MVA
Energie, elektr.	[GJ]	0,02	0,01	0,01	0,08	0,27
Energie, therm.	[GJ]	0,06	0,03	0,03	0,22	0,73
Weißblech	[kg]	763,0	772,6	772,6		
Sortierreste	[kg]	22,0	10,0	10,0		

Tabelle 3.3.29: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Weißblech

Im Vergleich der Umweltwirkungen (Abbildung 3.3.31 und Abbildung 3.3.32) schneiden die Verwertungsoptionen bei den Kategorien Terrestrische Eutrophierung, Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Versauerung, Treibhauseffekt sowie Humantoxizität günstiger ab als die Beseitigungsoptionen. Das liegt einerseits an den Gutschriften für Primärstahl durch den in der Stahlschmelze gewonnenen Sekundärstahl. Andererseits bestehen die aus dieser Verpackungsmaterialgruppe in der Sortierung gewonnenen Fraktionen beinahe ausschließlich aus Weißblech, so dass in der Beseitigung keine Zusatznutzen durch Energieauskopplung erzielt werden.

Spezieller Teil

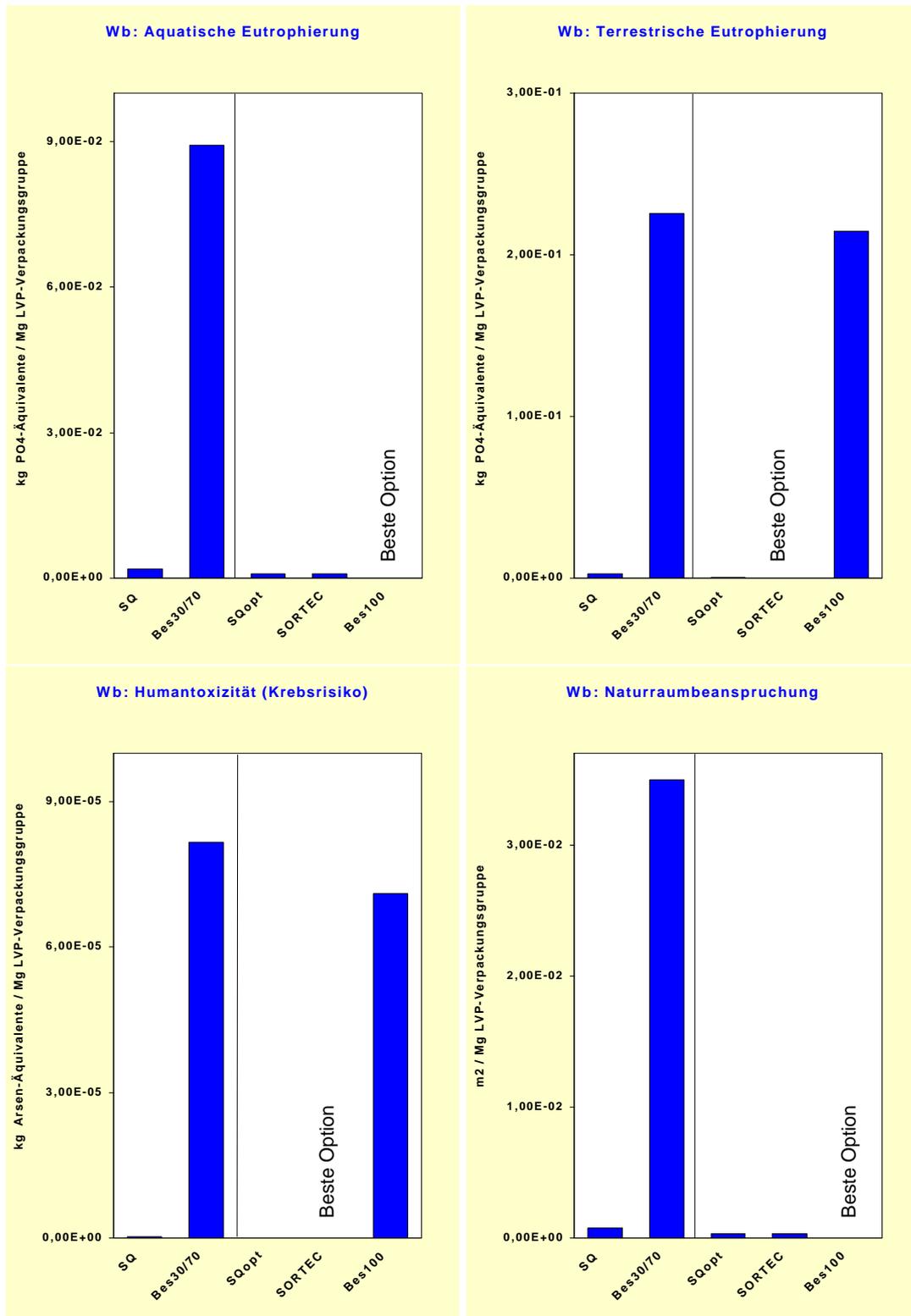


Abbildung 3.3.31: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

Spezieller Teil

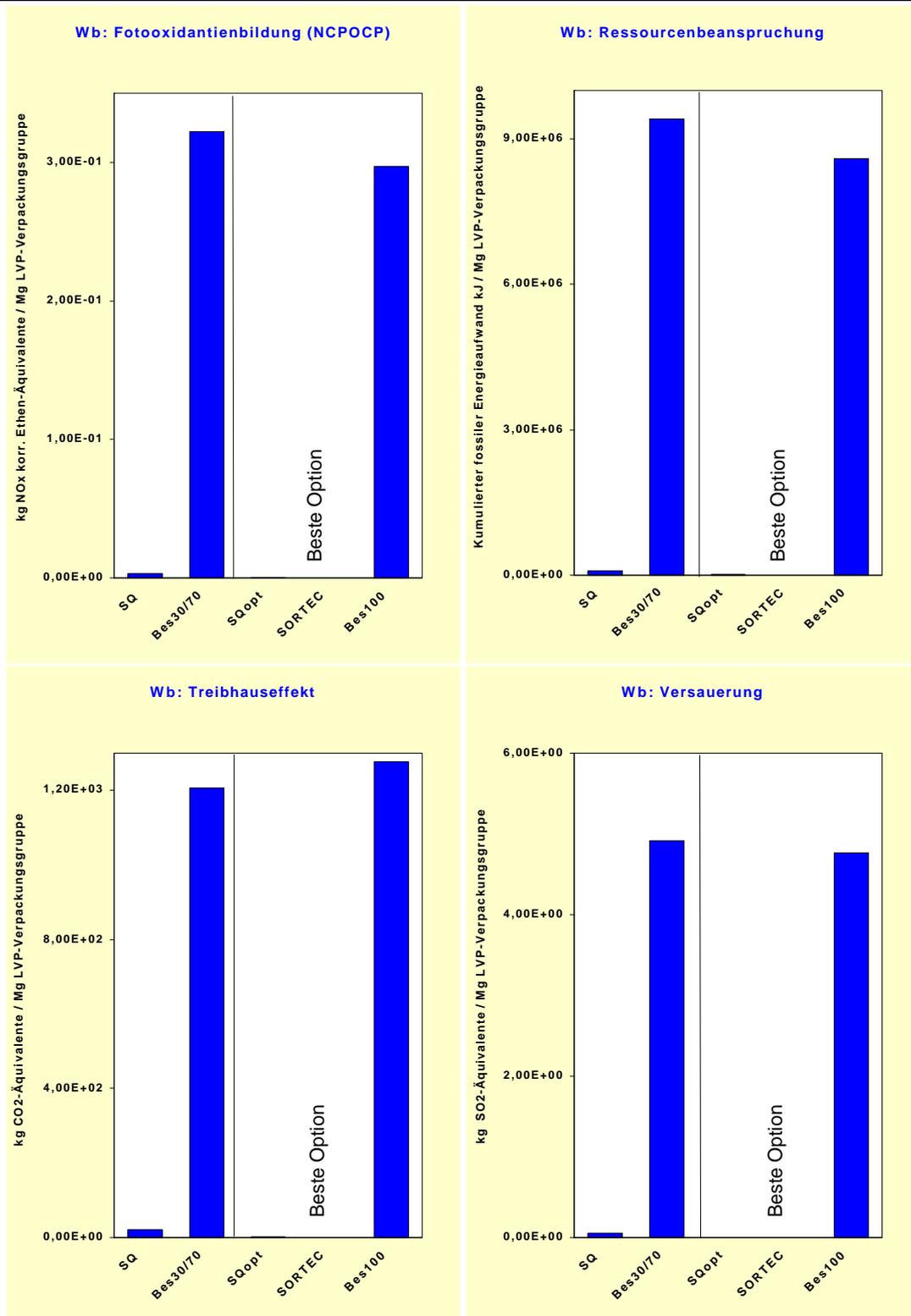


Abbildung 3.3.32: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

SQ versus Bes30/70 und Bes100

Der direkte Vergleich der EDW des Status Quo von Verwertung und Beseitigung (s. Tabelle 3.3.30) zeigt, dass SQ sowohl gegenüber Bes30/70 als auch gegenüber Bes100 bei den Katerien Treibhauseffekt, Terrestrische Eutrophierung, Versauerung, Ressourcenbeanspruchung und Humantoxizität besser abschneidet.

Szenario	Humantoxizität (Krebsrisiko)	Treibhauseffekt	Terrestrische Eutrophierung	Naturraumbenanspruchung	Versauerung	Aquatische Eutrophierung	Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	Ressourcenbeanspruchung
SQ	•	•	•	•	•	•	•	•
Bes30/70	■	■■■■■	■■■	•	■■■■■	■	■■	■■■■
SQopt	•	•	•	•	•	•	•	•
SORTEC	Beste Option	Beste Option	Beste Option	•	Beste Option	••	Beste Option	Beste Option
Bes100	■	■■■■■	■■■	Beste Option	■■■■■	Beste Option	■	■■■■

Spezifischer Beitrag: Abstand zum jeweils besten Szenario: (■) entspricht 5.000 EDW (gerundet).

“Beste Option“ < 1 EDW; 1 EDW < (•) < 1250 EDW; 1250 EDW (••) < 2.500 EDW

Ökologische Bedeutung: (■ •) sehr groß, (■ •) groß, (■ •) mittel.

Tabelle 3.3.30: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag

Die Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe Weißblech weist unter den gegebenen Rahmenbedingungen deutliche ökologische Vorteile gegenüber einer Beseitigung auf. Zukunftstechniken wie mit SQopt und SORTEC bilanziert, würden wie in Tabelle 3.3.30 ersichtlich, diesen Vorteil kaum noch steigern.

Sensitivitätsanalysen

1. Berücksichtigung eines möglichen Stahlrecyclings aus der MVA-Schlacke

Aufgrund des Fehlens geschlossener Stoffstrombilanzen gibt es keine Anhaltspunkte für die Effizienz des Stahlschrottrecyclings aus der MVA-Schlacke bezogen auf den Abfallinput. Zur Abschätzung des Einflusses eines solchen Recyclings auf die Ergebnisse wurden zwei Recyclingquoten (25% und 50%) bilanziert.

Analog zu dem Vorgehen bei den über das DSD erfassten Stahlschrotten wurde dabei ein Recycling im Elektrolichtbogenofen angenommen und für den Sekundärstahl die Erzeugung von primärem Sauerstoffblasstahl gutgeschrieben¹⁰.

Erwartungsgemäß nimmt der Nachteil der MVA-Variante gegenüber der LVP-Verwertung im SQ mit zunehmendem Schlackerecycling ab (s. Abbildung 3.3.33), ohne jedoch zu einer grundsätzlich anderen Bewertung der technischen Varianten zu führen.

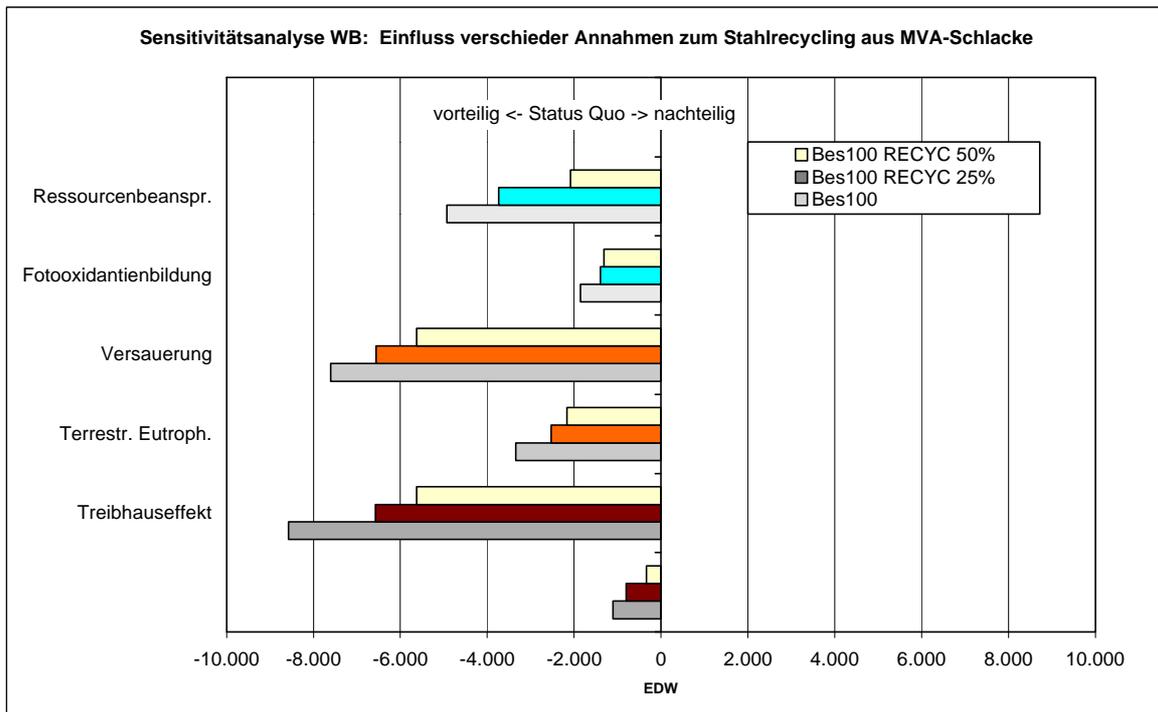


Abbildung 3.3.33: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss des Stahlrecycling aus der MVA-Schlacke für den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe WB

Die Aufschlüsselung der in der Abbildung 3.3.33 zugrunde liegenden Nettowerte in die Belastungen aus der Verwertung bzw. Beseitigung und die gegebenen Gutschriften findet sich im Anhang (Weißblech, Abb. III-21)

¹⁰ Dieses Vorgehen wurde von der Stahlindustrievorgeschlagen (ursprünglich als methodische Konvention für die Bilanzierungen der UBA-Getränkeökobilanz 2) und hier angewendet. Hintergrund dieser Konvention ist die mengenmäßig begrenzte Möglichkeit zur Schrotzugabe bei der Blasstahlerzeugung.

3.3.3.12 Weißblechverbunde (Wb-Vb)

Für die Verpackungsmaterialgruppe Weißblechverbunde ist der ausschließliche Verwertungsweg die Stahlschmelze. Zwischen den Verwertungsoptionen besteht dabei im Grunde kein nennenswerter Unterschied hinsichtlich des in allen 3 Optionen erhaltenen hohen Anteils an Sekundärstahl. Die Sortierreste sind durchgängig gering und bei SQ mit 4,5% am größten. Detaillierte Angaben befinden sich in Tabelle 3.3.31.

Produkt		Verwertung			Beseitigung	
		Status Quo	Status Quo optimiert	SORTEC	30% MVA 70% Dep.	100% MVA
Energie, elektr.	[GJ]	0,05	0,01	0,01	0,07	0,24
Energie, therm.	[GJ]	0,13	0,03	0,03	0,19	0,65
Weißblech	[kg]	694,0	719,5	719,5		
Sortierreste	[kg]	45,0	10,0	10,0		

Tabelle 3.3.31: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Weißblechverbunde

Im Vergleich der Umweltwirkungen (Abbildung 3.3.34 und Abbildung 3.3.35) schneiden die Verwertungsoptionen bei den Kategorien Terrestrische Eutrophierung, Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Versauerung, Treibhauseffekt sowie Human-toxizität günstiger ab als die Beseitigungsoptionen. Das liegt einerseits an den Gutschriften für Primärstahl durch den in der Stahlschmelze gewonnenen Sekundärstahl. Andererseits bestehen dem Massenfluss zufolge die aus dieser Verpackungsmaterialgruppe in der Sortierung gewonnenen Fraktionen beinahe ausschließlich aus Weißblech, so dass in der Beseitigung keine Zusatznutzen durch Energieauskopplung erzielt werden.

Spezieller Teil

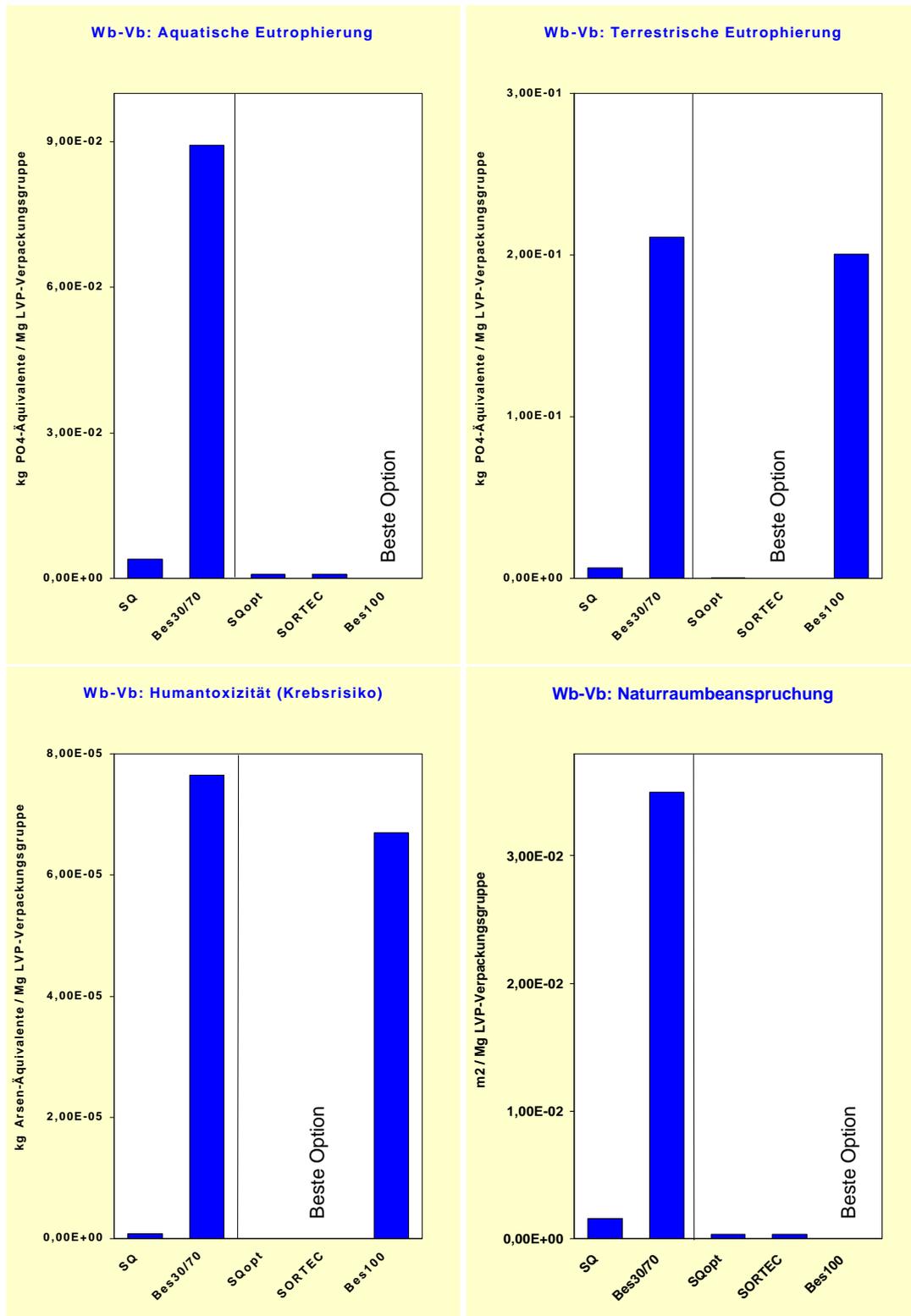


Abbildung 3.3.34: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

Spezieller Teil

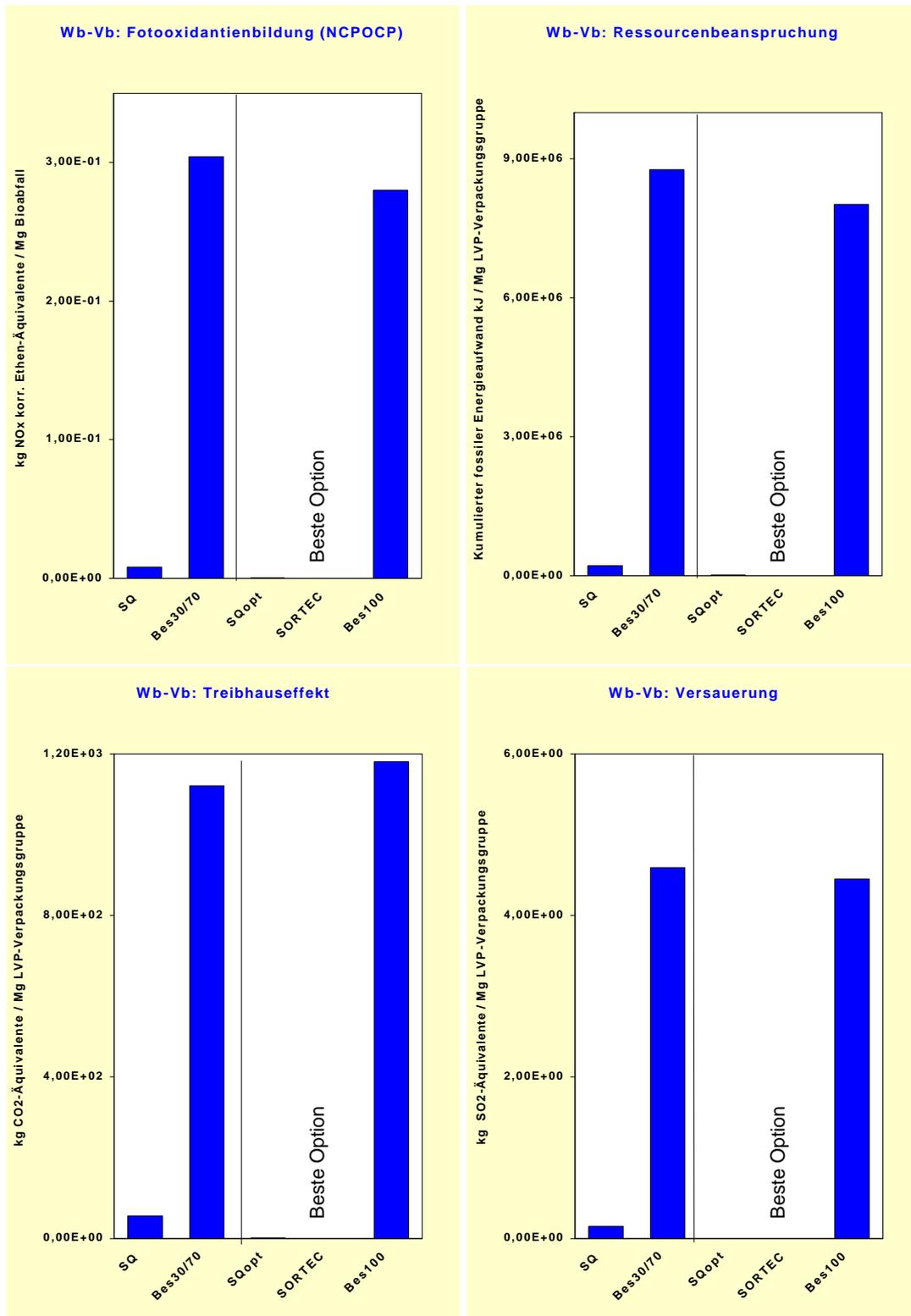


Abbildung 3.3.35: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

SQ versus Bes30/70 und Bes100

Der direkte Vergleich der EDW des Status Quo von Verwertung und Beseitigung (s. Tabelle 3.3.32) zeigt, dass SQ sowohl gegenüber Bes30/70 als auch gegenüber Bes100 bei den Kriterien Treibhauseffekt, Terrestrische Eutrophierung, Versauerung, Ressourcenbeanspruchung und Humantoxizität besser abschneidet.

Szenario	Humantoxizität (Krebsrisiko)	Treibhauseffekt	Terrestrische Eutrophierung	Naturraumbenanspruchung	Versauerung	Aquatische Eutrophierung	Photoxidantienbildung (NCPOCP)	Ressourcenbeanspruchung
SQ	•	•	•	•	•	•	•	•
Bes30/70	•	■ ■	■	•	■ ■	• •	• •	■
SQopt	•	•	•	•	•	•	•	•
SORTEC	Beste Option	Beste Option	Beste Option	•	Beste Option	•	Beste Option	Beste Option
Bes100	•	■ ■	■	Beste Option	■	Beste Option		■

Spezifischer Beitrag: Abstand zum jeweils besten Szenario: (■) entspricht 5.000 EDW (gerundet).

Beste Option“ = 0 EDW gesetzt; 0 EDW < (•) < 1250 EDW; 1250 EDW (••) < 2.500 EDW

Ökologische Bedeutung: (■ •) sehr groß, (■ •) groß, (■ •) mittel.

Tabelle 3.3.32: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb-Vb unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag

Die Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe Weißblechverbunde weist unter den gegebenen Rahmenbedingungen deutliche ökologische Vorteile gegenüber einer Beseitigung auf. Zukunftstechniken wie mit SQopt und SORTEC bilanziert, würden wie in Tabelle 3.3.32 ersichtlich, diesen Vorteil kaum noch steigern.

3.3.3.13 Papierkartonagenverbunde (PPK-Vb)

Für die Verpackungsmaterialgruppe Papierkartonagenverbunde ist der wesentliche Verwertungsweg die Aufbereitung zur Faserrückgewinnung. Die dabei ebenfalls gewonnenen Rejekte aus einem Kunststoff-Aluminiumverbund werden im Zementwerk als Energieträger und Bauxitersatz verwendet. Bei Status Quo und optimiertem Status Quo ist zu einem gewissen Maße auch die rohstoffliche Verwertung von Relevanz. Daneben besteht der Unterschied zwischen den Verwertungsoptionen im Wesentlichen in den unterschiedlichen Anteilen an dem Verwertungsprodukt Altpapierstoff, die vom SQ mit ca. 38% über SQopt mit ca. 65% zu SORTEC mit ca. 77% hin zunehmen. Entsprechend nehmen die Sortierreste in der gleichen Reihenfolge ab. Detaillierte Angaben befinden sich in Tabelle 3.3.33.

Produkt	Verwertung	Beseitigung				
		Status Quo	Status Quo optimiert	SORTEC	30% MVA 70% Dep.	100% MVA
Redoxpotential [GJ]		0,92	0,98	1,58		
Energie, elektr. [GJ]		0,43	0,19	0,08	0,84	2,09
Energie, therm. [GJ]		0,97	0,45	0,23	1,88	5,95
Altpapierstoff [kg]		373,9	651,0	771,9		
Aluminium [kg]		1,8	1,8			
K-Ersatz [kg]				22,5		
Konstruktionszaun [kg]		0,8	0,8			
Methanol [kg]		28,5	30,4			
Palisaden [kg]		0,8	0,8	17,6		
Regranulat-MKS [kg]		1,0	1,0			
Weißblech [kg]		0,4	0,4			
Zementklinker [kg]		317,7	553,2	655,9		
Sortierreste [kg]		515,6	212,4	80,7		

Tabelle 3.3.33: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Papierkartonagenverbunde

Im Vergleich der Umweltwirkungen (Abbildung 3.3.36 und Abbildung 3.3.37) schneiden die Verwertungsoptionen bei den Kategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Naturraumbeanspruchung, Ressourcenbeanspruchung und Versauerung günstiger ab als die Beseitigungsoptionen. Das liegt überwiegend an den Gutschriften für Primärfasern durch den in der Faseraufbereitung gewonnenen Altpapierstoff.

Beim Treibhauseffekt und der Fotooxidantienbildung ist die MVA günstiger als die Verwertung im Status Quo, da im Status Quo die Verwertungseffizienz geringer ist als bei den anderen Verwertungsoptionen und zudem die Belastung aus dem Verwertungsweg selbst bei diesen beiden Kategorien größer ist. Hinsichtlich der Humantoxizität ist die Verbrennung am vorteilhaftesten.

Spezieller Teil

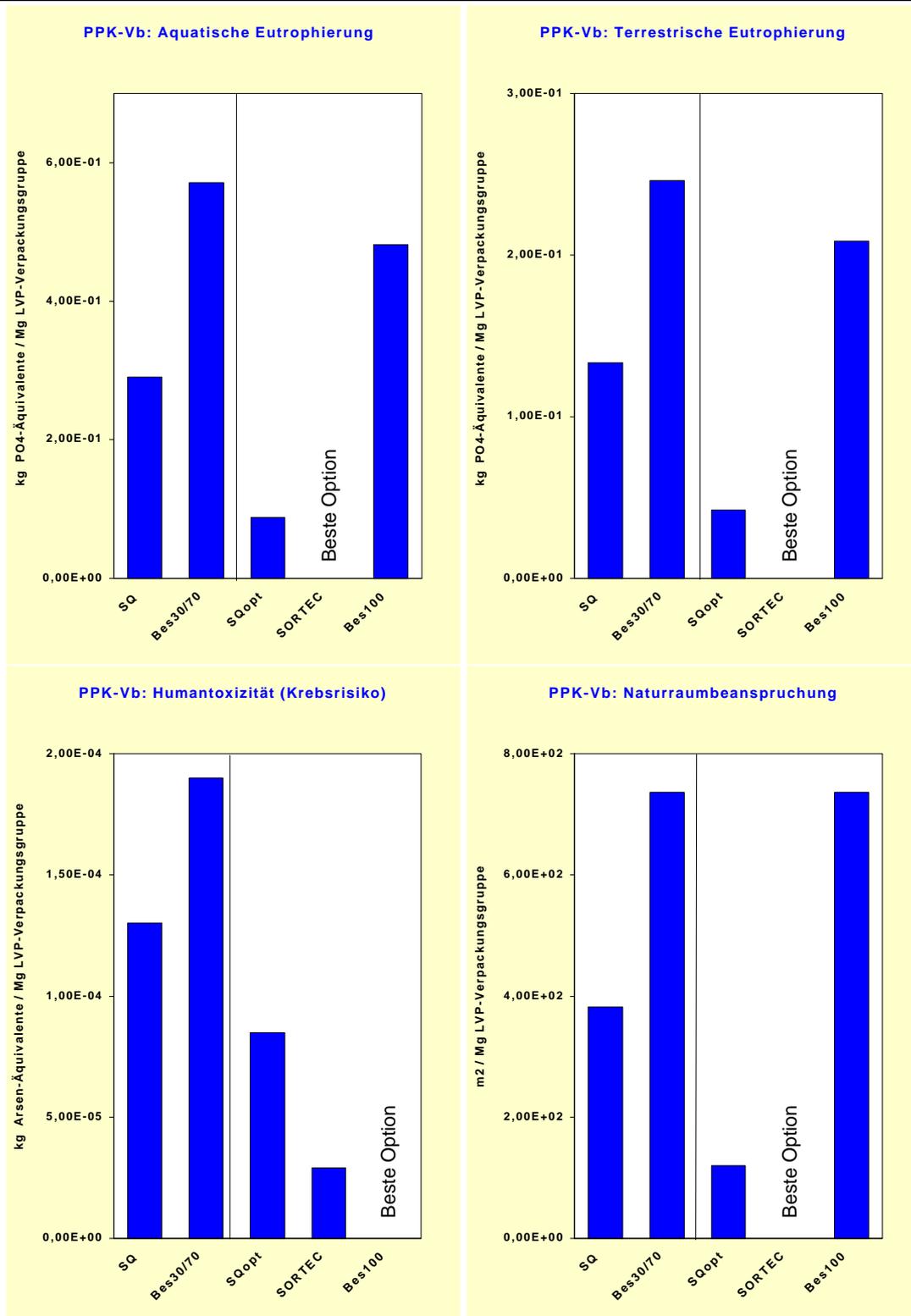


Abbildung 3.3.36: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

Spezieller Teil

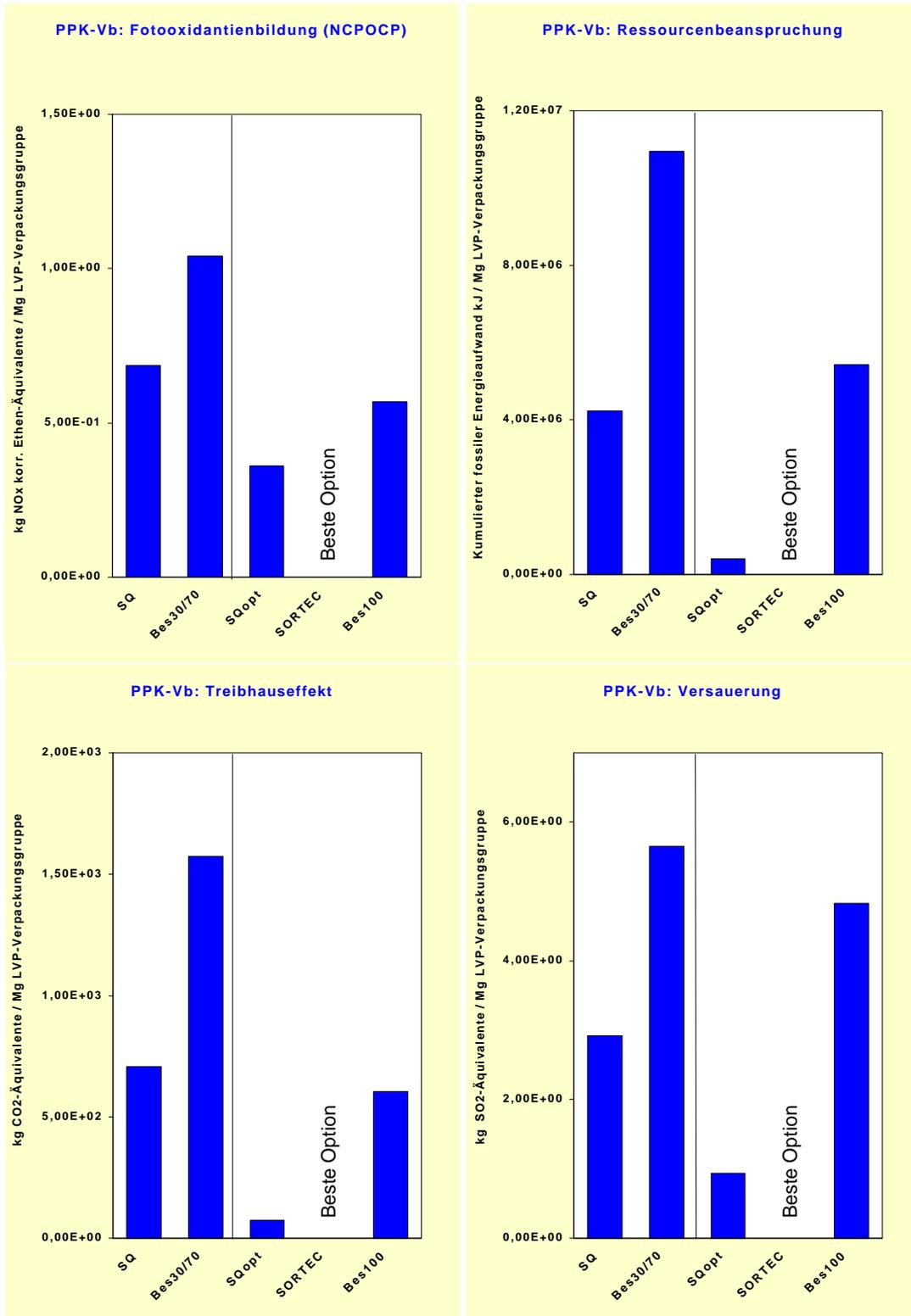


Abbildung 3.3.37: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

SQ versus Bes30/70 und Bes100

Der direkte Vergleich der EDW des Status Quo von Verwertung und Beseitigung (s. Tabelle 3.3.34) zeigt, dass SQ gegenüber Bes30/70 außer bei der Humantoxizität bei allen anderen Kategorien besser abschneidet.

Für den Vergleich von SQ mit Bes100 gilt, dass die Bes100 die vorteilhaftere Option hinsichtlich der Humantoxizität ist, aber Nachteile bei der Naturraumbeanspruchung und der Versauerung aufweist. Bei den restlichen Kategorien ist Bes100 gleichwertig.

Szenario	Humantoxizität (Krebsrisiko)	Treibhauseffekt	Terrestrische Eutrophierung	Naturraumbeanspruchung	Versauerung	Aquatische Eutrophierung	Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	Ressourcenbeanspruchung
SQ	■	■	■	■ ■	■	■	■	■
Bes30/70	■	■ ■ ■	■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■
SQopt	● ●	●	● ●	■	● ●	■	●	●
SORTEC	●	Beste Option	Beste Option	Beste Option	Beste Option	Beste Option	Beste Option	Beste Option
Bes100	Beste Option	■	■	■ ■ ■ ■	■ ■	■	■	■

Spezifischer Beitrag: Abstand zum jeweils besten Szenario: (■) entspricht 1.000 EDW (gerundet).

“Beste Option“ = 0; 0 < (●) < 250 EDW; 250 EDW (●●) < 500 EDW

Ökologische Bedeutung: (■ ●) sehr groß, (■ ●) groß, (■ ●) mittel.

Tabelle 3.3.34: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag

Die Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb weist unter den gegebenen Rahmenbedingungen ökologische Vorteile gegenüber einer Beseitigung auf, wenn diese auch im Vergleich zu Bes100 recht gering sind. Zukunftstechniken wie mit SQopt und SORTEC bilanziert, würden wie in Tabelle 3.3.34 ersichtlich, den bislang geringen Vorteil deutlicher ausprägen.

Sensitivitätsanalysen

1. MVA mit höherem energetischen Wirkungsgrad

In Abbildung 3.3.38 ist ersichtlich, wie sich die Beseitigung der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb in der MVA im Vergleich zur Verwertung im Status Quo darstellt, wenn die Verbrennung nicht mit dem standardmäßig verwendeten energetischen Wirkungsgrad der MVA von 40% erfolgt, sondern der Abfall in eine energetisch optimierte MVA mit einem energetischen Wirkungsgrad von 70% verbracht würde.

Die wesentlichen Vorteile des SQ hinsichtlich der EDW gegenüber der Bes100 liegen im Standardansatz bei den Kategorien Naturraumbeanspruchung und Versauerung. Hier werden die Vorteile des SQ bei erhöhtem energetischen Wirkungsgrad der MVA nur wenig geringer. Bei der Humantoxizität und dem Treibhauseffekt nehmen die Vorteile der Bes100 zu. Im Vergleich aller Kategorien weist der SQ gegenüber der Bes100 bei der WK-70-Option weiterhin geringe ökologische Vorteile auf.

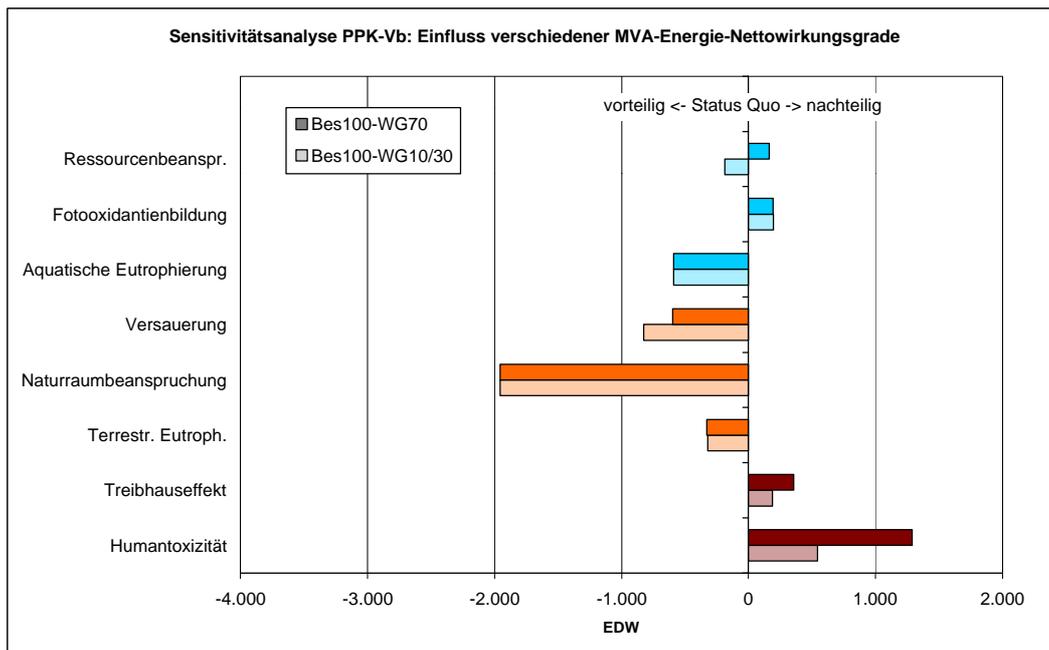


Abbildung 3.3.38: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erhöhten energetischen Wirkungsgrades der MVA auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb

3.3.3.14 Flüssigkeitskartons (FKN)

Für die Verpackungsmaterialgruppe Flüssigkeitskartons ist der wesentliche Verwertungsweg die Aufbereitung zur Faserrückgewinnung. Die dabei ebenfalls gewonnenen Rejekte aus einem Kunststoff-Aluminiumverbund werden im Zementwerk als Energieträger und Bauxitersatz verwendet. Der Unterschied zwischen den Verwertungsoptionen besteht im Wesentlichen in den unterschiedlichen Anteilen an Altpapierstoff, die vom SQ mit ca. 60% zu SQopt und SORTEC mit ca. 67% hin zunehmen. Entsprechend nehmen die Sortierreste in der gleichen Reihenfolge ab. Detaillierte Angaben befinden sich in Tabelle 3.3.35.

Produkt		Verwertung			Beseitigung	
		Status Quo	Status Quo optimiert	SORTEC	30% MVA 70% Dep.	100% MVA
Energie, elektr.	[G]	0,14	0,10	0,07	0,86	2,27
Energie, therm.	[G]	0,35	0,25	0,19	2,00	6,40
Altpapierstoff	[kg]	597,8	668,5	667,8		
Aluminium	[kg]	0,9	0	2,4		
Bauxitersatz	[kg]	23,9	26,7	26,7		
Zementklinker	[kg]	1922,1	2149,4	2147,1		
Sortierreste	[kg]	154,6	92,6	68,6		

Tabelle 3.3.35: Quantifizierter Nutzen der Verwertung bzw. Beseitigung pro 1000 kg der Verpackungsmaterialgruppe Flüssigkeitskartons

Im Vergleich der Umweltwirkungen (Abbildung 3.3.39 und Abbildung 3.3.40) schneiden die Verwertungsoptionen bei den Kategorien Terrestrische Eutrophierung, Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Versauerung und Treibhauseffekt günstiger ab als die Beseitigungsoptionen. Das liegt überwiegend an den Gutschriften für Primärfasern durch den in der Faseraufbereitung gewonnenen Altpapierstoff. Beim Treibhauseffekt hat zusätzlich auch die Rejektverwertung einen Anteil von ca. 45% an der Gutschrift

Hinsichtlich der Humantoxizität ist die Beseitigung am vorteilhaftesten, sowohl bei Bes30/70 als auch bei Bes100.

Spezieller Teil

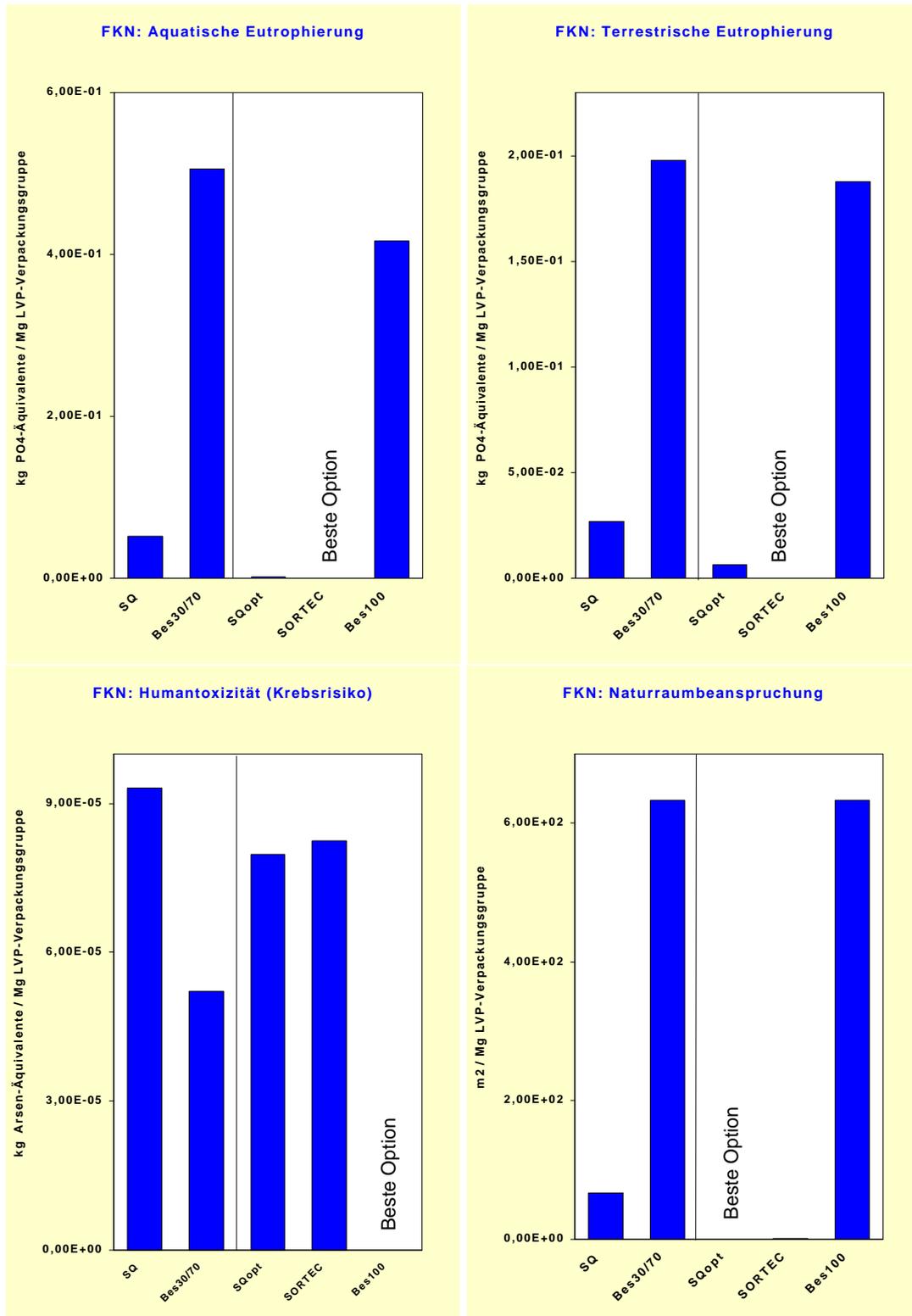


Abbildung 3.3.39: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe FKN hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

Spezieller Teil

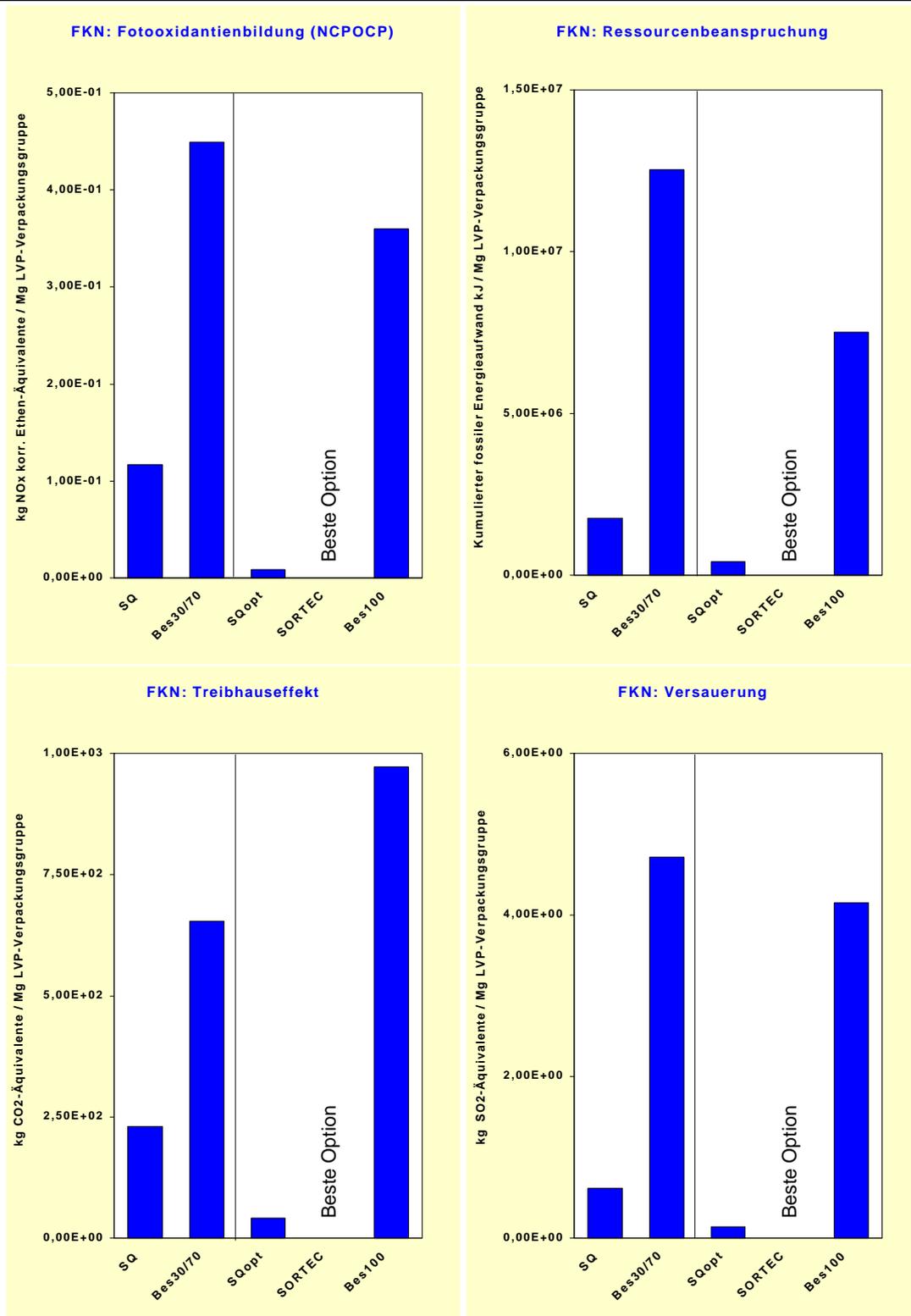


Abbildung 3.3.40: Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe FKN hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung (die beste Option wurde jeweils auf Null gesetzt).

SQ versus Bes30/70 und Bes100

Der direkte Vergleich der EDW des Status Quo von Verwertung und Beseitigung (s. Tabelle 3.3.36) zeigt, dass SQ gegenüber den Beseitigungsoptionen bei den Kategorien Treibhauseffekt, Terrestrische Eutrophierung, Versauerung, Ressourcenbeanspruchung und Fotooxidantienbildung. Die Beseitigung ist hinsichtlich der Humantoxizität vorteilhafter.

Szenario	Humantoxizität (Krebsrisiko)	Treibhauseffekt	Terrestrische Eutrophierung	Naturraumbeanspruchung	Versauerung	Aquatische Eutrophierung	Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	Ressourcenbeanspruchung
SQ	■	■	•	••	••	•	••	■■■■■
Bes30/70	••	■■■	■	■■■■■	■■■	■■■	■	Beste Option
SQopt	••	•	•	Beste Option	Beste Option	•	•	■■■■■
SORTEC	••	Beste Option	Beste Option	•	•	Beste Option	Beste Option	■■■■■
Bes100	Beste Option	■■■	■	■■■■■	■■■	■■■	■	■■■■■

Spezifischer Beitrag: Abstand zum jeweils besten Szenario: (■) entspricht 5.000 EDW (gerundet).

Beste Option“ = 0 EDW gesetzt; 0 EDW < (•) < 1250 EDW; 1250 EDW (••) < 2.500 EDW

Ökologische Bedeutung: (■ •) sehr groß, (■ •) groß, (■ •) mittel.

Tabelle 3.3.36: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe FKN unter Einbeziehung von ökologischer Bedeutung und spezifischem Beitrag

Die Verwertung der Verpackungsmaterialgruppe Flüssigkeitskartons weist unter den gegebenen Rahmenbedingungen deutliche ökologische Vorteile gegenüber der Beseitigung auf. Zukunftstechniken wie mit SQopt und SORTEC bilanziert, würden wie in Tabelle 3.3.36 ersichtlich, diesen Vorteil noch geringfügig steigern.

3.3.3.15 Schlussfolgerungen

In den vorangehenden Kapiteln wurden verschiedene Verwertungs- und Beseitigungsoptionen der in dieser Studie untersuchten 13 Verpackungsmaterialgruppen der LVP ökologisch bewertet. Die wichtigsten Ergebnisse sind zum besseren Überblick in Tabelle 3.3.37 zusammengefasst.

	SQ vs Bes30/70	SQ vs Bes100		SQopt vs Bes100	SORTEC vs Bes100
	Stand.-Opt.	Stand.-Opt.	Sens.-Anal.	Stand.-Opt.	Stand.-Opt.
Alu	++	++		++	++
Aluh.-Vb	+	+	M-70: +	+	++
FKN	++	++		++	++
K.-Becher	(●)	(●)	M-70: ~ SF-0,5: ~	++	++
K.-Flaschen	+	+		+++	++
K.-Fo<A4	(●)	(●)	M-70: ~	+	++
K.-Fo>A4	+	+		+	++
K.-Vb	(●)	(●)	M-70: ~	(●)	+
so. K.	(●)	(●)	M-70: ~	++	++
PPK-Vb	+	(●)	M-70: (●)	++	++
Alu-Vb	+	+		++	++
Wb	+++	+++		+++	+++
Wb-Vb	+	+		+	+

+ Verwertung ist ökologisch vorteilhafter
 ++ Verwertung ist ökologisch viel vorteilhafter
 +++ Verwertung ist ökologisch sehr viel vorteilhafter
 (●) geringfügige ökologische Unterschiede, Vorteil der Verwertung nicht eindeutig
 ~ Verwertung und Beseitigung ökologisch gleichwertig
 M-70 Sensitivitätsbetrachtung mit 70% energetischem Wirkungsgrad in der MVA
 SF-0,5 Sensitivitätsbetrachtung mit einem Substitutionsfaktor von 0,5

Tabelle 3.3.37: Verdichtete Darstellung der Ergebnisse des ökologischen Vergleichs von Verwertung und Beseitigung der untersuchten Verpackungsmaterialgruppen

Dabei wird jeweils das Ergebnis des Vergleichs einer Verwertungsoption mit einer Beseitigungsoption mit Hilfe von graphischen Elementen dargestellt. Ein oder mehrere „+“ bedeutet, dass die Verwertung ökologisch vorteilhafter ist (mit zunehmender Anzahl der „+“ wird der Vorteil größer). Das Symbol (●) zeigt an, dass die ökologischen Unterschiede zwischen Verwertung und Beseitigung nur sehr gering sind und eigentlich kein ökologischer Vorteil der Verwertung ableitbar ist.

Die Schlussfolgerungen aus dieser Betrachtung lassen sich im Grunde in den 3 nachfolgenden Aussagen zusammenfassen:

- Bei keiner Verpackungsmaterialgruppe weist die Beseitigung eindeutige ökologische Vorteile gegenüber der Verwertung auf
- Bei den Verpackungsmaterialgruppen Alu, Alu-Vb, Aluh.-Vb, FKN, K-Flaschen, K.-Fo>A4, Wb und Wb-Vb weist die Verwertung eindeutige ökologische Vorteile gegenüber der Beseitigung auf
- Bei den Verpackungsmaterialgruppen K-Becher, K.-Fo.<A4, K.-Vb, so.K und mit Einschränkungen PPK weist die Verwertung keine eindeutigen ökologischen Vorteile gegenüber der Beseitigung auf

Daneben werden in der Spalte „Sens.-Anal.“ der Tabelle 3.3.37 zusätzlich die Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtungen abgebildet. Im Zentrum steht hier die Frage, ob durch das Setzen anderer Rahmenbedingungen – in diesem Fall die gezielte Verbringung einzelner Verpackungsmaterialgruppen in eine MVA mit hohem energetischen Wirkungsgrad – zu anderen Schlussfolgerungen führen würde. Dabei zeigt sich, dass ein Vergleich zwischen der Verwertung im Status Quo und der Beseitigung in der MVA bei den Verpackungsmaterialgruppen, die schon im Standardvergleich nur geringe ökologische Unterschiede ergeben, ein eindeutiges ökologisches Patt eintritt.

In dieser Studie wurde der Status Quo der Verwertung ins Zentrum der ökologischen Betrachtung gestellt. Bei einer zukünftigen Optimierung dieses Status Quo wird so lässt sich aus den Massenflussdiagrammen erkennen – die Verwertung der Kunststofffraktionen zunehmend von der rohstofflichen in die werkstoffliche Verwertung geleitet. Es stellt sich die Frage, in welchem Umfang die dabei hergestellten Sekundärkunststoffe die werkstofflichen Anforderungen des Marktes mit Blick auf den Ersatz von Primärkunststoffen erfüllen.

Diese Frage ist derzeit noch nicht zu beantworten, spielt aber für die ökologische Bewertung der zukünftigen Verwertungsoptionen eine entscheidende Rolle, da sie die Ausprägung der funktionellen Äquivalenz in Form der Substitutionsfaktoren unmittelbar bestimmt. Die Festlegung der Substitutionsfaktoren ist nämlich besonders bei den Optionen mit hohem werkstofflichem Verwertungsanteil relevant. Wie in Abbildung 3.3.41 dargestellt gehen beispielsweise im optimierten Status Quo der Verpackungsmaterialgruppe Kunststoffbecher die ökologischen Vorteile der Verwertung je nach Wirkungska-

tegorie um über 50% zurück, wenn die Substitutionsfaktoren von 0,7 bzw. 0,9 auf 0,5 gesetzt werden.

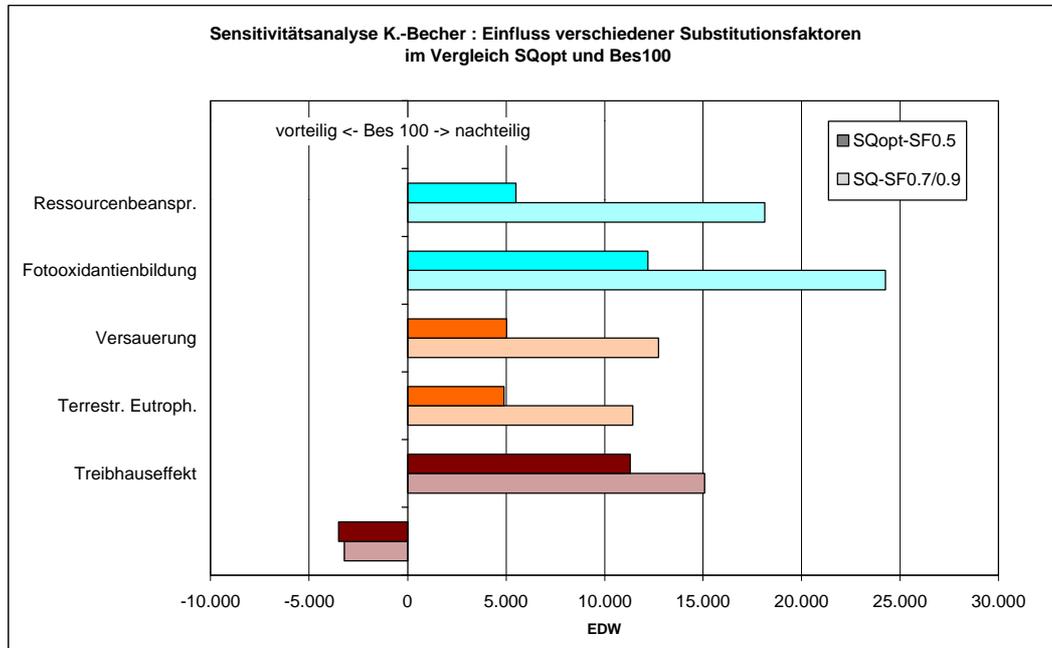


Abbildung 3.3.41: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss eines erniedrigten Substitutionsfaktors auf den Vergleich zwischen SQ und Bes100 der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher

Dies sollte man beachten, wenn die Ergebnisse für Verwertung im optimierten Status Quo oder im SORTEC-Verfahren (Tabelle 3.3.37, Spalte „SQopt vs Bes100“ bzw. „SORTEC vs Bes100) als Kriterien für Entscheidungen im Rahmen der Verpackungsverordnung herangezogen werden sollten. Auf der Basis des derzeitigen Informationsstandes sind nach Auffassung der Auftragnehmer Schlussfolgerungen hinsichtlich der ökologischen Vorteilhaftigkeit zukünftiger Verwertungsoptionen deshalb nur mit Einschränkungen möglich.

4 Vergleichende Untersuchungen ausgewählter Szenarien

4.1 Herleitung und Randbedingungen der Szenarien

Bislang wurde im Zusammenhang mit der technischen Umsetzung und den gegebenen Optionen von „technischen Varianten“ der LVP-Verwertung gesprochen. Der Begriff Szenario ist im Rahmen dieser Studie auf die Modellierung von Erfassungsvarianten beschränkt, die einen Systemausschluss einzelner Materialgruppen nach dem Kosten-Nutzen-Verhältnis simulieren.

In der politischen Diskussion stehen zurzeit eine Reihe entsprechender Vorschläge, die mehr oder minder den Totalanspruch der deutschen Verpackungsverordnung aus ökonomischen, teilweise auch aus ökologischen Überlegungen heraus zur Disposition stellen.

Tabelle 4.1.1 zeigt ohne Anspruch auf Vollständigkeit eine Übersicht diskutierter Szenarien. Sieht man von regionalspezifischen Lösungsvorschlägen ab, die vorgabegemäß nicht Gegenstand der Erörterung sind, konzentriert sich die Diskussion auf sog. kleinteilige Kunststoffverpackungen, die aus der getrennten LVP-Erfassung in die Restmüllfassung zurückgeführt werden sollen. Übrige Materialgruppen bleiben meist unerwähnt. Gemäß Tabelle 3.3.2 bzw. Tabelle 2.1.2 handelt es sich hierbei bezogen auf die aktuellen Verhältnisse um eine Teilmenge von ca. 4 kg/E•a, die von einem Systemausschluss potentiell betroffen wären.

Eine Definition hinsichtlich des genauen Zuweisungskriteriums wird vielfach nicht vorgenommen, teils werden große Folien und Flaschen als im System verbleibende Artikelgruppen explizit genannt. Hier folgt man also der Logik des Status quo, indem diese Artikelgruppen potentiell für eine werkstoffliche Verwertung vorgesehen sind.

Seitens des UBA wurde im Zuge der Auftragsformulierung eine funktionale Vorgabe zu den Randbedingungen eines Systemausschlusses aufgestellt.

Vergleichende Untersuchungen ausgewählter Szenarien

lfd. Nr.	Studie/Verfasser	Szenarien bezogen auf Kunststoffverpackungen		Behandlung sonst. LVP
		kleinteilige KS*	große KS**	
1	UBA Österreich	Beschränkung der Haushaltssammlung auf "automatisch sortierbare u. großteils stofflich verwert. KS" (nach Verfasser: Hohlkörper, große Folien) + Nicht-Verpackungskunststoffe und Produktionsabfälle		keine Aussage
2	BifA 1	keine Änderung in der Erfassung (opt. Wertstoffhof für großteilige KS); Sortiertiefe variieren (Negativsortierung KS, d.h. KS bleiben auf dem Sortierband), summarische, rohstoffliche Verwertung		in gemischter Erfassung enthalten
3	BifA 2	keine Änderung der Erfassung (opt. Wertstoffhof für großteilige KS), automatische Sortierung der LVP-Fraktion mittels Sortec		in gemischter Erfassung enthalten
4	BifA II	gesonderte Erfassung (sep. Sack) + MKS -Aufbereitung + rohstoffliche Verwertung im Stahlwerk/Hydrierung	gesonderte Erfassung (gelber Sack/Tonne) + werkstoffliche Verwertung	gemeinsam mit den großen KS erfasst
5	BifA III	Erfassung mit Restmüll + energ. Verwertung nach MBA	gesonderte Erfassung (gelber Sack/Tonne) + werkstoffliche Verwertung	gemeinsam mit den großen KS erfasst
6	BifA IV	Erfassung mit Restmüll + energ. Verwertung nach MBA	gesonderte Erfassung am Wertstoffhof + werkstoffliche Verwertung	gesonderte Erfassung am Wertstoffhof
7	BifA V / Martini (Rheinl.Pfalz) Friege, Schmitt (Düsseldorf, Hagen)	Erfassung mit Restmüll + energ. Verwertung MVA	gesonderte Erfassung (gelber Sack/Tonne) + werkstoffliche Verwertung	gemeinsam mit den großen KS erfasst
8	Lahn-Dill-Kreis	Erfassung mit Restmüll, MBA und Trockenstabilat	Monoerfassung großer Folien/Flaschen im Depotcontainer	PPK/FKN Land-bell-System, sonst. Depotcont.
9	BifA VI	gesonderte Erfassung (gelber Sack) + rohstoffl. Verwertung im Stahlwerk	gesonderte Erfassung im Depotcontainer + werkstoffliche Verwertung	gesonderte Erfassung im Depotcontainer
10	BifA VII	gesonderte Erfassung (gelber Sack) + rohstoffl. Verwertung im Stahlwerk	gesonderte Erfassung am Wertstoffhof + werkstoffliche Verwertung	gesonderte Erfassung am Wertstoffhof
11	BifA VIII	alle Verpackungen mit Restmüll erfassen und energetische Verwertung MVA		keine Aussage

* i.d.Regel nicht spezifiziert, wenn spezifiziert dann kleinteilige u. stark verschmutzte KS u. KS-Verbunde bzw.** Flaschen und großformatige Folien

Tabelle 4.1.1: Übersicht über in der Diskussion befindlicher Szenarien zur Modifikation der Verpack V

Diese lautet, dass die Vorgaben der VerpackV bzw. der EU-Richtlinie bezüglich der quantitativen Systemanforderung eingehalten werden sollen. Dies führt zur Formulierung von Szenarien, die sich in ihrer Bezeichnung an den Schwellenwerten der jeweiligen gesetzlichen Vorgaben orientieren. Im einzelnen sind dies:

Szenario VVO Einhaltung der quantitativen Systemanforderungen der Verpackungsverordnung

Szenario EU-45 Systemausschluss bis zu einer Verwertungsquote von 45 %

Szenario EU-25 Systemausschluss bis zu einer Verwertungsquote von 25 %

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden im Weiteren folgende Randbedingungen festgelegt:

- Abgrenzung der Materialgruppen nach den derzeitigen Vorgaben der VerpackV auch für die Szenarien EU-25 und EU 45 (d.h. die Verbunde bilden eine einzige Materialgruppe, die Reinmaterialien jeweils eine einzelne)
- einheitliche Erfüllung der quantitativen Anforderungen durch alle 4 Materialgruppen nach VerpackV
- Schnittstelle zur Bezifferung der Verwertungsquote entsprechend der aktuellen Rahmenbedingungen des MSN
- System-Ausgrenzung von Materialgruppen nach Kosten-Nutzen-Ranking bis zum Erreichen o.a. Schwellenwerte; als Leitparameter zur Bezifferung des ökologischen Nutzens dient der kumulierte Energieaufwand (hier: Energieeinsparung)
- Berücksichtigung von Aspekten der praktischen Umsetzbarkeit
- Bezugsmengen zur Bezifferung der Schwellenwerte bilden Marktmengen (Verbrauchsmengen)

Wie vorstehend erläutert, treten sowohl in den ökonomischen als auch in den ökologischen Bewertungen der Materialgruppen quantitative und hierarchische Verschiebungen in Abhängigkeit der technischen Variante der Systemumsetzung auf. Hierzu wurde festgelegt, dass in erster Linie eine Bemessung am Status quo erfolgen sollte. Da zu erwarten ist, dass spätestens mit Neuausschreibung der Leistungsverträge die Anpassung an den Stand der Technik in der LVP-Sortierung abschließend vollzogen sein wird, war für die ökonomische Beurteilung die Variante 3 (opt. Status - alte Spezifikation) zugrunde zu legen. Als realistisch kurzfristig umsetzbar ist auch eine Umstellung der Produktspezifikationen einzuschätzen, so dass die Variante opt. Status - neue Spezifikation einem zusätzlichen Referenzszenario zugrunde gelegt wurde.

Die Variante Sortec wurde als erst mittelfristig umsetzbare Option von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

4.2 Ableitung der Mengengerüste

4.2.1 Kosten-/Nutzenbetrachtung für die einzelnen Materialgruppen

Die Kosten-Nutzenanalyse für die einzelnen Materialgruppen basiert zunächst auf der vereinfachten Annahme, dass sich der ökologische Nutzen einer getrennten Erfassung und Verwertung annähernd über den Parameter kumulierter Energieaufwand (hier negativ, entspricht Energieeinsparung) abbilden lässt.

Die Abbildungen 4.2.1 und 4.2.2 veranschaulichen die Komplexität der Bewertung. Aufgetragen sind für jede einzelne Materialgruppe der kumulierte Energieaufwand über die spez. Systemkosten. Abb. 4.2.1 bezieht sich auf den Status quo; Abb. 4.2.2 auf den opt. Status. Zur grundlegenden Lesart der Graphiken ist anzumerken, dass das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Verwertung einer Materialgruppe sich umso besser darstellt, je höher und je weiter links ihre Koordinaten angeordnet sind. Um die Ergebnisse etwas plastischer darzustellen, wird der KEA nicht in KJ sondern in KWh angegeben.

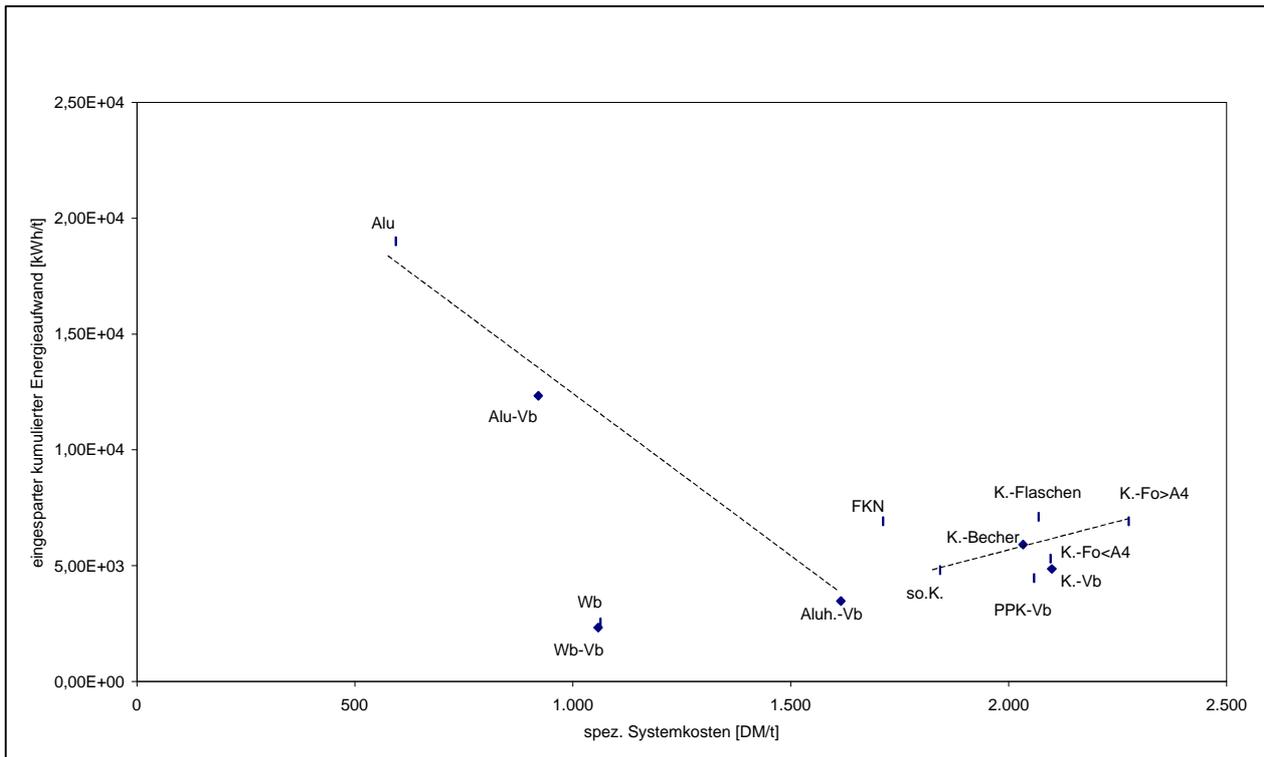


Abbildung 4.2.1: Zur Kosten-Nutzenanalyse Status quo

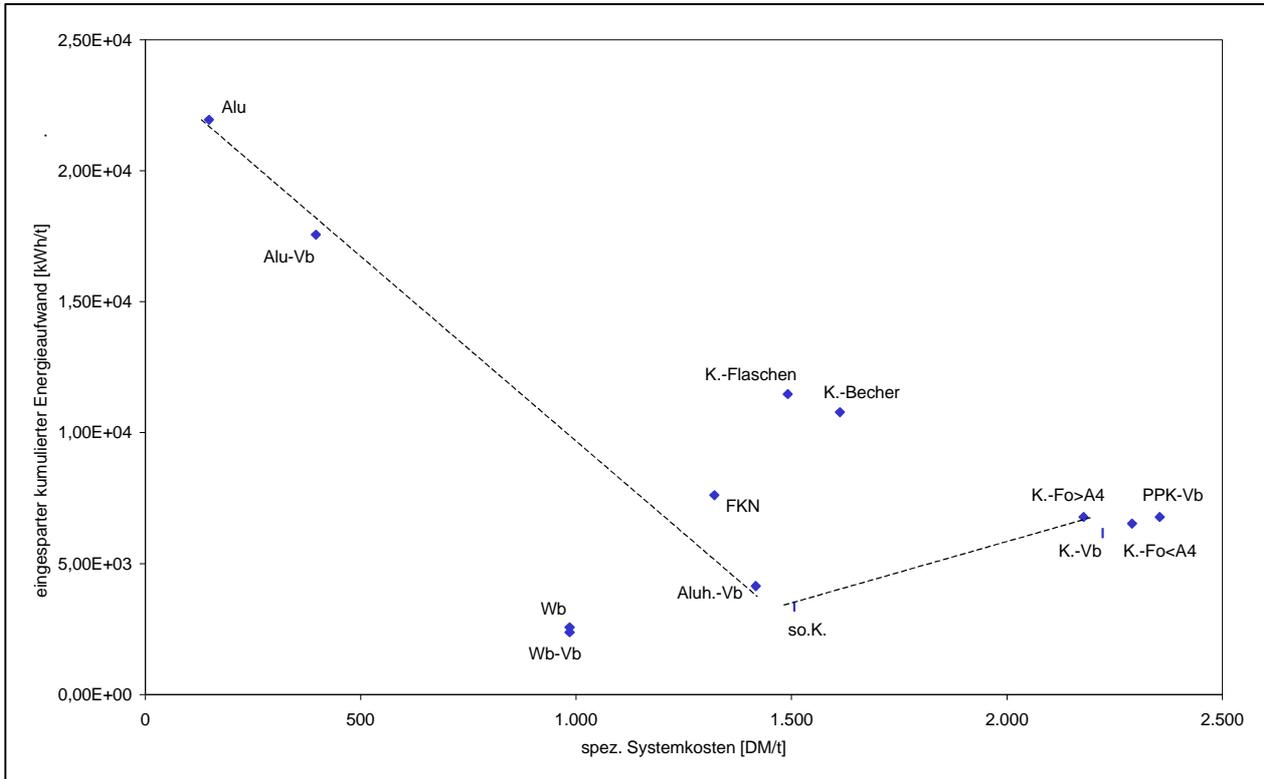


Abbildung 4.2.2: Zur Kosten-Nutzenanalyse opt. Status

Übergreifend zeigen sich keine Gesetzmäßigkeiten dergestalt, dass sich proportionale bzw. umgekehrt unproportionale Abhängigkeiten zwischen Kosten und ökologischem Nutzen herleiten ließen.

Augenfällig stellen sich aber materialspezifisch Gruppierungen ein. So lässt sich ein nahezu linearer Zusammenhang für die aluminiumhaltigen Verpackungen herleiten. Zur Verdeutlichung sind entsprechende Hilfslinien in die Graphiken eingetragen. Zunehmender ökologischer Nutzen geht hierbei mit abnehmenden Verwertungskosten einher.

Aus der Konzentration der Kunststoffmaterialgruppen für den Status quo lassen sich bei hoher Streubreite eher proportionale Zusammenhänge vermuten, indem höherer ökologischer Nutzen auch höhere Systemkosten nach sich zieht. Werden phänomenologisch ähnliche Materialgruppen wie Becher und Flaschen einerseits oder Folien und Großfolien andererseits, die sich aber hinsichtlich des Grades der späteren Veredlung schon generell unterscheiden, unmittelbar miteinander verglichen, zeigt sich dies etwas deutlicher. Streng mathematisch sind solche Bezüge aber nicht aufzuzeigen. Was aber im Hinblick auf die derzeitige Materialgruppeneinteilung der VerpackV eindeutig abzulesen ist, ist, dass die summarische Bewertung der Materialverbunde wenig sinnvoll ist.

Vergleichende Untersuchungen ausgewählter Szenarien

Auch aus der korrespondierenden Darstellung für den opt. Status quo sind einheitliche Gesetzmäßigkeiten nicht abzuleiten. In unmittelbarem Vergleich der Kunststoffe ist aber im Vergleich zum Status quo eine starke Entzerrung zu verzeichnen. Aus Kosten-Nutzen-Aspekten legt die Darstellung auch grundsätzlich nahe, sich hinsichtlich einer Steigerung der Veredlungstiefe auf die formstabilen Kunststoffe zu konzentrieren.

Nochmals vereinfacht lassen sich die Ergebnisse der vorstehenden Abbildungen darstellen, wenn die Bewertungsgrößen Kosten und kumulierter Energieaufwand durch Bezugsetzung in eine einzige spezifische Größe überführt werden. Die Aussagekraft der resultierenden Größe Kosten/kumulierter Energieaufwand ist allerdings eingeschränkt.

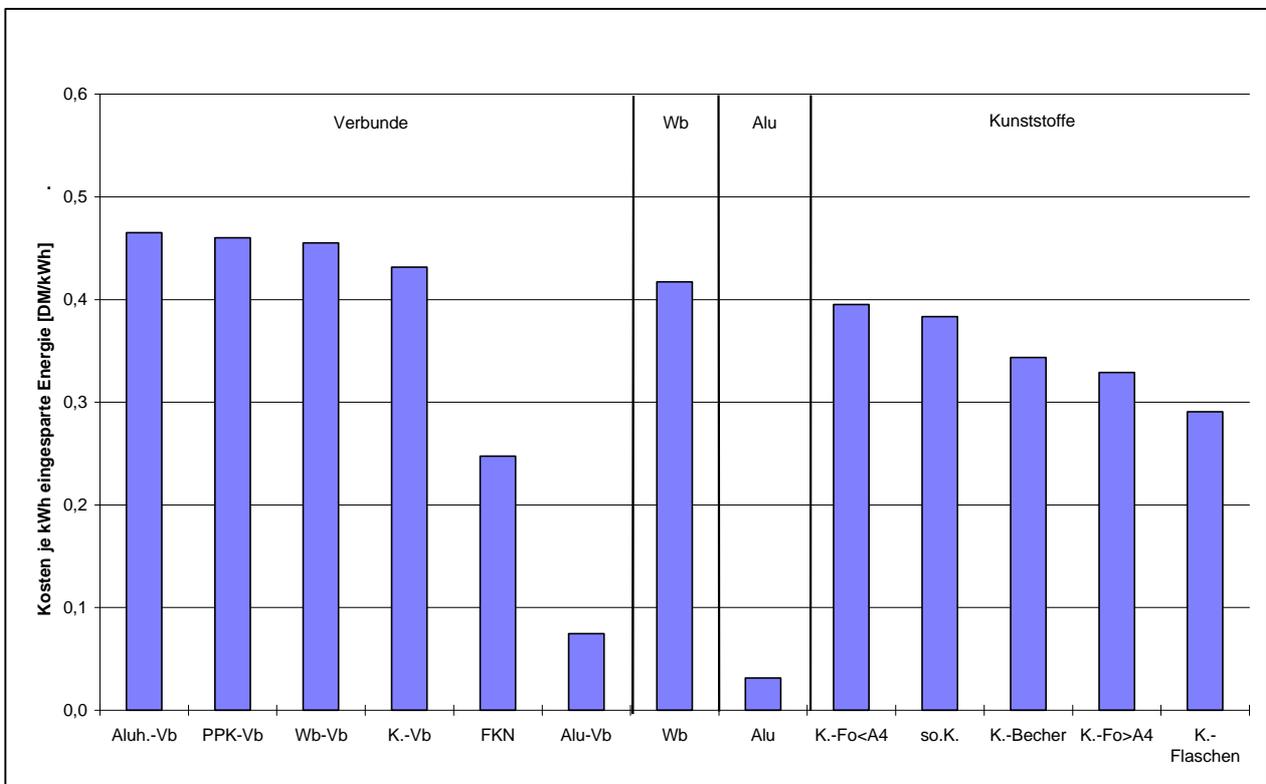


Abbildung 4.2.3: Kosten je kWh eingesparte Energie im Status quo

Die Abbildungen 4.2.3 und 4.2.4 zeigen die Ergebnisse in Form von Balkendiagrammen. Entsprechend der Vorgaben sind die einzelnen Materialgruppen nach VerpackV voneinander abgesetzt hierarchisch nach Größe geordnet. In dieser Darstellungsform sind niedrige Balkenhöhen gleichbedeutend mit günstigem Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Vergleichende Untersuchungen ausgewählter Szenarien

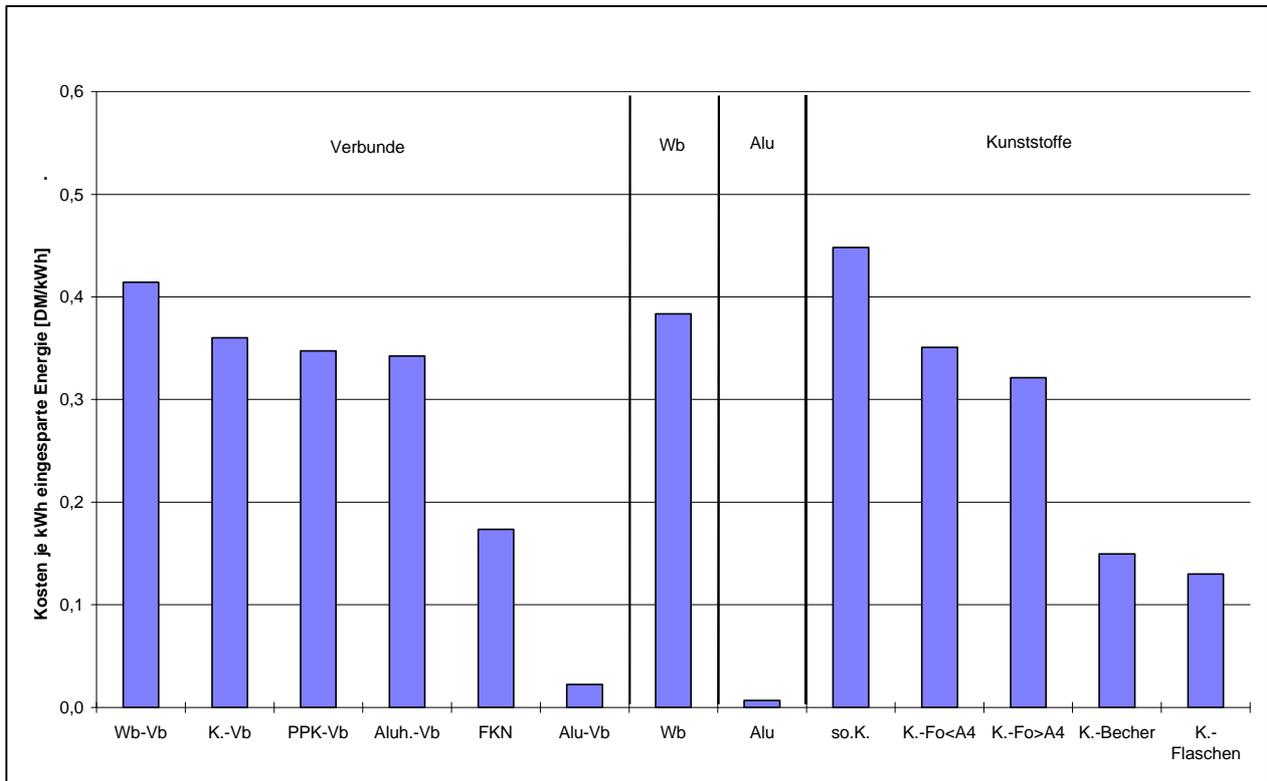


Abbildung 4.2.4: Kosten je kWh eingesparte Energie im opt. Status

Grundsätzlich ist aus den Darstellungen besser ablesbar, dass ein Ranking technologieabhängig vorzunehmen ist, da sich die interne Rangreihenfolge der Materialgruppen im Vergleich der beiden Varianten verändert. Als erheblich ist dies allerdings nur für die Kunststoffmaterialgruppen einzuschätzen.

Darüber hinaus wird ersichtlich, dass zumindest bei konsequenter Heranführung des Systems an den Stand der Technik, die Konzentration der Diskussion auf den Systemausschluss kleiner Kunststoffverpackungen ihre Grundlage verliert. So weisen im opt. Status Becher und Flaschen ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis im Vergleich zu Großfolien auf. Diese wiederum sind ähnlich den Kleinfolien zu charakterisieren.

Etwas überraschend ist nach allen vorstehenden Ausführungen das verhältnismäßig schlechte Kosten-Nutzen-Verhältnis von Weißblech in der vereinfachten Betrachtung. Dies ist bedingt durch die gewählte Systematik vorliegender Studie, nach der nur der Entsorgungsweg der Verpackungen ökobilanziell quantitativ untersucht werden konnte. Die erteilten Gutschriften für Sekundärrohstoffe beim Leitparameter K Weißblech vergleichsweise gering, was die relativ schlechte Positionierung der Weißblechmaterialgruppen im vereinfachten Kosten-Nutzenvergleich verursacht.

Hieraus ist nicht zu folgern, dass die Weißblechverwertung zur Disposition zu stellen ist. Vielmehr wird signalisiert, dass eine rein mechanische Anwendung der Ergebnisse in dargestellter Form nicht vorbehaltlos vorzunehmen ist.

4.2.2 Grundlagen der Mengenansätze zu den einzelnen Szenarien

Nachfolgende Tabellen veranschaulichen die Herleitung der Mengengerüste zu den exemplarisch gebildeten Szenarien unter den eingangs formulierten Prämissen.

Ausgehend von einer durchschnittlichen LVP-Zusammensetzung sind in Tabelle 4.2.1 - 4.2.3 die Produktanteile für die Schnittstelle der derzeitigen Quotennachweise durch Multiplikation mit den jeweiligen Ausbringensraten für die Prozessstufe Sortierung berechnet. Die Schwellenwerte bei linearer Einstellung der quantitativen Anforderung der VerpackV bzw. EU-Richtlinie sind auf Basis der Verbrauchsmengen-Erhebung für 1997 gegenübergestellt.

Die simulative Herausnahme einzelner Verpackungsmaterialgruppen erfolgte in erster Linie nach den Ergebnissen des Rankings gemäß Abb. 4.2.3 und 4.2.4, soweit nicht Machbarkeitsgründe dagegen standen. Dies ist bspw. bei den Weißblechverbunden gegeben, deren selektiver Systemausschluss bei gleichzeitiger Systemverbleib von Weißblech weder praktisch umsetzbar, noch sinnvoll erscheint.

Es muss berücksichtigt werden, dass bei dem vorgegebenen Ansatz, die jeweiligen quantitativen Anforderungen nicht durch ein generelles Absenken der Erfassungsmengen, sondern bei selektiver Ausgrenzung einzelner Materialgruppen zu erfüllen, die eigentliche Erfassung nicht in ihrer Intensität gemindert werden kann.

Insofern müssen Übermengen einzelner Materialfraktionen wie auch in den derzeitigen Praxis in Kauf genommen werden. Führend sind die jeweils im Grenzbereich zum Schwellenwert liegenden Materialgruppen. Unter der Maßgabe der Einstellung der quantitativen Systemanforderungen der VerpackV besteht demnach kein Spielraum zur Systemausgrenzung einzelner Materialien. Das Szenario VVO entfällt entsprechend.

Anders stellt sich dies bei den Maßgaben der EU Richtlinie dar. Aus den Tabellen ist jeweils durch die Kennzeichnung mit einem x ersichtlich, welche Stoffgruppen für die Szenarien bei den Schwellenwerten 45 % und 25 % rechnerisch eliminiert werden.

Vergleichende Untersuchungen ausgewählter Szenarien

	LVP-Zusammensetzung (2 Mio t LVP)		Summe Produktanteile (nur Verkaufsverpackungen)				Schwellenwert V.VO	absolute Produktanteile ohne Grenzmaterialgruppe (GM)	
	relativ	absolut	relativ		absolut			Status Quo	opt. Status
			Status Quo	opt. Status	Status Quo	opt. Status			
Kunststoffe					436.444	481.158	493.331		
Folien > DIN A4	7,9%	158.000	87,8%	93,9%	138.724	148.362			
Folien < DIN A4	4,5%	90.000	72,5%	87,6%	65.250	78.840			
Flaschen	5,0%	100.000	84,7%	85,0%	84.700	85.000			
Becher	5,6%	112.000	76,0%	85,1%	85.142	95.312			
Styropor	1,3%	26.000							
sonst Kunststoffe	5,1%	102.000	61,4%	72,2%	62.628	73.644			
Verbunde					276.290	309.750	324.131		
Kunststoff-Verbunde	0,8%	16.000	64,0%	83,4%	10.240	13.344			
Verbunde auf Alubasis	0,8%	16.000	63,6%	85,0%	10.176	13.600			
aluhaltige Verbunde	1,2%	24.000	57,8%	81,9%	13.872	19.656			
Weißblech-Verbunde	4,7%	94.000	95,5%	99,0%	89.770	93.060			
sonst. PPK-Verbunde	1,2%	24.000	49,7%	80,0%	11.928	19.200			
FKN	7,9%	158.000	88,8%	95,5%	140.304	150.890			
Aluminium					25.920	30.144	27.692		
Aluminium	1,6%	32.000	81,0%	94,2%	25.920	30.144			
Weißblech					342.300	346.500	258.726		
Weißblech	17,5%	350.000	97,8%	99,0%	342.300	346.500			
Rest	34,9%	698.000							
Summe	100,0%	2.000.000	83,0%	89,7%	1.080.954	1.167.552			

Tabelle 4.2.1: Zur Herleitung der Mengengerüste zum Szenario VVO

Dies sind zusammenfassend für die einzelnen Szenarien:

Status quo EU-45:

- K.-Fo<A4
- K.-Vb
- Aluh.-Vb
- PPK-Vb

Vergleichende Untersuchungen ausgewählter Szenarien

Status quo EU-25:

- K.-Fo<A4
- K.-Becher
- So.K.
- K.-Vb
- Aluh.-Vb
- PPK-Vb

	LVP-Zusammensetzung (2 Mio t LVP)		Summe Produktanteile (nur Verkaufsverpackungen)				Schwellenwert EU-45	absolute Produktanteile ohne Grenzmaterialgruppe (GM)	
	relativ	absolut	relativ		absolut			Status Quo	opt. Status
			Status Quo	opt. Status	Status Quo	opt. Status			
Kunststoffe					371.194	407.514	369.998	286.052	328.674
Folien > DIN A4	7,9%	158.000	87,8%	93,9%	138.724	148.362			
Folien < DIN A4	4,5%	90.000	72,5%	87,6%	X	78.840			GM
Flaschen	5,0%	100.000	84,7%	85,0%	84.700	85.000			
Becher	5,6%	112.000	76,0%	85,1%	85.142	95.312			
Styropor	1,3%	26.000							
sonst. Kunststoffe	5,1%	102.000	61,4%	72,2%	62.628	X		GM	
Verbunde					240.250	257.550	243.098	99.946	106.660
Kunststoff-Verbunde	0,8%	16.000	64,0%	83,4%	X	X			
Verbunde auf Alubasis	0,8%	16.000	63,6%	85,0%	10.176	13.600			
aluhaltige Verbunde	1,2%	24.000	57,8%	81,9%	X	X			
Weißblech-Verbunde	4,7%	94.000	95,5%	99,0%	89.770	93.060			
sonst. PPK-Verbunde	1,2%	24.000	49,7%	80,0%	X	X			
FKN	7,9%	158.000	88,8%	95,5%	140.304	150.890		GM	GM
Aluminium					25.920	30.144	20.769		
Aluminium	1,6%	32.000	81,0%	94,2%	25.920	30.144			
Weißblech					342.300	346.500	166.324		
Weißblech	17,5%	350.000	97,8%	99,0%	342.300	346.500			
Rest	34,9%	698.000							
Summe	100,0%	2.000.000	75,2%	80,0%	979.664	1.041.708			

Tabelle 4.2.2: Zur Herleitung der Mengengerüste der Szenarien EU-45

Opt. Status EU-45:

- so.K.
- K.-Vb
- Aluh.-Vb
- PPK-Vb

Vergleichende Untersuchungen ausgewählter Szenarien

Opt. Status EU-25:

- K.-Fo<A4
- so.K.
- K.-Vb
- Aluh.-Vb
- PPK-Vb

	LVP-Zusammensetzung (2 Mio t LVP)		Summe Produktanteile (nur Verkaufsverpackungen)				Schwellenwert EU-25	absolute Produktanteile ohne Grenzmaterialgruppe (GM)	
	relativ	absolut	relativ		absolut			Status Quo	opt. Status
			Status Quo	opt. Status	Status Quo	opt. Status			
Kunststoffe					223.424	328.674	205.555	84.700	180.312
Folien > DIN A4	7,9%	158.000	87,8%	93,9%	138.724	148.362		GM	GM
Folien < DIN A4	4,5%	90.000	72,5%	87,6%	X	X			
Flaschen	5,0%	100.000	84,7%	85,0%	84.700	85.000			
Becher	5,6%	112.000	76,0%	85,1%	X	95.312			
Styropor	1,3%	26.000							
sonst. Kunststoffe	5,1%	102.000	61,4%	72,2%	X	X			
Verbunde					240.250	257.550	135.055	99.946	106.660
Kunststoff-Verbunde	0,8%	16.000	64,0%	83,4%	X	X			
Verbunde auf Alubasis	0,8%	16.000	63,6%	85,0%	10.176	13.600			
aluhaltige Verbunde	1,2%	24.000	57,8%	81,9%	X	X			
Weißblech-Verbunde	4,7%	94.000	95,5%	99,0%	89.770	93.060			
sonst. PPK-Verbunde	1,2%	24.000	49,7%	80,0%	X	X			
FKN	7,9%	158.000	88,8%	95,5%	140.304	150.890		GM	GM
Aluminium					25.920	30.144	11.539		
Aluminium	1,6%	32.000	81,0%	94,2%	25.920	30.144			
Weißblech					342.300	346.500	92.402		
Weißblech	17,5%	350.000	97,8%	99,0%	342.300	346.500			
Rest	34,9%	698.000							
Summe	100,0%	2.000.000	63,9%	74,0%	831.894	962.868			

Tabelle 4.2.3: Zur Herleitung der Mengengerüste der Szenarien EU-25

Das Szenario Status quo EU-25 entspricht weitgehend der aktuellen Diskussion um die Ausgrenzung kleinteiliger Kunststoffe.

Es gelingt bei den einzelnen Szenarien nicht, die Schwellenwerte exakt einzustellen. Es ergeben sich jeweils Grenzmaterialgruppen, die ausschlaggebend dafür sind, ob ein Schwellenwert unter - oder überschritten wird.

Angesichts des modellhaften Charakters der Berechnungen wurde die Grenzmaterialgruppe jeweils im System belassen.

4.3 Errechnung der Systemkosten

4.3.1 Berechnungsgrundlagen

Die Berechnungsgrundlagen zur Quantifizierung der Veränderung der Systemkosten wurden im Vergleich zu den in Kapitel 2 im Wesentlichen unverändert übernommen. Notwendige Anpassungen und Festlegungen, die szenarienabhängig vorzunehmen waren, sind nachfolgend dokumentiert.

- Erfassungskosten

Wie bereits erwähnt, setzt die Aufgabenstellung einer Quotenerfüllung auf niedrigerem Niveau durch gezielte Abschöpfung einzelner Materialgruppen eine ebenso intensive Erfassung voraus, wie sie zurzeit praktiziert wird. Aufgrund der geringen Mengenabhängigkeit der Erfassungskosten wurden die absoluten Kosten für alle Szenarien unverändert zum Referenzszenario (Null-Variante/d.h. keine Systemveränderung) belassen. Hier wird angenommen, dass die effektiven Einsparungen, die sich bei geringeren Erfassungsmengen ergeben, durch eine Erhöhung der Transportkosten bei einer verkleinerten Anzahl weiterhin leistungsfähiger Anlagen in etwa kompensiert werden.

- Erfassungsmengen

Bei dieser maßgeblichen Größe für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bestehen die größten Unsicherheiten in der Abschätzung. Es kann sicherlich nicht davon ausgegangen werden, dass eine 100%ige Umsetzung einer geänderten Systemzuweisung seitens der Endverbraucher vollzogen wird. Ein solcher Ansatz wäre angesichts der derzeitigen Ergebnisse der getrennten Erfassung nicht zu rechtfertigen. Es ist vielmehr nach den Erfahrungen mit Systemumstellungen anzunehmen, dass zu Beginn einer geänderten Systemzuweisung keine merkliche Veränderung stattfindet und dann in einer Art Hysteresekurve eine Anpassung der Mengenentwicklung im Vergleich zur Systemeinführung stattfindet.

Ansätze zur Mengenprognose fehlen, so dass an dieser Stelle ein Pauschalansatz vorgenommen wurde. Allen Berechnungen wurde zugrunde gelegt, dass 50 % der Verpackungen, die aus dem System ausgeschlossen werden sollen auch tatsächlich aus dem LVP-Bereich in das Restmüllgefäß transferiert werden.

- Inputmengen der Anlagen

Wie an anderer Stelle bereits ausgeführt, sind die Betriebskosten der Sortierung stark durchsatzabhängig. Würde in diesem Punkt unterstellt, dass geringere Sam-

melismengen bei gleichem Anlagenbestand verarbeitet würden, wären absolut gesehen nur geringfügige Einsparungen zu verzeichnen.

In Anlehnung an die allgemeine Entwicklung bezüglich des Trends zur Anlagenkapazitätssteigerung würde daher angesetzt, dass die einzelnen Inputmengen unverändert bleiben und sich somit die Anzahl der Anlagen (und damit die Kosten) proportional zum Mengenrückgang beim jeweiligen Szenario verringern. Zusätzliche Transportkosten, die sich hieraus ableiten, wurden vernachlässigt (siehe Erfassungskosten).

- Spezifische Sortierkosten

Die spezifischen Sortierkosten wurden unter o.g. Prämisse gleichbleibender Anlagendurchsätze jeweils szenarienabhängig neu ermittelt. Hierbei wurden die Betriebskostenanteile (Kapitalkosten für Funktionsmaschinen, Sortierpersonalkosten etc.) für im jeweiligen Szenario nicht mehr benötigten Funktionsgruppen eliminiert.

- Produktionsmengen

Die Kosten für die Verwertung bestimmen sich einheitlich durch Multiplikation der jeweils erzeugten Produktionsmengen mit den in Tabelle 2.2.5 ausgewiesenen Ansätzen. Die Produktionsmengen für die einzelnen Szenarien lassen sich nicht 1:1 aus den Tabellen 4.2.1 bis 4.2.3 entnehmen, da hier idealisiert nur Verkaufsverpackungen dokumentiert sind. Reale Sortierfraktionen weisen aber einen gewissen Anteil an Verunreinigung bzw. stoffidentischen Nicht-Verpackungen auf.

Dies ist insofern zwecks möglichst realitätsnaher Abbildung berücksichtigt, als dass die idealisierten Werte mittels der üblichen Produktspezifikation bereinigt wurden.

- Kostenbelastung von ausgeschlossenen Materialgruppen

Kostenbelastungen für die in die Restmüllfassung umgeleiteten Verpackungen sind in der Kostenrechnung nicht berücksichtigt.

Sie sind zunächst lediglich als „virtuelle“ Kosten aufzufassen.

Werden massenproportionale Ansätze gewählt, ist für die Beseitigung nach aktuellen Kenntnissen bei erheblicher regionaler Schwankungsbreite im Beseitigungsmix von ca. 350,- DM/t auszugehen [UBA 1998 (1), UBA 1998 (2)].

Bei spezifischer sehweise, d.h. verursachungsgerechter Kostenzuweisung z.B. nach Heizwert oder Volumenbedarf, werden von anderen Verfassern Durchschnittskosten von bis zu 770,- DM/t zu Grunde gelegt [Öko-Institut 2000].

Vergleichende Untersuchungen ausgewählter Szenarien

4.3.2 Ergebnisse

Die nach vorgenannter Methode ermittelten Kosten sind den Kalkulationsübersichten in Tabelle 4.3.1 für die Szenaren EU-45 und EU-25 zu entnehmen.

opt. Status - alte Spezifikation											
Nullvariante			Szenario EU-45			Szenario EU-25					
Jahresmenge	2.000.000 t/a		Jahresmenge	1.762.349 t/a		Jahresmenge	1.667.964 t/a				
Erfassung	390 DM/t	780.000.000 DM/a	Erfassung	443 DM/t	780.000.000 DM/a	Erfassung	468 DM/t	780.000.000 DM/a			
Sortierung	447 DM/t	893.437.485 DM/a	Sortierung	403 DM/t	710.414.106 DM/a	Sortierung	390 DM/t	651.182.872 DM/a			
Verwertung			Verwertung			Verwertung					
Weißblech	460.808 t/a	-27.648.482 DM/a	Weißblech	460.363 t/a	-27.621.761 DM/a	Weißblech	460.462 t/a	-27.627.699 DM/a			
Aluminium	72.751 t/a	0 DM/a	Aluminium	63.151 t/a	-11.367.252 DM/a	Aluminium	63.306 t/a	-11.395.123 DM/a			
FKN	162.247 t/a	4.867.419 DM/a	FKN	162.247 t/a	4.867.419 DM/a	FKN	162.247 t/a	4.867.419 DM/a			
Folien	159.147 t/a	90.411.139 DM/a	Folien	152.983 t/a	86.909.914 DM/a	Folien	152.983 t/a	86.909.914 DM/a			
MKS	372.613 t/a	217.978.758 DM/a	MKS	123.878 t/a	72.468.630 DM/a	MKS		0 DM/a			
Polymerprodukte	63.579 t/a	32.699.924 DM/a	Polymerprodukte	93.137 t/a	47.902.141 DM/a	Polymerprodukte	93.137 t/a	47.902.141 DM/a			
PPK-Verbunde	70.752 t/a	26.885.760 DM/a	PPK-Verbunde		0 DM/a	PPK-Verbunde		0 DM/a			
Produkt	1.361.897 t/a	345.194.518 DM/a	Produkt	1.055.760 t/a	173.159.092 DM/a	Produkt	932.136 t/a	100.656.652 DM/a			
Gesamtkosten		2.020.000.000 DM/a			1.660.000.000 DM/a			1.530.000.000 DM/a			
opt. Status - neue Spezifikation											
Nullvariante			Szenario EU-45			Szenario EU-25					
Jahresmenge	2.000.000 t/a		Jahresmenge	1.827.155 t/a		Jahresmenge	1.762.349 t/a				
Erfassung	390 DM/t	780.000.000 DM/a	Erfassung	427 DM/t	780.000.000 DM/a	Erfassung	443 DM/t	780.000.000 DM/a			
Sortierung	477 DM/t	954.101.560 DM/a	Sortierung	421 DM/t	769.530.145 DM/a	Sortierung	428 DM/t	753.908.632 DM/a			
Verwertung			Verwertung			Verwertung					
Weißblech	460.808 t/a	-27.648.482 DM/a	Weißblech	460.363 t/a	-27.621.761 DM/a	Weißblech	460.363 t/a	-27.621.761 DM/a			
Aluminium	72.835 t/a	0 DM/a	Aluminium	63.235 t/a	-11.382.279 DM/a	Aluminium	63.235 t/a	-11.382.279 DM/a			
FKN	162.247 t/a	4.867.419 DM/a	FKN	162.247 t/a	4.867.419 DM/a	FKN	162.247 t/a	4.867.419 DM/a			
große Folien	159.147 t/a	90.395.224 DM/a	große Folien	155.813 t/a	88.501.940 DM/a	große Folien	22.275 t/a	12.652.200 DM/a			
MKS	167.814 t/a	98.171.393 DM/a	MKS	41.324 t/a	24.174.540 DM/a	MKS		0 DM/a			
PPK-Verbunde	70.752 t/a	26.885.760 DM/a	PPK-Verbunde		0 DM/a	PPK-Verbunde		0 DM/a			
PE	118.726 t/a	17.808.868 DM/a	PE	106.903 t/a	16.035.395 DM/a	PE	106.903 t/a	16.035.395 DM/a			
PP	34.935 t/a	6.986.947 DM/a	PP	7.895 t/a	1.578.947 DM/a	PP	7.895 t/a	1.578.947 DM/a			
PS	63.105 t/a	3.155.237 DM/a	PS	46.903 t/a	2.345.132 DM/a	PS	46.903 t/a	2.345.132 DM/a			
PET	23.987 t/a	3.598.105 DM/a	PET	21.579 t/a	3.236.842 DM/a	PET	21.579 t/a	3.236.842 DM/a			
Produkt	1.334.356 t/a	224.220.473 DM/a	Produkt	1.066.261 t/a	101.736.175 DM/a	Produkt	891.399 t/a	1.711.896 DM/a			
Gesamtkosten		1.960.000.000 DM/a			1.650.000.000 DM/a			1.540.000.000 DM/a			

Tabelle 4.3.1: Kalkulationsübersicht für die Szenarien EU 45 und EU-25

Ausgewiesen sind hierin jeweils für die einzelnen Szenaren die spez. Erfassungskosten sowie die errechneten Sortierkosten, die mit der abgeschätzten Jahresinputmenge multipliziert die jeweiligen Jahreskosten ergeben. Untenstehend ist das Ergebnis der Produktionsmengenschätzung ablesbar; multipliziert mit den spez. Verwertungskosten errechnen sich die jeweiligen Zuzahlungen bzw. Erlöse für die Veredlungs- und Verwertungsstufen.

Die Zahlen für die Szenarien EU-45 und EU-25 sind jeweils den Ergebnissen der Nullvariante gegenübergestellt. Diese bildet das Referenzszenario unter der Annahme unveränderter Systemzuweisung.

Auf Rundungen bei Einzelpositionen wurde verzichtet; die Gesamtsystemkosten sind auf 10 Mio. DM gerundet.

Unabhängig von der technischen Ausgestaltung des Systems lassen die Ergebnisse für die Szenarien EU-45 einen Kostenrückgang von ca. 300-350 Mio. DM/a und für die

Szenarien EU-25 einen Systemkostenminderung in der Größenordnung von 400-500 Mio. DM/a erwarten.

Diese Angaben beinhalten nicht die Kosten, die den jeweils nicht mehr systemzugehörigen Verpackungen auf der Restabfallseite anzulasten sind.

Werden diese in der vorher skizzierten Bandbreite als reine Beseitigungskosten mitberücksichtigt, reduziert sich die ökonomische Gutschrift bei Systemausschluß in der graphisch exemplarisch dargestellten Größenordnung gegenüber der Nullvariante (s. Abbildung 4.3.1).

O. a. absolute Zahlen sind angesichts der Vielzahl von Annahmen, die zur Kostenkalkulation getroffen werden mussten, mit Vorbehalten zu versehen. An den Modellrechnungen sind aber verallgemeinerlose Gesetzmäßigkeiten abzuleiten, die an nachfolgenden graphischen Auswertungen aufgezeigt werden sollen.

Vergleichende Untersuchungen ausgewählter Szenarien

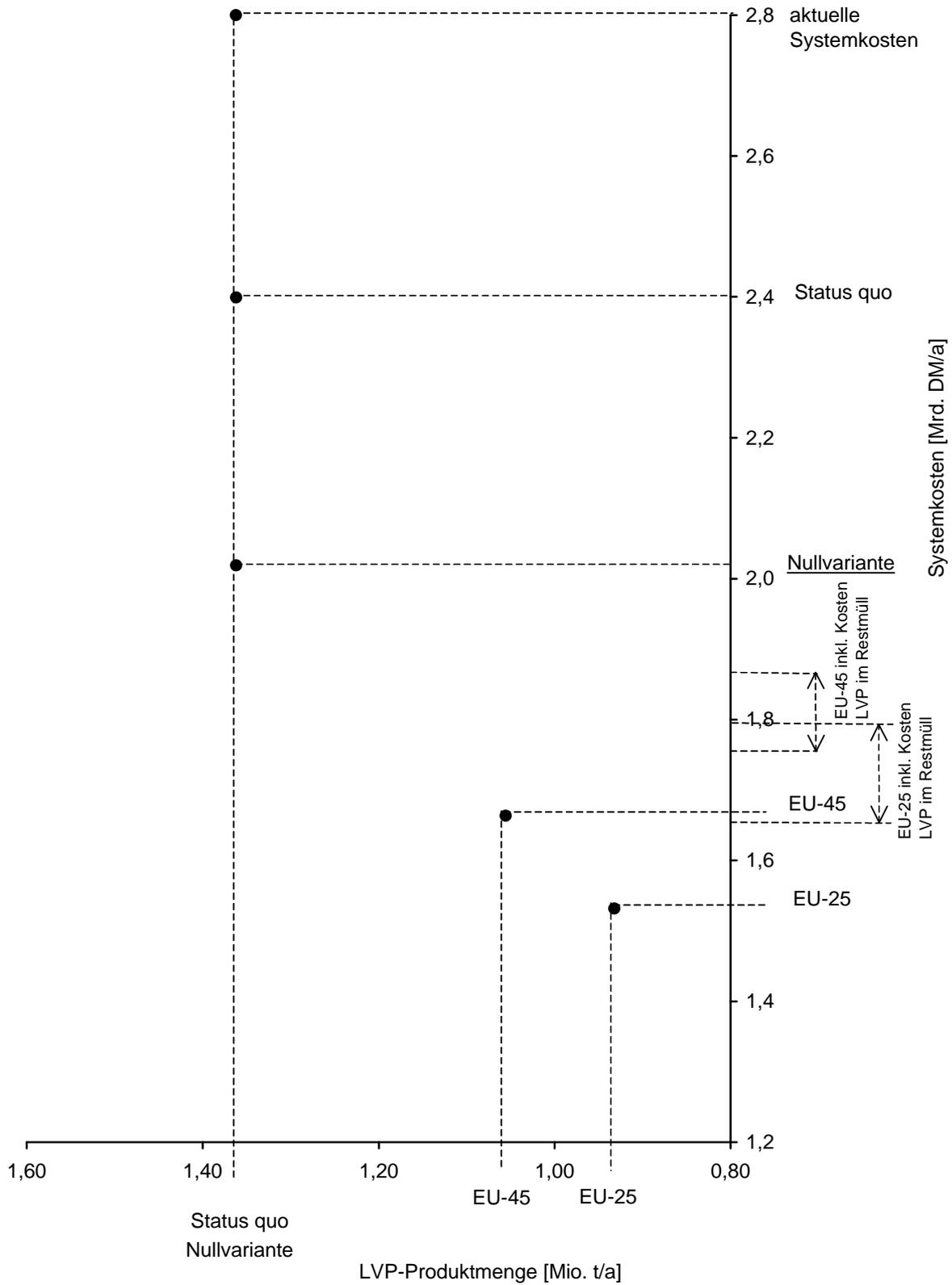


Abbildung 4.3.1: Systemkosten für Nullvariante und Szenarien EU-45 und EU-25 Status quo

Abbildung 4.3.1 zeigt zunächst eine Auftragung der Systemkosten für Nullvariante und Szenarien EU-45 und EU-25 über die jeweils resultierenden Produktmengen.

Zur Orientierung sind die aktuellen Systemkosten des Dualen Systems für den LVP-Bereich sowie das Ergebnis der Berechnung für den Status quo vermerkt.

DSD/DKR verausgaben z. Zt. für den LVP-Bereich inkl. Verwertungskosten für Kunststoffe und PPK-Verbunde ca. 2,8 Milliarden DM. Nach Status quo Berechnungen liegen die tatsächlichen Aufwendungen bei 2,4 Milliarden DM/a. Die Differenz kann auf noch nicht erfolgte Vertragsanpassung an die gestiegene Effizienz der Sortiertechnologie zurückgeführt werden. Bei konsequenter Umsetzung des Standes der Technik stellt sich die Nullvariante bei ca. 2,0 Milliarden DM ein. Hiermit ist zu rechnen, wenn eine Neuvergabe der Leistungsverträge durch Ausschreibungen erfolgt sind. Für alle genannten Positionen beträgt das Produktionsmengeniveau ca. 1,4 Mio. t/a. Die Szenarien EU-45 und EU-25 lassen im Mittel in etwa nochmals einen Kostenrückgang in der Größenverordnung erwarten, wie er für die Neuverhandlung der Verträge prognostiziert wird. Hiermit ist aber erstmals eine Rückführung der Produktionsmengen vorhanden. Aus Abbildung 4.3.1 ist ablesbar, dass dieser überproportional zum Kostenrückgang verläuft.

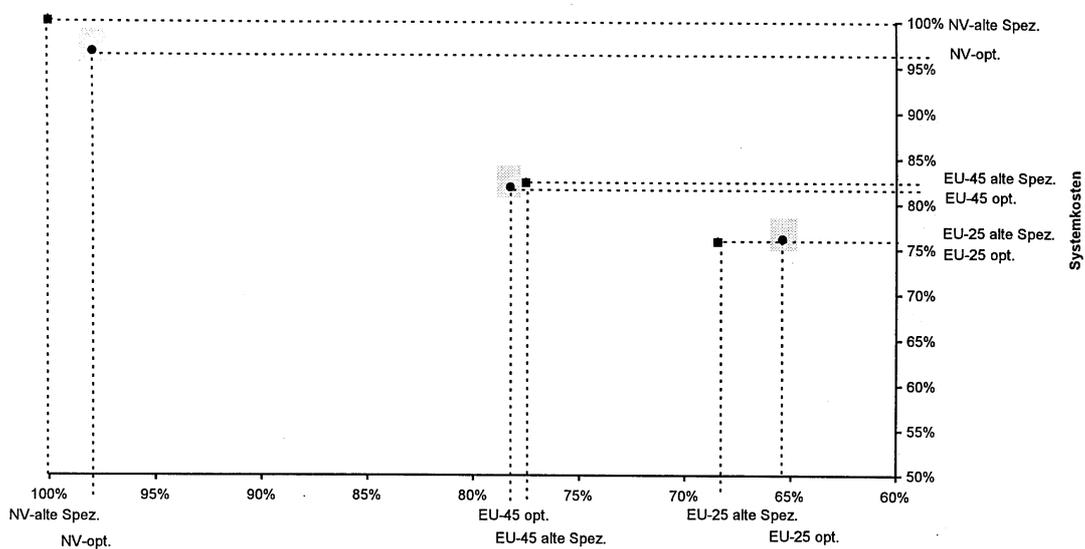


Abbildung 4.3.2: Systemkostenmodellierung für unterschiedliche Mengenszenarien

Deutlicher ist dies der Abbildung 4.3.2 zu entnehmen, in der die relative Kostenveränderung über die relative Produktionsmengenveränderung aufgetragen ist. An den Endpunkten gedachter Verbindungslinien der einzelnen Szenarien sind bei Systemkostenreduzierungen von etwas unterhalb von 25 % die Produktionsmengen um ca 32-38 % rückläufig.

Vergleichende Untersuchungen ausgewählter Szenarien

Dies bedeutet, dass die spezifischen Kosten für die Produktionsmengen umso höher werden, je umfangreicher ein Systemausschluss vollzogen wird. Dass heißt aber gleichzeitig, dass die Kosten für die im System verbliebenen Materialgruppen spezifisch steigen.

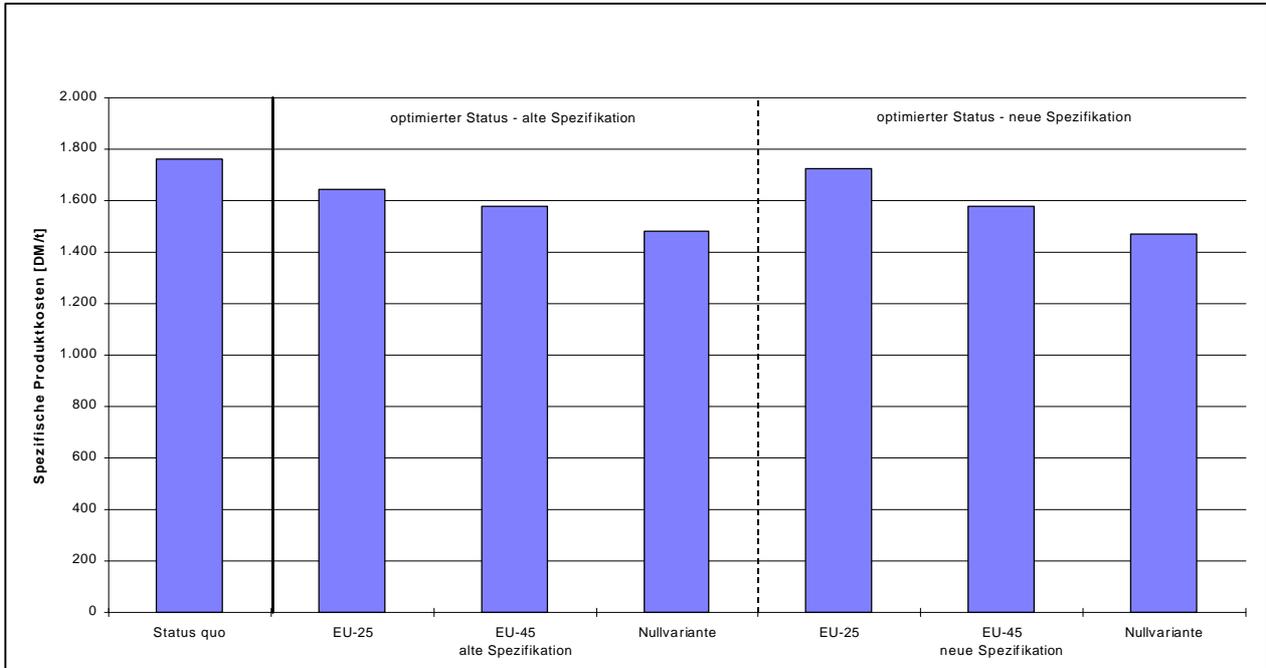


Abbildung 4.3.3: Spezifische Produktkosten unterschiedlicher Szenarien

Abbildung 4.3.3 zeigt eine entsprechende Auswertung in Form eines Balkendiagramms.

5 LITERATUR

- [AGVU 1999] AGVU (Hrsg.): Vergleich der rohstofflichen und energetischen Verwertung von Verpackungstoffen. Öko-Institut e.V., Darmstadt und Deutsche Projekt Union, Essen 1999
- [BlfA GmbH 1998] Bayrisches Institut für Abfallforschung: Maßnahmen zur Kostensenkung für die Lizenznehmer der DSD AG, BlfA-Texte Nr. 10, 1998
- [Christiani 1997] Christiani, Joachim „Kreislaufwirtschaft nach dem Muster der Verpackungsverordnung“, Shaker Verlag 1997
- [DKR 1999] DKR, Daten zu Kunststoffverwertung, unveröffentlicht
- [DSD 1997] DSD, Mengenstromnachweis 1996, unveröffentlicht
- [DSD 1998] DSD, Mengenstromnachweis 1997, unveröffentlicht
- [DSD 1999] DSD, Mengenstromnachweis 1998, unveröffentlicht
- [GVM 2000] GVM, Daten zur Kunststoffzusammensetzung, unveröffentlicht
- [Heyde und Kremer 1999] Heyde, M. und Kremer, M.: Recycling and Recovery of Plastics from Packagings in Domestic Waste. Eco-Infoma Press, Vol. 5, 1999.
- [HTP 1995 – 1999] Untersuchungen und Bilanzierungen von Sortieranlagen durch HTP aus den Jahren 1995, 96, 97 98, 99; unveröffentlicht
- [HTP 1997] HTP Planungsunterlagen zur Anlage AWA Milkel, unveröffentlicht
- [HTP 1998 (2)] HTP Planungsunterlagen und Versuchsergebnisse der Sortec-Anlage, unveröffentlicht
- [HTP 1998] HTP Planungsunterlagen zur Anlage Remex Stuttgart, unveröffentlicht
- [HTP 1999] HTP „Grundlagen zur Ermittlung von Erfassungsmengen im Rahmen des Nachweises nach Verpackungsverordnung“, April 1999
- [HTP 2000] HTP „Grundlagen zur Ermittlung von Erfassungsmengen im

LITERATUR

- Rahmen des Nachweises nach Verpackungsverordnung“, April 2000
- [HTP/INFA 1999] Optimierung von Getrennterfassungssystemen des Dualen Systems unter Berücksichtigung von Sammelleistung, Wirtschaftlichkeit und Hygiene“, Studie im Auftrag des Kuratoriums der DSD AG 1999
- [ifeu 1999] Abfallwirtschaftliche und ökobilanzielle Grundlagen für die Aufstellung eines Abfallwirtschaftsplanes für Kläranlagenabfälle, ifeu, November 1999, Entwurf.
- [ifeu 2000] Persönliche Mitteilung durch Herrn Dr. Dölling, VAW Aluminium AG und Besuch einer Aluminium-Pyrolyseanlage am 2.5.2000
- [IKKV 1995] Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz: Interkommunaler Kennzahlenvergleich für die kommunale Abfallentsorgung in Rheinland-Pfalz - IKKV 1995, Mainz 1997
- [IVV 2001] Bez, J. et al.: Methanol aus Abfall. Ökobilanz bescheinigt gute Noten. Fraunhofer IVV, Freising. Müll und Abfall 3, 2001
- [ÖKO 1995] Informationen aus der Studie des Öko-Instituts: Vergleichende Ökobilanz des Kunststoffeinsatzes im Hochofen. Öko-Institut, Darmstadt 1995, unveröffentlicht
- [Öko-Institut/DPU 1999] „Vergleich der rohstofflichen und energetischen Verwertung von Verkaufsverpackungen“, Studie im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Verpackung und Umwelt, Darmstadt/Essen 1999
- [Öko-Institut 2000] Wollny, V., Schmitt, B. „Auswirkungen der vom Rat der Sachverständigen für Umweltfragen vorgeschlagenen Reform der Verpackungsverordnung auf Mengenströme und Kosten“, Öko-Institut, Darmstadt Mai 2000
- [SVZ 2000] Herr Obermeier: Betriebserfahrungen des SVZ Schwarze Pumpe. 5. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung, Kassel 2000
- [UBA 1995] Ökobilanz Getränkeverpackungen UBA-Texte 52/95

LITERATUR

- [UBA 2000] Ökobilanz für graphische Papiere. UBA-Texte 22/00
- [UBA 1999] Giegrich, J., Fehrenbach, H., Orlik, W. und Schwarz, M: Ökologische Bilanzen in der Abfallwirtschaft. Abschlussbericht des ifeu (Heidelberg) im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, Forschungsvorhaben 294 31 606. Februar 1999. Uba-Texte 10/99.
- [UBA 2000a] Bewertung in Ökobilanzen. Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043. UBA-Texte 92/99.
- [UBA 2000b] Ökobilanz für Getränkeverpackungen II. UBA Texte 37/00 (Hauptteil) und 38/00 (Materialsammlung)
- [UBA Österreich 1998] Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie Österreich 1998: Kosten-Nutzen-Analyse der Kunststoffverwertung, Monographien, Band 98, 1998
- [UBA 1998 (1)] Analyse der Kostenstruktur der kommunalen Abfallentsorgung, Texte 32/98 1998
- [UBA 1998 (2)] Kosten und Gebühren in der kommunalen Abfallentsorgung - Mögliche Maßnahmen zur Dämpfung von Gebührensteigerungen sowie Entwicklung eines Kalkulations- und Simulationsmodells; Oktober 1998
- [UBA, 2000c] Fehrenbach, H. und Kohlshorn, K.: Ökologische Bilanzierung von Altöl-Verwertungswegen. Abschlussbericht der Projektgemeinschaft ifeu (Heidelberg) und ARCADIS (Darmstadt) im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, Forschungsvorhaben 203 01 382. Januar 2000.
- [Uhlig 1993] Uhlig, D.E.: Qualitätssicherungsmaßnahmen an der Schnittstelle Erfassung-Sortierung/Verwertung im Dualen System; in: Entsorga Schriften 9, Köln 1993
- [VAW 2000] „Ökologische Effizienz der stofflichen Verwertung der DSD-Aluminium-Verpackungs-Fraktion durch Pyrolyse“, VAW AG, 2000; unveröffentlicht (Anlage zum MSN 1999)

Anhang zum Kapitel 2.2

2.2.1	Fraktionspreise der technischen Varianten	206
2.2.2	Gesamtübersicht Kosten einzelner Stoffgruppen	207

2.2.1 Fraktionspreise der technischen Varianten

Fraktionspreise der technischen Varianten

Variante	Status quo			opt. Status	Sortec
	Variante 1	Variante 2	Variante 3		
Fraktion					
Weißblech	651 DM/t	483 DM/t	438 DM/t	447 DM/t	267 DM/t
Aluminium	1.677 DM/t	569 DM/t	540 DM/t	552 DM/t	512 DM/t
FKN	1.668 DM/t	1.171 DM/t	701 DM/t	711 DM/t	419 DM/t
gr. Folien	1.643 DM/t	1.020 DM/t	978 DM/t	993 DM/t	
MKS	1.721 DM/t			1.305 DM/t	
MKS formstabiler Anteil		1.370 DM/t	628 DM/t		
MKS flächiger Anteil		1.087 DM/t	1.006 DM/t		
PE				726 DM/t	1.315 DM/t
PP				716 DM/t	
PS				742 DM/t	2.094 DM/t
PET				1.205 DM/t	901 DM/t
PO-Agglomerat					509 DM/t
Flaschen	1.607 DM/t	1.031 DM/t	1.244 DM/t		
PPK-Vb	3.307 DM/t	2.100 DM/t	1.867 DM/t	1.804 DM/t	
Faserstoffe					1.228 DM/t

Anhang zum Kapitel 2.2

2.2.2 Gesamtübersicht Kosten einzelner Stoffgruppen

Stoffgruppe	Status quo			opt. Status			Sortec
Erfassung Kosten für die Sortierung Kosten für Aufbereit/Transp	Folien > DIN A4			Folien > DIN A4			Folien > DIN A4
	600,0			600,0			600,0
	1.178,1			1.049,0			784,0
	247,7	40,6% PE-Reg.	610,0 DM/t	310,5	50,9% PE-Reg.	610,0 DM/t	
	97,3	21,3% w.V.H.	457,0 DM/t	118,4	25,9% w.V.H.	457,0 DM/t	
Summe	151,5	25,9% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	100,0	17,1% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	1.384,0
Erfassung Kosten für die Sortierung Kosten für Aufbereit/Transp	Folien < DIN A4			Folien < DIN A4			Folien < DIN A4
	600,0			600,0			600,0
	1.077,9			1.182,2			597,9
	36,8	6,0% PE-Reg.	610,0 DM/t	25,6	4,2% PE-Reg.	610,0 DM/t	
	28,3	6,2% w.V.H.	457,0 DM/t	19,2	4,2% w.V.H.	457,0 DM/t	
Summe	352,8	60,3% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	463,3	79,2% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	1.197,9
Erfassung Kosten für die Sortierung Kosten für Aufbereit/Transp	Flaschen			Flaschen alte Spezifikation			Flaschen
	600,0			600,0			600,0
	1.185,2			760,2			555,9
	336,8	67,9% Flaschenrec	496,0 DM/t	299,6	60,4% Flaschenrec	496,0 DM/t	
	3,7	0,8% w.V.H.	457,0 DM/t	5,5	1,2% w.V.H.	457,0 DM/t	
Summe	93,6	16,0% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	136,9	23,4% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	1.155,9
Erfassung Kosten für die Sortierung Kosten für Aufbereit/Transp	Flaschen			Flaschen neue Spezifikation			
	600,0			600,0			
	760,2			760,2			
	85,5	57,0% PE-Reg.	150,0 DM/t	15,0	7,5% PP-Reg.	200,0 DM/t	
	30,8	20,5% PET	150,0 DM/t	30,8	20,5% PET	150,0 DM/t	
Summe				1.491,5			
Erfassung Kosten für die Sortierung Kosten für Aufbereit/Transp	Becher			Becher alte Spezifikation			Becher
	600,0			600,0			600,0
	994,4			917,0			917,0
	21,3	3,8% Becherrecy	560,0 DM/t				
	21,3	3,8% Becherrecy	560,0 DM/t				
Summe	19,2	4,2% w.V.H.	457,0 DM/t	15,1	4,3% w.V.H.	350,0 DM/t	
Erfassung Kosten für die Sortierung Kosten für Aufbereit/Transp	Becher			Becher neue Spezifikation			
	376,7	64,4% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	472,7	80,8% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	
	2.032,9			2.004,7			1.517,0
	600,0			600,0			
	917,0			917,0			
Summe				56,3	37,5% PE-Reg.	150,0 DM/t	
				-18,8	37,5% PS-Reg.	-50,0 DM/t	
				2,3	0,5% w.V.H.	457,0 DM/t	
				55,6	9,5% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	
Summe				1.612,3			
Erfassung Kosten für die Sortierung Kosten für Aufbereit/Transp	Kunststoff-Verbunde			Kunststoff-Verbunde			Kunststoff-Verbunde
	600,0			600,0			600,0
	1.228,4			1.139,0			528,2
	14,6	3,2% w.V.H.	457,0 DM/t	19,2	4,2% w.V.H.	457,0 DM/t	
	355,7	60,8% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	463,3	79,2% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	
Summe	2.198,7			2.221,5		1.128,2	

Anhang zum Kapitel 2.2

	sonst. Kunststoffe			sonst. Kunststoffe	alte Spezifikation		sonst. Kunststoffe
Erfassung	600,0			600,0			600,0
Kosten für die Sortierung	887,1			731,6			762,9
Kosten für Aufbereit/Transp	14,2	3,1% w.V.H.	457,0 DM/t	17,4	3,8% w.V.H.	457,0 DM/t	
	341,1	58,3% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	400,1	68,4% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	
Summe	1.842,3			1.749,1			1.362,9
				sonst. Kunststoffe	neue Spezifikation		
Erfassung				600,0			
Kosten für die Sortierung				731,6			
Kosten für Aufbereit/Transp				16,2	10,8% PE	150,0 DM/t	
				49,4	24,7% PP	200,0 DM/t	
				-7,4	14,8% PS	-50,0 DM/t	
				3,3	2,2% PET	150,0 DM/t	
				4,6	1,0% w.V.H.	457,0 DM/t	
Summe				108,2	18,5% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	
				1.505,9			
	sonst. PPK-Verbunde			sonst. PPK-Verbunde			sonst. PPK-Verbunde
Erfassung	600,0			600,0			600,0
Kosten für die Sortierung	1.257,8			1.438,5			1.161,3
Kosten für Aufbereit/Transp	152,8	40,2% Altpap.	380,0 DM/t	266,0	70,0% Altpap.	380,0 DM/t	
	3,7	1,2% Alu	306,0 DM/t	3,7	1,2% Alu	306,0 DM/t	
	0,2	0,8% WB	20,0 DM/t	0,2	0,8% WB	20,0 DM/t	
	1,8	0,4% w.V.H.	457,0 DM/t	1,8	0,4% w.V.H.	457,0 DM/t	
	41,5	7,1% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	44,5	7,6% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	
Summe	2.057,8			2.354,6			1.761,3
	FKN			FKN			FKN
Erfassung	600,0			600,0			600,0
Kosten für die Sortierung	1.066,0			692,4			493,7
Kosten für Aufbereit/Transp	25,6	85,4% FKN-Auf	30,0 DM/t	28,7	95,5% FKN-Auf	30,0 DM/t	
	19,9	3,4% Aluminium	584,0 DM/t				
Summe	1.711,5			1.321,1			1.093,7
	Aluminium			Aluminium			Aluminium
Erfassung	600,0			600,0			600,0
Kosten für die Sortierung	844,9			538,2			-428,8
Kosten für Aufbereit/Transp	-851,3	81,0% Aluminium	-1.051,0 DM/t	-990,0	94,2% Aluminium	-1.051,0 DM/t	
Summe	593,6			148,1			171,2
	Aluhaltige VB			Aluhaltige VB			Aluhaltige VB
Erfassung	600,0			600,0			600,0
Kosten für die Sortierung	830,6			583,6			722,8
Kosten für Aufbereit/Transp	94,2	34,9% Aluminium	270,0 DM/t	194,4	72,0% Aluminium	270,0 DM/t	
	32,7	8,6% Altp.	380,0 DM/t	14,1	3,7% Altp.	380,0 DM/t	
	2,3	0,5% w.V.H.	457,0 DM/t	0,9	0,2% w.V.H.	457,0 DM/t	
	54,4	9,3% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	23,4	4,0% Aggl. SVZ	585,0 DM/t	
	0,9	4,5% Stahlwerk	20,0 DM/t	0,4	2,0% Stahlwerk	20,0 DM/t	
Summe	1.615,1			1.416,8			1.322,8
	Verbunde auf Alubasis			Verbunde auf Alubasis			Verbunde auf Alubasis
Erfassung	600,0			600,0			600,0
Kosten für die Sortierung	750,0			515,5			-86,4
Kosten für Aufbereit/Transp	-473,8	56,0% Aluminium	-846,0 DM/t	-719,1	85,0% Aluminium	-846,0 DM/t	
	44,5	7,6% Aggl. SVZ	585,0 DM/t				
Summe	920,7			396,4			513,6

Anhang zum Kapitel 2.2

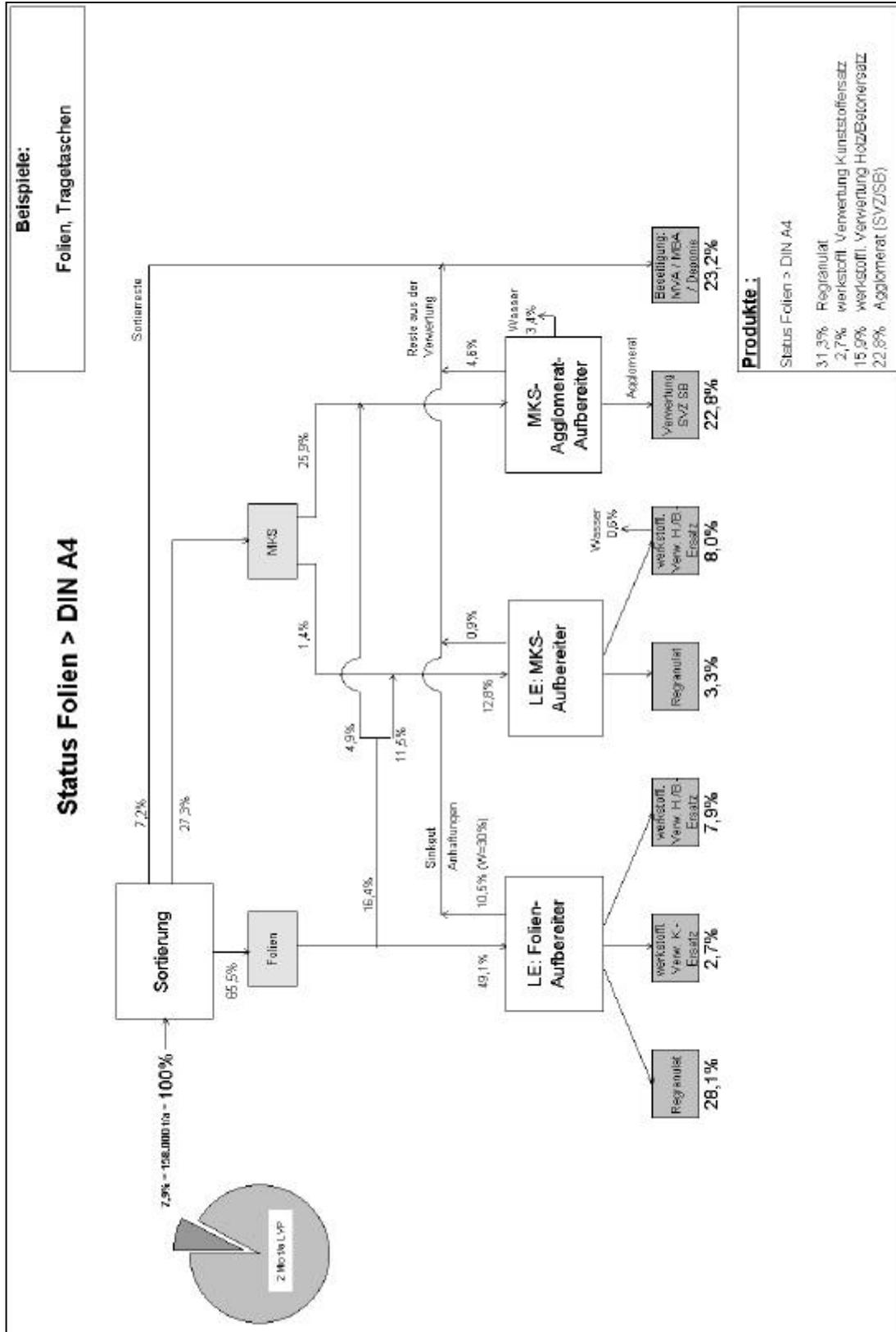
Erfassung	600,0			600,0			600,0
Kosten für die Sortierung	523,3			445,2			218,8
Kosten für Aufbereit/Transp							
Transport	-60,0	97,8% Stahlwerk	20,0 DM/t	-60,0	99,0% Stahlwerk	20,0 DM/t	
Summe	1.063,3			985,2			818,8
	Weißblech-Verbunde			Weißblech-Verbunde			Weißblech-Verbunde
Erfassung	600,0			600,0			600,0
Kosten für die Sortierung	518,3			445,2			218,8
Kosten für Aufbereit/Transp							
Transport	-60,0	95,5% Stahlwerk	20,0 DM/t	-60,0	99,0% Stahlwerk	20,0 DM/t	
Summe	1.058,3			985,2			818,8

Anhang zum Kapitel 3.1

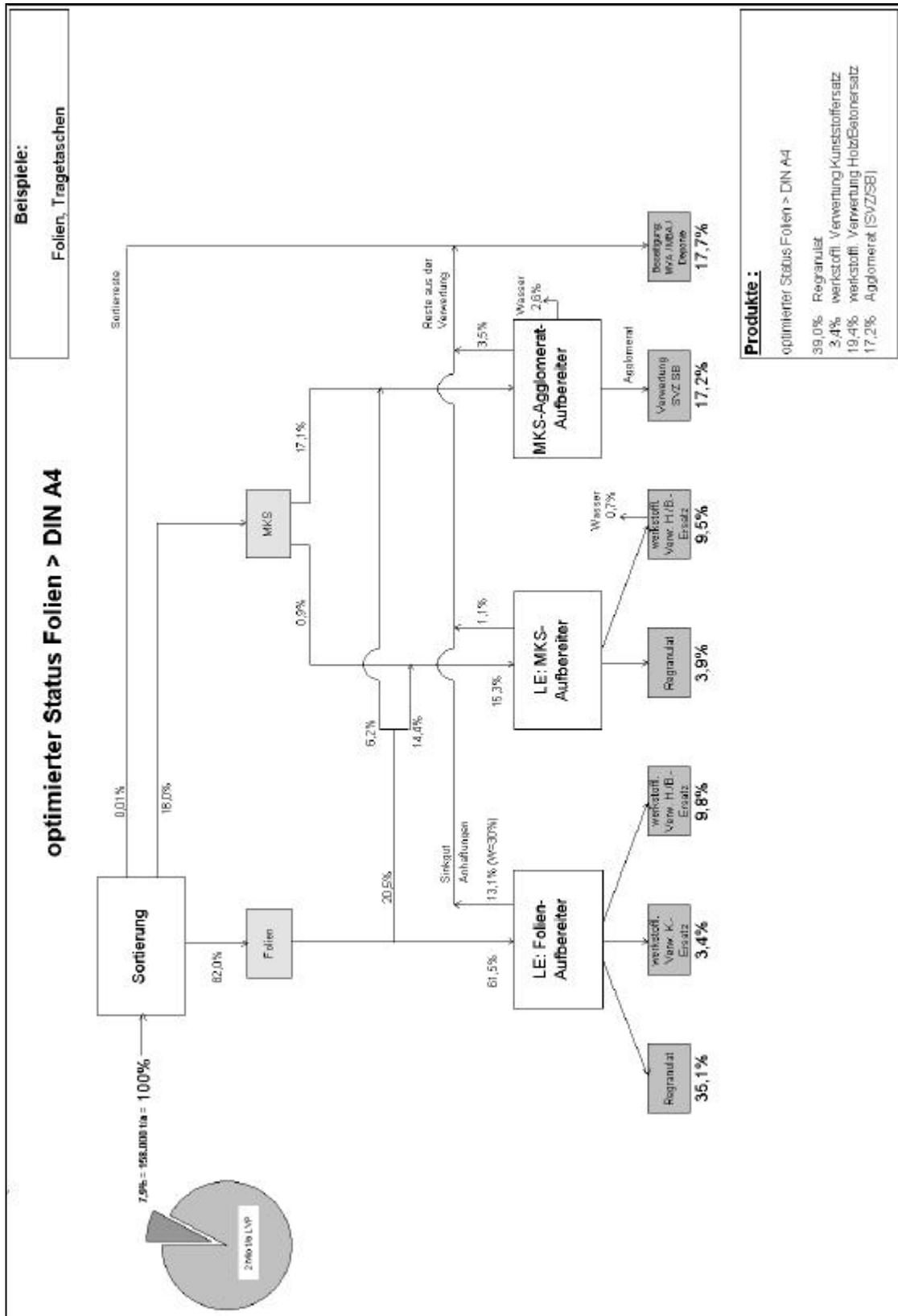
3.1.1	Folien >DIN A4 Status Quo.....	212
3.1.2	Folien >DIN A4 optimierter Status.....	213
3.1.3	Folien >DIN A4 Sortec	214
3.1.4	Folien < DIN A4 Status Quo.....	215
3.1.5	Folien < DIN A4 optimierter Status.....	216
3.1.6	Folien < DIN A4 Sortec	217
3.1.7	Kunststoffflaschen Status Quo.....	218
3.1.8	Kunststoffflaschen optimierter Status – Alte Spezifikation	219
3.1.9	Kunststoffflaschen optimierter Status – Neue Spezifikation	220
3.1.10	Kunststoffflaschen Sortec	221
3.1.11	Becher Status Quo	222
3.1.12	Becher optimierter Status – Alte Spezifikation	223
3.1.13	Becher optimierter Status – Neue Spezifikation	224
3.1.14	Becher Sortec	225
3.1.15	Sonstige Kunststoffe Status Quo	226
3.1.16	Sonstige Kunststoffe optimierter Status – Alte Spezifikation	227
3.1.17	Sonstige Kunststoffe optimierter Status – Neue Spezifikation.....	228
3.1.18	Sonstige Kunststoffe Sortec.....	229
3.1.19	Kunststoffverbunde Status Quo	230
3.1.20	Kunststoffverbunde optimierter Status	231
3.1.21	Kunststoffverbunde Sortec.....	232
3.1.22	Sonstige PPK-Verbunde Status Quo	233
3.1.23	Sonstige PPK-Verbunde optimierter Status	234
3.1.24	Sonstige PPK-Verbunde Sortec.....	235
3.1.25	Flüssigkeitskartons Status Quo	236
3.1.26	Flüssigkeitskartons optimierter Status	237

3.1.27	Flüssigkeitskartons Sortec.....	238
3.1.28	Weißblech Status Quo.....	239
3.1.29	Weißblech optimierter Status.....	240
3.1.30	Weißblech Sortec	241
3.1.31	Weißblechverbunde Status Quo	242
3.1.32	Weißblechverbunde optimierter Status	243
3.1.33	Weißblechverbunde Sortec.....	244
3.1.34	Aluminium Status Quo	245
3.1.35	Aluminium optimierter Status	246
3.1.36	Aluminium Sortec.....	247
3.1.37	Aluminiumverbunde Status Quo	248
3.1.38	Aluminiumverbunde optimierter Status	249
3.1.39	Aluminiumverbunde Sortec.....	250
3.1.40	Aluminiumhaltige Verbunde Status Quo	251
3.1.41	Aluminiumhaltige Verbunde optimierter Status	252
3.1.42	Aluminiumhaltige Verbunde Sortec.....	253

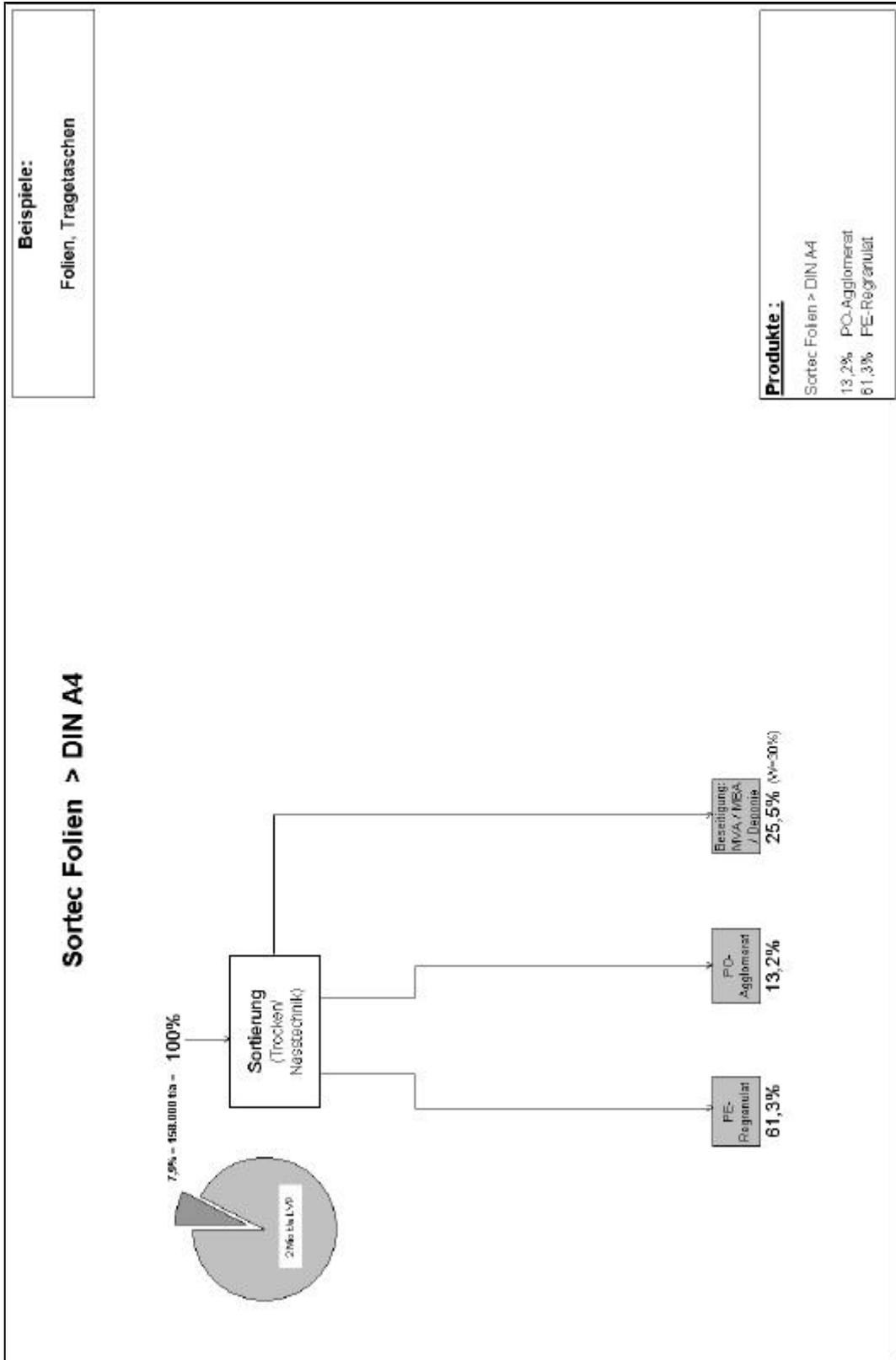
3.1.1 Folien >DIN A4 Status Quo



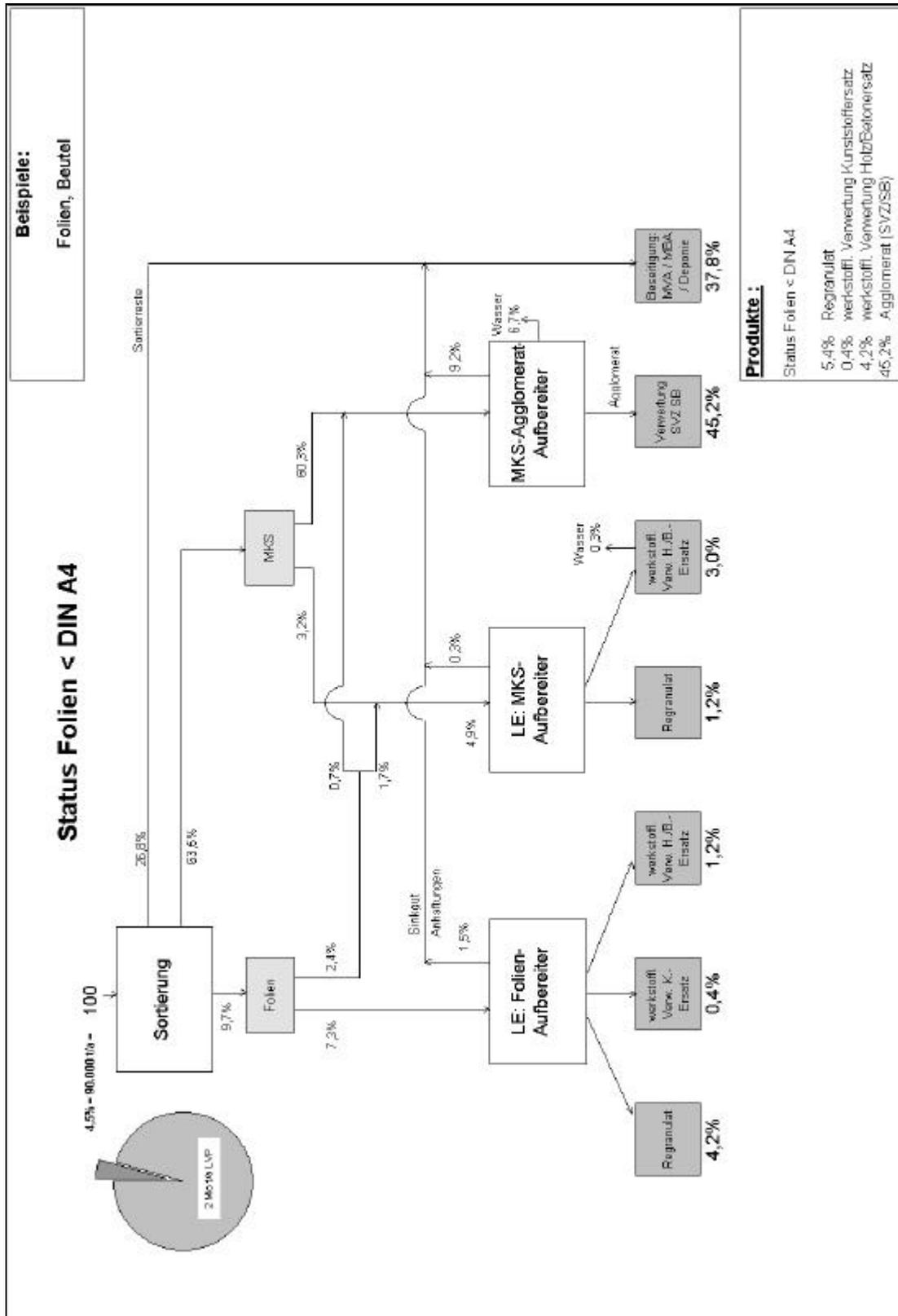
3.1.2 Folien >DIN A4 optimierter Status



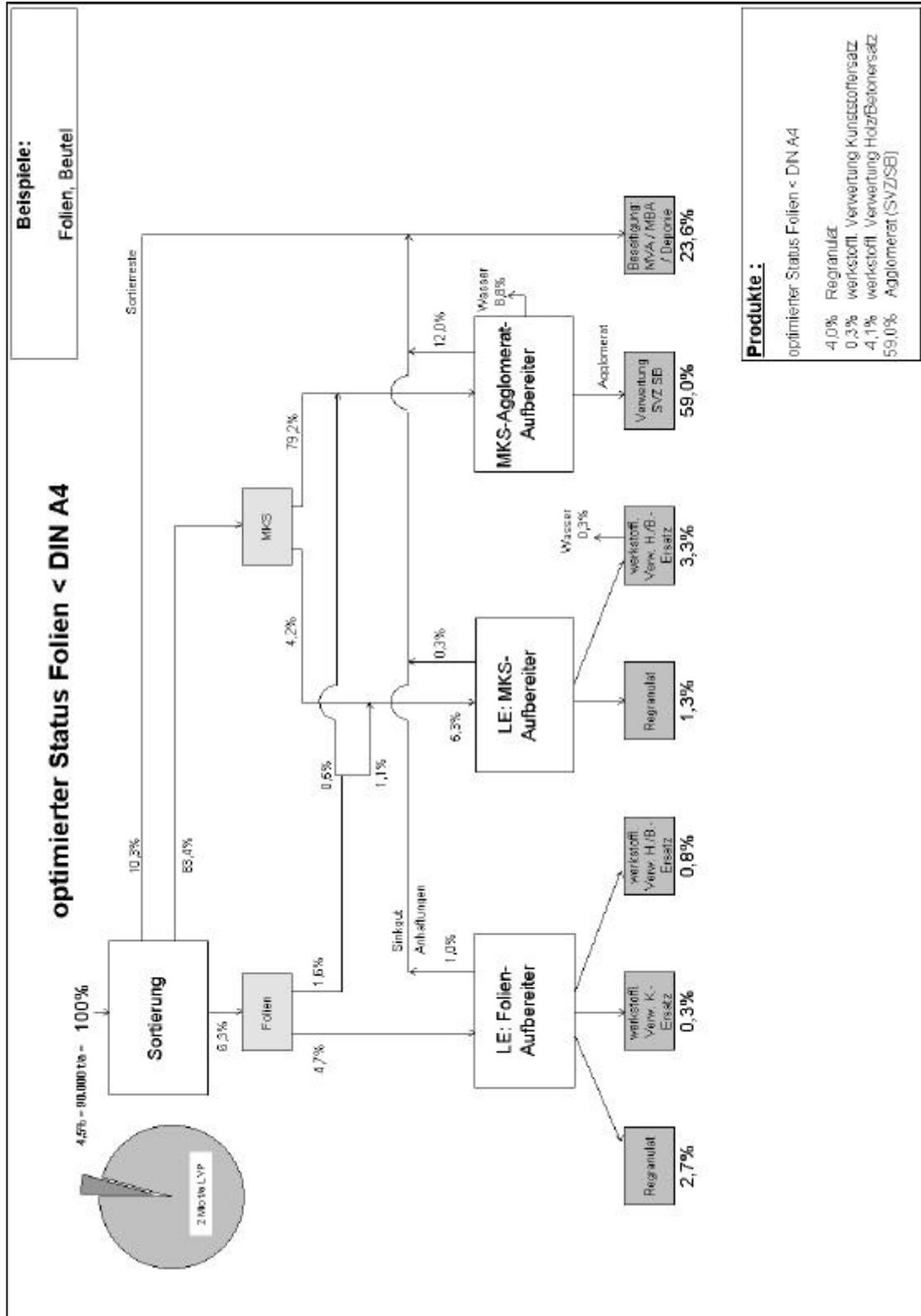
3.1.3 Folien >DIN A4 Sortec



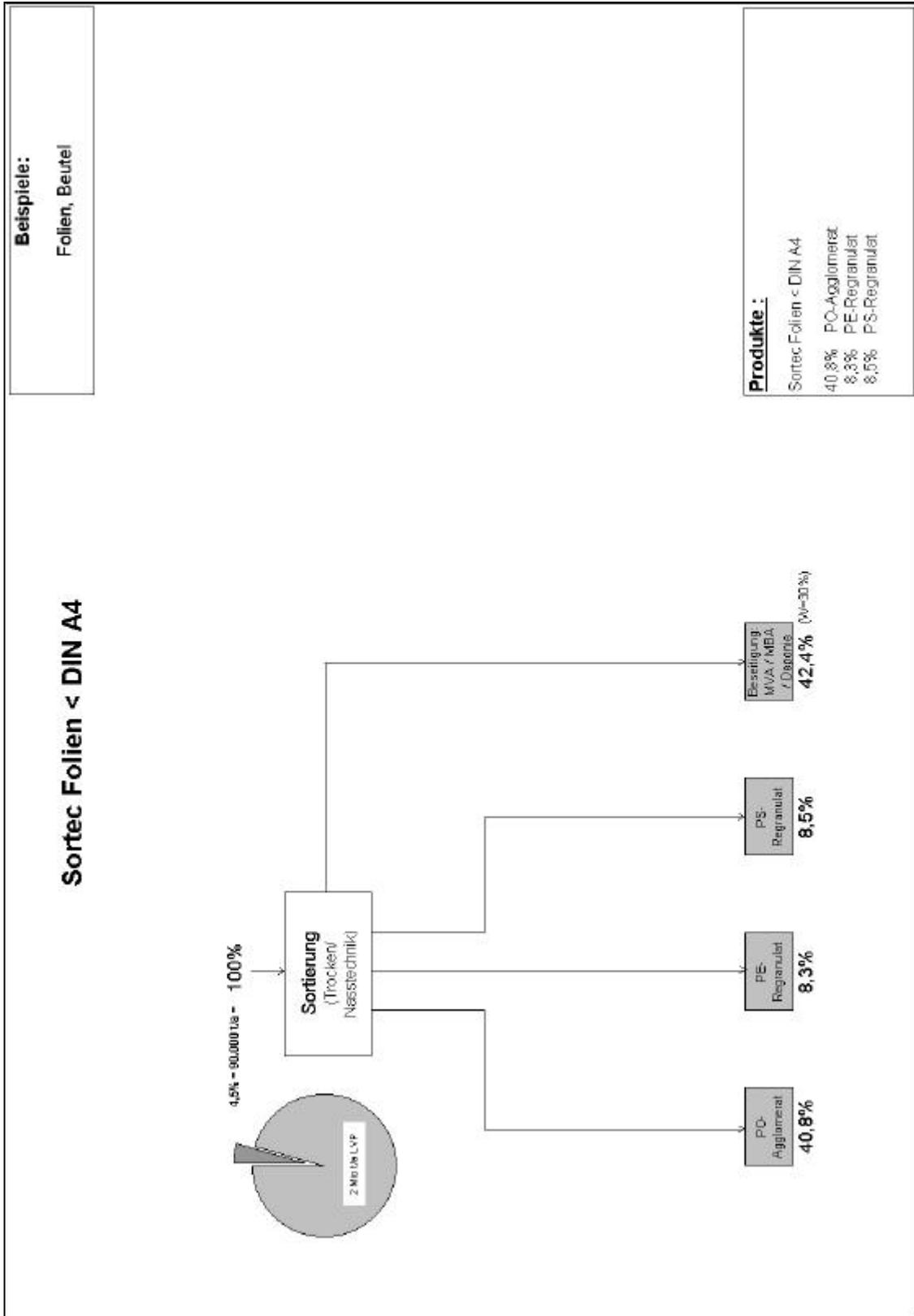
3.1.4 Folien < DIN A4 Status Quo



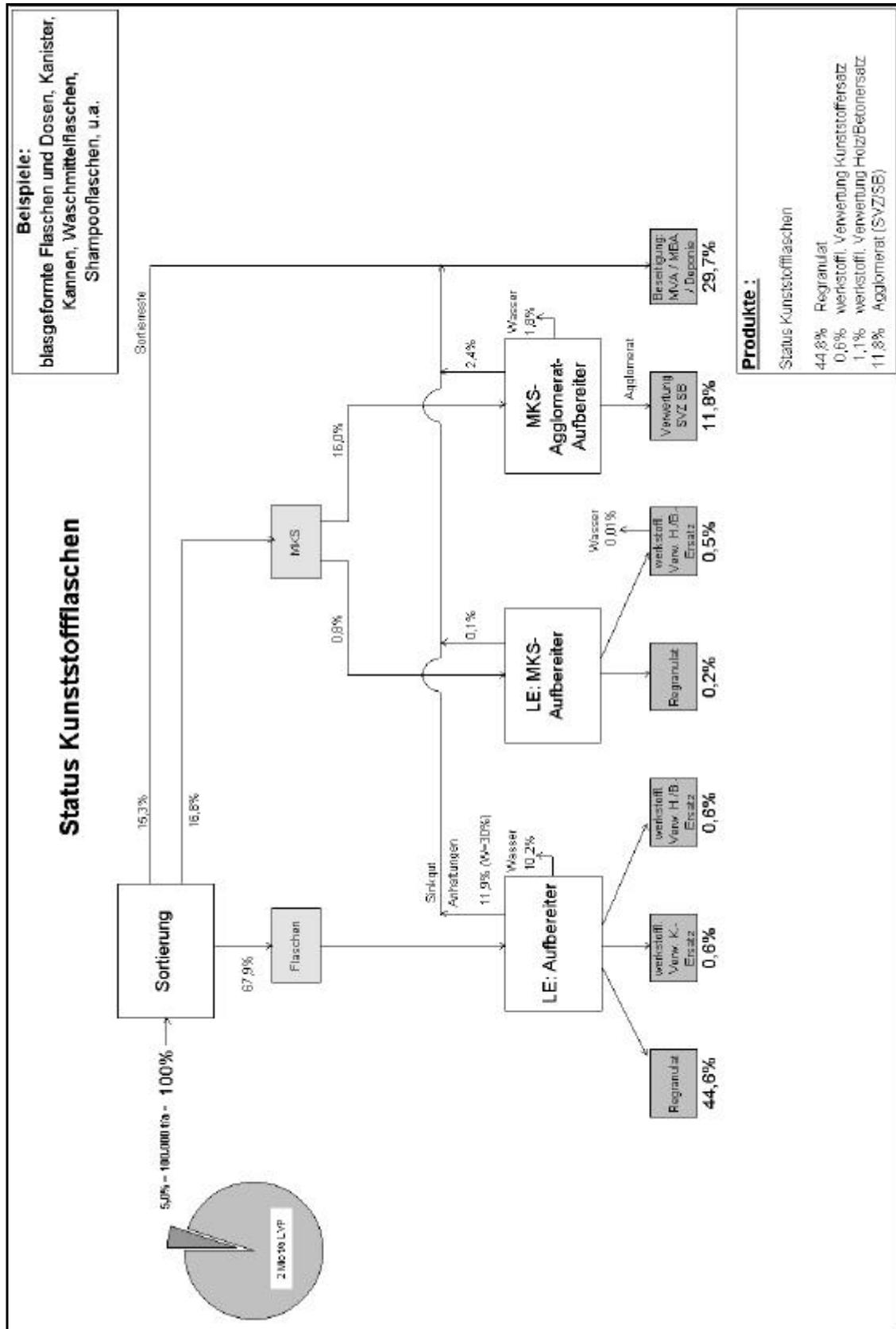
3.1.5 Folien < DIN A4 optimierter Status



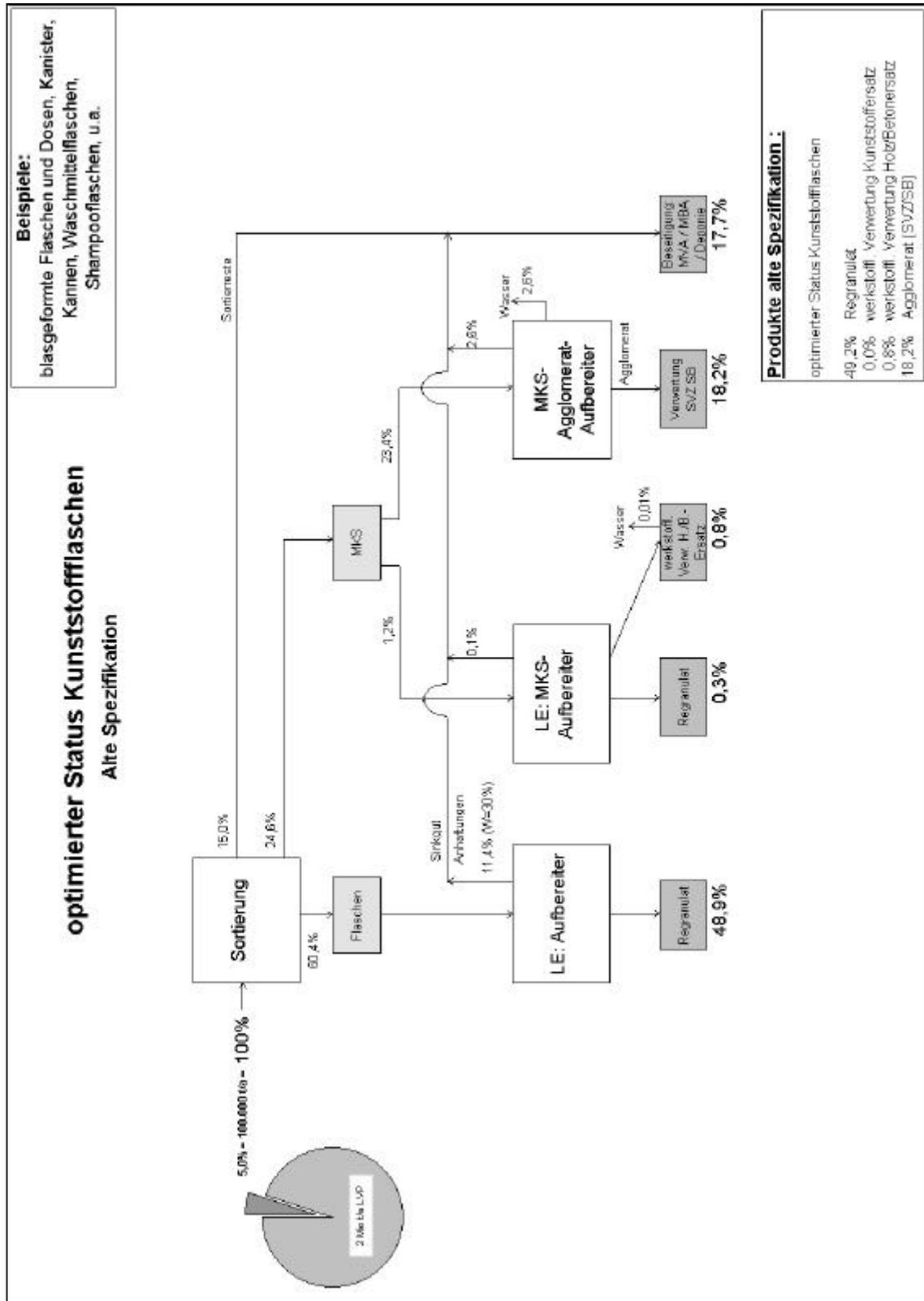
3.1.6 Folien < DIN A4 Sortec



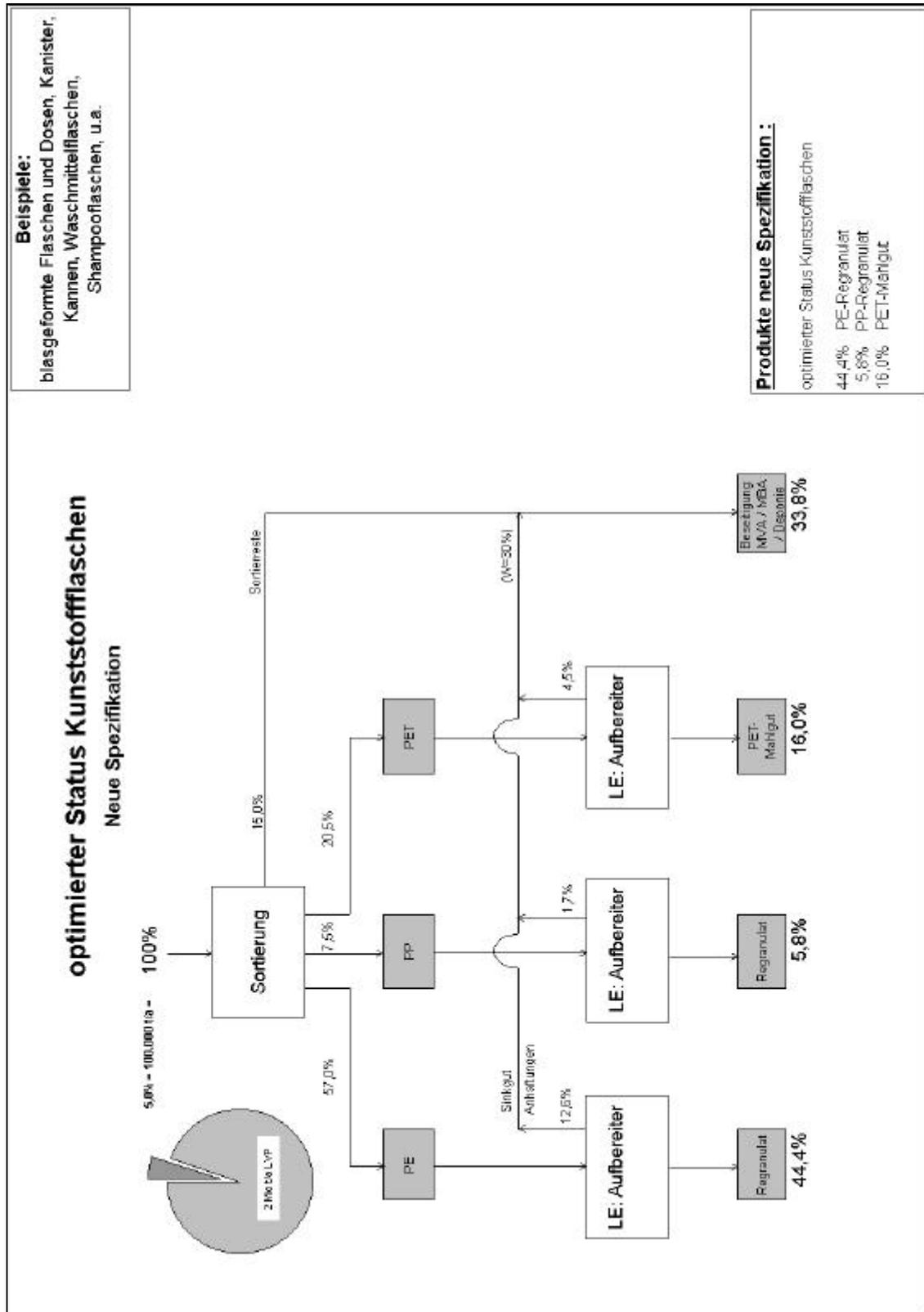
3.1.7 Kunststoffflaschen Status Quo



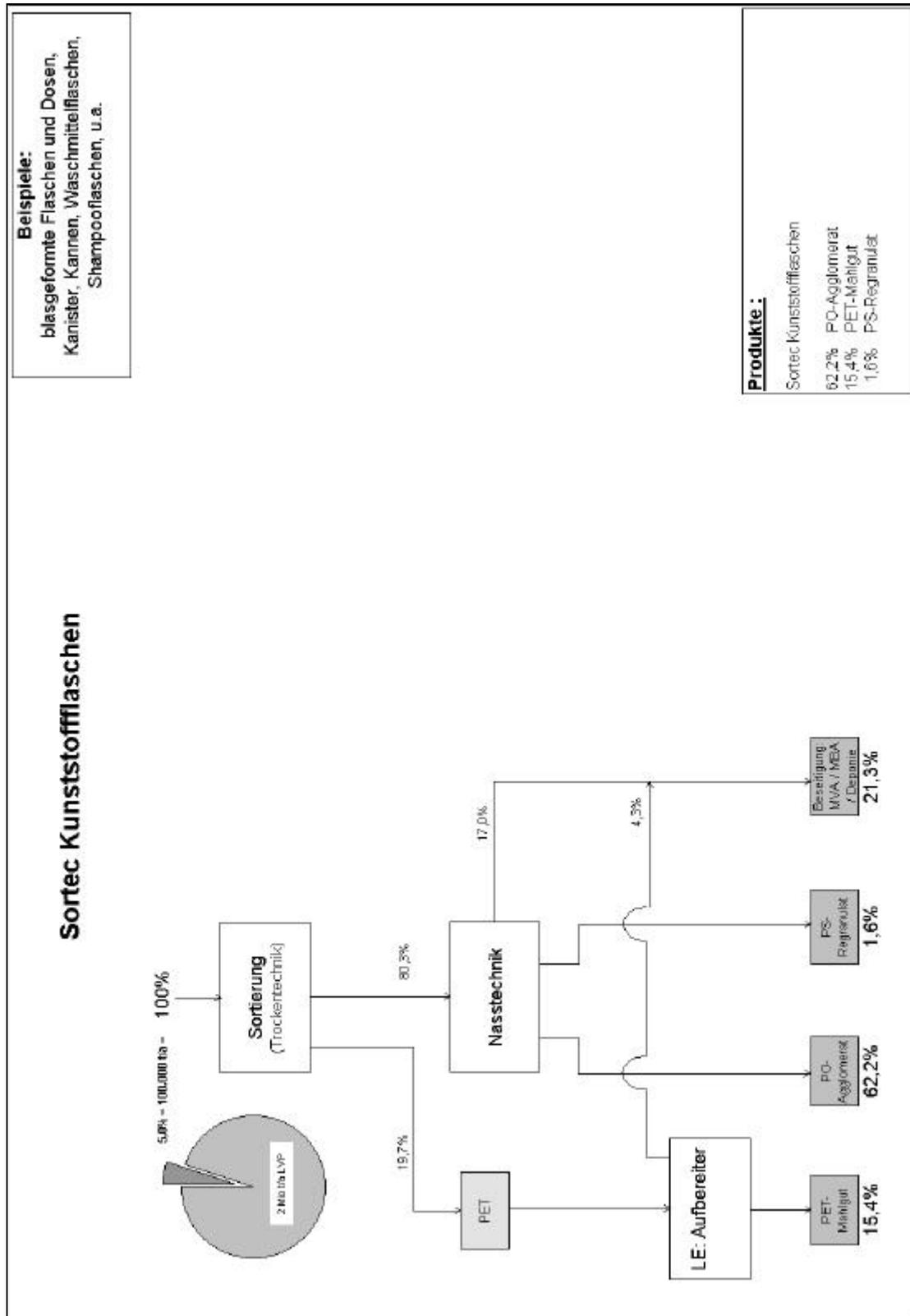
3.1.8 Kunststoffflaschen optimierter Status – Alte Spezifikation



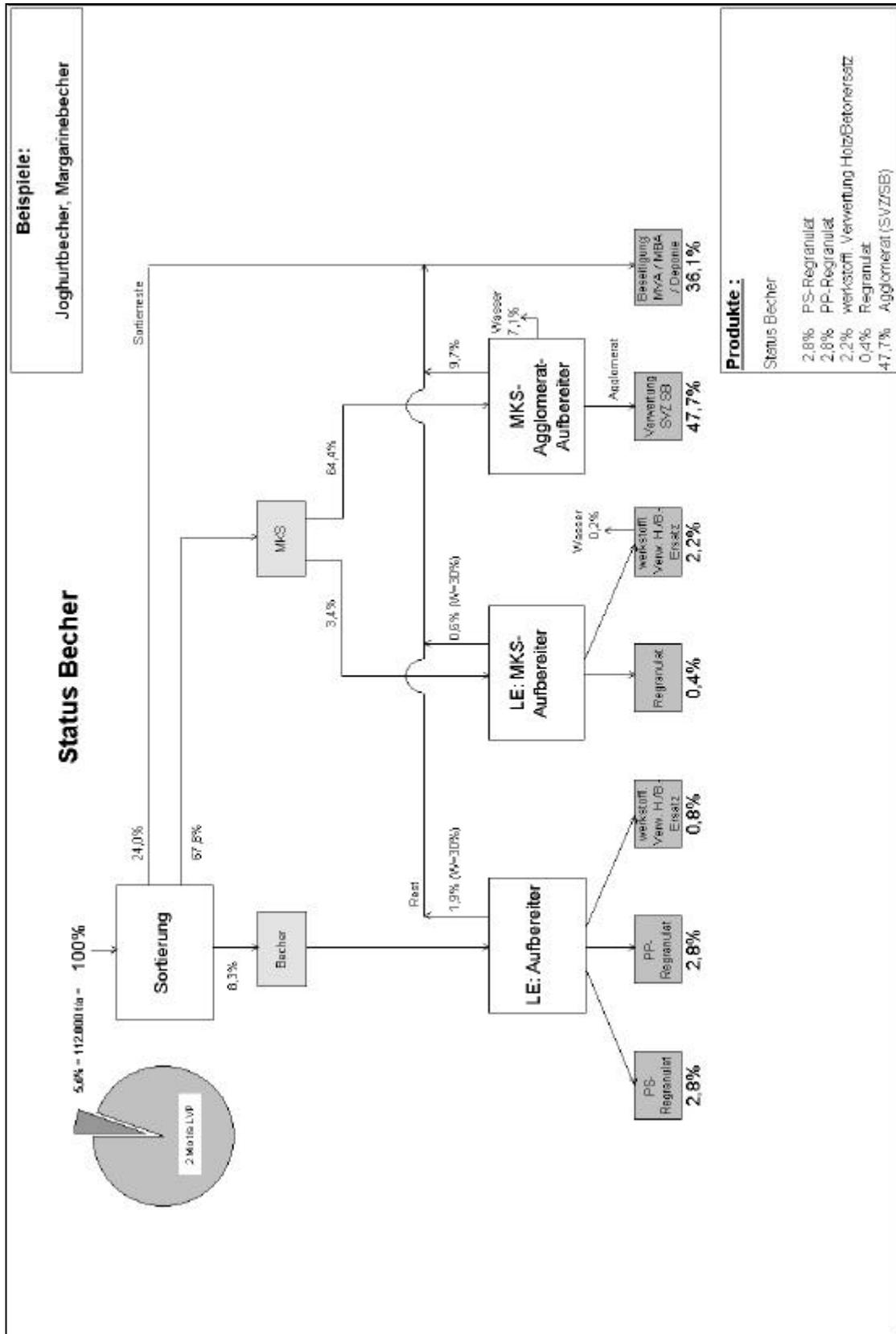
3.1.9 Kunststoffflaschen optimierter Status – Neue Spezifikation



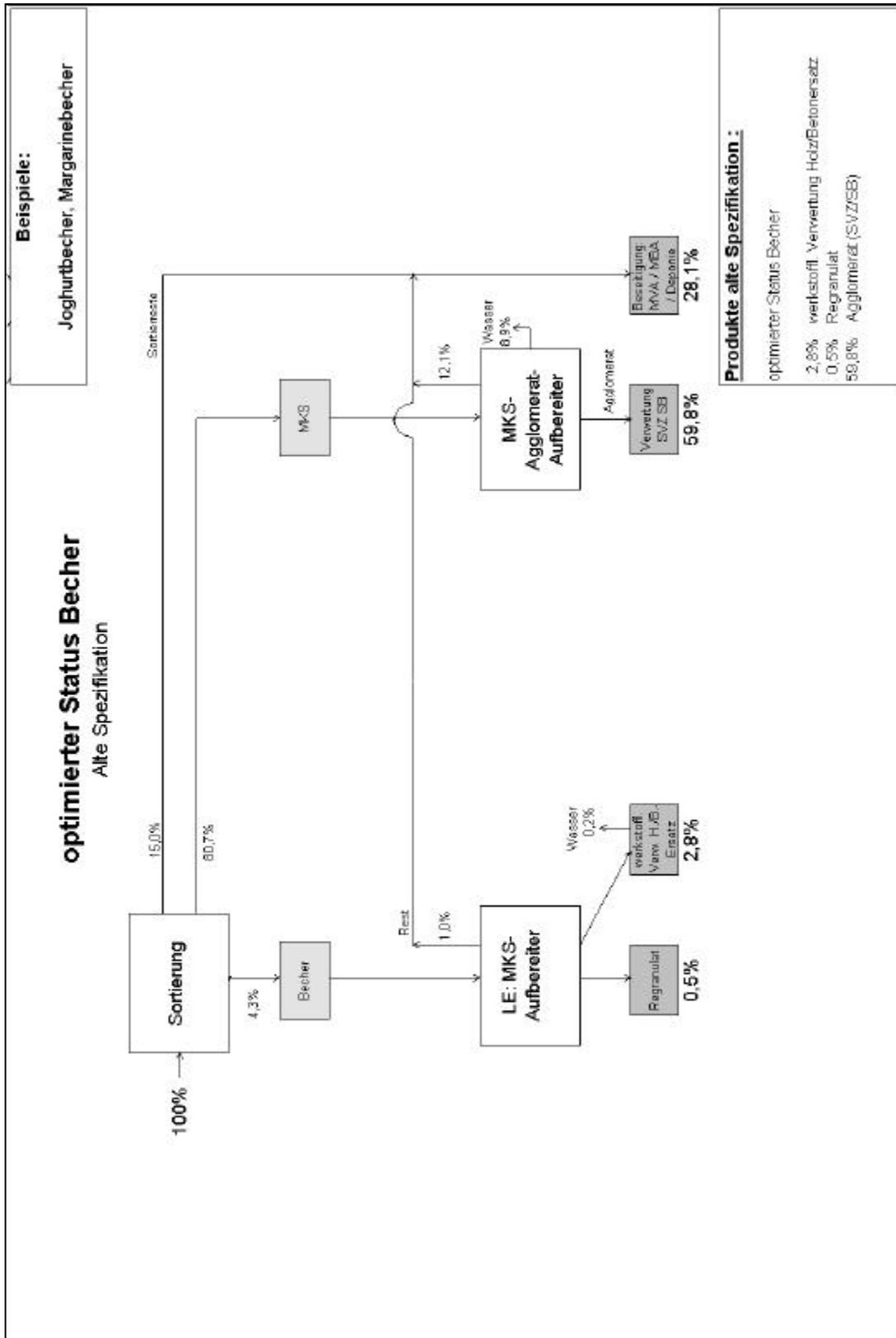
3.1.10 Kunststoffflaschen Sortec



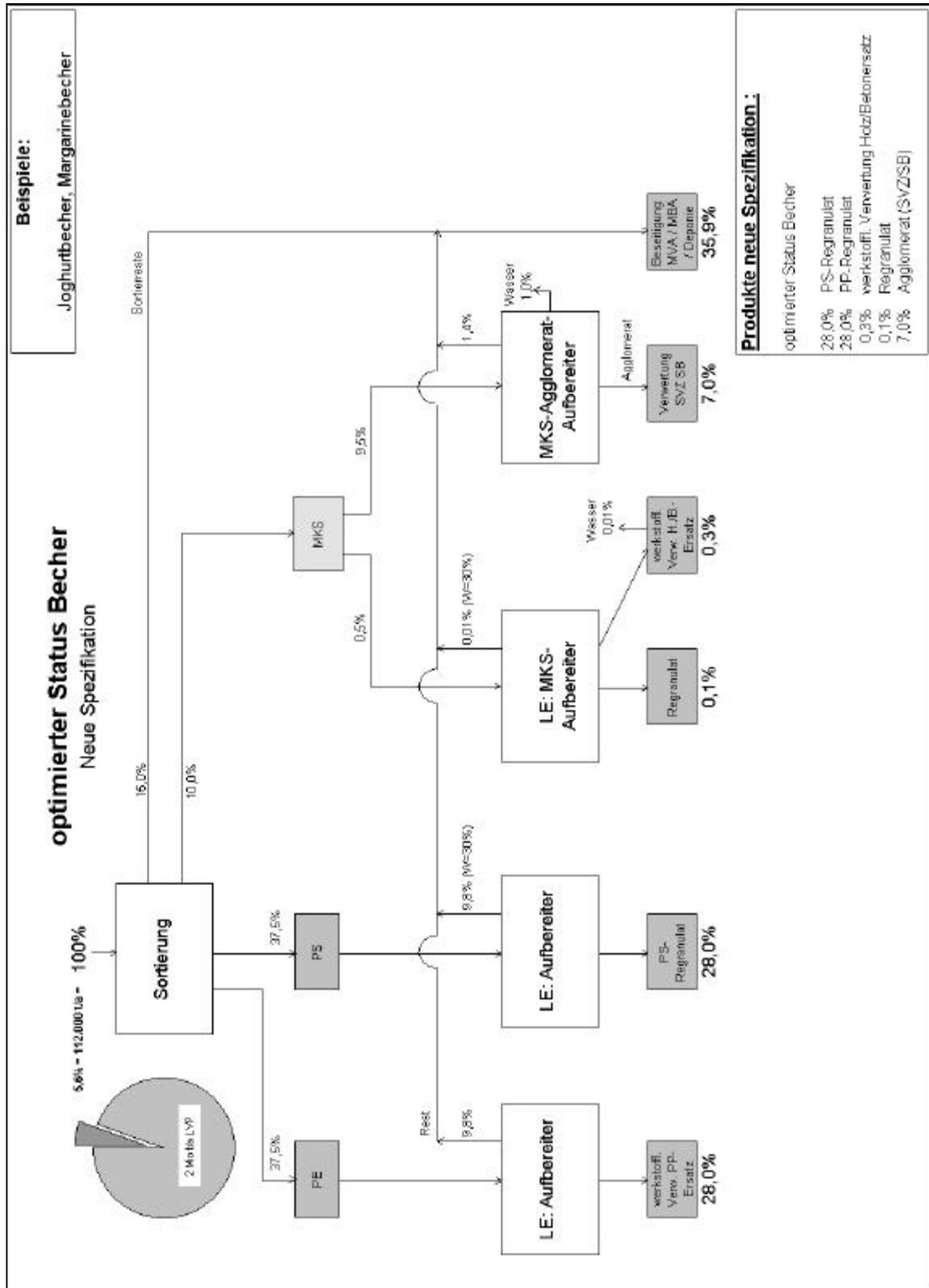
3.1.11 Becher Status Quo



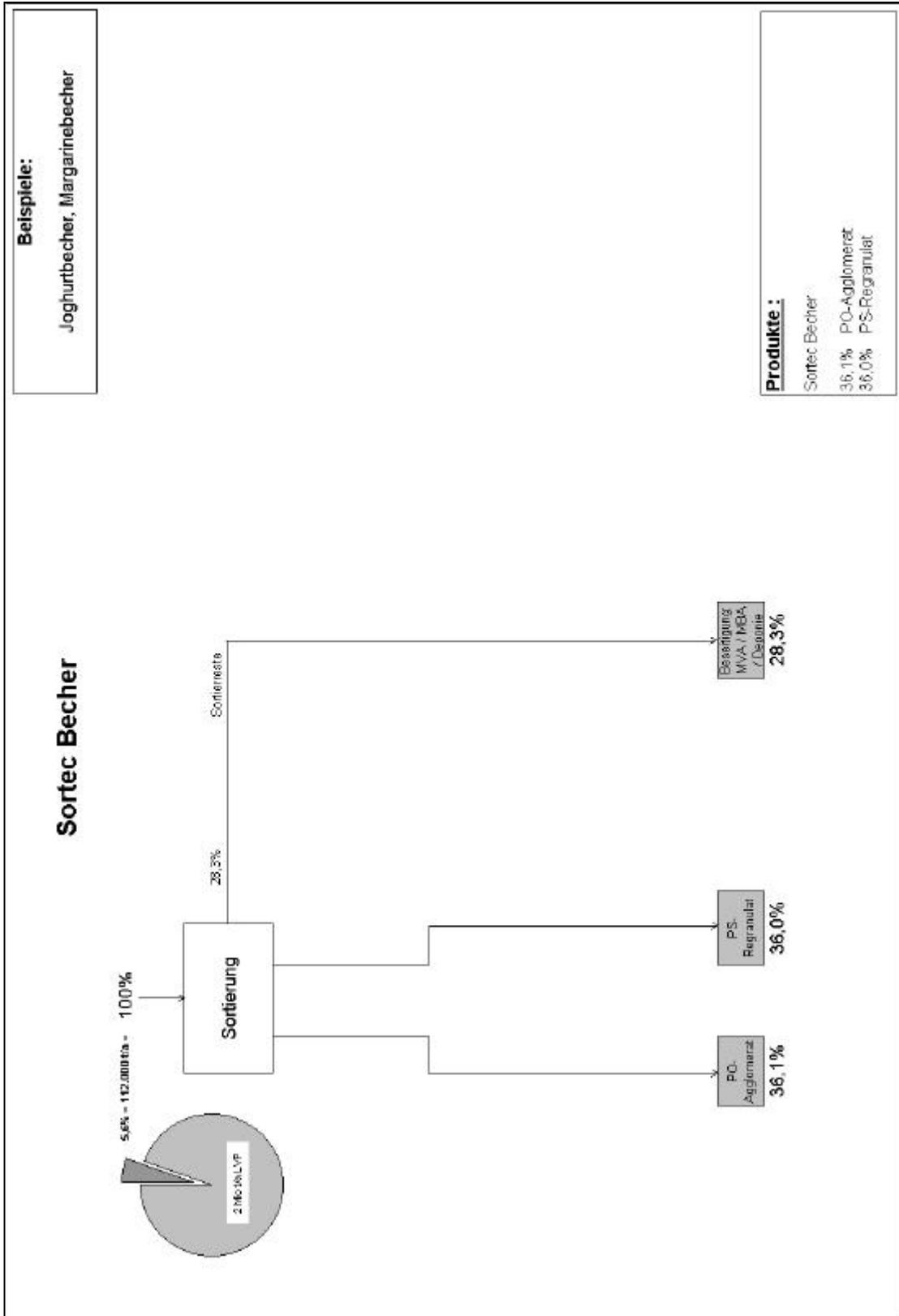
3.1.12 Becher optimierter Status – Alte Spezifikation



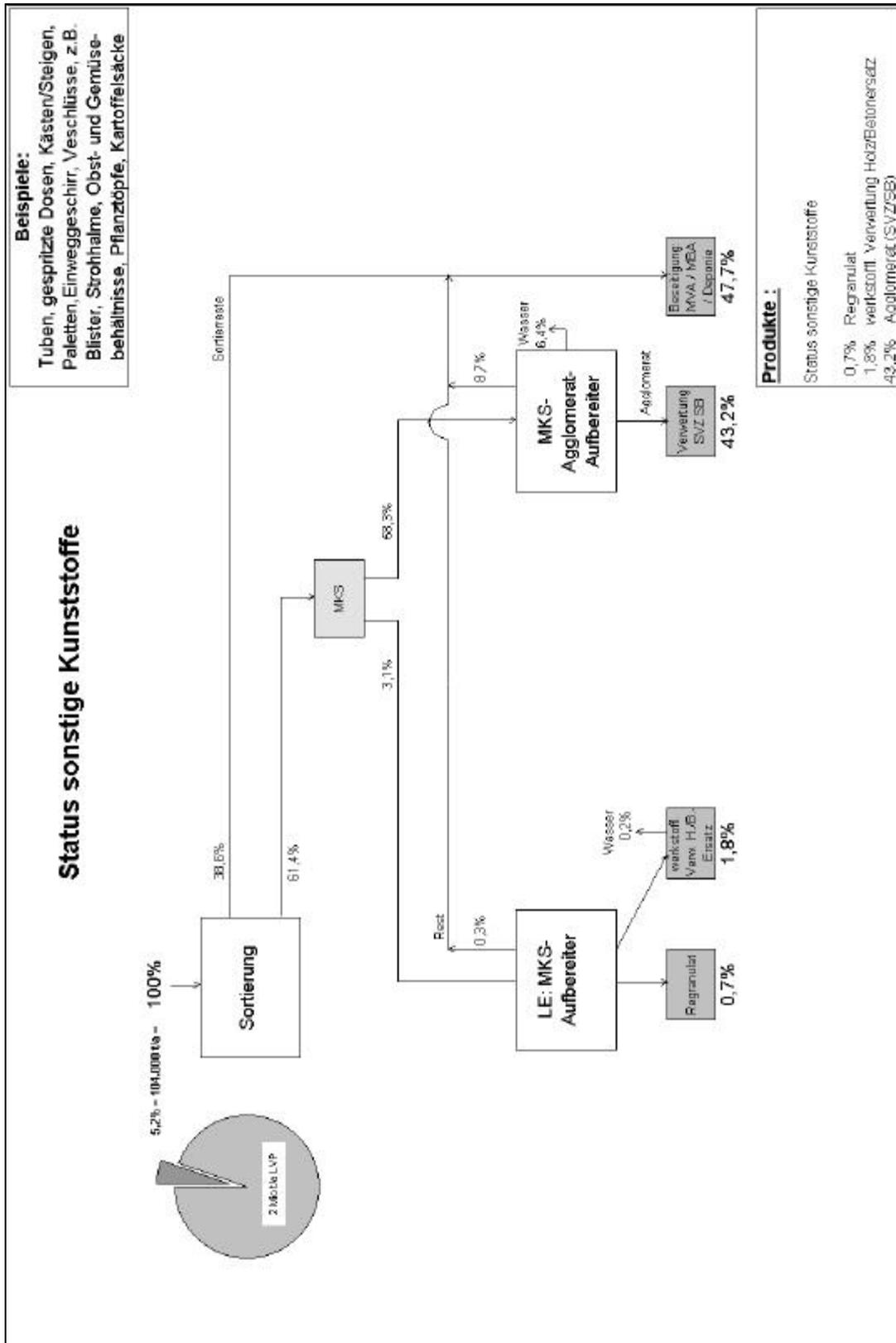
3.1.13 Becher optimierter Status – Neue Spezifikation



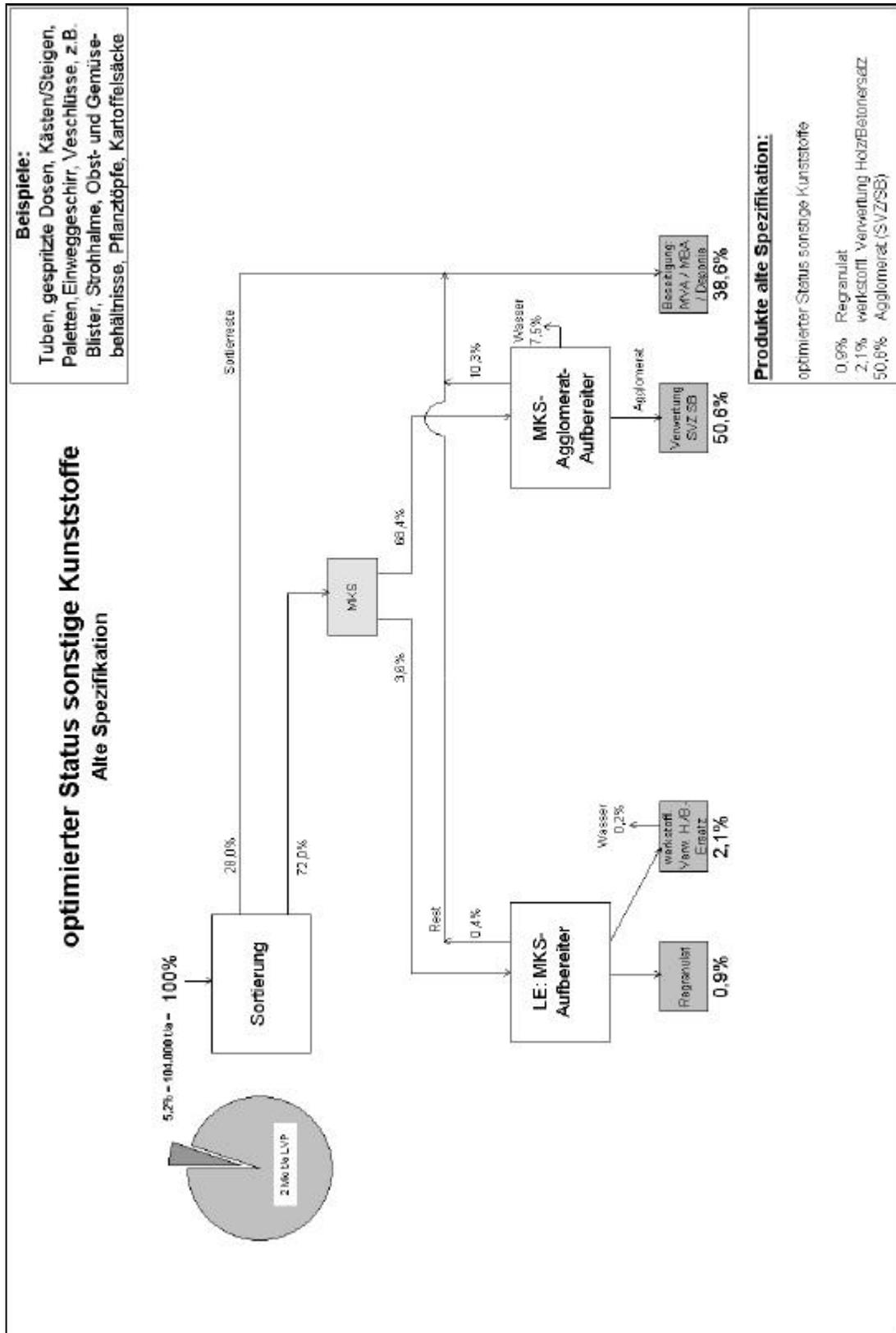
3.1.14 Becher Sortec



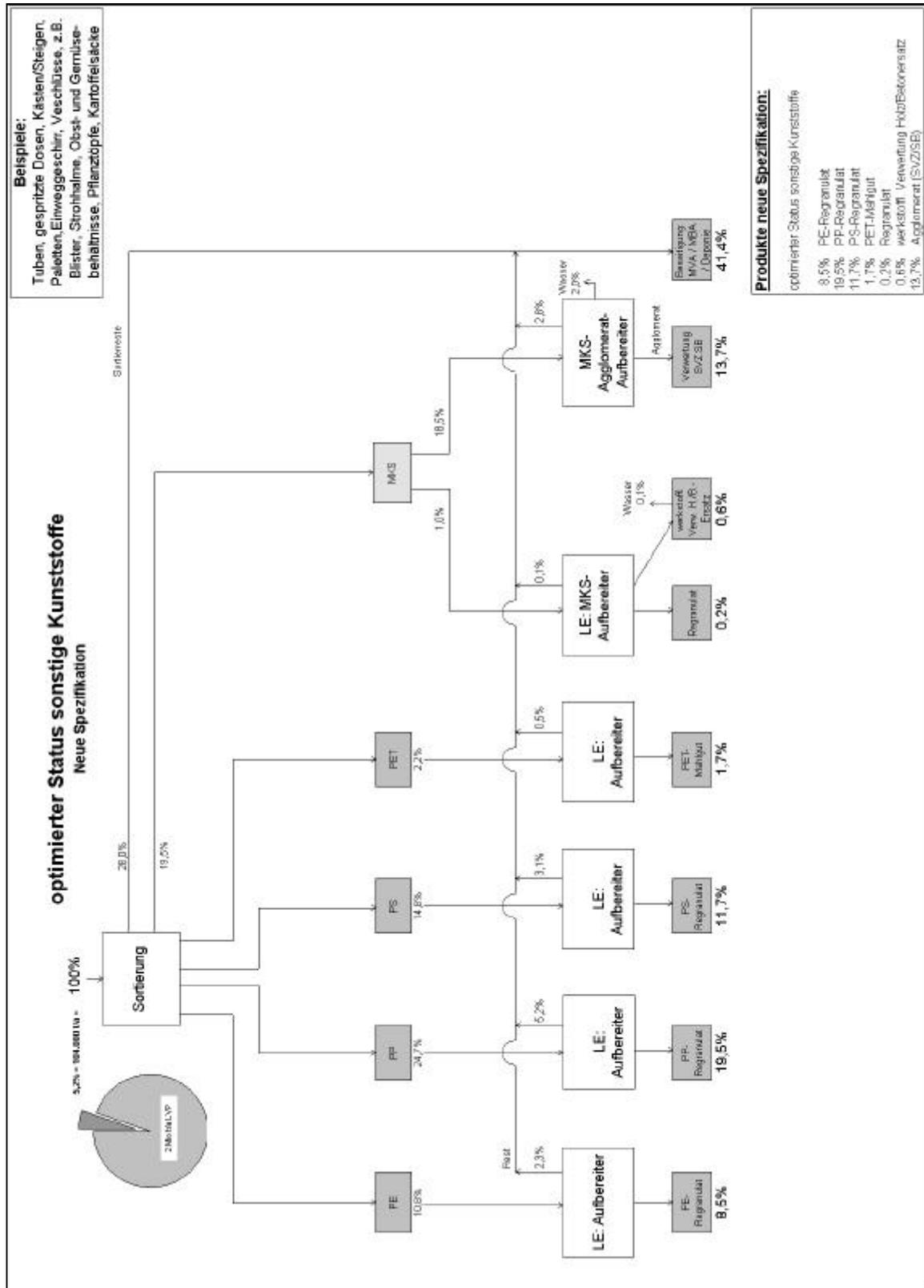
3.1.15 Sonstige Kunststoffe Status Quo



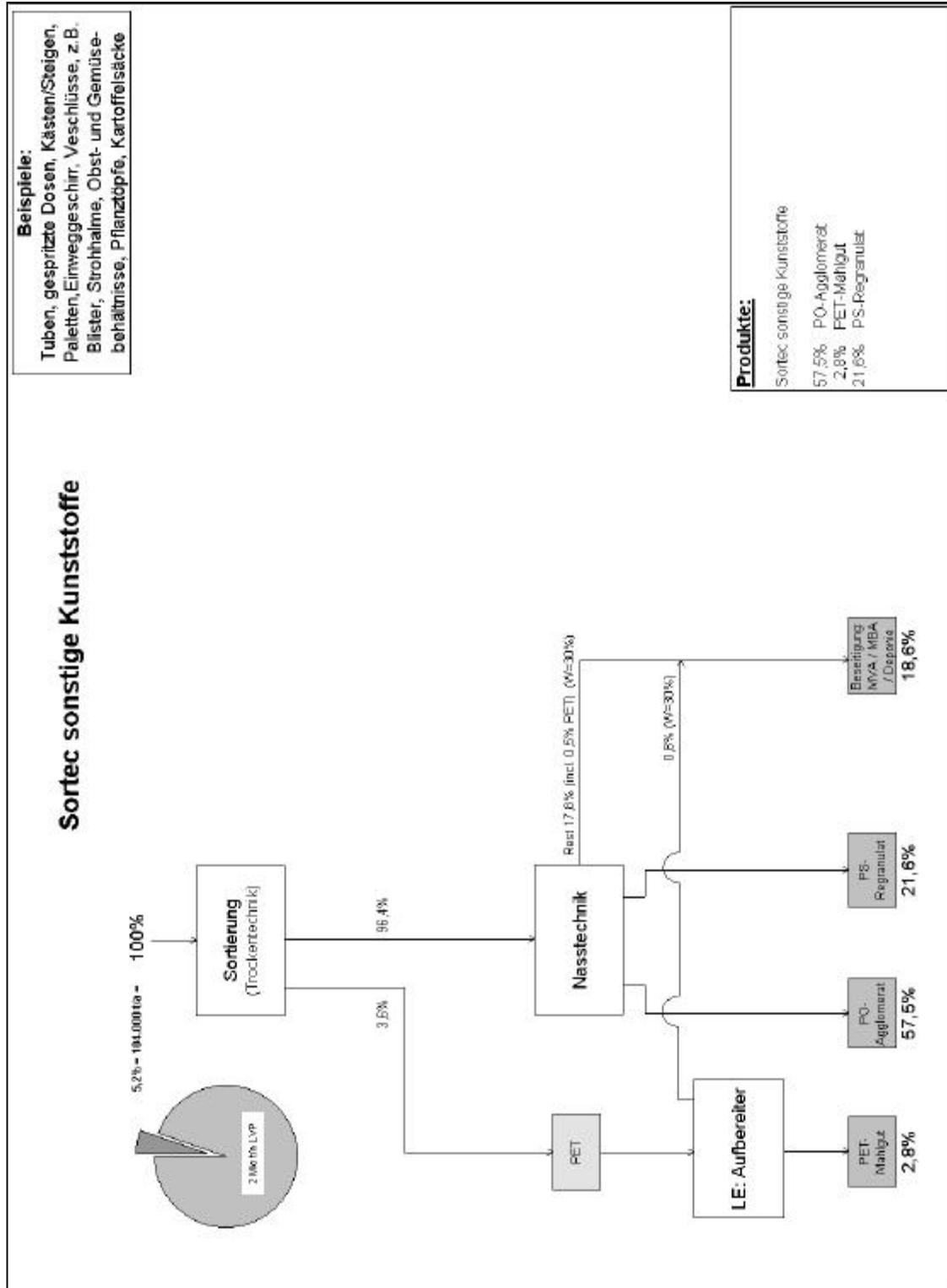
3.1.16 Sonstige Kunststoffe optimierter Status – Alte Spezifikation



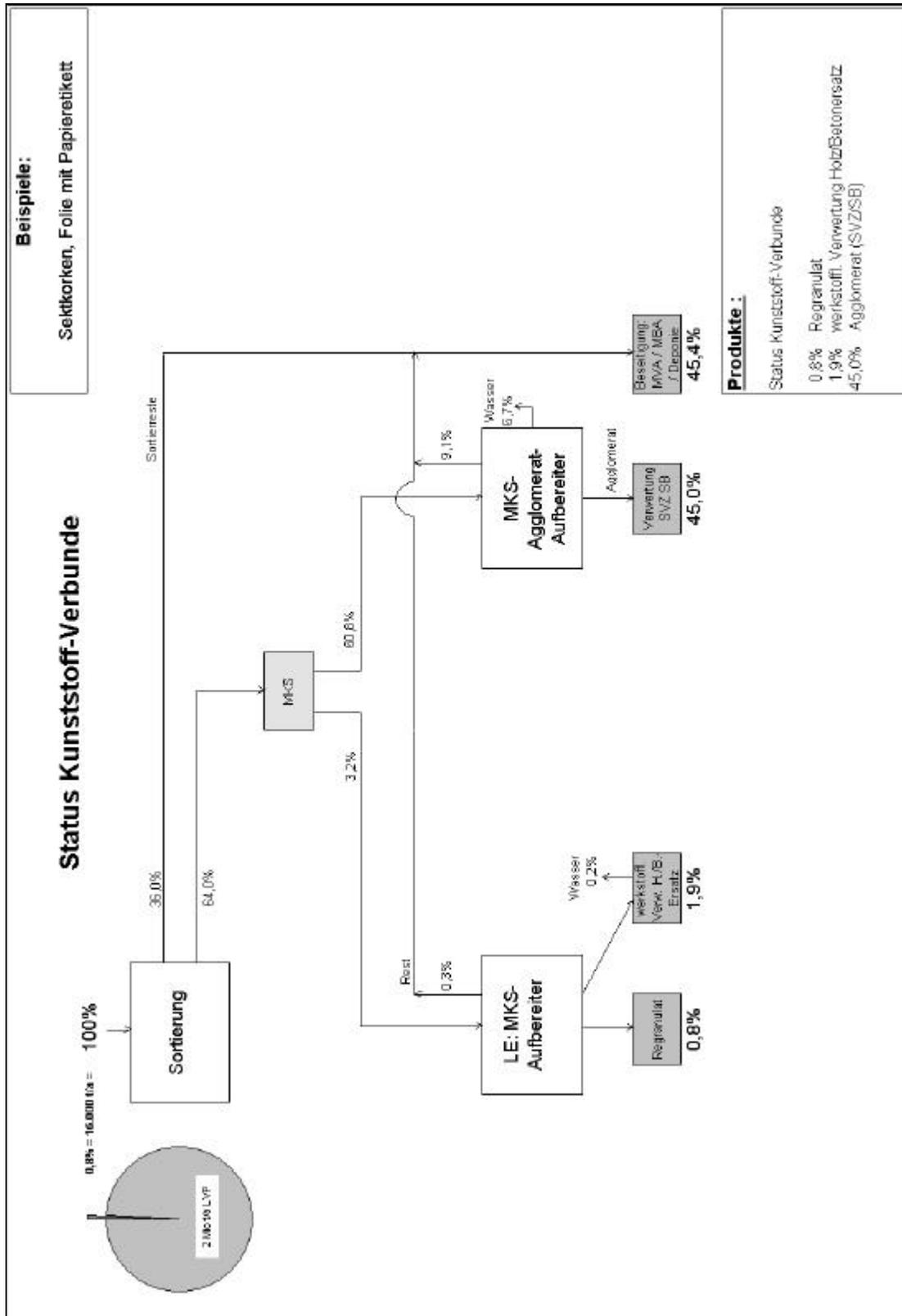
3.1.17 Sonstige Kunststoffe optimierter Status – Neue Spezifikation



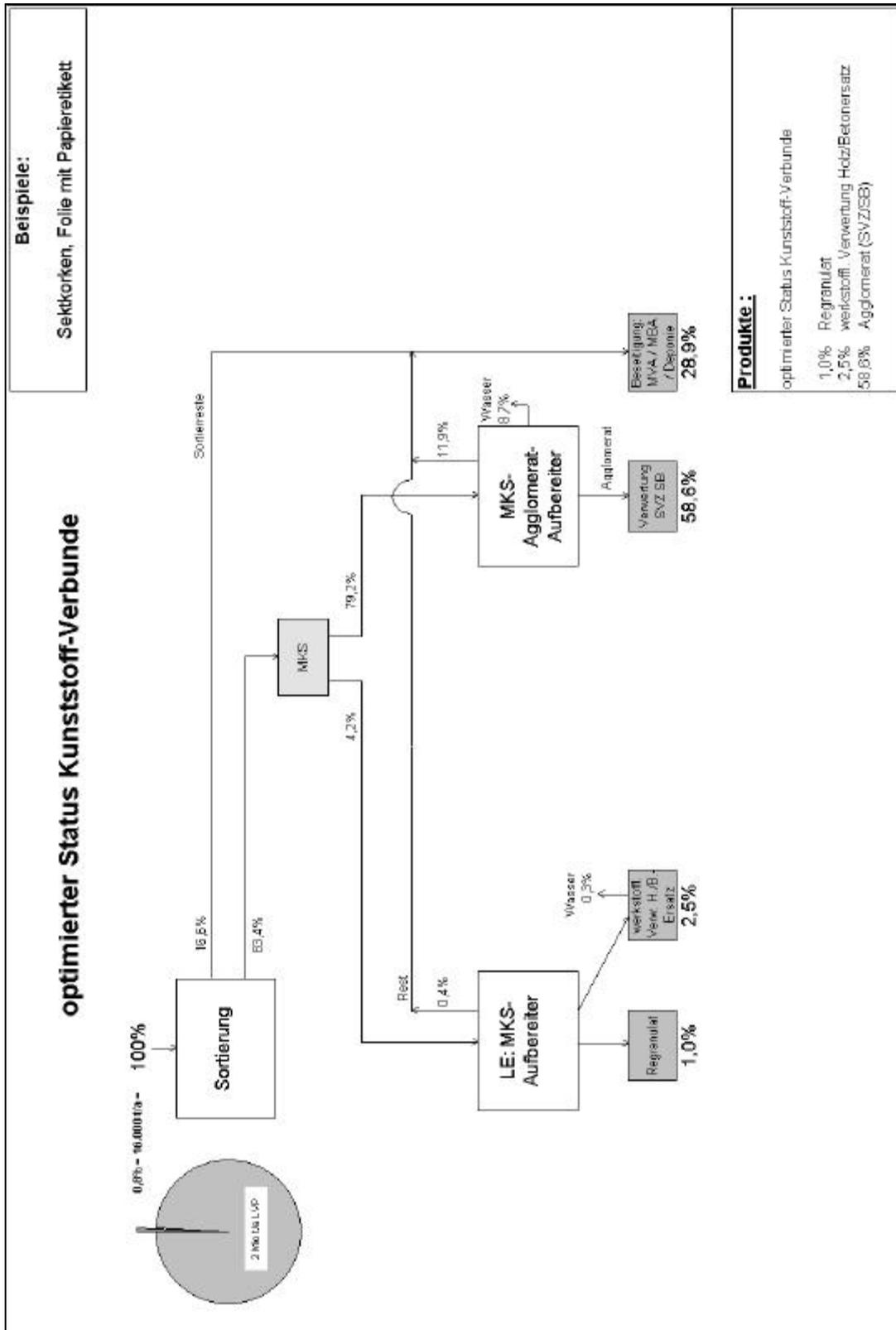
3.1.18 Sonstige Kunststoffe Sortec



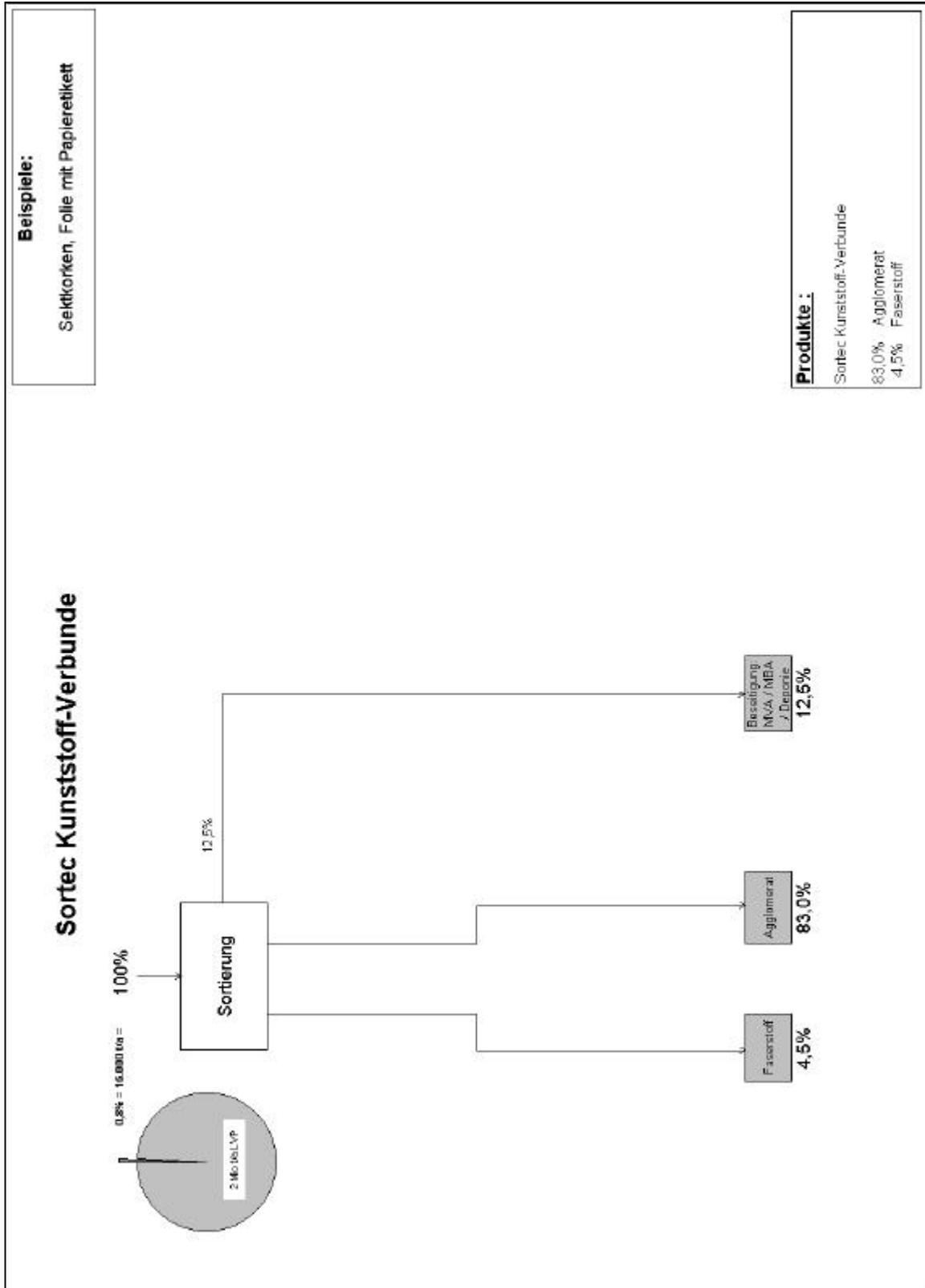
3.1.19 Kunststoffverbunde Status Quo



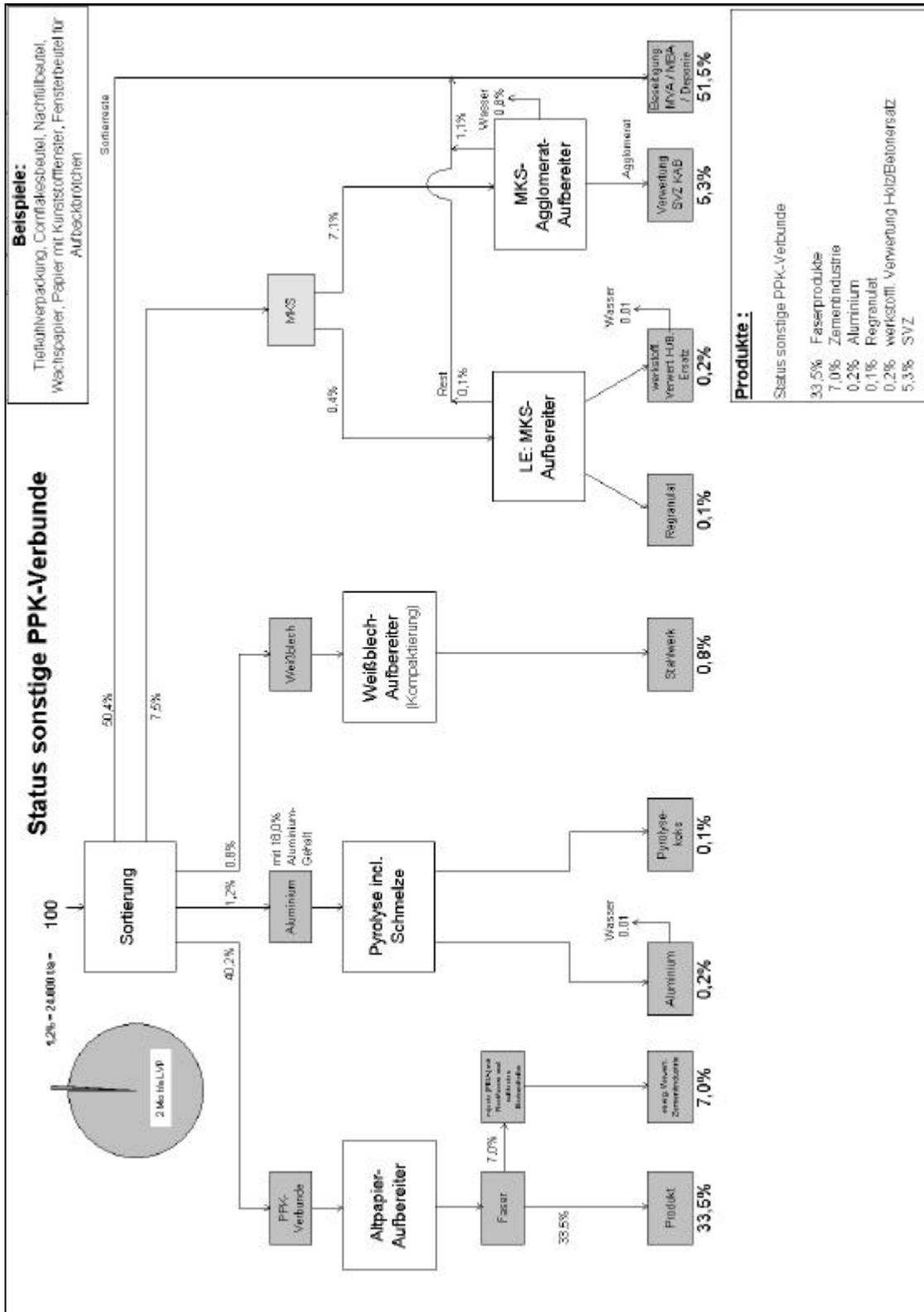
3.1.20 Kunststoffverbunde optimierter Status



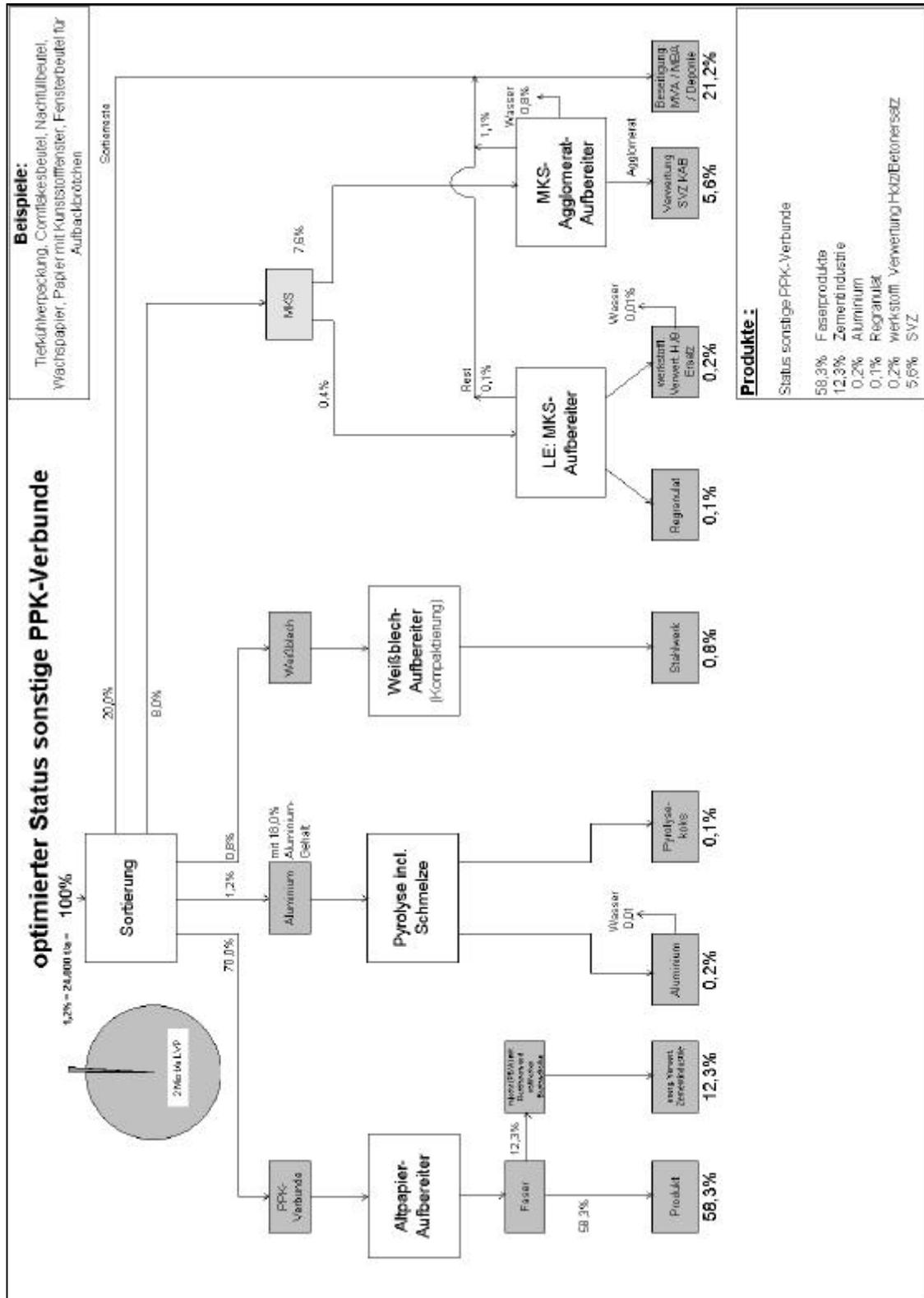
3.1.21 Kunststoffverbunde Sortec



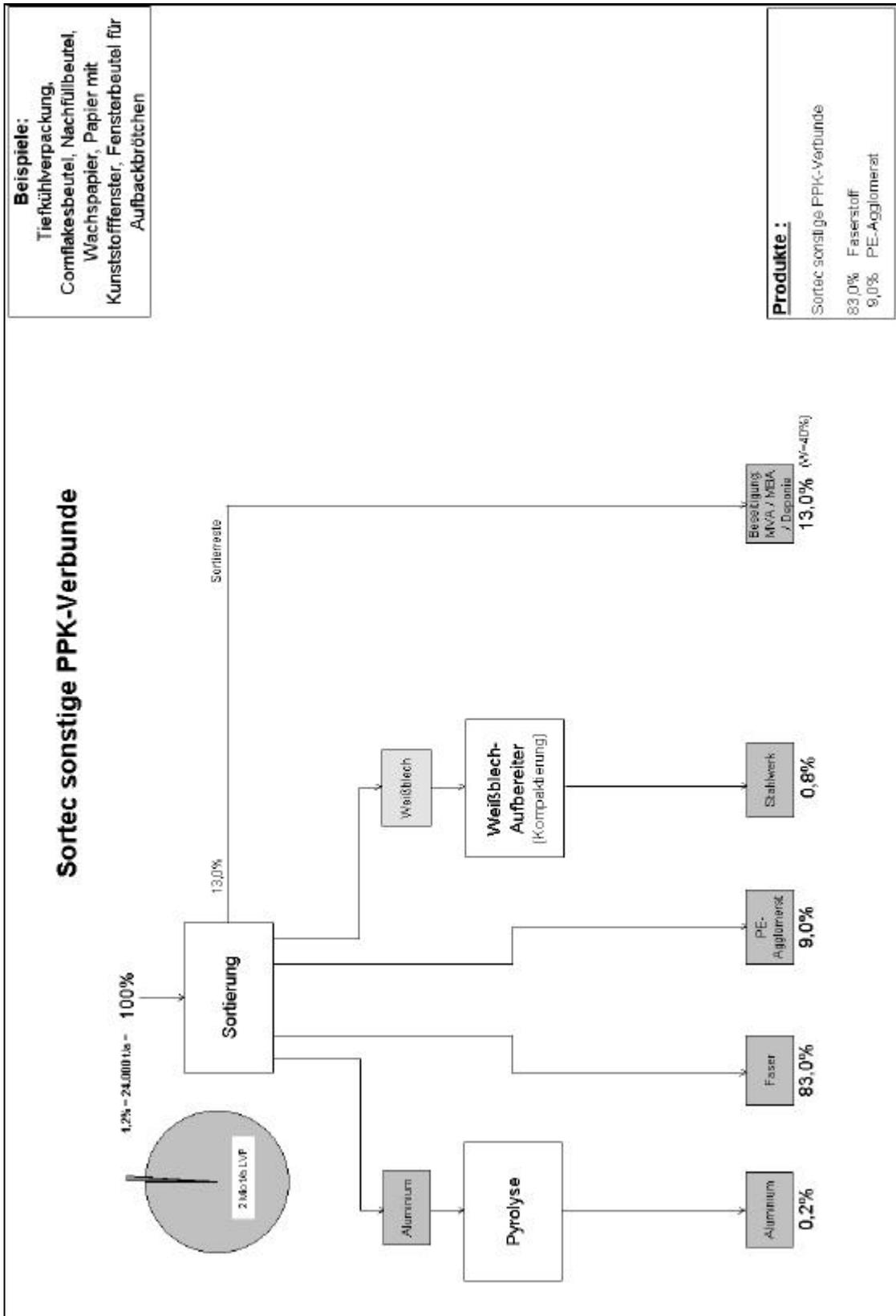
3.1.22 Sonstige PPK-Verbunde Status Quo



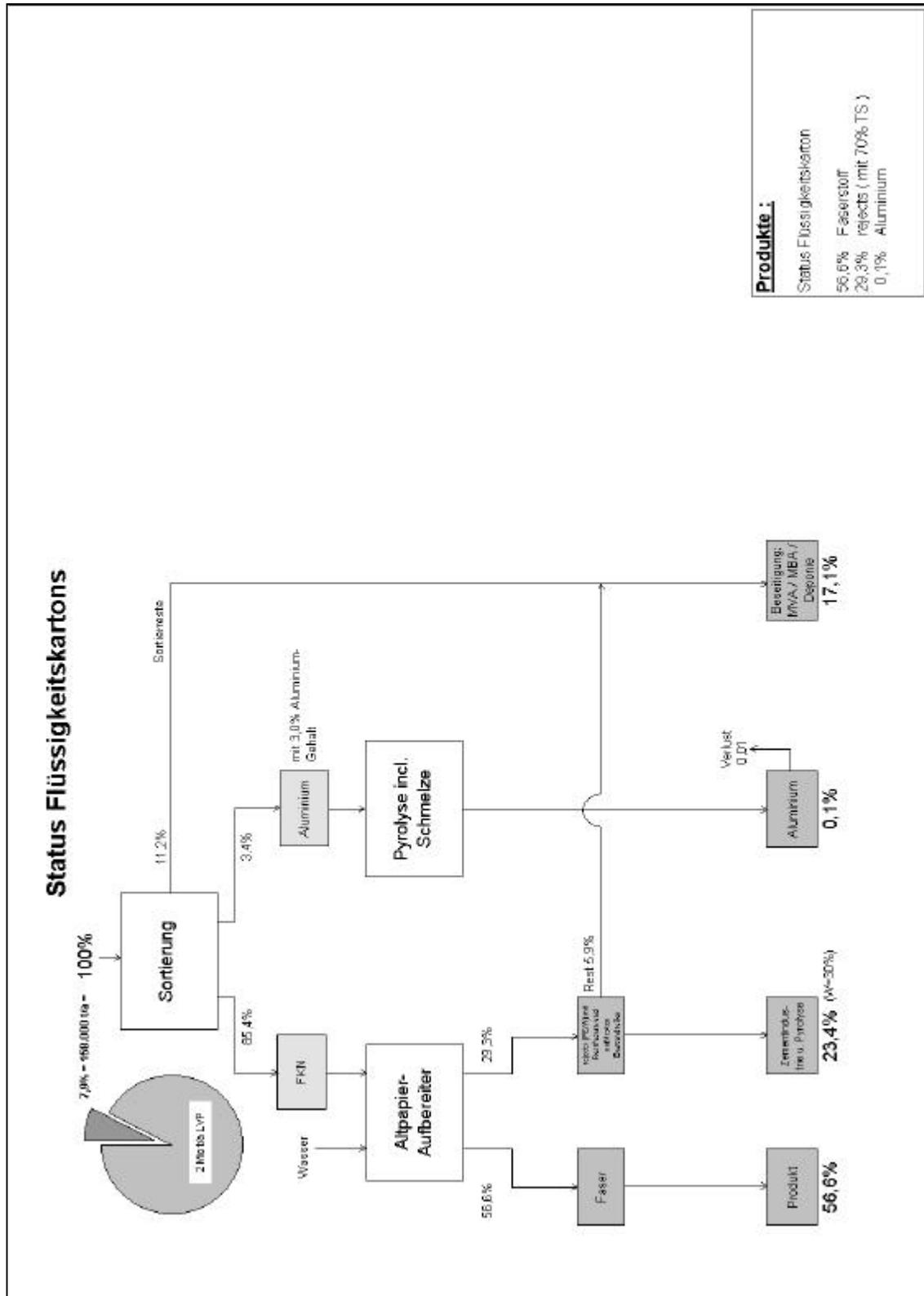
3.1.23 Sonstige PPK-Verbunde optimierter Status



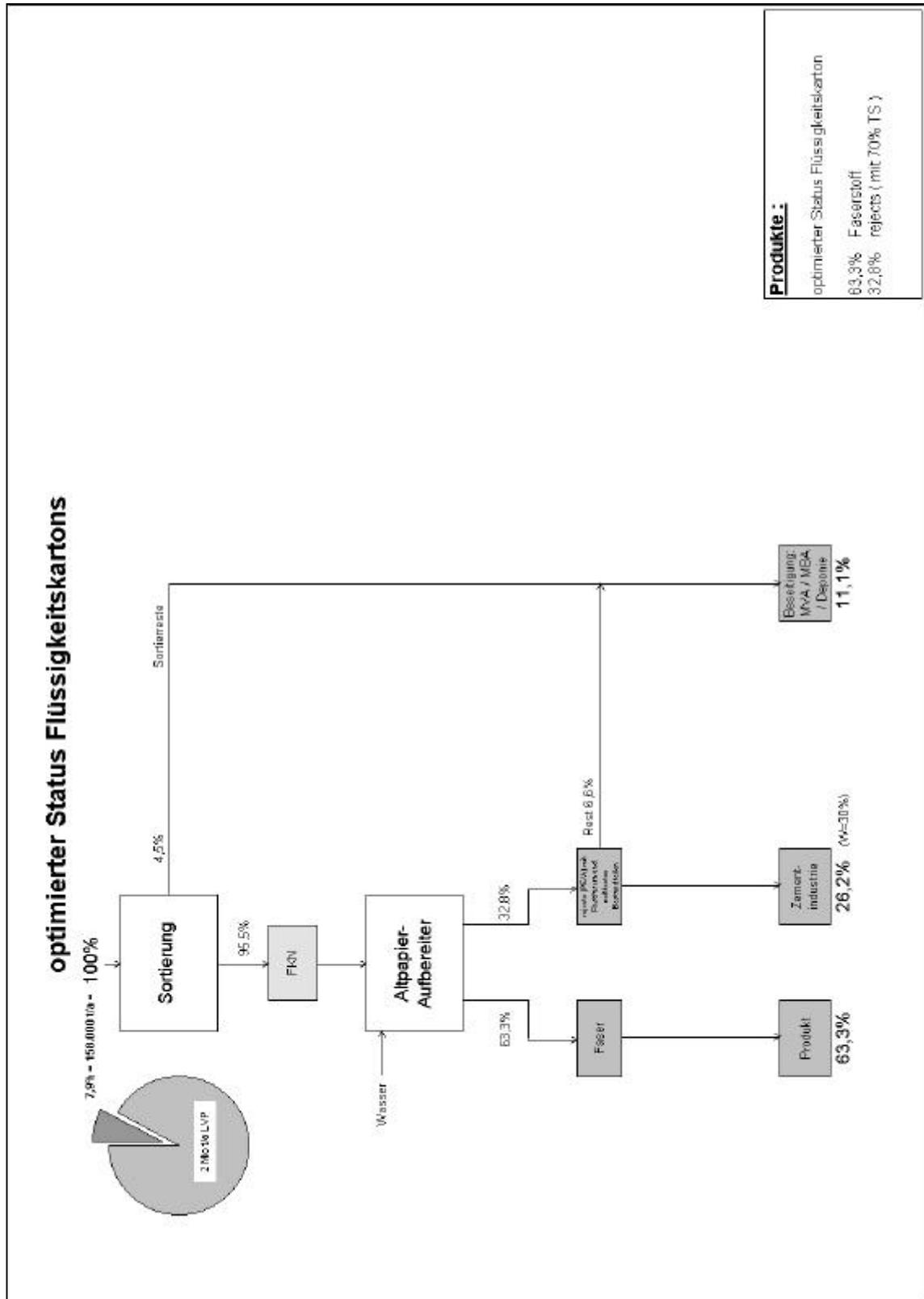
3.1.24 Sonstige PPK-Verbunde Sortec



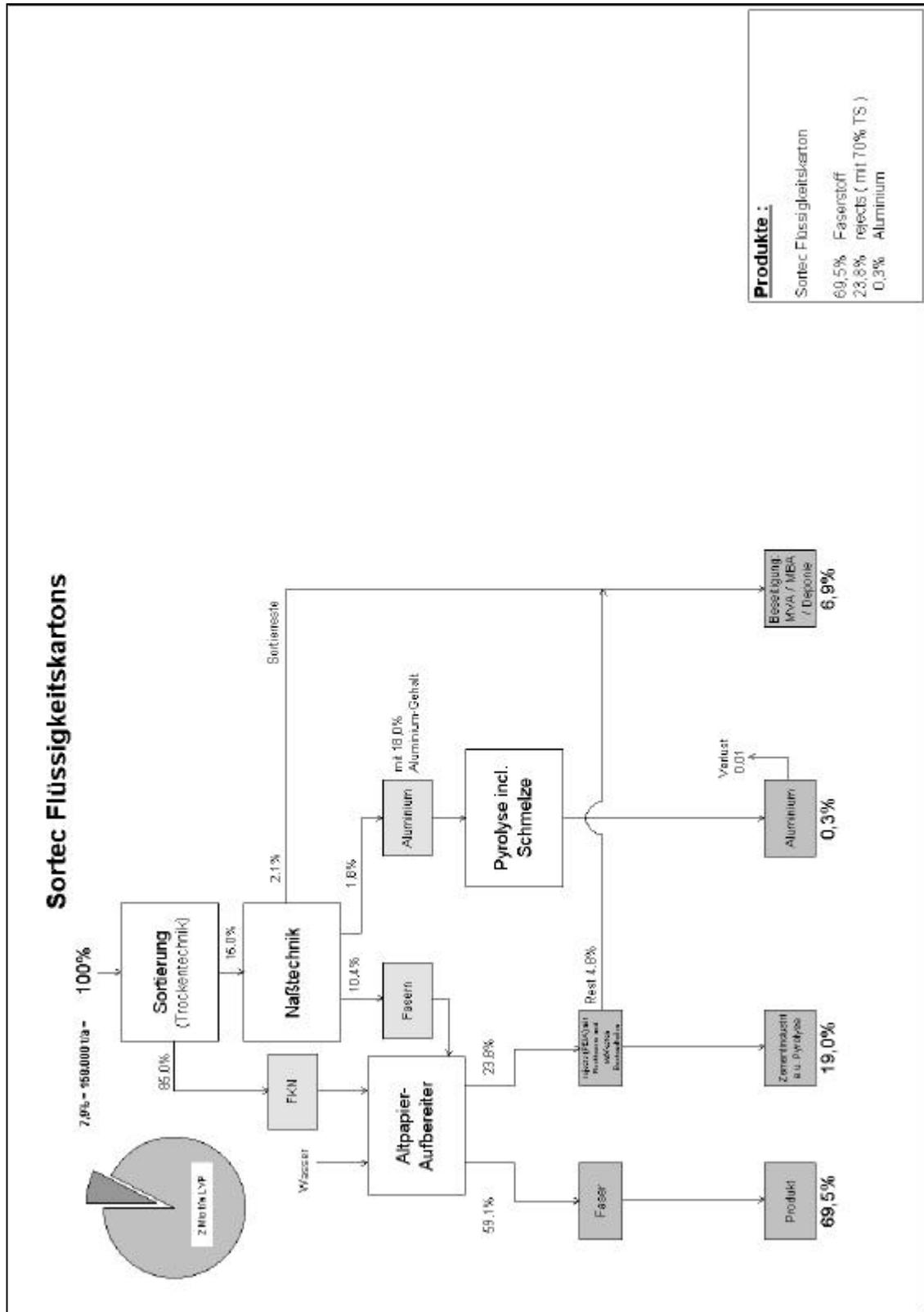
3.1.25 Flüssigkartons Status Quo



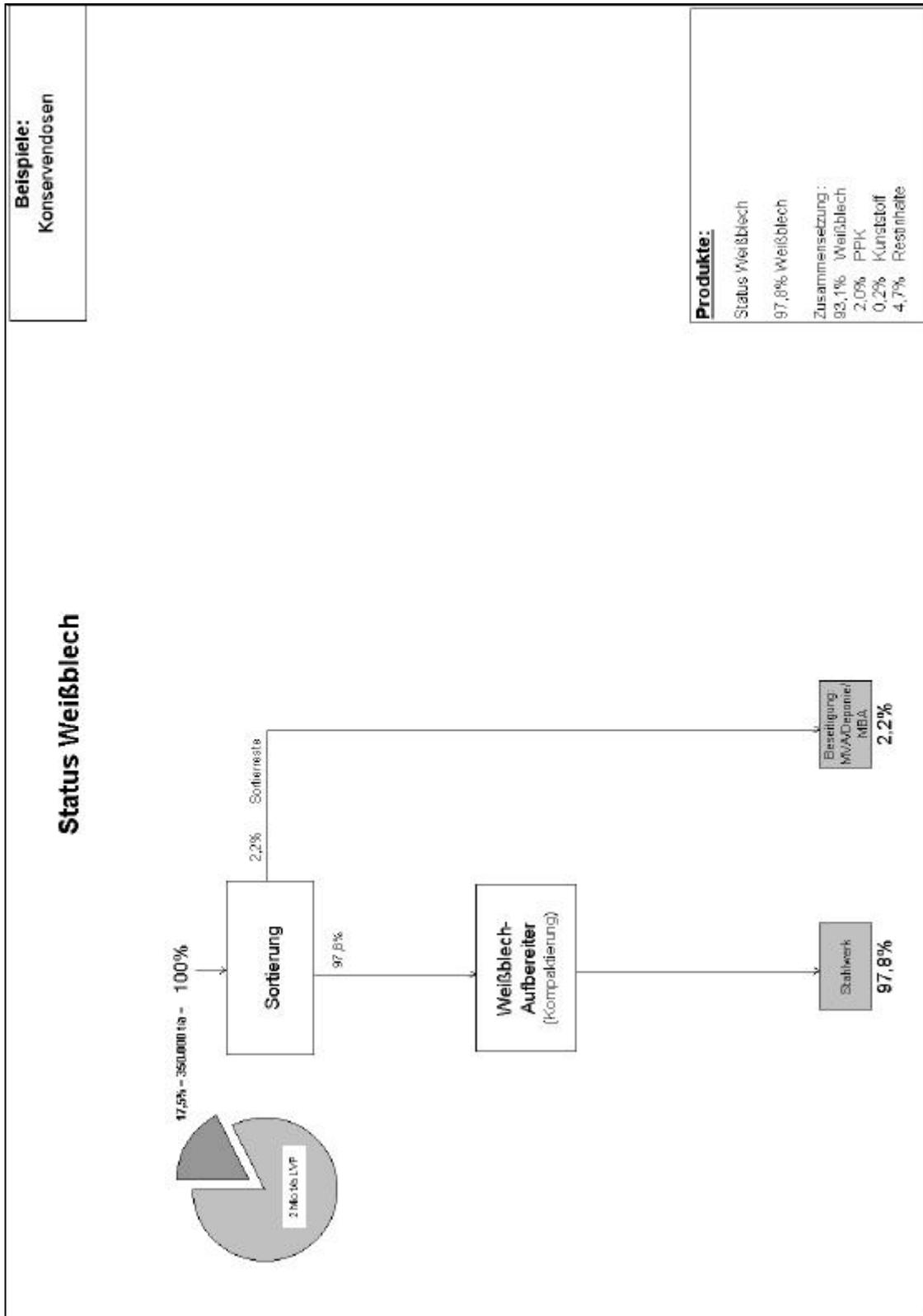
3.1.26 Flüssigkartons optimierter Status



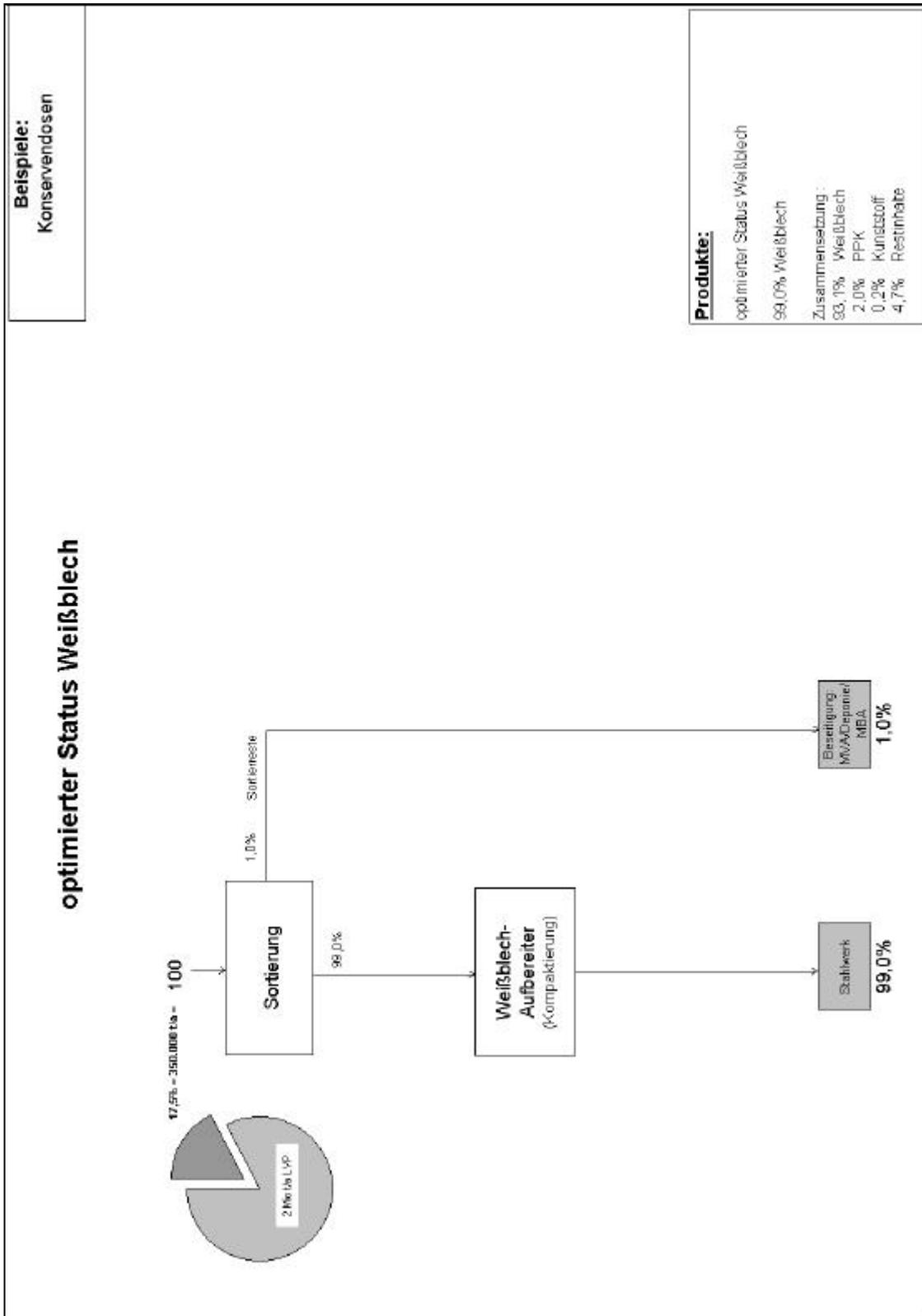
3.1.27 Flüssigkeitskartons Sortec



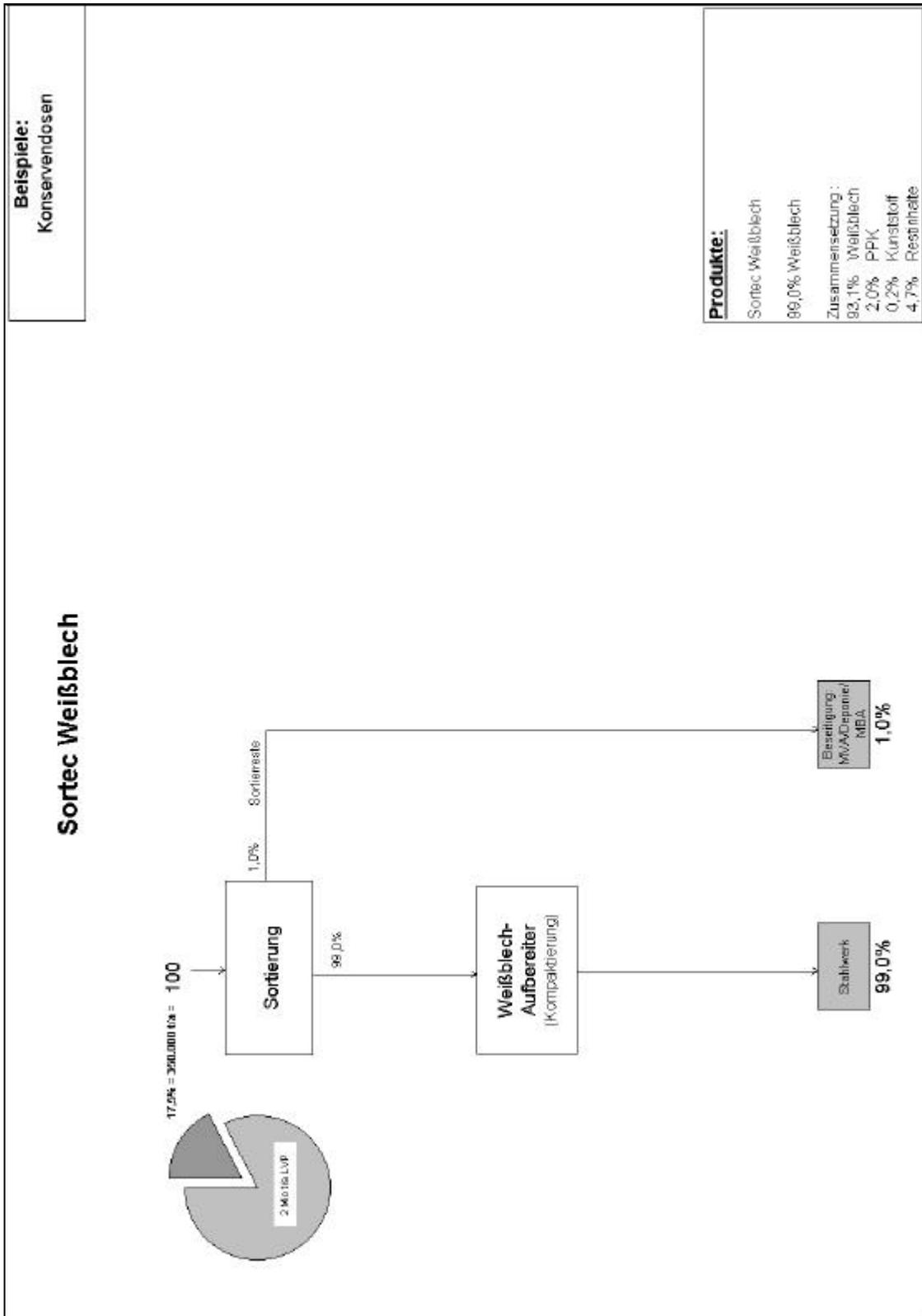
3.1.28 Weißblech Status Quo



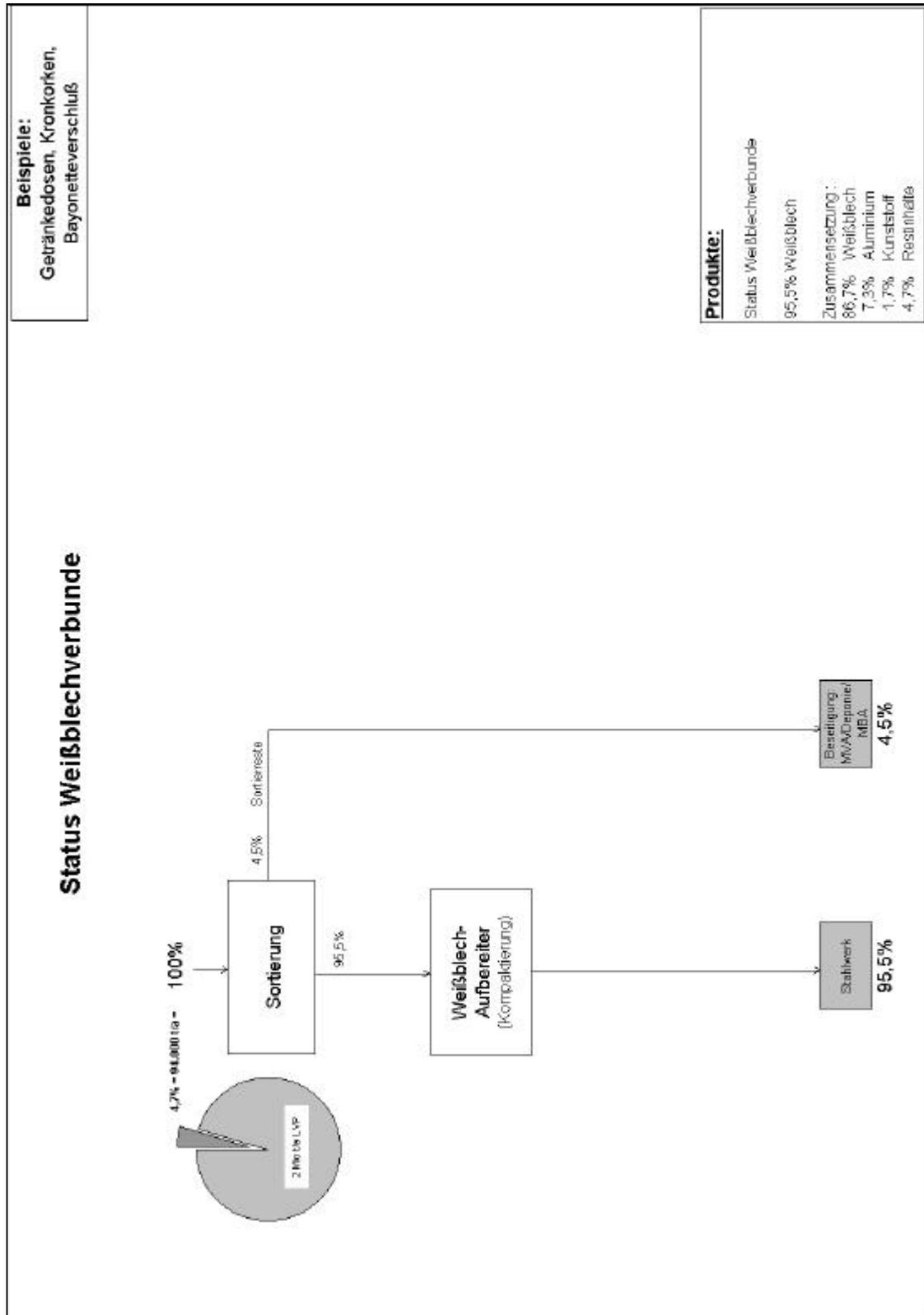
3.1.29 Weißblech optimierter Status



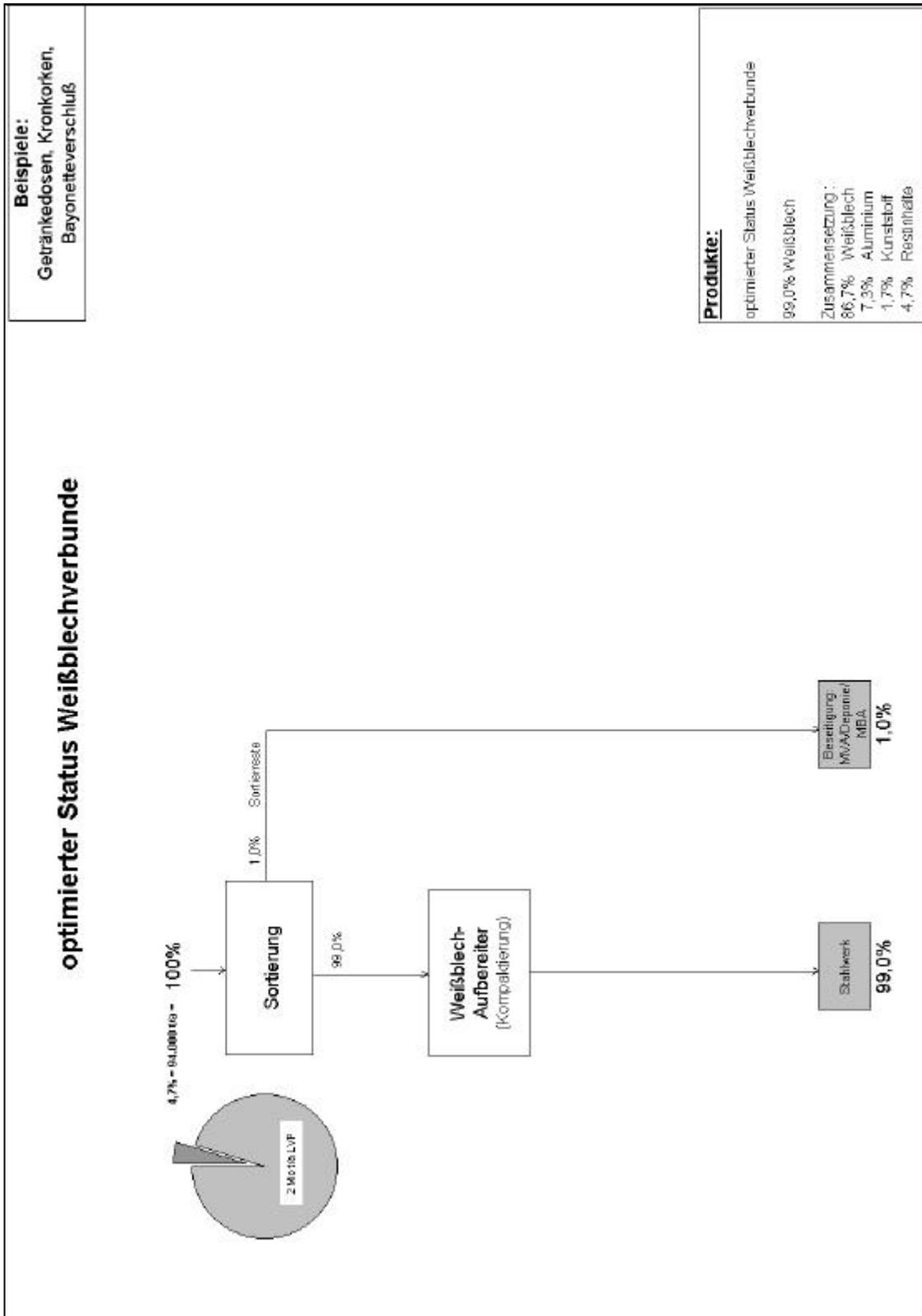
3.1.30 Weißblech Sortec



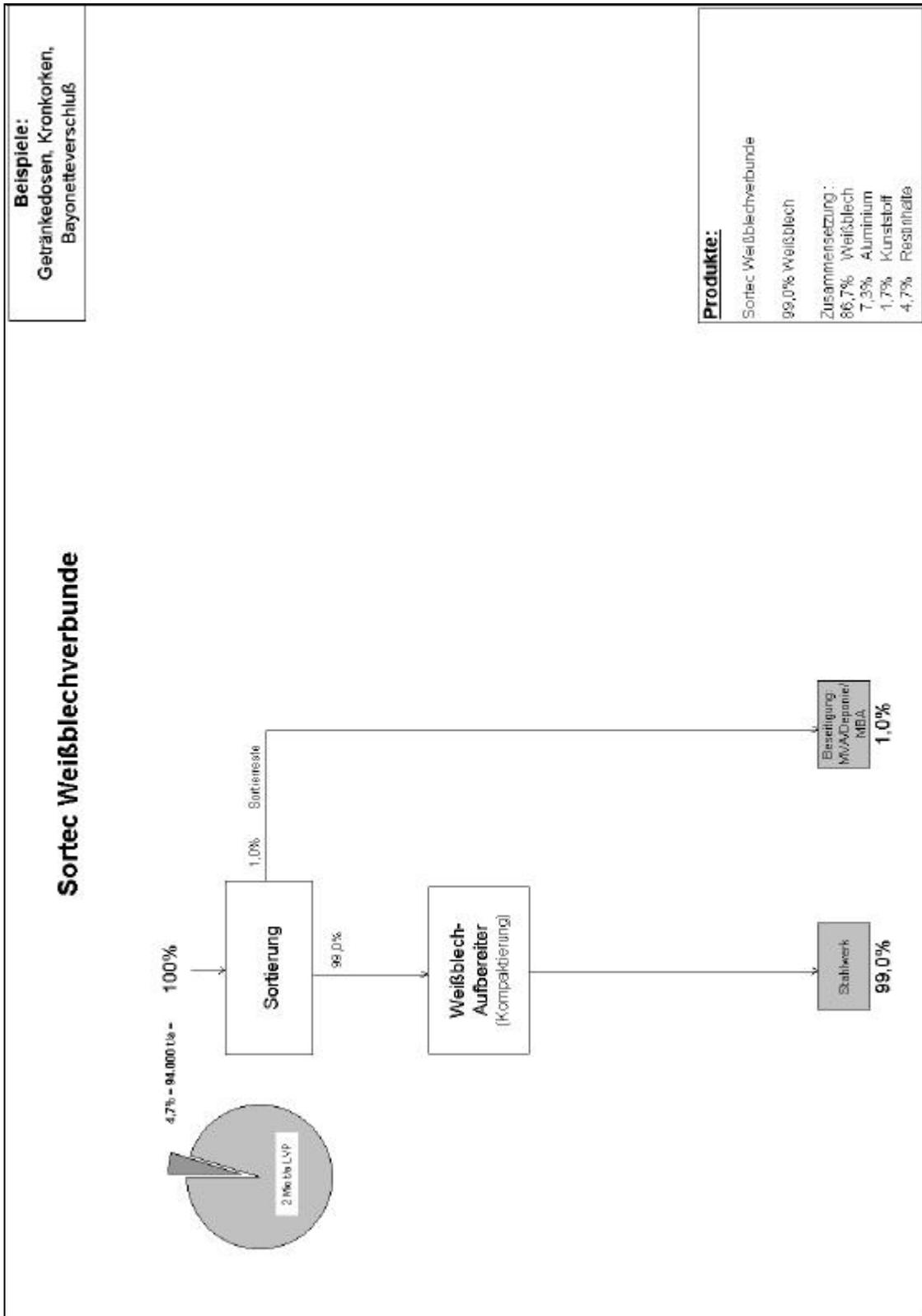
3.1.31 Weißblechverbunde Status Quo



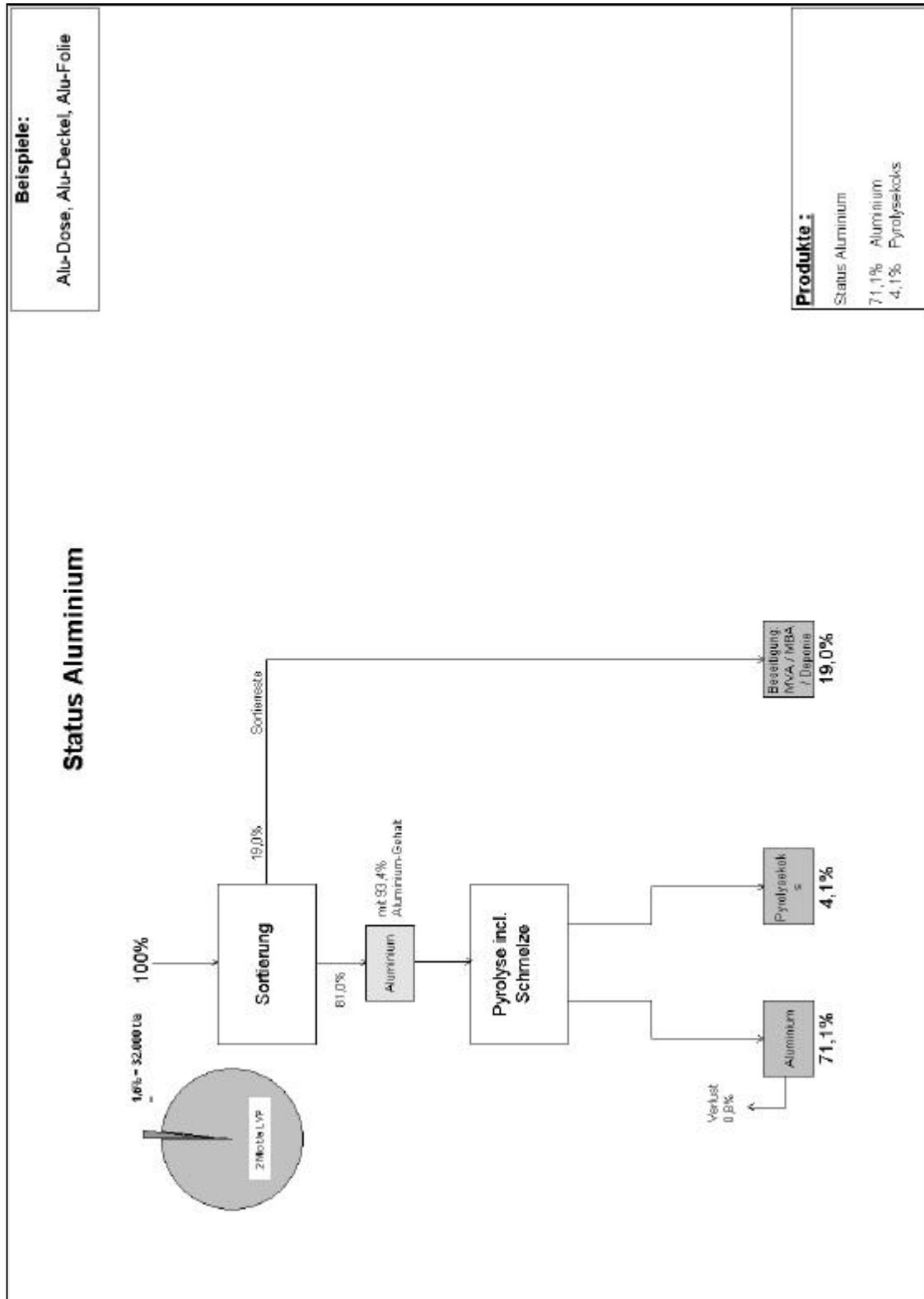
3.1.32 Weißblechverbunde optimierter Status



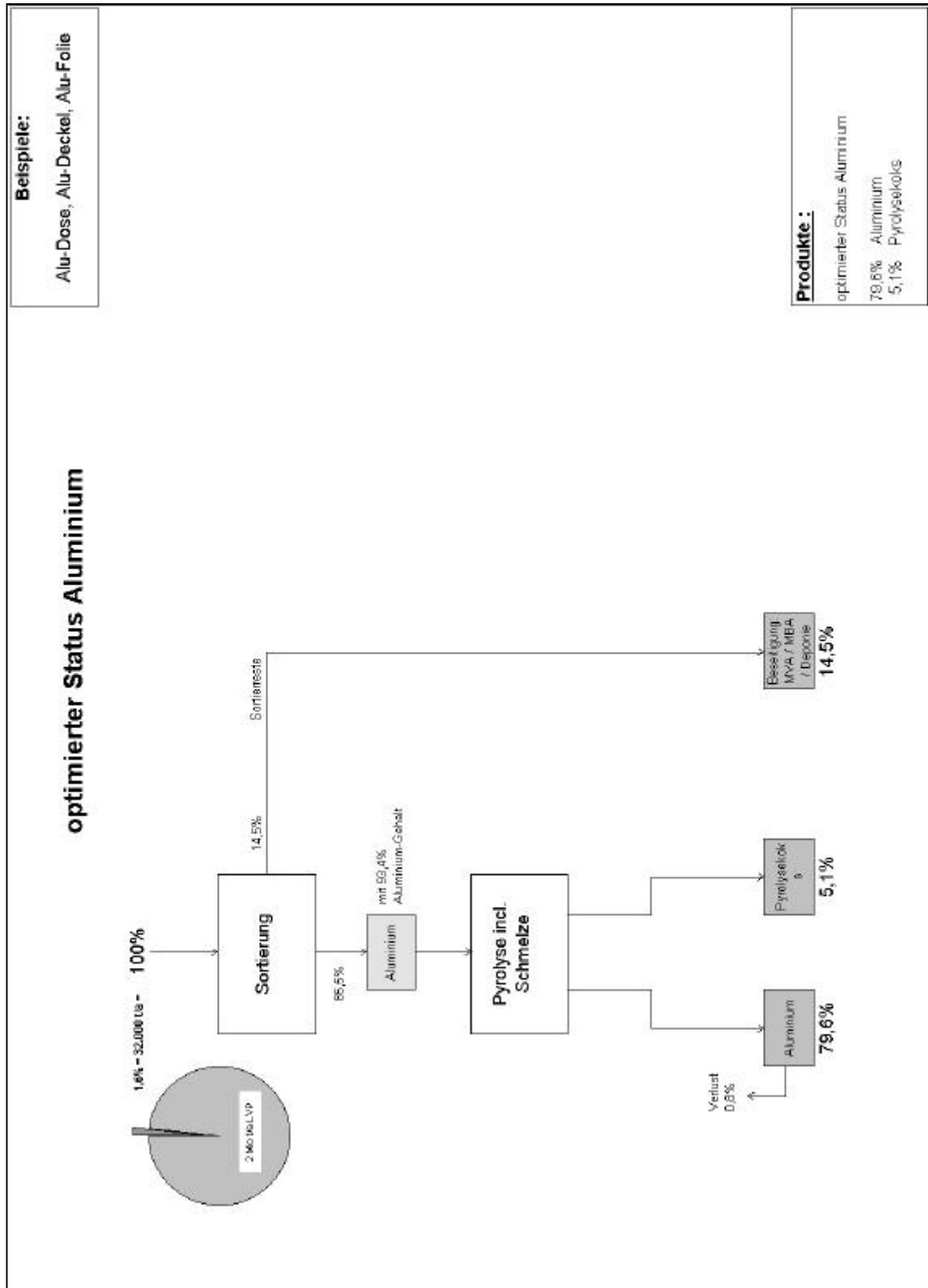
3.1.33 Weißblechverbunde Sortec



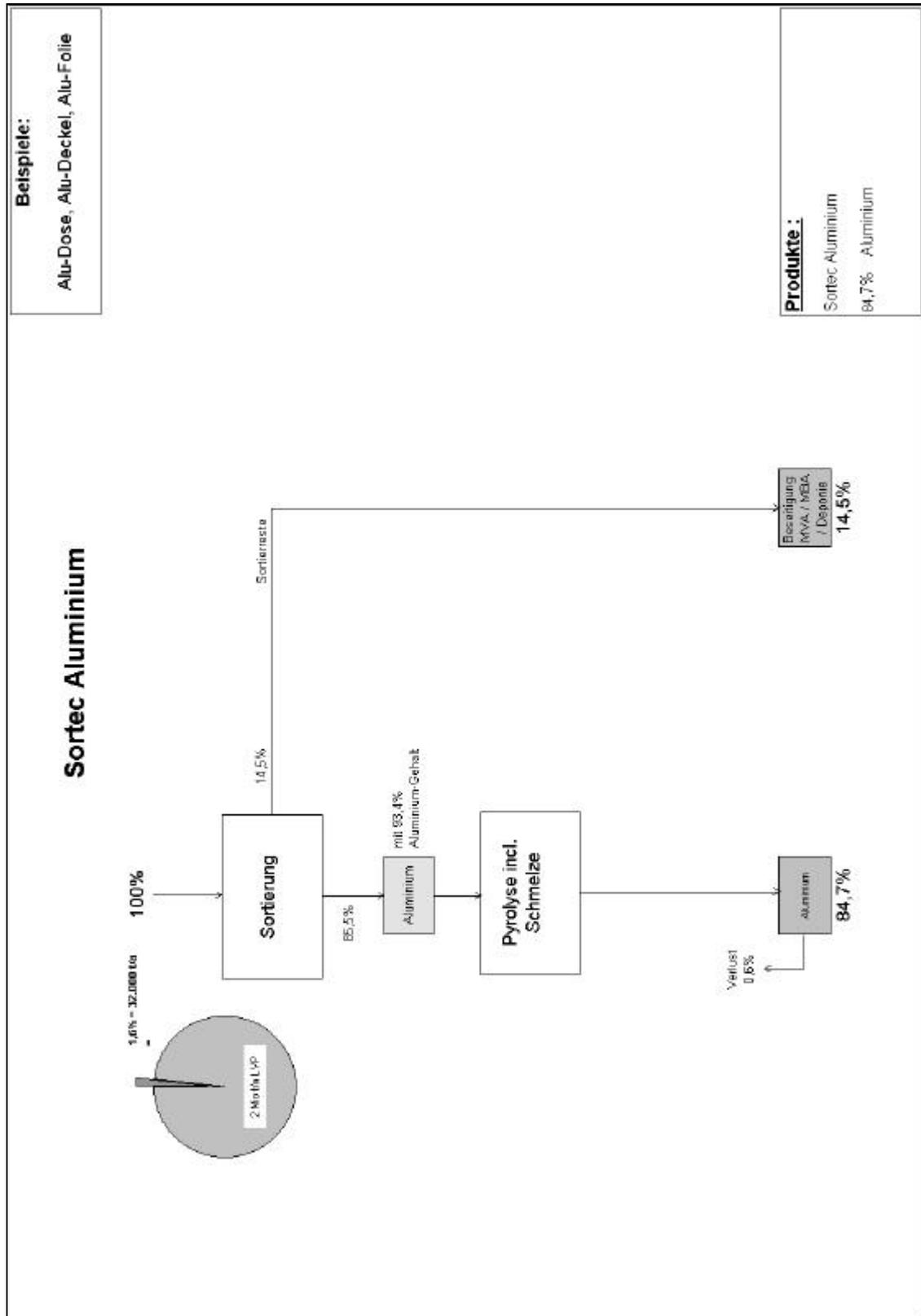
3.1.34 Aluminium Status Quo



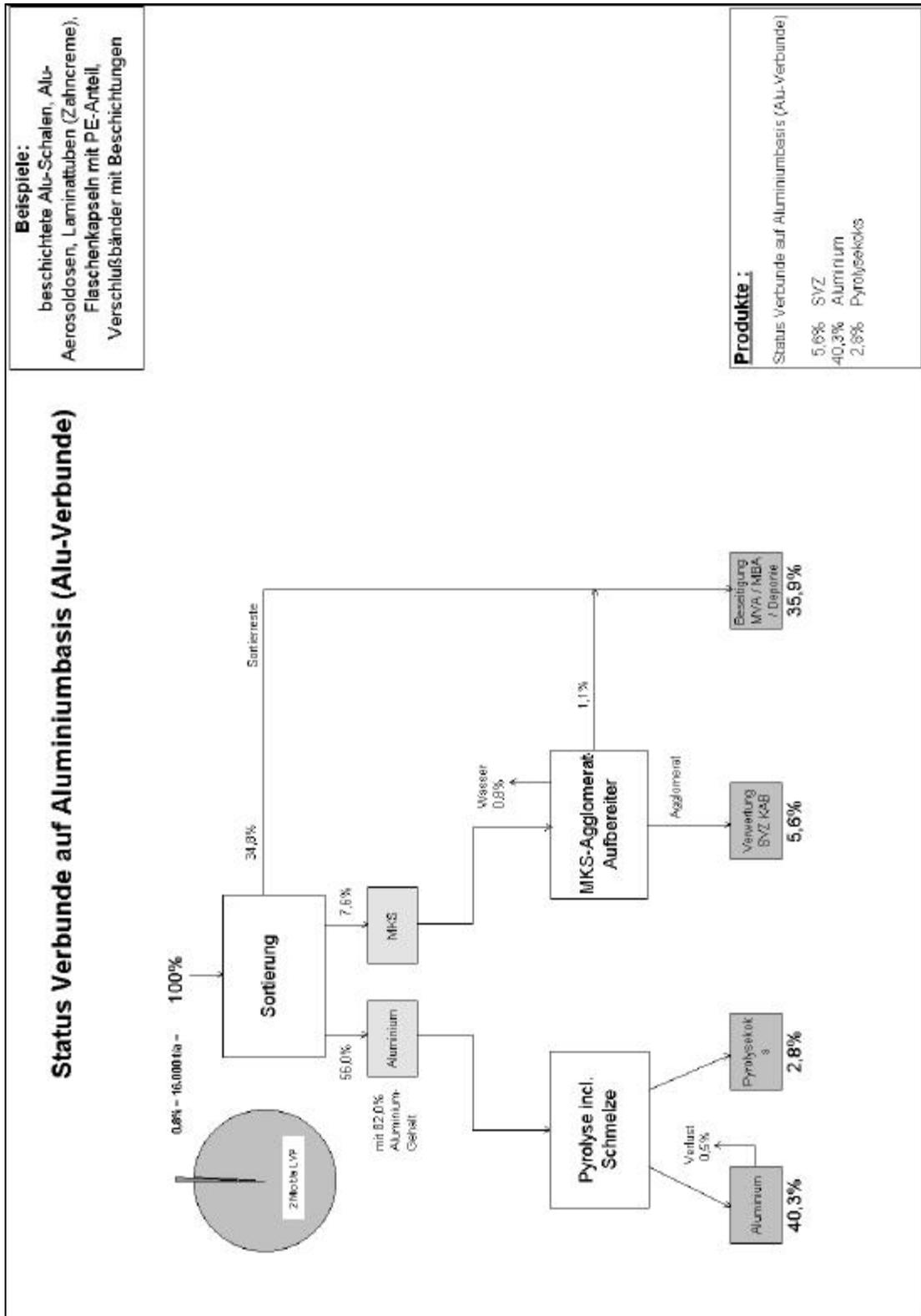
3.1.35 Aluminium optimierter Status



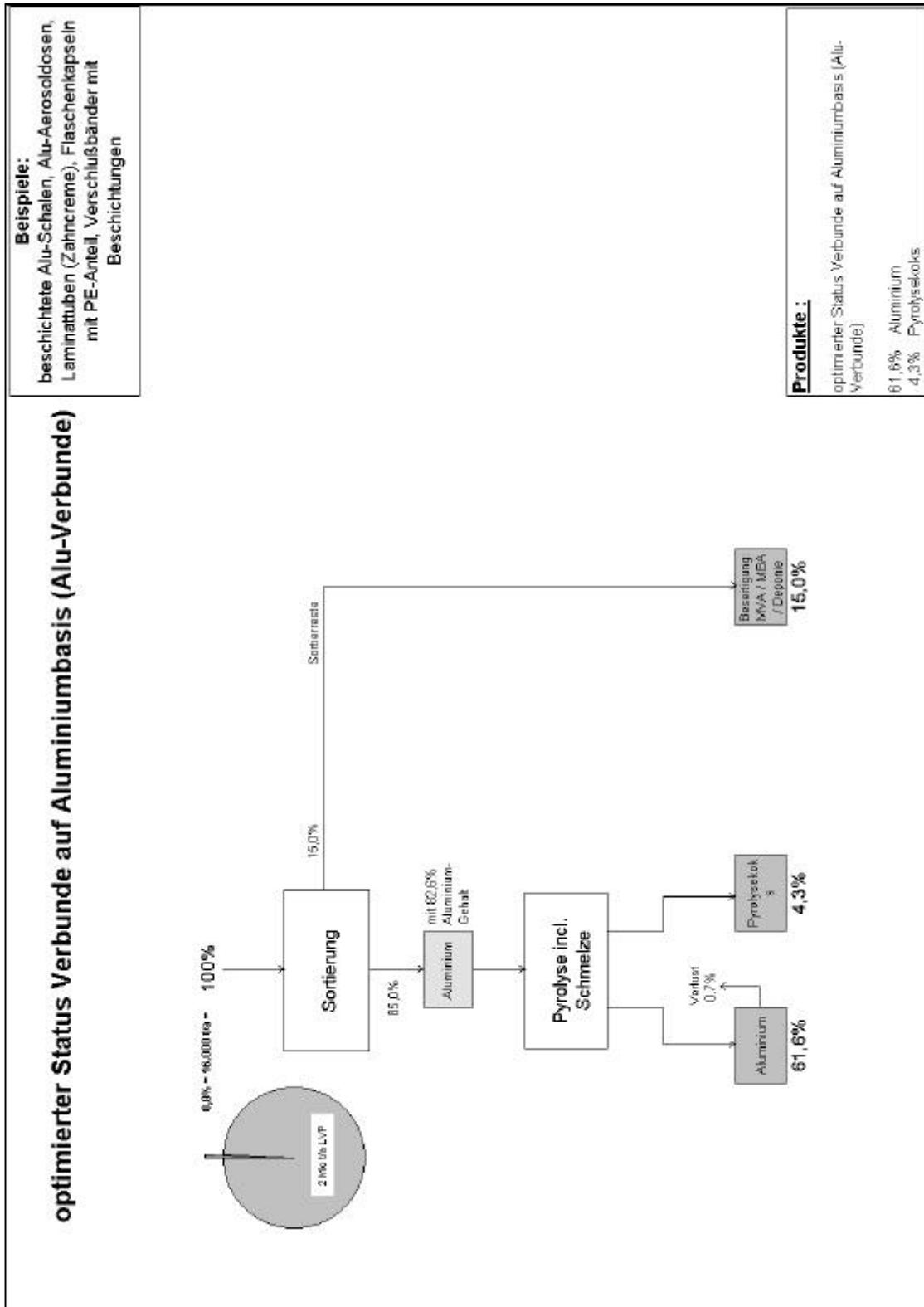
3.1.36 Aluminium Sortec



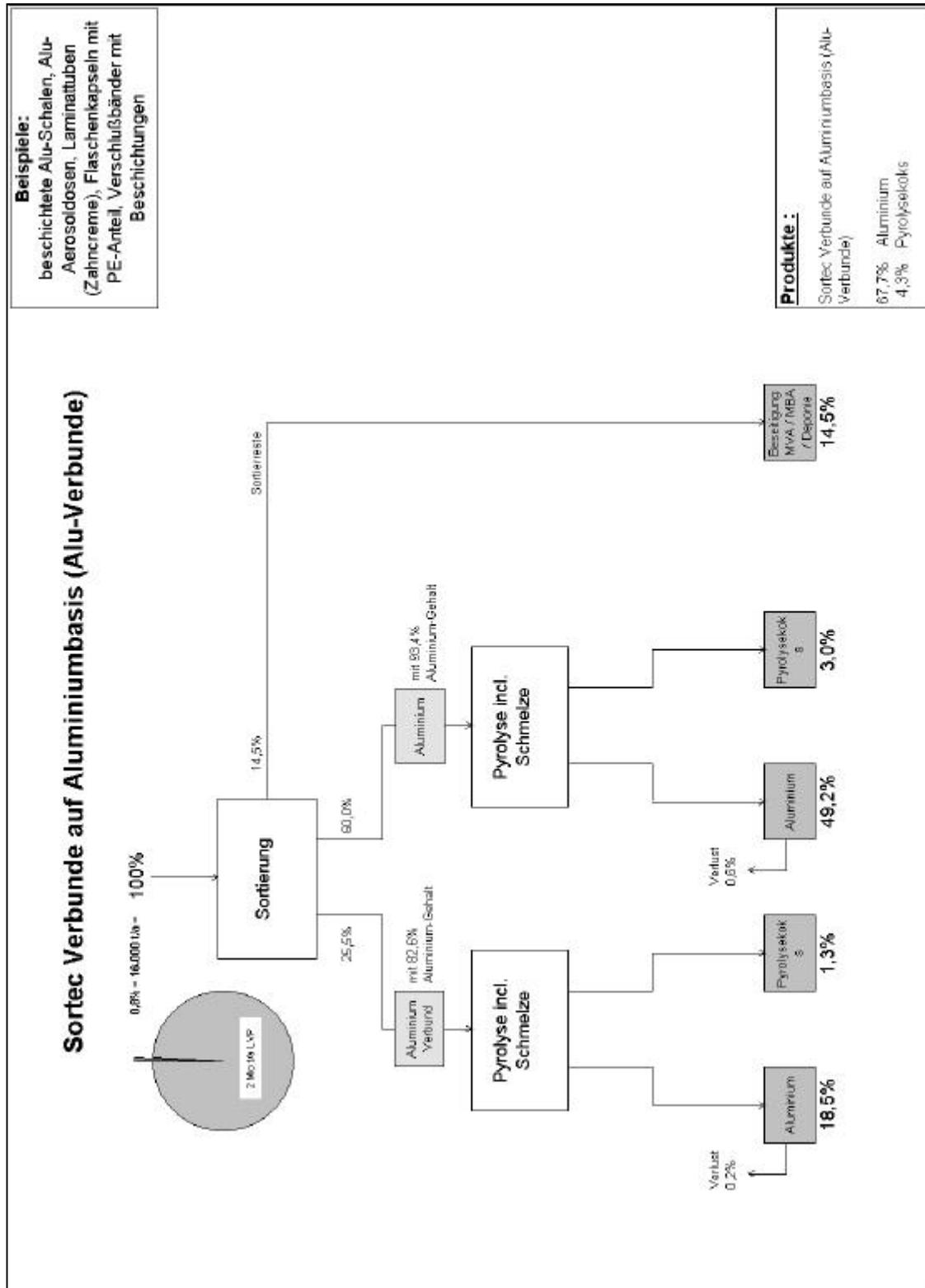
3.1.37 Aluminiumverbunde Status Quo



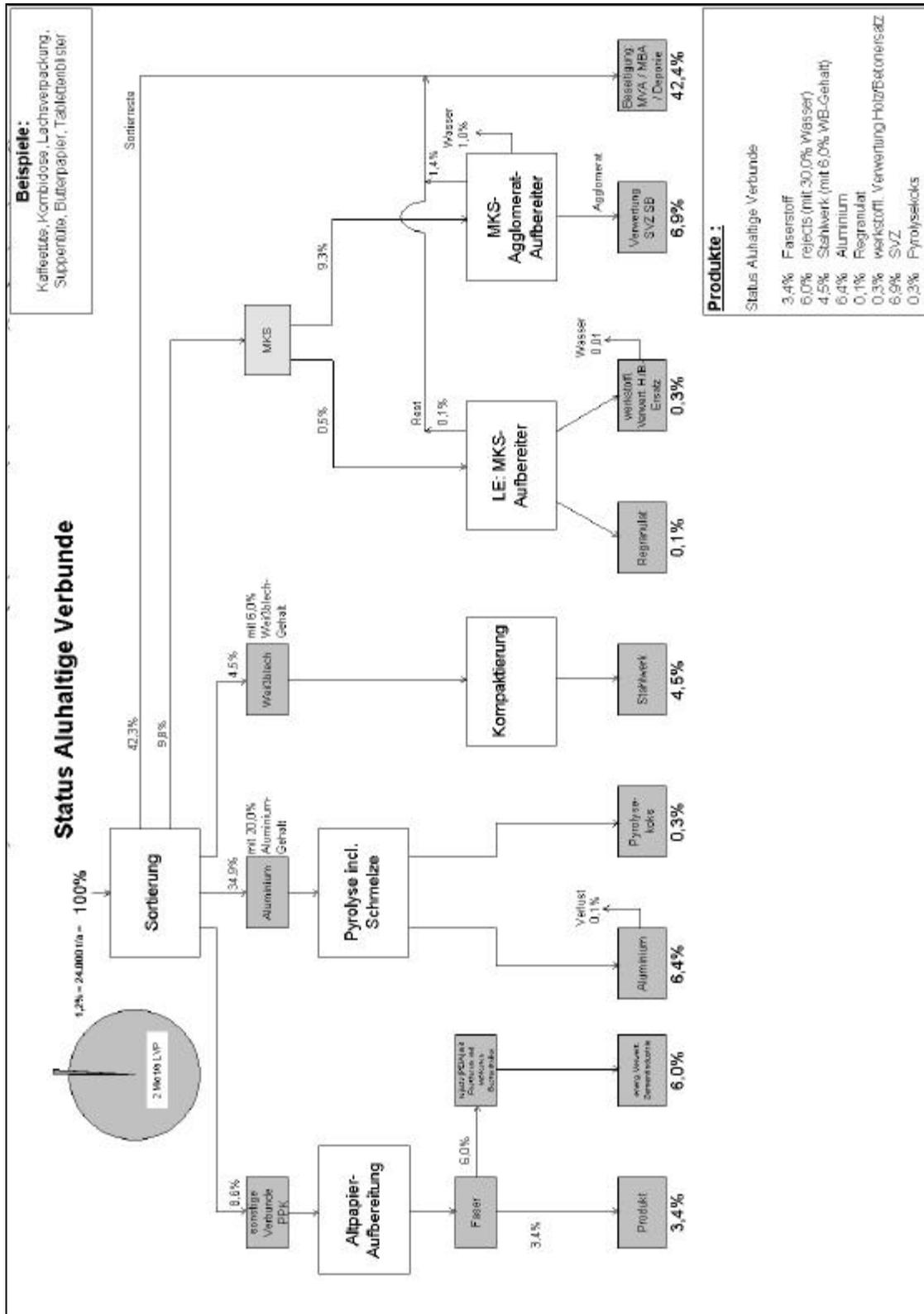
3.1.38 Aluminiumverbunde optimierter Status



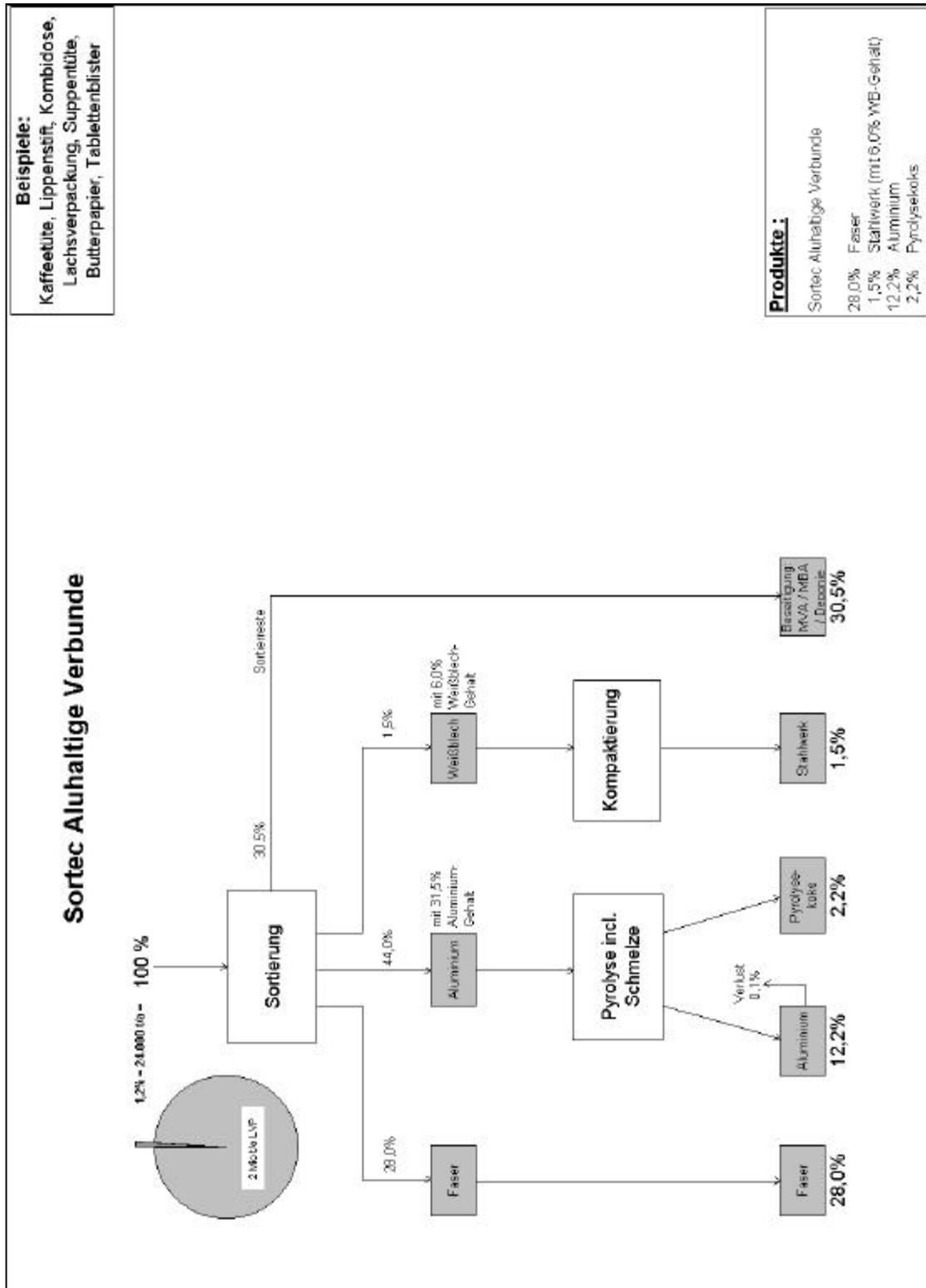
3.1.39 Aluminiumverbunde Sortec



3.1.40 Aluminiumhaltige Verbunde Status Quo



3.1.42 Aluminiumhaltige Verbunde Sortec



Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

Anhang I.	Ergänzende Daten zu den Verwertungsprozessen.....	255
Anhang II.	Ergänzende Daten zu den Äquivalenzprozessen	258
Anhang III.	Ergänzende Daten zur Auswertung.....	262
III.1	Kunststofffolien > Din A4 (K.-Fo>A4).....	265
III.2	Kunststofffolien < Din A4 (K.-Fo<A4).....	268
III.3	Kunststoffbecher (K.-Becher)	271
III.4	Kunststoffflaschen (K.-Flaschen).....	274
III.5	Kunststoffverbunde (K.-Vb)	277
III.6	Sonstige Kunststoffe (so. K.).....	280
III.7	Verbunde auf Aluminiumbasis (Alu-Vb).....	283
III.8	Aluminium haltige Verbunde (Aluh.-Vb).....	286
III.9	Aluminium (Alu).....	289
III.10	Weißblech (Wb).....	292
III.11	Weißblechverbunde (Wb-Vb).....	296
III.12	Papierkartonagenverbunde (PPK-Vb).....	299
III.13	Flüssigkeitskartons (FKN).....	302
Anhang IV.	Vergleich der 13 LVP-Gruppen innerhalb einer Wirkungskategorie ..	305

Anhang I. Ergänzende Daten zu den Verwertungsprozessen

Bei der Betrachtung des Gesamtsystems im Modell werden wie in Kapitel 2 „Grundlagen der Bilanzierung“ beschrieben, die Schritte Sortierung, Aufbereitung und Herstellung sekundärer Rohstoffe abgebildet. Der für die Sortierung angenommene spezifische Energieaufwand je Verpackungsmaterialgruppe im Zuge der Sortierung wird aus Tab. I-1 entnommen (Daten von HTP zu Verfügung gestellt). Der in der Verwertungsoption SORTEC in vielen Fällen wesentlich höhere Energieaufwand ergibt sich aus der in dieser Anlage verwirklichten Stoffstromsortierung mit integrierter Veredelung, die in den Szenarien Status Quo und Status Quo optimiert gesondert modelliert werden und nicht direkt in der Sortierung implementiert sind (vgl. auch Tab. I-2).

Den nur geringen Unterschieden im Energieverbrauch der Verwertungsoptionen Status Quo und Status Quo optimiert stehen die zum Teil erheblich größeren Verbräuche in der Verwertungsoption SORTEC gegenüber. Vor allem die Sortierung und Aufbereitung von Kunststofffolien, Kunststoffbechern, sonstigen Kunststoffen und Papierkartonagenverbunden benötigen in der SORTEC-Anlage einen sehr hohen Energieaufwand.

Tab. I-1 : Energieverbrauch [kWh t⁻¹] in der Sortierung

Verpackungsmaterialgruppe	Status Quo [kWh t ⁻¹]	Status Quo optimiert [kWh t ⁻¹]	SORTEC [kWh t ⁻¹]
Aluminium	120	140	240
aluminiumhaltig Verbunde	80	120	110
Flüssigkeitskartons	80	100	60
Kunststoffbecher	100	100	900
Kunststoffflaschen	70	120	240
Kunststofffolien < Din A4	100	110	800
Kunststofffolien > Din A4	120	100	800
Kunststoffverbunde	110	100	230
Papierkartonagenverbunde	60	60	570
sonstige Kunststoffe	80	90	640
Verbunde auf Aluminiumbasis	90	130	220
Weißblech	80	80	80
Weißblechverbunde	80	80	80

Die im Anschluss an die Sortierung stattfindenden Prozesse der weiteren Aufbereitung und Herstellung sekundärer Rohstoffe sind vor allem in den Szenarien Status Quo und Status Quo optimiert zu finden (Tab. I-2), da ein Großteil der Prozesse in der Verwer-

tungsoption SORTEC im Sortierungsmodul beinhaltet sind. Der Energieaufwand für die Kompaktierung von Weißblech ist in den Szenarien Status quo und Status Quo optimiert zu 40 %, im Szenario SORTEC zu 100 % im als Sortierung bezeichneten Schritt enthalten (Daten von HTP zu Verfügung gestellt) und wurde daher in den Varianten Status Quo und Status Quo optimiert nur zu 60% angelastet.

Tab. I-2 : Energieverbrauch [kWh t⁻¹] in der Aufbereitung

Aufbereitungs- bzw. Verwertungsschritt	[kWh t ⁻¹]
Verarbeitung sortierter Becher	750
Verarbeitung sortierter Flaschen	750
Nassverarbeitung sortierter Folien	1000
Verarbeitung von MKS zum Holz-/Betonersatz bzw. Regranulat	350
PET-Mahlgutherstellung	100
Verarbeitung von MKS zum MKS-Agglomerat	330
Kompaktierung von Weißblech	4,5

Für die in den Teilmodulen Aufbereitung und Herstellung sekundärer Rohstoffe abgebildeten Transportprozesse werden die in Tab. I-3 aufgeführten Entfernungsangaben und Auslastungsgrade verwendet (Angaben von HTP, DKR, [Heyde und Kremer 1999] und eigene Erhebungen). Die teils stark unterschiedlichen Entfernungen ergeben sich vor allem aus der geografischen Verteilung der Standorte der einzelnen Anlagenbetreiber in der BRD. Im Auslastungsgrad spiegelt sich die Dichte des zu transportierenden Gutes wieder, die beispielsweise bei Kunststoffflaschen im Vergleich zu Weißblech viel geringer ist.

Tab. I-3: Entfernung [km] und Auslastung [%] der LKW-Transporte (40 t) von der „Sortierung zur Aufbereitung“ und „Aufbereitung zur Herstellung sekundärer Rohstoffe“

Material	Entfernung [km]	Auslastung [%]
Aluminium (Pyrolyse)	500	90
Faserstoff (Altpapier)	500	90
Kunststoffbecher	200	90
Kunststoffflaschen	200	70
MKS-Agglomerat (Hochofen / SVZ)	600	90
MKS-Agglomerat (Palisaden/Konstruktionszäune)	200	90
PET-Mahlgut	600	50
Weißblech	200	95
PE im Reject (Zementklinker)	200	90

Anhang II. Ergänzende Daten zu den Äquivalenzprozessen

Für die Bilanzierung des äquivalenten Nutzens der in der Verwertung produzierten Güter und der in der Beseitigung erzeugten thermischen und elektrischen Energie, wird im Modul der Äquivalenzprozesse eine entsprechende Gutschrift berechnet. Ein Vergleich der Gutschriften bei verschiedenen Produkten ist in den Abbildungen Abb. II-1 bis Abb. II-6, bezogen auf 1000 kg Materialeinsatz dieses Produkts, dargestellt. In den Prozessen Reduktionsmittel (Hochofen) und Klinkerpotential (Herstellung von Zementklinkern) wird entsprechend eine Materialmenge von 1000 kg Kunststoff (PE) eingesetzt und gutgeschrieben. In den Modulen Holz- und Zementpalisaden werden zudem die Substitutionsfaktoren der Produkte berücksichtigt. Damit ist es möglich, das Ausmaß zu ersehen, in dem die einzelnen Äquivalenzprozesse Gutschriften bei den betrachteten Wirkungskategorien erbringen.

Beispielsweise entlastet die Gutschrift von 1000 kg Aluminium in der Wirkungskategorie Treibhauseffekt das Gesamtsystem um mehr als 12.000 kg CO₂-Äquivalente wohingegen die Gutschrift einer gleichen Menge von Weißblech nur eine Entlastung von ca. 3000 kg CO₂-Äquivalenten zur Folge hat (vgl. Abb. II-1).

Auf die Darstellung der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung und Naturraumbeanspruchung wird aufgrund des mit Ausnahme der Verpackungsmaterialgruppen PPK-Vb und FKN sehr geringen spezifischen Beitrags verzichtet.

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

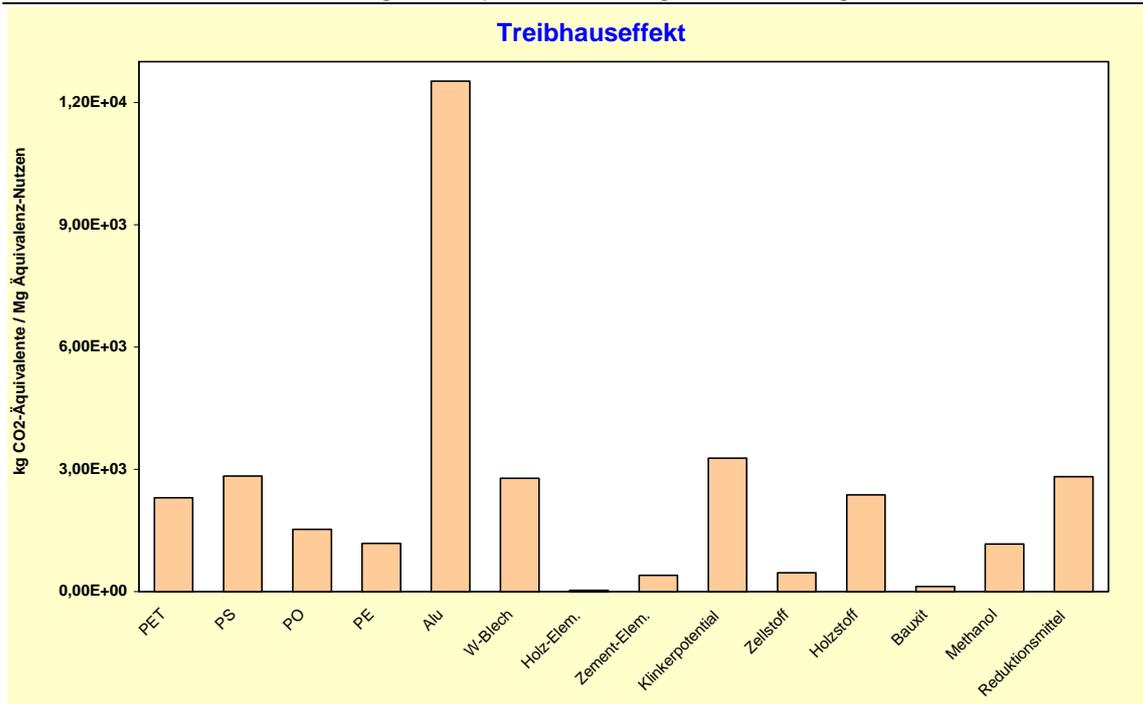


Abb. II-1: Treibhauseffekt in den Äquivalenzprozessen bezogen auf je 1000 kg Nutzen (bei Holz- und Zementpalisaden unter Berücksichtigung der Substitutionsfaktoren; bei Klinkerpotential und Reduktionsmittel bezogen auf 1000 kg Kunststoffprodukt).

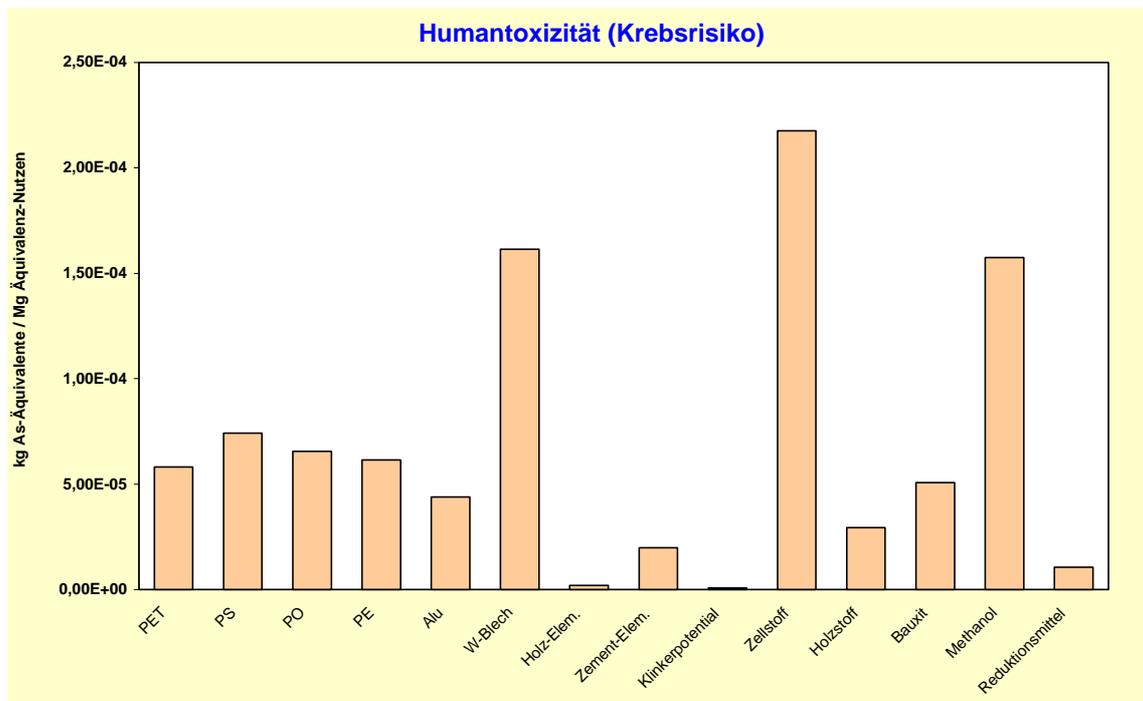


Abb. II-2: Humantoxizität in den Äquivalenzprozessen bezogen auf je 1000 kg Nutzen (bei Holz- und Zementpalisaden unter Berücksichtigung der Substitutionsfaktoren; bei Klinkerpotential und Reduktionsmittel bezogen auf 1000 kg Kunststoffprodukt).

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

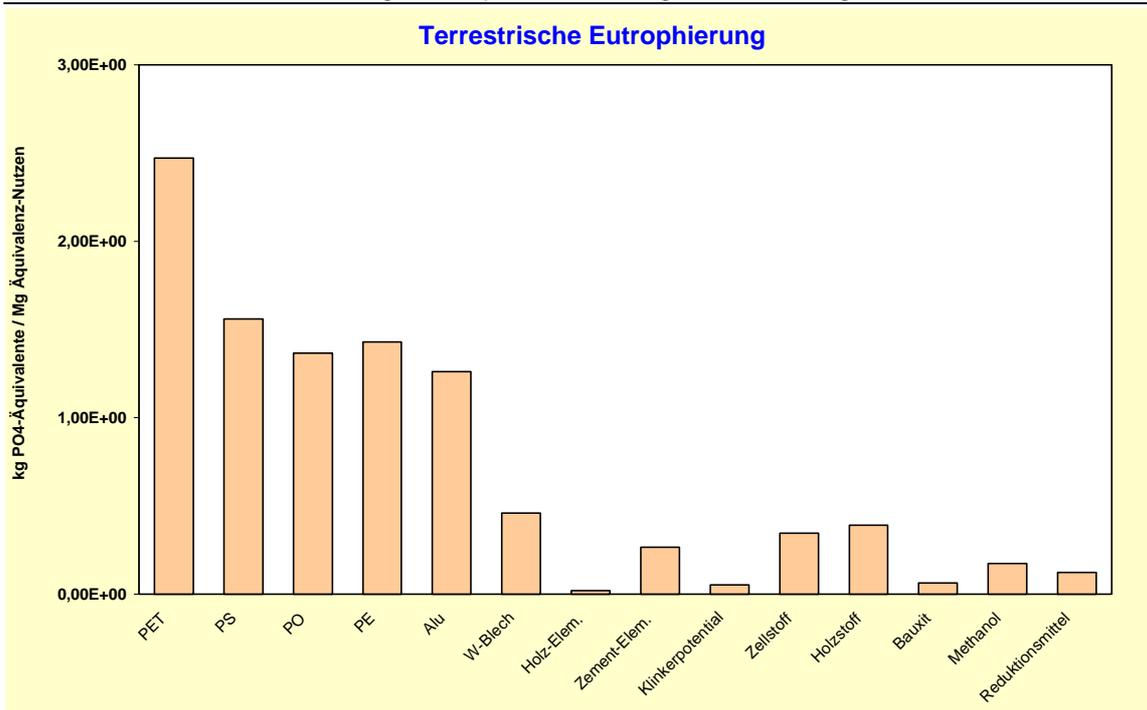


Abb. II-3: Terrestrische Eutrophierung in den Äquivalenzprozessen bezogen auf je 1000 kg Nutzen (bei Holz- und Zementpalisaden unter Berücksichtigung der Substitutionsfaktoren; bei Klinkerpotential und Reduktionsmittel bezogen auf 1000 kg Kunststoffprodukt).

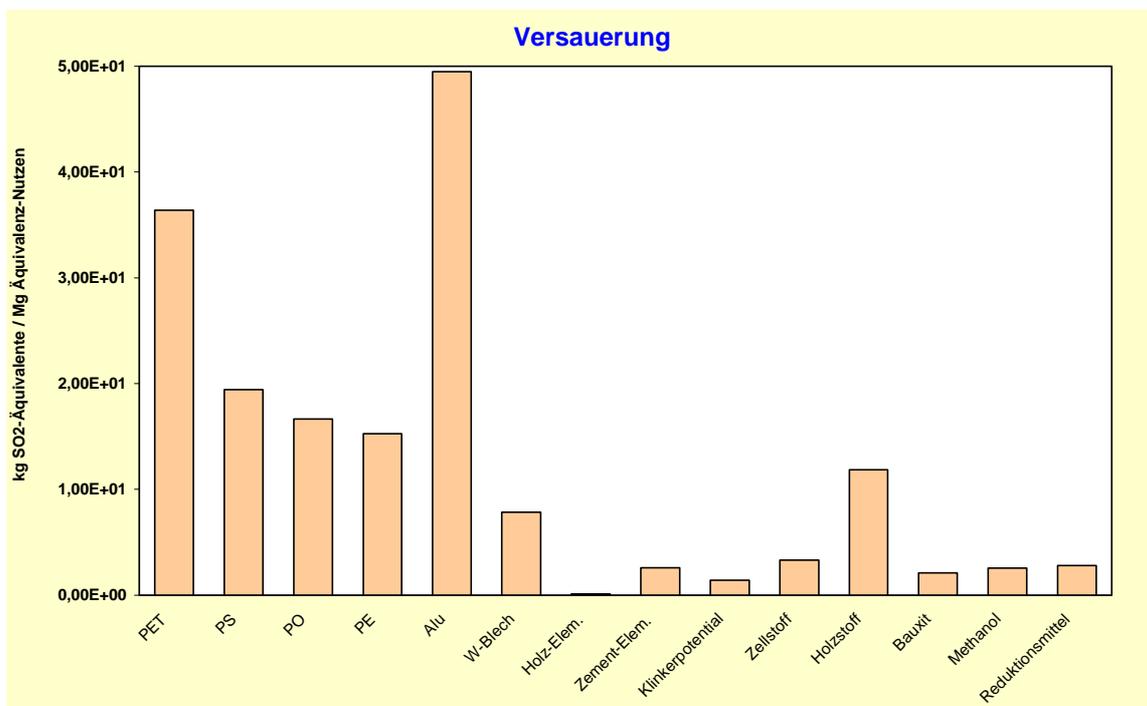


Abb. II-4: Versauerung in den Äquivalenzprozessen bezogen auf je 1000 kg Nutzen (bei Holz- und Zementpalisaden unter Berücksichtigung der Substitutionsfaktoren; bei Klinkerpotential und Reduktionsmittel bezogen auf 1000 kg Kunststoffprodukt).

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

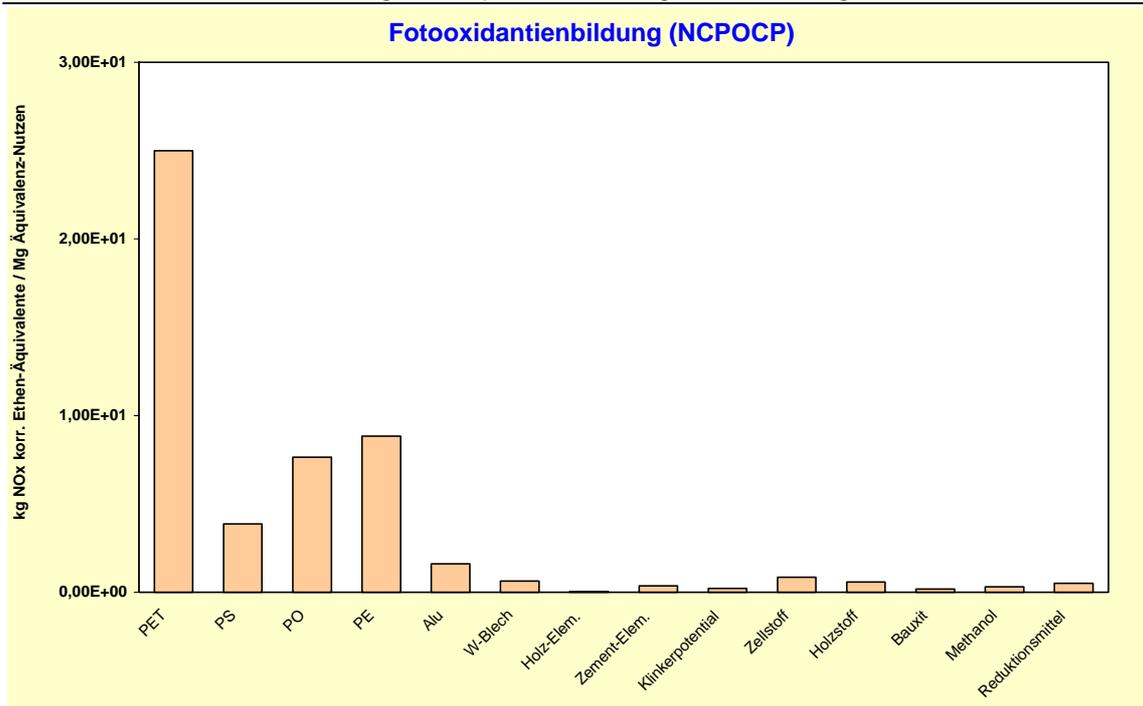


Abb. II-5: Fotooxidantienbildung in den Äquivalenzprozessen bezogen auf je 1000 kg Nutzen (bei Holz- und Zementpalisaden unter Berücksichtigung der Substitutionsfaktoren; bei Klinkerpotential und Reduktionsmittel bezogen auf 1000 kg Kunststoffprodukt).

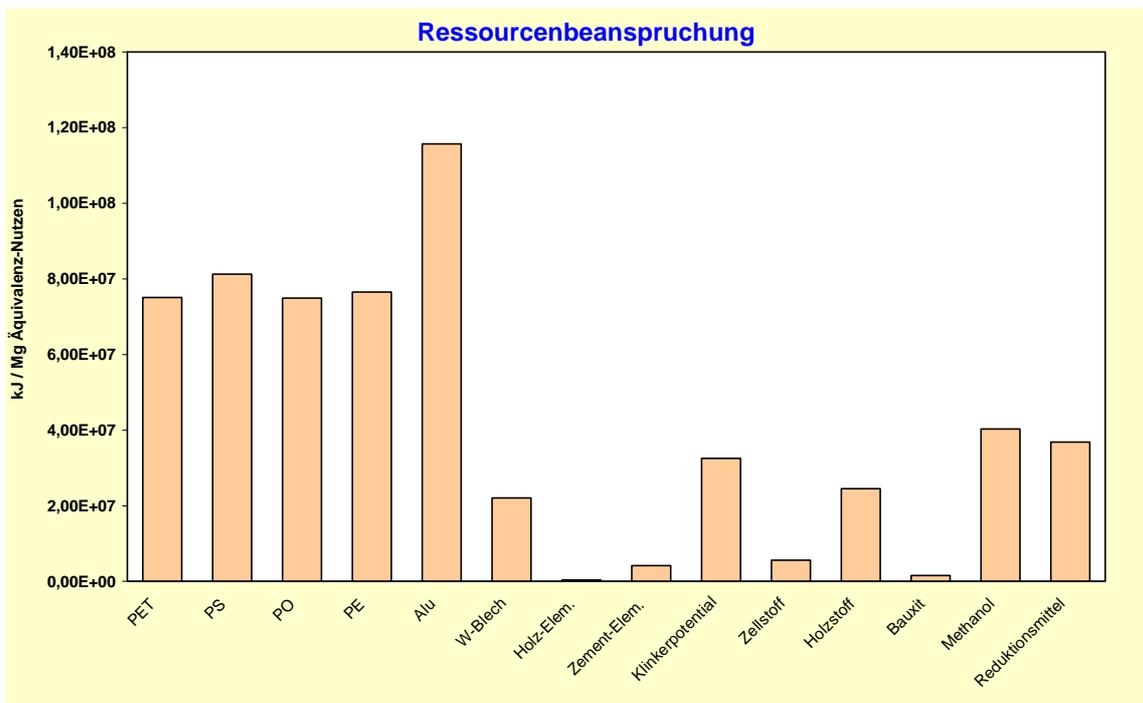


Abb. II-6: Ressourcenbeanspruchung in den Äquivalenzprozessen bezogen auf je 1000 kg Nutzen (bei Holz- und Zementpalisaden unter Berücksichtigung der Substitutionsfaktoren; bei Klinkerpotential und Reduktionsmittel bezogen auf 1000 kg Kunststoffprodukt).

Anhang III. Ergänzende Daten zur Auswertung

Für sämtliche Verpackungsgruppen befinden sich in den folgenden Abschnitten III.1 bis III 13 grundlegenden Angaben für die in Kapitel 4 diskutierte „Ökologische Bewertung“. Nachfolgend werden die entsprechenden Tabellen und Abbildungen kurz erläutert.

Zu den Tabellen:

- In den Tabellen „EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe: Absolutwerte“ sind die für die jeweilige Verpackungsgruppe berechneten Einwohnerdurchschnittswerte je Wirkungskategorie angegeben (z.B. Tab. III-1). In der Beseitigungsoption Bes100 finden sich in der Wirkungskategorie Naturraumbeanspruchung und Aquatische Eutrophierung keine Werte. Bei der in diesem Fall angenommenen Beseitigungsoption findet keine Belastungen durch die 100%ige Müllverbrennung selber oder Entlastung durch die produzierte Energiemenge in den betrachteten Wirkungskategorien statt. Rundungsbedingt können auch Werte mit „0“ auftauchen, die einem Wert zwischen 0 und 0,49 entsprechen.
- Die Tabellen „EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe: Differenzwerte zur besten Option“ berücksichtigen die jeweils in einer Wirkungskategorie beste Verwertungs- oder Beseitigungsoption, indem diese als Null gesetzt wird und in der Tabelle keinen Wert erhält (z.B. Tab. III-2, Verwertungsoption SORTEC in der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung oder die Beseitigungsoption Bes100 in der Wirkungskategorie Humantoxizität). Diese Tabelle dient zur Bestimmung der „Kachelbilder“ in Kapitel 4, Ökologische Bewertung (z.B. Tab. 4-3).

Grundlage für die Berechnung der EDW sind die Indikatorergebnisse in der Rubrik 2, Charakterisierung in der Wirkungsabschätzung, Verzeichnis LVP.XLS auf CD-ROM. Die Indikatorergebnisse berechnen sich aus den Sachbilanzgrößen (Rubrik 1, Klassifizierung in der Wirkungsabschätzung, Verzeichnis LVP.XLS auf CD-ROM) über die Bestimmung von Wirkungsäquivalenten (vgl. auch Kapitel 3.1, Tab. 3-2).

Die Indikatorergebnisse werden ins Verhältnis zur durchschnittlichen Belastung je Einwohner bzw. Einwohnerin der BRD gesetzt. Als Grundlage hierfür dient die in Kapitel 3.2.2 (Normierung) aufgeführte Tab. 3-4. Dadurch ergibt sich für jede Untersuchungs-

option eine Anzahl von Einwohnerdurchschnittswerten je Umweltwirkung. Diese Anzahl bezieht sich zunächst nur auf den Stoffeinsatz von 1000 kg Material. .

Durch eine Skalierung der EDW (Basis 1000 kg) auf das jeweilige Aufkommen der betrachteten Verpackungsgruppe (vgl. Tab. 2-2, Verpackungsgruppen im DSD), kann man die Einwohnerdurchschnittswerte in der BRD berechnen, die bei einem Vergleich der Leichtverpackungen untereinander notwendig sind (vgl. auch Anhang IV). Verpackungsgruppen mit einem hohen jährlichen Aufkommen, wie beispielsweise Weißblech oder K.-Folien > A4 haben daher einen relativ größeren Einfluss bei der Betrachtung von EDW als Verpackungsgruppen mit einem geringen jährlichen Aufkommen (z.B. Aluh.-Vb).

Für eine ökologische Bewertung innerhalb einer Verpackungsgruppe – wie sie im Hauptteil dieses Berichtes durchgeführt wird – ist diese Skalierung nicht unbedingt notwendig, da nur zwischen verschiedenen Verwertungs- bzw. Beseitigungsoptionen der jeweils gleichen Verpackungsmaterialgruppe verglichen wird.

Zu den Abbildungen:

Für die einzelnen Verpackungsgruppen sind für jede Wirkungskategorie der durch das System verursachten kumulierten Umweltwirkungen (= System) die Gutschriften der jeweiligen Äquivalenzprozesse gegenübergestellt (= Gutschrift). Die Differenz dieser beiden Bilanzen (= Netto) wird als Netto-Beitrag in der jeweiligen Wirkungskategorie berechnet. Die Abbildungen sind wie folgt zu lesen:

- Der mit „System“ bezeichnete Balken stellt die Umweltwirkung der eigentlichen Verwertungsmaßnahme – hier des fossilen Energieverbrauch – bezogen auf die jeweilige Verpackungsgruppe dar. Die Umweltbelastung ist als positiver Wert aufgetragen und beschreibt eine Belastung im Gesamtsystem.
- Der mit „Gutschrift“ bezeichnete Balken stellt die Einsparung dar, die durch den erzeugten Sekundärrohstoff erreicht wird, indem eine gleiche oder adäquate Menge (siehe Substitutionsfaktor in Tab. 2-4) eines Primärrohstoffes im Sinne der Kreislaufwirtschaft eingespart wird. Die eingesparte Umweltbelastung wird negativ aufgetragen und bezeichnet eine Entlastung im Gesamtsystem.
- Der mit „Netto“ bezeichnete Balken stellt die Addition der Umweltbelastung durch die Verwertung und Beseitigung im System sowie die Umweltentlastung in der Gutschrift (durch die an Primärmaterialien eingesparten Umweltbelastungen) dar. Ist der Netto-Balken unter der Null-Linie, so ergibt die Verwertungs- bzw. Beseitigungsoption eine Netto-Entlastung der Umwelt wieder, liegt sie darüber beschreibt sie eine Netto-Belastung.

Die im Hauptteil dargestellten Abbildungen „Absolute Unterschiede im Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppen hinsichtlich der Wirkungskategorien“ (z.B. Abb. 4-1) stellen somit einen Auszug aus den in diesem Anhang dargestellten Abbil-

dungen dar, da sie nur die jeweiligen Netto-Werte bezogen auf die jeweils günstigste Option (= 1 gesetzt) wiedergeben.

III.1 Kunststofffolien > Din A4 (K.-Fo>A4)

Tab. III-1: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Kunststofffolien > Din A4: Absolutwerte

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	-25.228	-24.785	-43.541	-3.946	-13.885
Treibhauseffekt	1.990	1.642	-714	4.841	15.434
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	-20.828	-23.674	-55.448	-143	-2.030
Naturraumbeanspruchung	-742	-900	-272	1	0
Versauerung	-12.133	-13.246	-23.602	-1.016	-4.546
Terrestrische Eutrophierung	-7.808	-8.890	-20.627	131	-1.242
Aquatische Eutrophierung	199	81	116	1.807	0
Humantoxizität (Krebsrisiko)	-1.292	-1.139	-1.352	-1.742	-6.002

Tab. III-2: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Kunststofffolien > Din A4: Differenzwerte zur besten Option

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	18.312	18.756		39.595	29.656
Treibhauseffekt	2.703	2.355		5.554	16.147
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	34.621	31.774		55.305	53.418
Naturraumbeanspruchung	158		628	902	900
Versauerung	11.469	10.356		22.585	19.056
Terrestrische Eutrophierung	12.818	11.737		20.757	19.385
Aquatische Eutrophierung	199	81	116	1.807	
Humantoxizität (Krebsrisiko)	4.710	4.862	4.650	4.259	

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

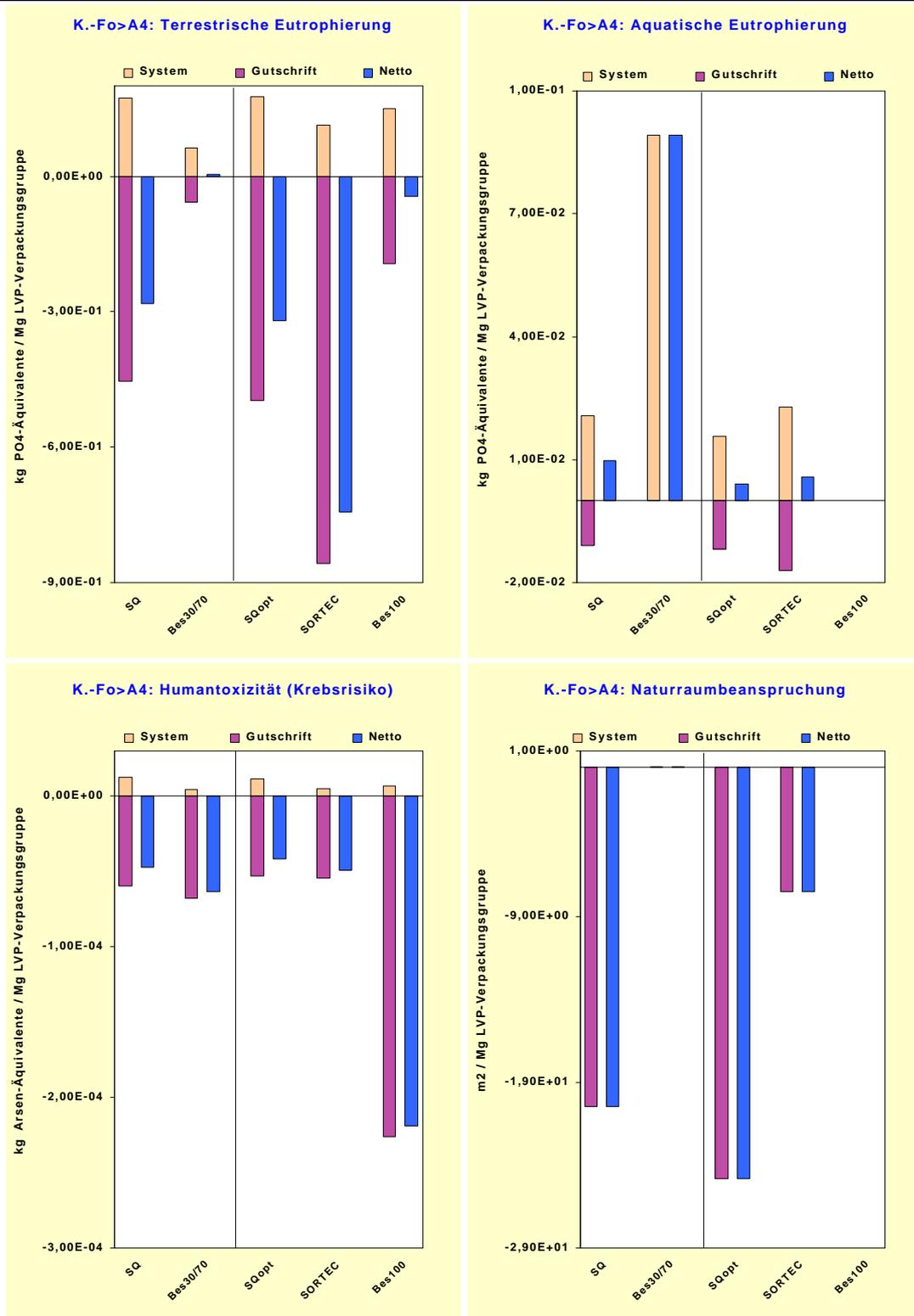


Abb. III-1: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo>A4 hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

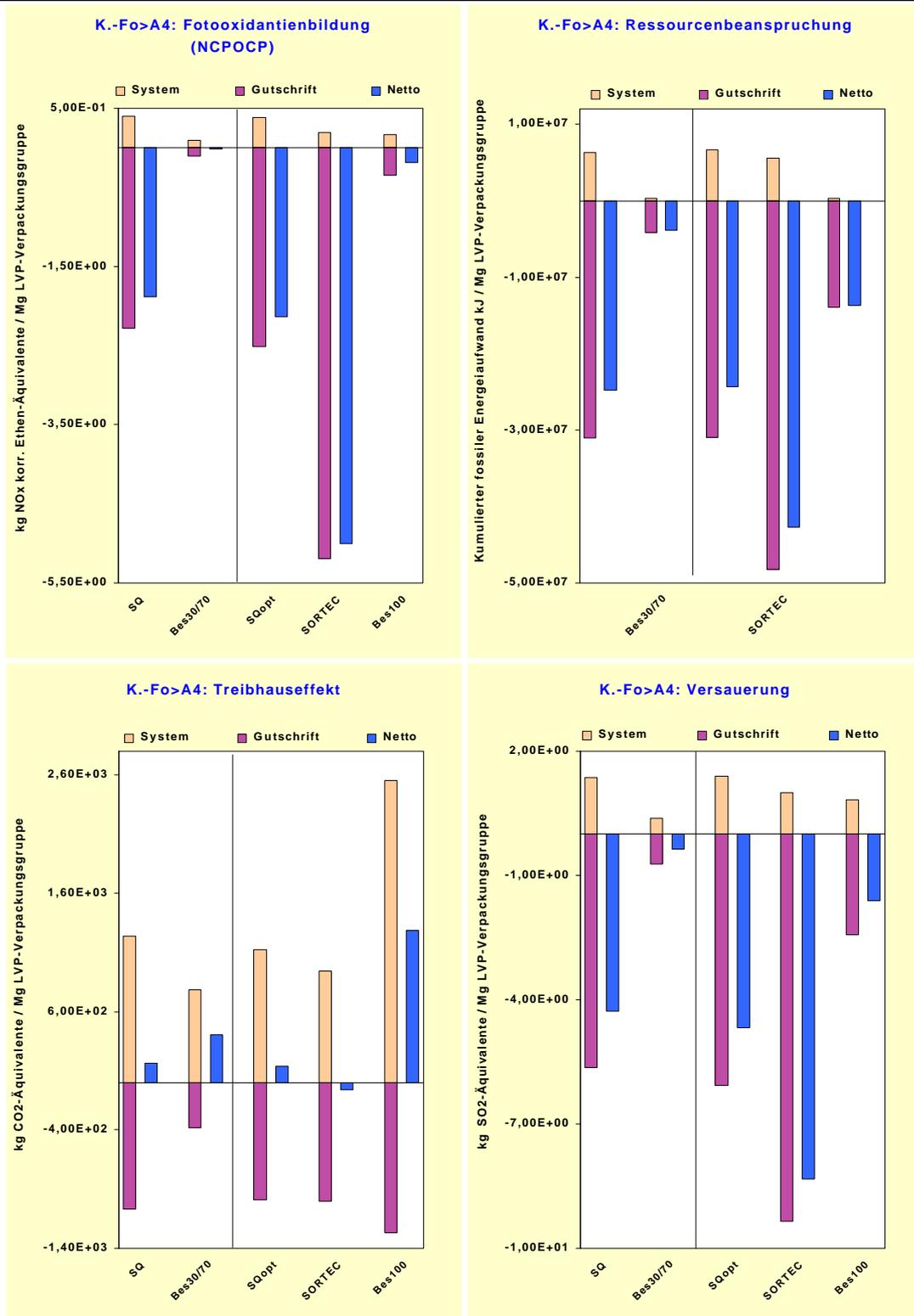


Abb. III-2: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo>A4 hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung

III.2 Kunststofffolien < Din A4 (K.-Fo<A4)

Tab. III-3: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Kunststofffolien < Din A4: Absolutwerte

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	-11.023	-13.661	-13.121	-2.166	-7.909
Treibhauseffekt	2.963	2.336	1.167	2.832	8.791
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	-944	-441	-10.149	143	-1.156
Naturraumbeanspruchung	-113	-110	-579	1	0
Versauerung	-1.722	-1.986	-5.229	-447	-2.590
Terrestrische Eutrophierung	65	49	-3.713	289	-707
Aquatische Eutrophierung	339	187	368	1.029	0
Humantoxizität (Krebsrisiko)	-635	-737	-267	-962	-3.419

Tab. III-4: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Kunststofffolien < Din A4: Differenzwerte zur besten Option

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	2.638		540	11.495	5.752
Treibhauseffekt	1.796	1.169		1.664	7.624
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	9.205	9.708		10.292	8.993
Naturraumbeanspruchung	467	469		580	579
Versauerung	3.507	3.243		4.783	2.640
Terrestrische Eutrophierung	3.778	3.763		4.002	3.006
Aquatische Eutrophierung	339	187	368	1.029	
Humantoxizität (Krebsrisiko)	2.783	2.682	3.152	2.456	

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

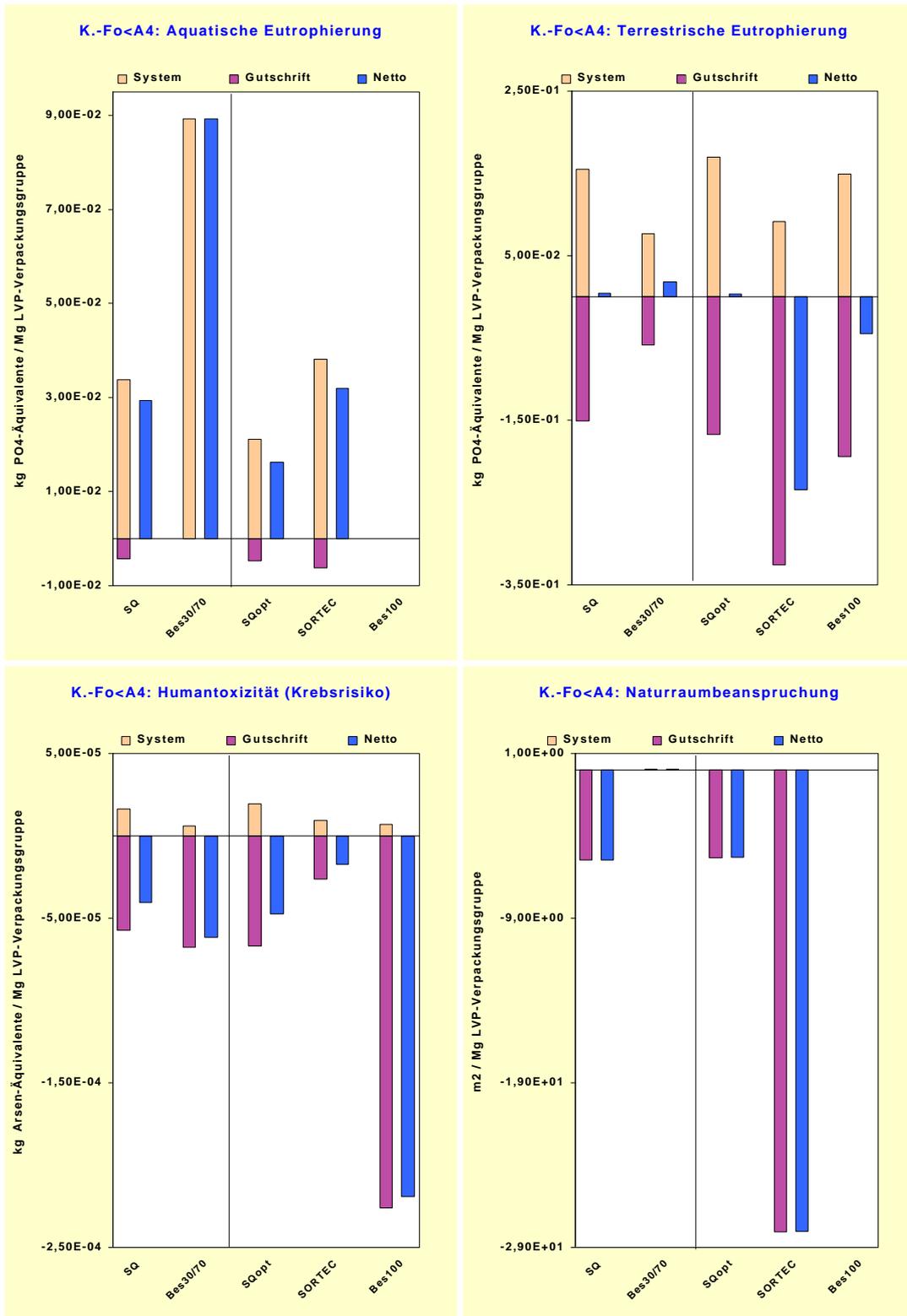


Abb. III-3: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4 hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

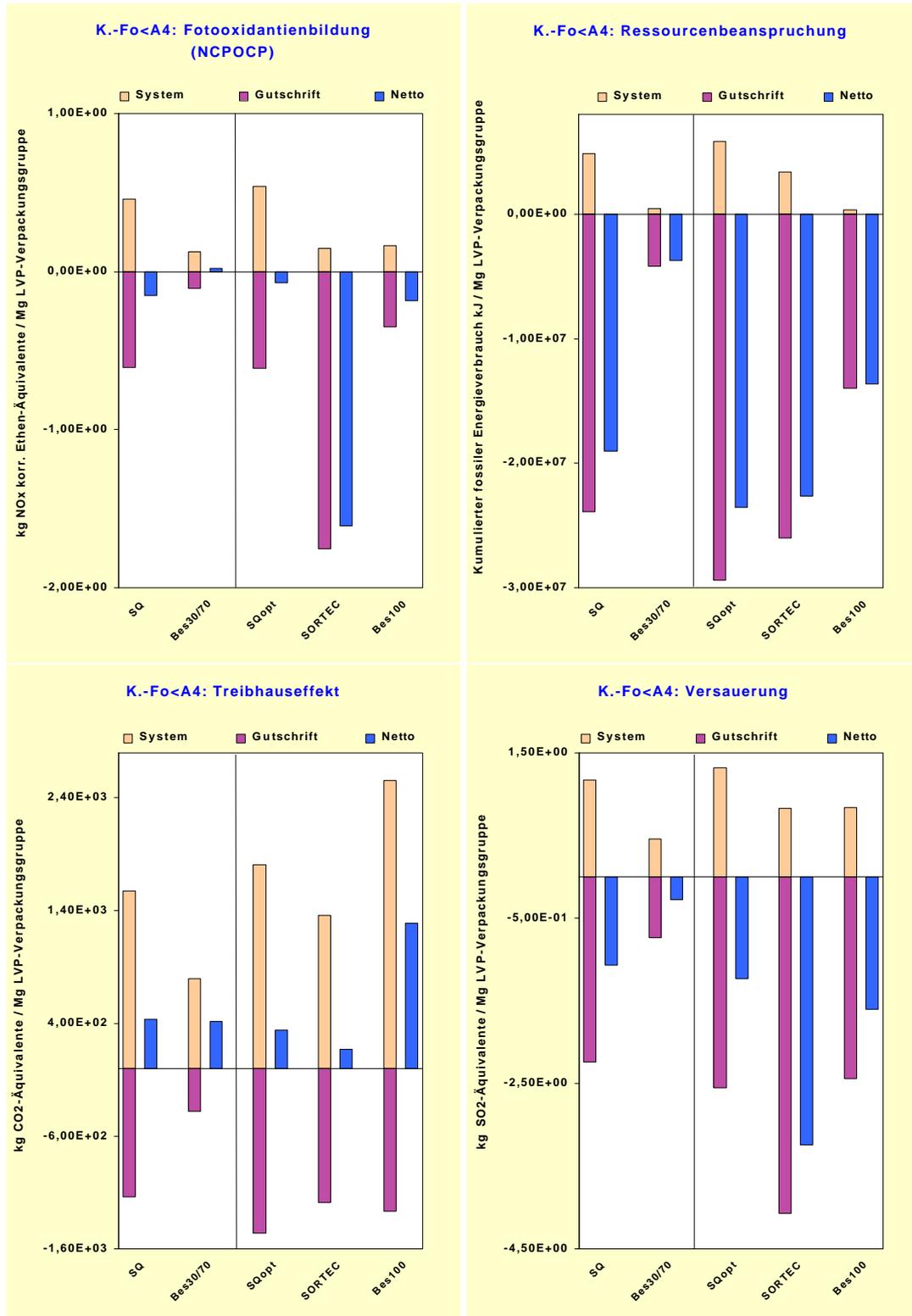


Abb. III-4: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Fo<A4 hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung

III.3 Kunststoffbecher (K.-Becher)

Tab. III-5: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher: Absolutwerte

EDW mit absoluten Werten

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	-15.389	-28.001	-29.062	-2.699	-9.858
Treibhauseffekt	3.321	-2.923	-4.787	3.889	12.158
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	-1.702	-25.726	-25.576	172	-1.455
Naturraumbeanspruchung	-83	-10	0	1	0
Versauerung	-2.790	-16.005	-19.330	-566	-3.259
Terrestrische Eutrophierung	-451	-12.369	-14.617	342	-937
Aquatische Eutrophierung	398	271	124	1.281	0
Humantoxizität (Krebsrisiko)	-803	-1.034	-1.092	-1.195	-4.246

Tab. III-6: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher: Differenzwerte zur besten Option

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	13.673	1.061		26.362	19.204
Treibhauseffekt	8.109	1.864		8.677	16.946
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	24.025		150	25.899	24.272
Naturraumbeanspruchung		74	84	84	83
Versauerung	16.539	3.325		18.763	16.071
Terrestrische Eutrophierung	14.166	2.247		14.959	13.680
Aquatische Eutrophierung	398	271	124	1.281	
Humantoxizität (Krebsrisiko)	3.443	3.212	3.154	3.051	

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

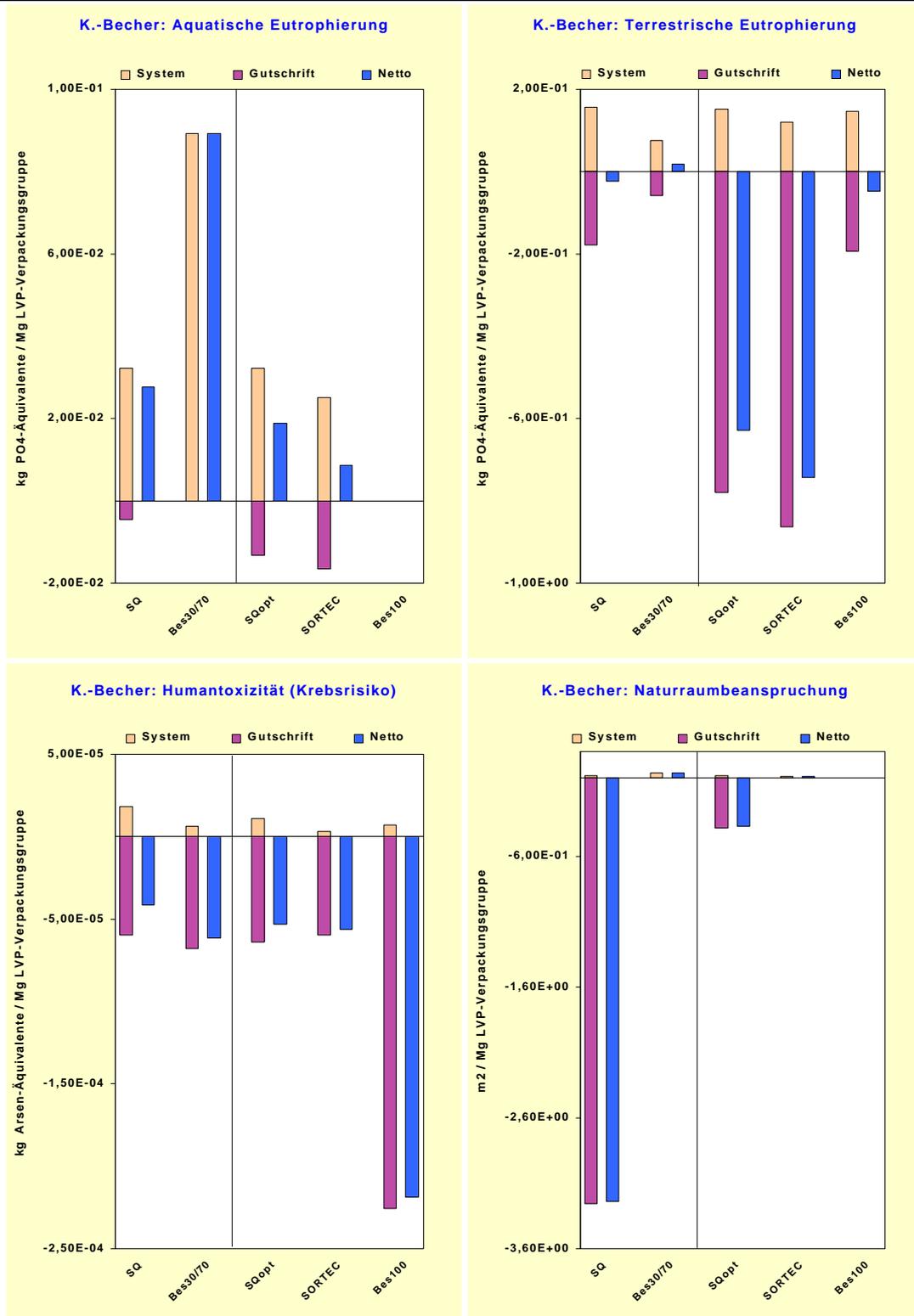


Abb. III-5: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

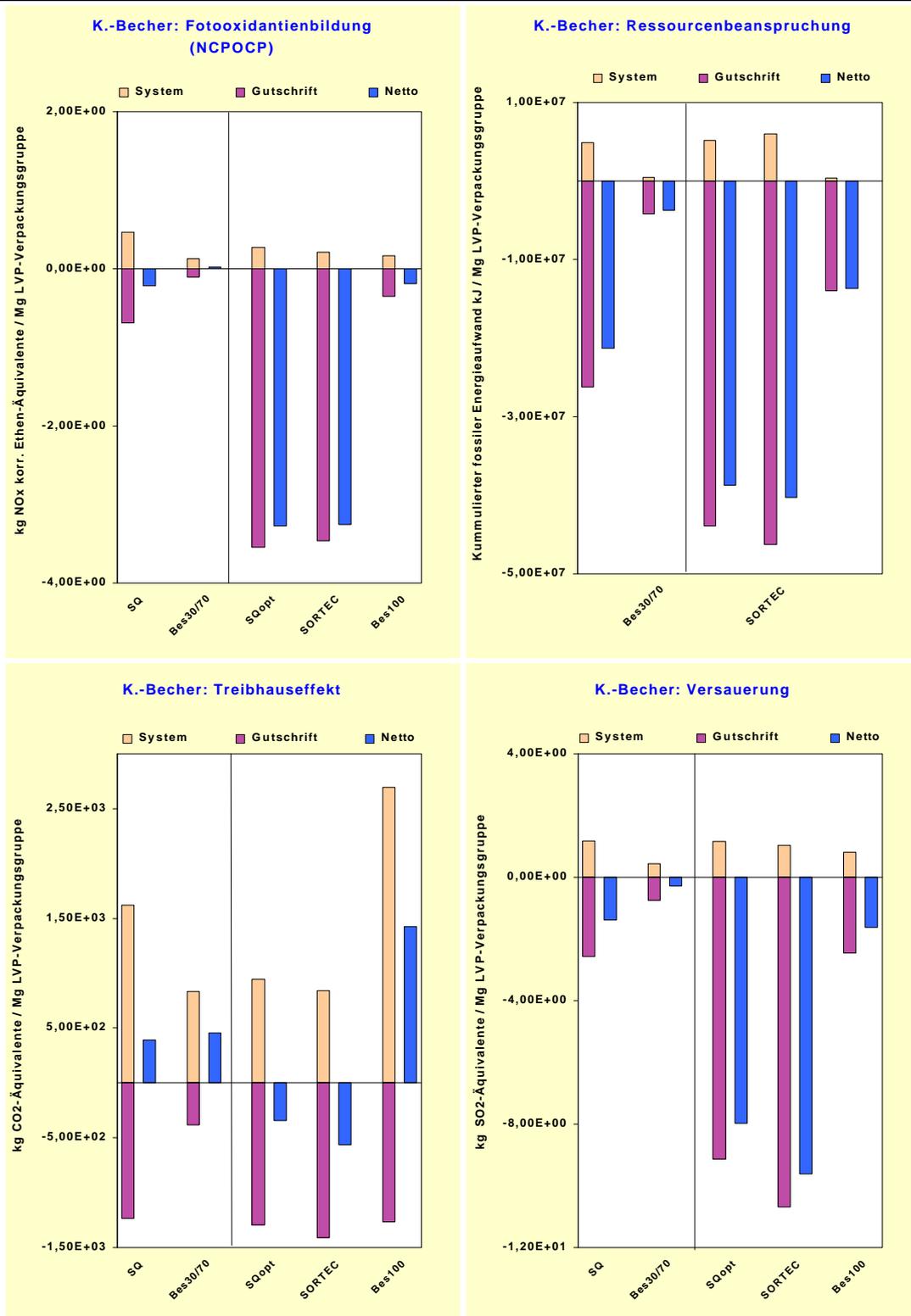


Abb. III-6: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Becher hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung

III.4 Kunststoffflaschen (K.-Flaschen)

Tab. III-7: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen: Absolutwerte

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	-16.452	-26.623	-20.163	-2.741	-9.904
Treibhauseffekt	747	-2.766	-2.135	3.266	10.166
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	-15.921	-40.620	-22.678	82	-1.557
Naturraumbeanspruchung	-15	0	-863	1	0
Versauerung	-8.471	-18.920	-13.018	-633	-3.333
Terrestrische Eutrophierung	-5.754	-15.088	-8.666	239	-1.059
Aquatische Eutrophierung	179	27	-18	1.144	0
Humantoxizität (Krebsrisiko)	-543	-897	-513	-1.212	-4.275

Tab. III-8: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen: Differenzwerte zur besten Option

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	10.171		6.460	23.882	16.720
Treibhauseffekt	3.513		630	6.031	12.931
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	24.699		17.942	40.702	39.063
Naturraumbeanspruchung	849	864		864	863
Versauerung	10.449		5.902	18.287	15.586
Terrestrische Eutrophierung	9.334		6.422	15.327	14.029
Aquatische Eutrophierung	196	44		1.161	18
Humantoxizität (Krebsrisiko)	3.731	3.377	3.762	3.063	

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

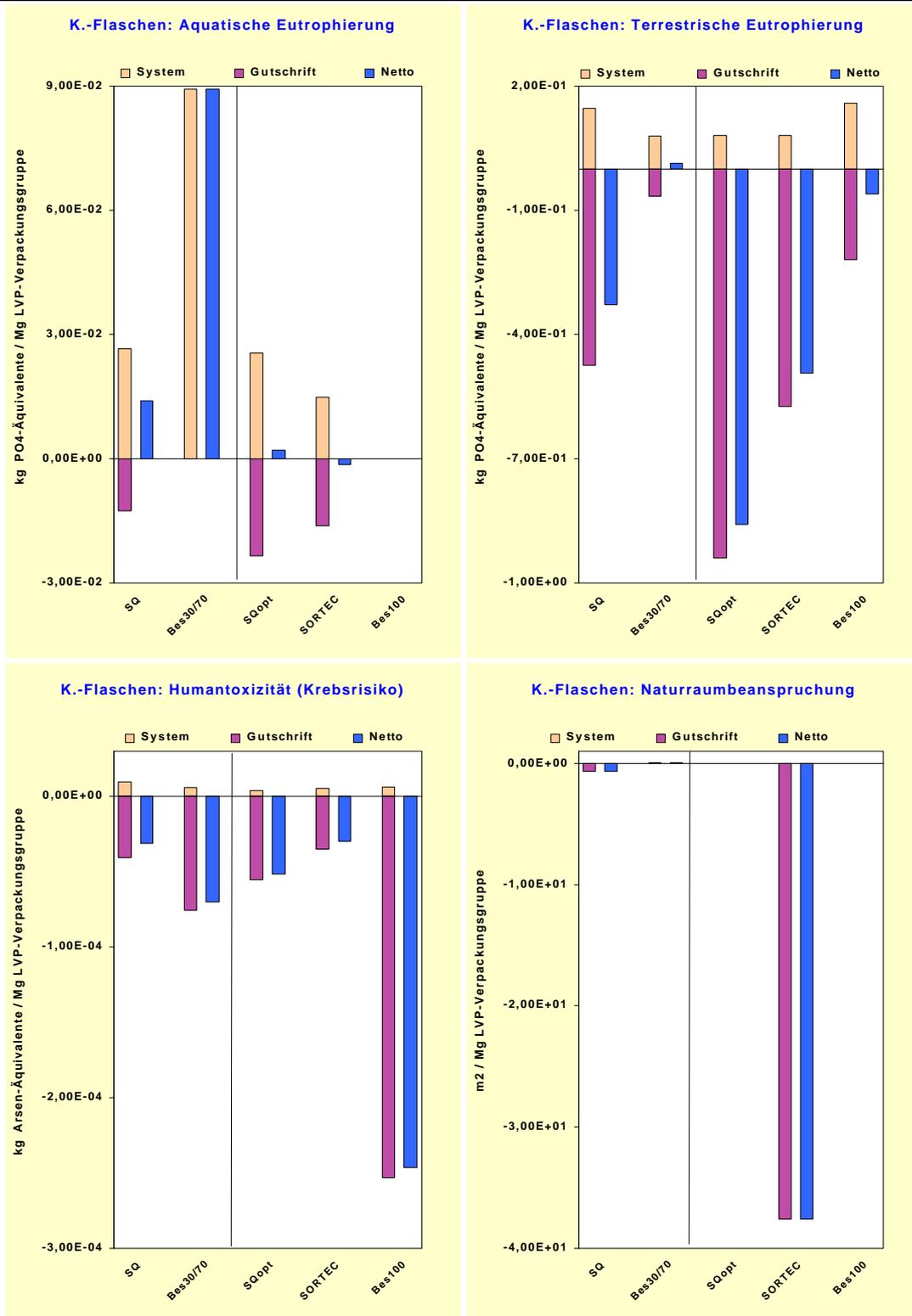


Abb. III-7: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

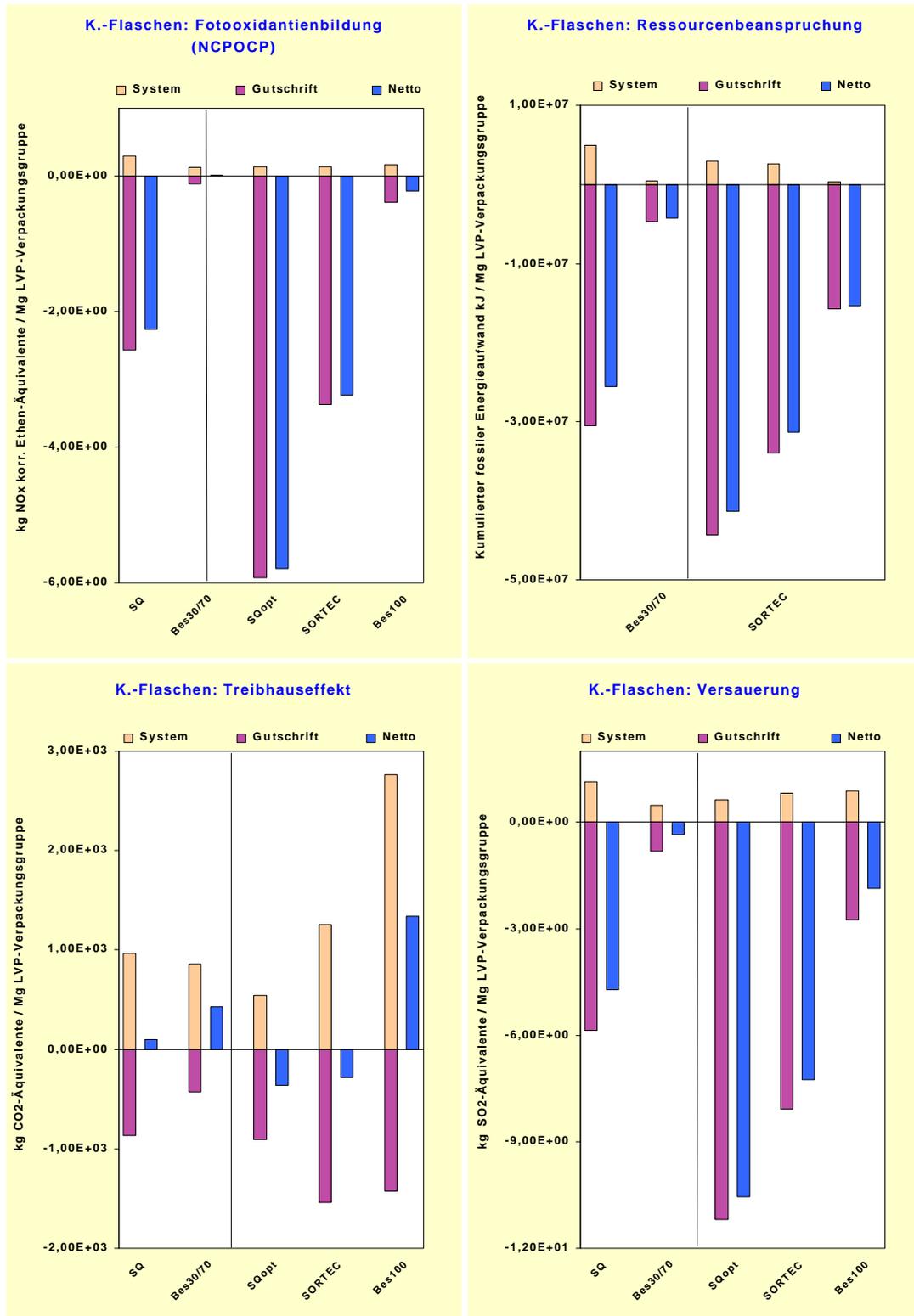


Abb. III-8: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Flaschen hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung

III.5 Kunststoffverbunde (K.-Vb)

Tab. III-9: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb:
Absolutwerte

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	-1.817	-2.289	-3.202	-361	-1.325
Treibhauseffekt	516	447	-209	567	1.774
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	124	125	-2.313	33	-182
Naturraumbeanspruchung	-9	-12	-173	0	0
Versauerung	-177	-271	-1.391	-66	-417
Terrestrische Eutrophierung	105	81	-926	62	-89
Aquatische Eutrophierung	77	45	7	183	0
Humantoxizität (Krebsrisiko)	-97	-152	-40	-135	-489

Tab. III-10: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb:
Differenzwerte zur besten Option

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	1.385	913		2.841	1.877
Treibhauseffekt	724	656		776	1.983
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	2.437	2.438		2.346	2.131
Naturraumbeanspruchung	164	162		174	173
Versauerung	1.214	1.120		1.325	974
Terrestrische Eutrophierung	1.032	1.007		989	838
Aquatische Eutrophierung	77	45	7	183	
Humantoxizität (Krebsrisiko)	392	337	449	353	

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

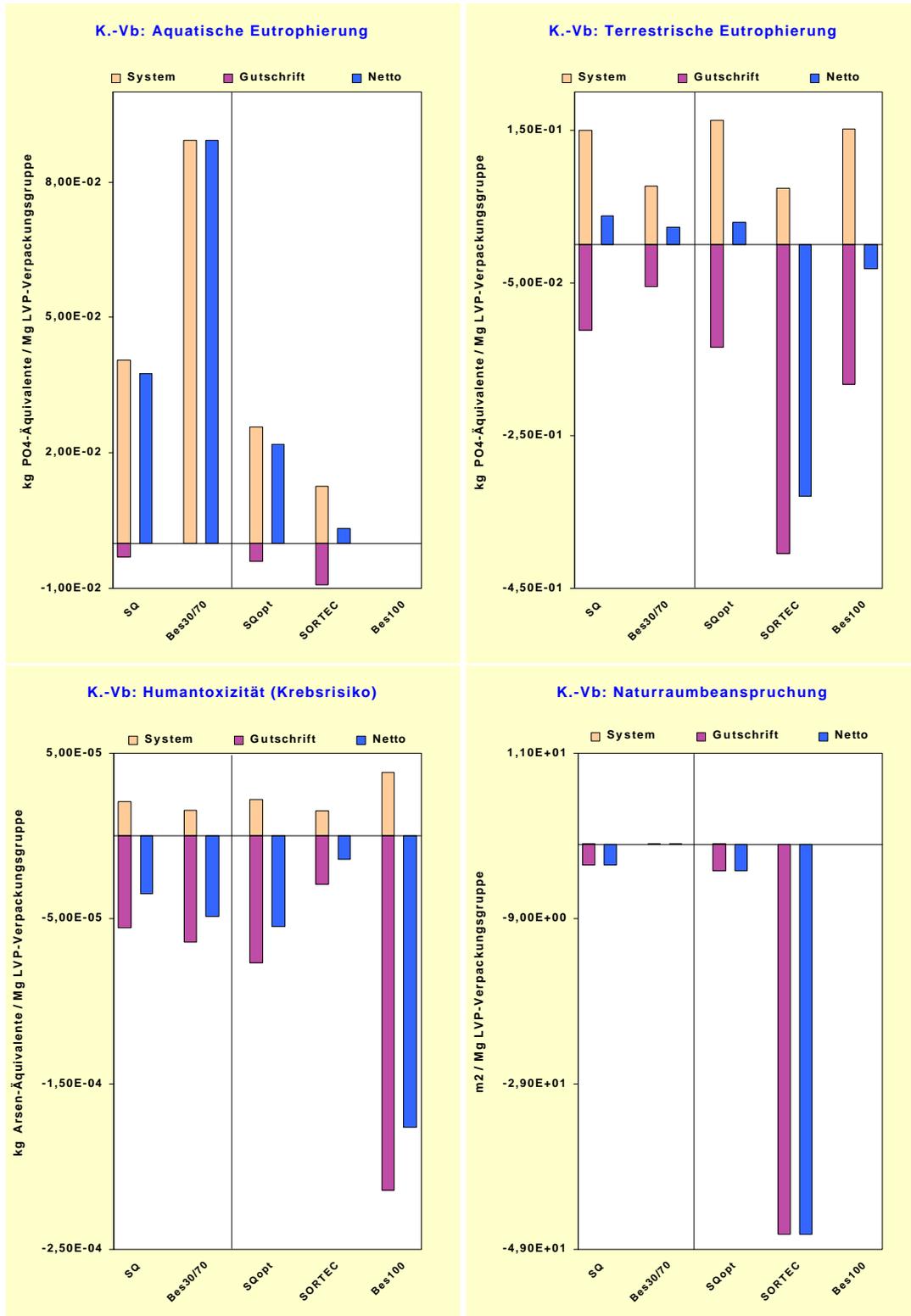


Abb. III-9: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

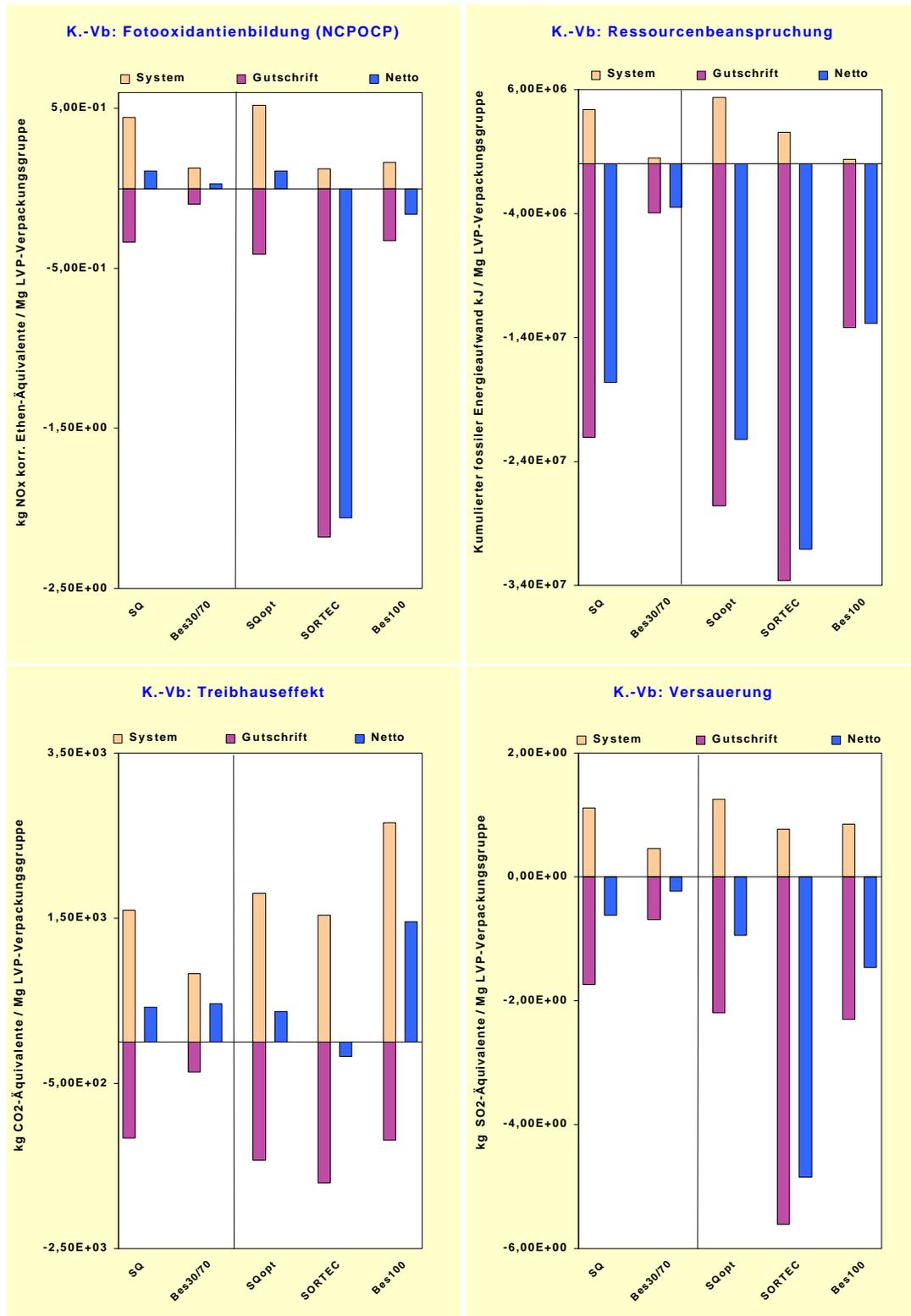


Abb. III-10: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe K.-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung

III.6 Sonstige Kunststoffe (so. K.)

Tab. III-11: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe so. K.:
Absolutwert

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	-11.353	-21.181	-23.007	-2.299	-8.446
Treibhauseffekt	3.060	-468	-1.676	3.612	11.307
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	676	-20.506	-16.400	209	-1.160
Naturraumbeanspruchung	-56	-16	-766	1	0
Versauerung	-1.345	-11.026	-12.230	-423	-2.659
Terrestrische Eutrophierung	542	-8.337	-8.636	398	-566
Aquatische Eutrophierung	518	336	78	1.166	0
Humantoxizität (Krebsrisiko)	-940	-894	-552	-863	-3.115

Tab. III-12: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe so. K.:
Differenzwerte zur besten Option

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	11.654	1.826		20.708	14.561
Treibhauseffekt	4.736	1.208		5.288	12.983
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	21.183		4.107	20.715	19.347
Naturraumbeanspruchung	710	750		767	766
Versauerung	10.885	1.204		11.807	9.571
Terrestrische Eutrophierung	9.178	298		9.033	8.070
Aquatische Eutrophierung	518	336	78	1.166	
Humantoxizität (Krebsrisiko)	2.175	2.221	2.563	2.252	

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

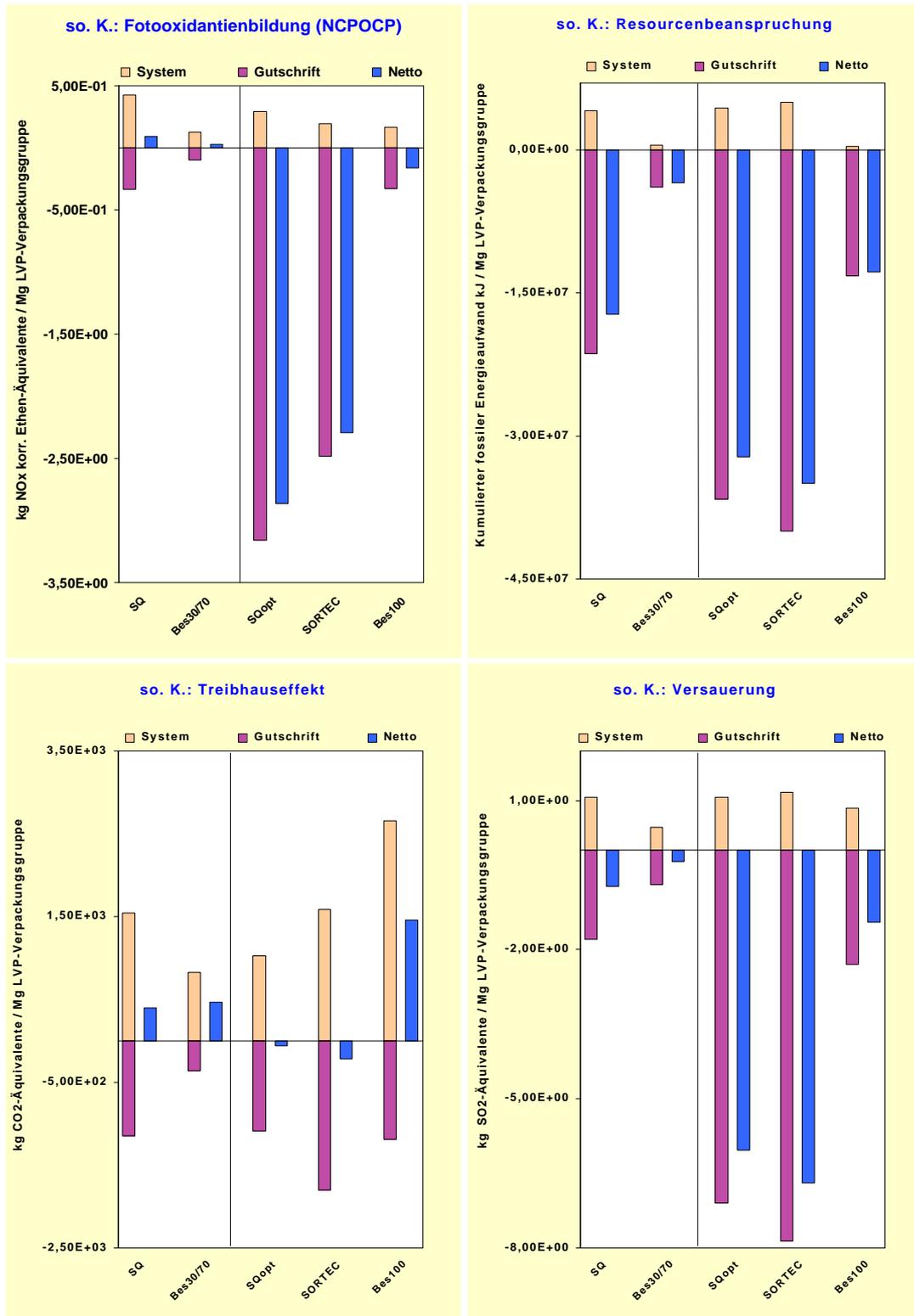


Abb. III-12: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe so. K. hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung

III.7 Verbunde auf Aluminiumbasis (Alu-Vb)

Tab. III-13: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Alu-Vb:
Absolutwerte

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	-6.864	-9.782	-10.657	-69	-413
Treibhauseffekt	-6.611	-10.533	-11.687	246	648
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	-595	-1.013	-1.093	138	54
Naturraumbeanspruchung	0	0	0	0	0
Versauerung	-7.914	-12.085	-13.243	66	-74
Terrestrische Eutrophierung	-1.591	-2.617	-2.851	158	81
Aquatische Eutrophierung	102	40	39	274	0
Humantoxizität (Krebsrisiko)	897	1.473	1.621	-29	-152

Tab. III-14: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Alu-Vb:
Differenzwerte zur besten Option

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	3.793	875		10.588	10.244
Treibhauseffekt	5.076	1.154		11.933	12.334
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	498	80		1.231	1.147
Naturraumbeanspruchung	0	0	0	0	
Versauerung	5.329	1.158		13.309	13.169
Terrestrische Eutrophierung	1.259	234		3.009	2.932
Aquatische Eutrophierung	102	40	39	274	
Humantoxizität (Krebsrisiko)	1.049	1.625	1.773	123	

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

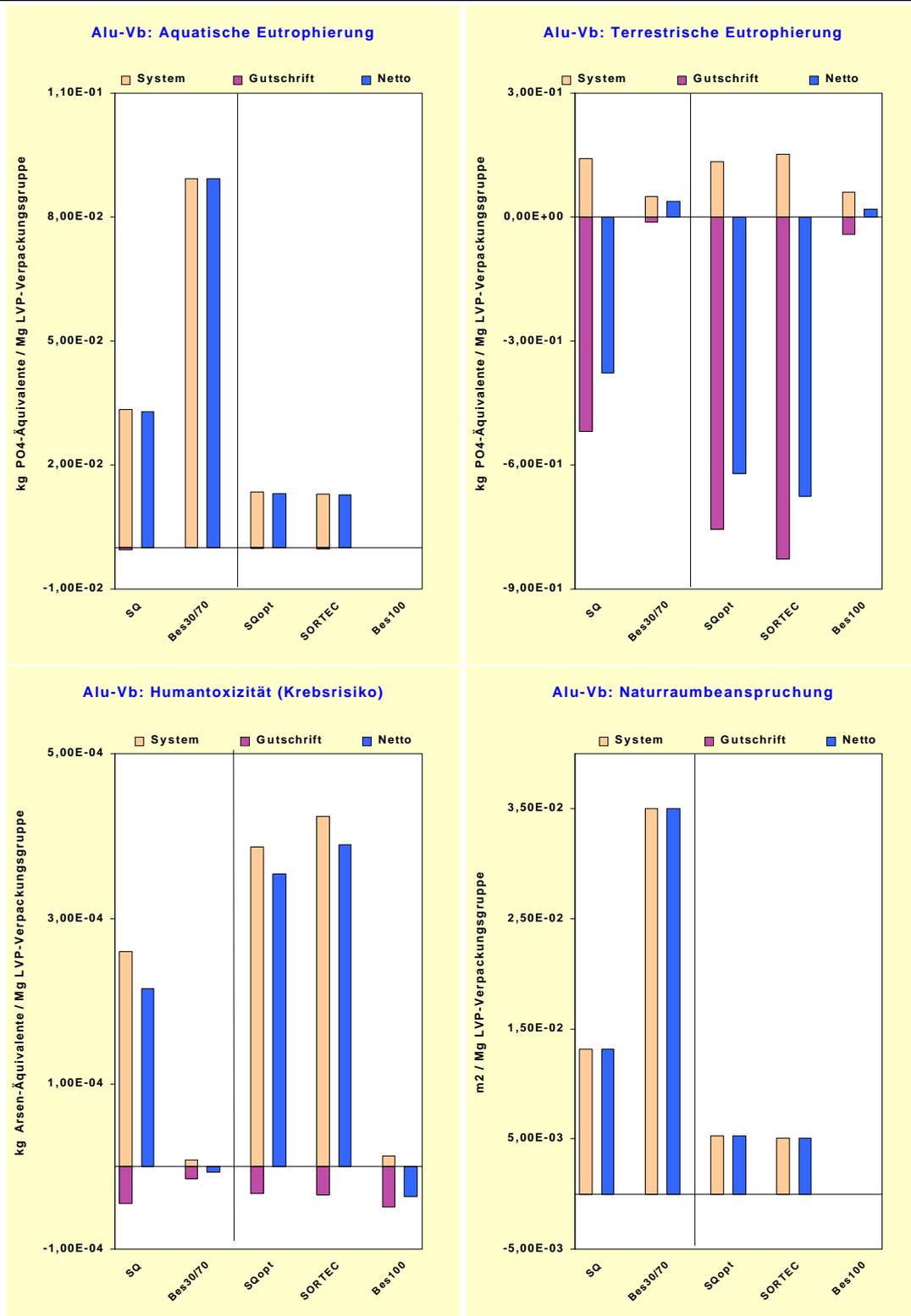


Abb. III-13: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

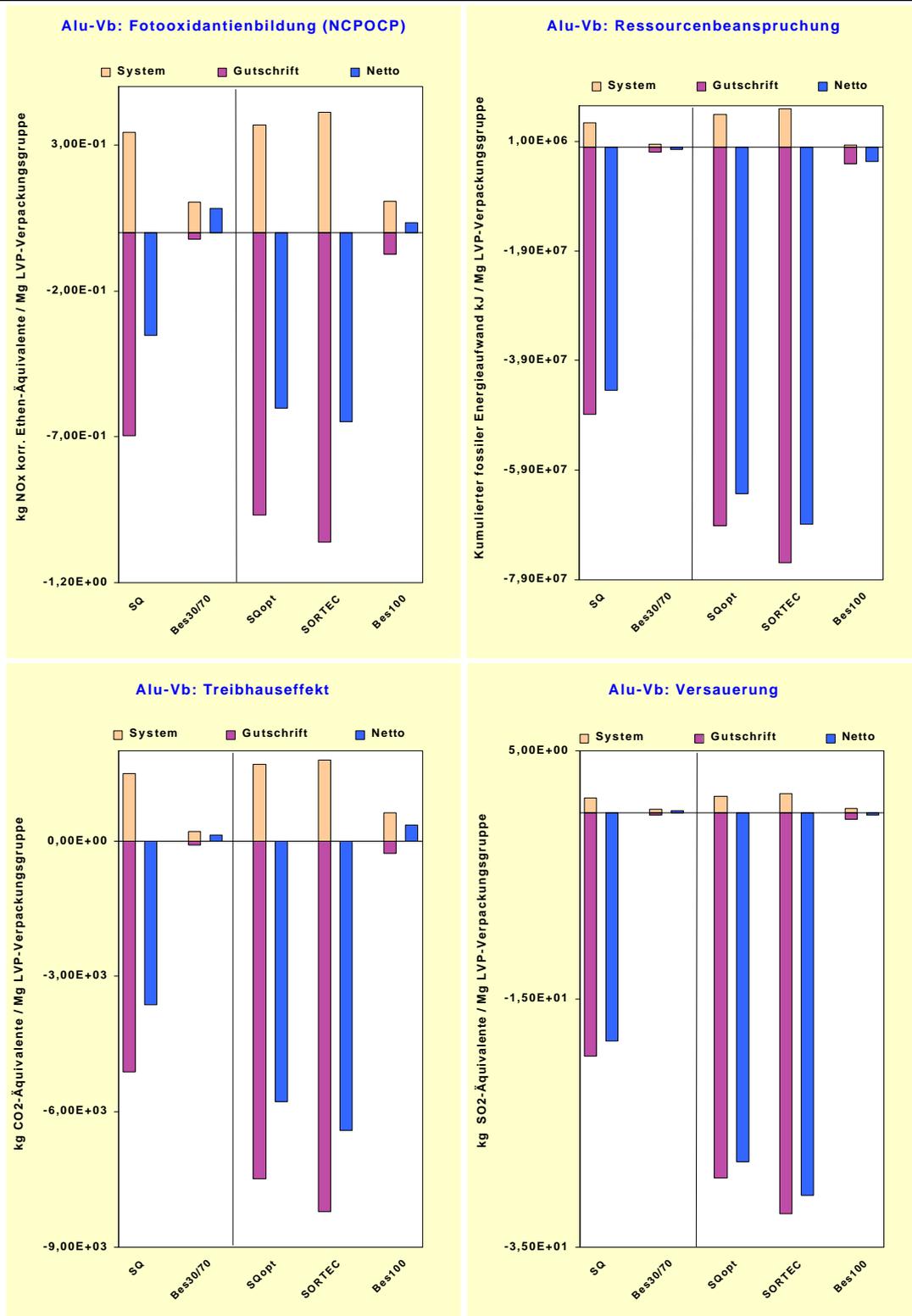


Abb. III-14: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung

III.8 Aluminium haltige Verbunde (Aluh.-Vb)

Tab. III-15: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Aluh-Vb:
Absolutwerte

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	-1.123	-1.455	-1.739	-271	-979
Treibhauseffekt	32	-295	-1.148	681	966
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	84	79	-286	235	-104
Naturraumbeanspruchung	-280	-120	-907	0	0
Versauerung	-941	-1.622	-2.104	-19	-290
Terrestrische Eutrophierung	-96	-201	-500	91	-29
Aquatische Eutrophierung	-25	-11	-290	183	0
Humantoxizität (Krebsrisiko)	113	275	137	16	-354

Tab. III-16: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Aluh-Vb:
Differenzwerte zur besten Option

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	616	284		1.468	759
Treibhauseffekt	1.180	853		1.829	2.114
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	369	364		520	182
Naturraumbeanspruchung	627	787		907	907
Versauerung	1.163	481		2.085	1.814
Terrestrische Eutrophierung	403	299		591	470
Aquatische Eutrophierung	265	279		473	290
Humantoxizität (Krebsrisiko)	466	629	490	370	

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

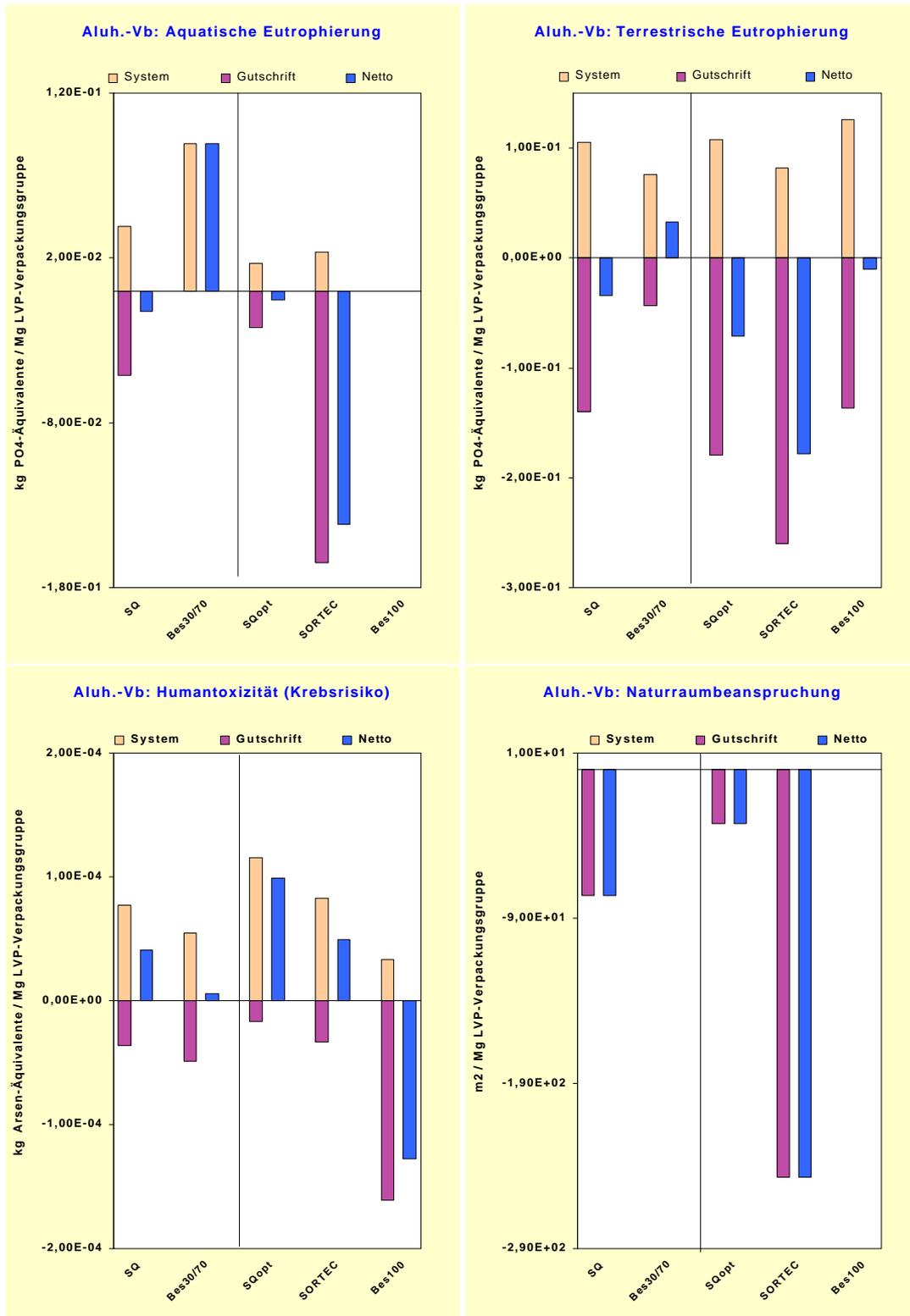


Abb. III-15: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Aluh-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

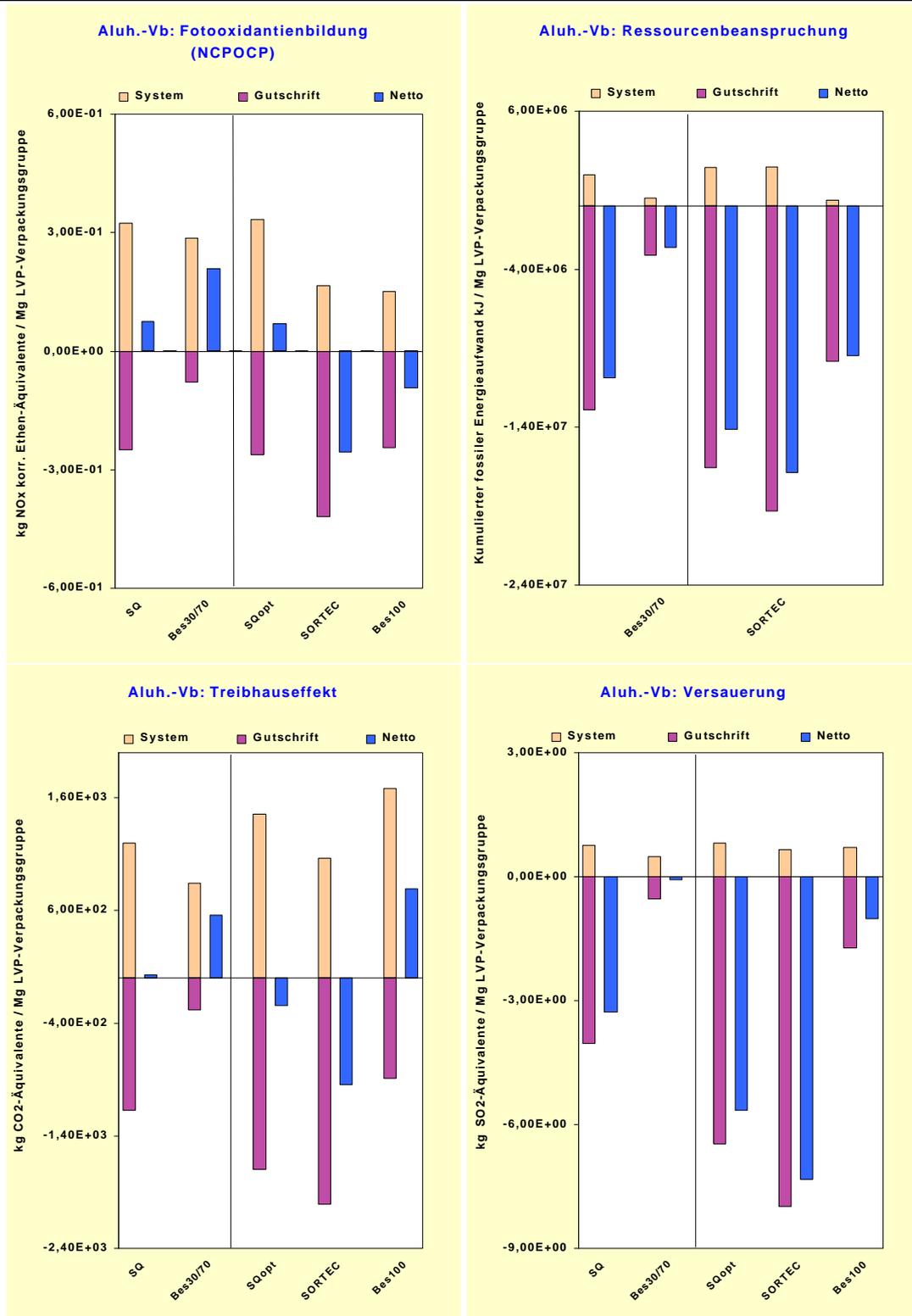


Abb. III-16: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Aluh-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung

III.9 Aluminium (Alu)

Tab. III-17: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Alu: Absolutwerte

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	-13.317	-14.764	-14.851	-121	-550
Treibhauseffekt	-16.673	-18.633	-18.028	302	864
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	-1.364	-1.539	-1.548	109	73
Naturraumbeanspruchung	0	0	0	0	
Versauerung	-16.452	-18.309	-18.441	41	-99
Terrestrische Eutrophierung	-3.563	-3.975	-3.986	134	108
Aquatische Eutrophierung	69	52	52	366	
Humantoxizität (Krebsrisiko)	2.112	2.269	2.155	-49	-203

Tab. III-18: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Alu: Differenzwerte zur besten Option

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	1.534	87		16.166	15.737
Treibhauseffekt	1.959		604	21.048	21.610
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	184	9		1.832	1.796
Naturraumbeanspruchung	0	0	0	0	
Versauerung	1.989	131		20.239	20.100
Terrestrische Eutrophierung	424	12		4.554	4.528
Aquatische Eutrophierung	69	52	52	366	
Humantoxizität (Krebsrisiko)	2.315	2.472	2.358	154	

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

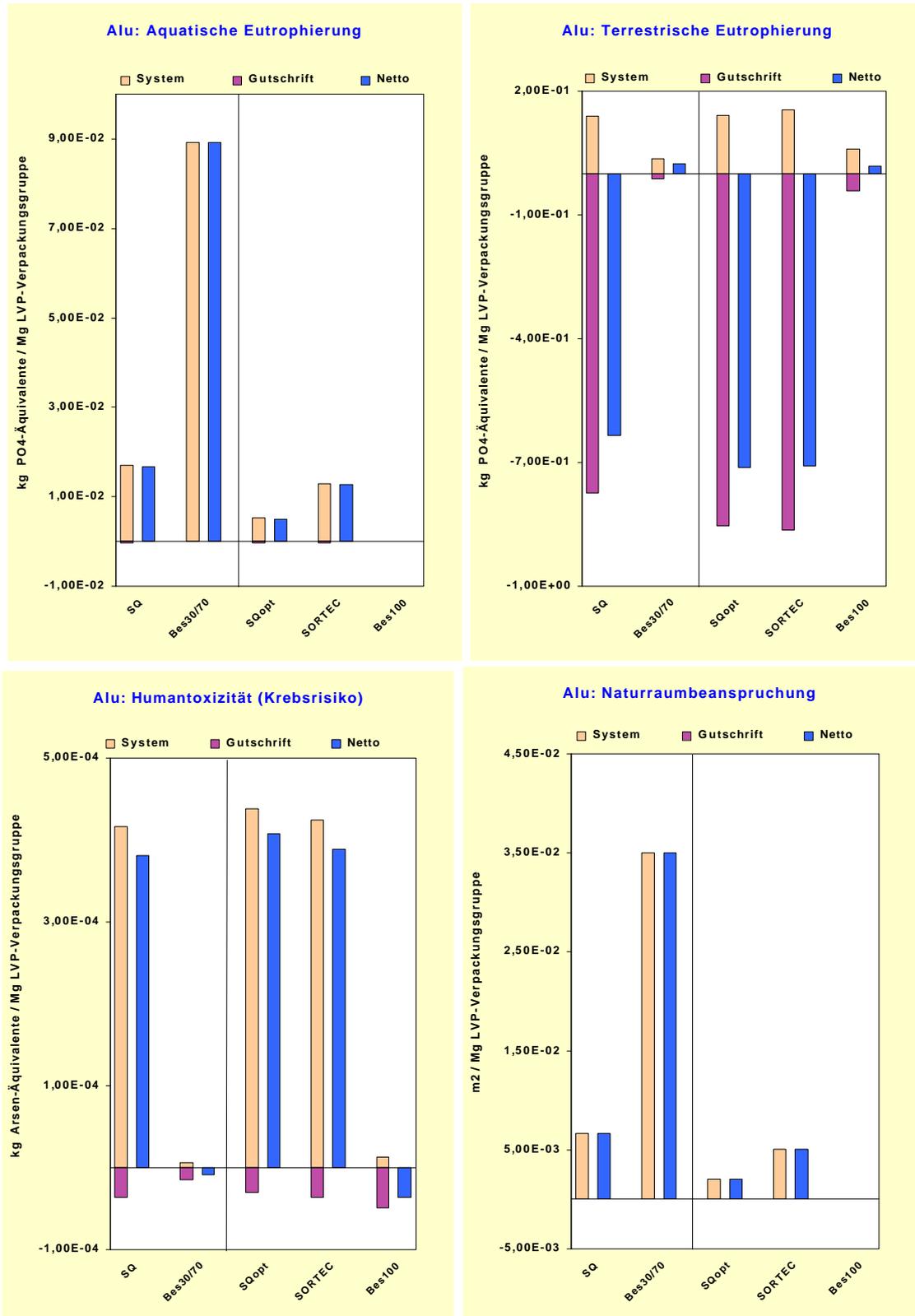


Abb. III-17: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

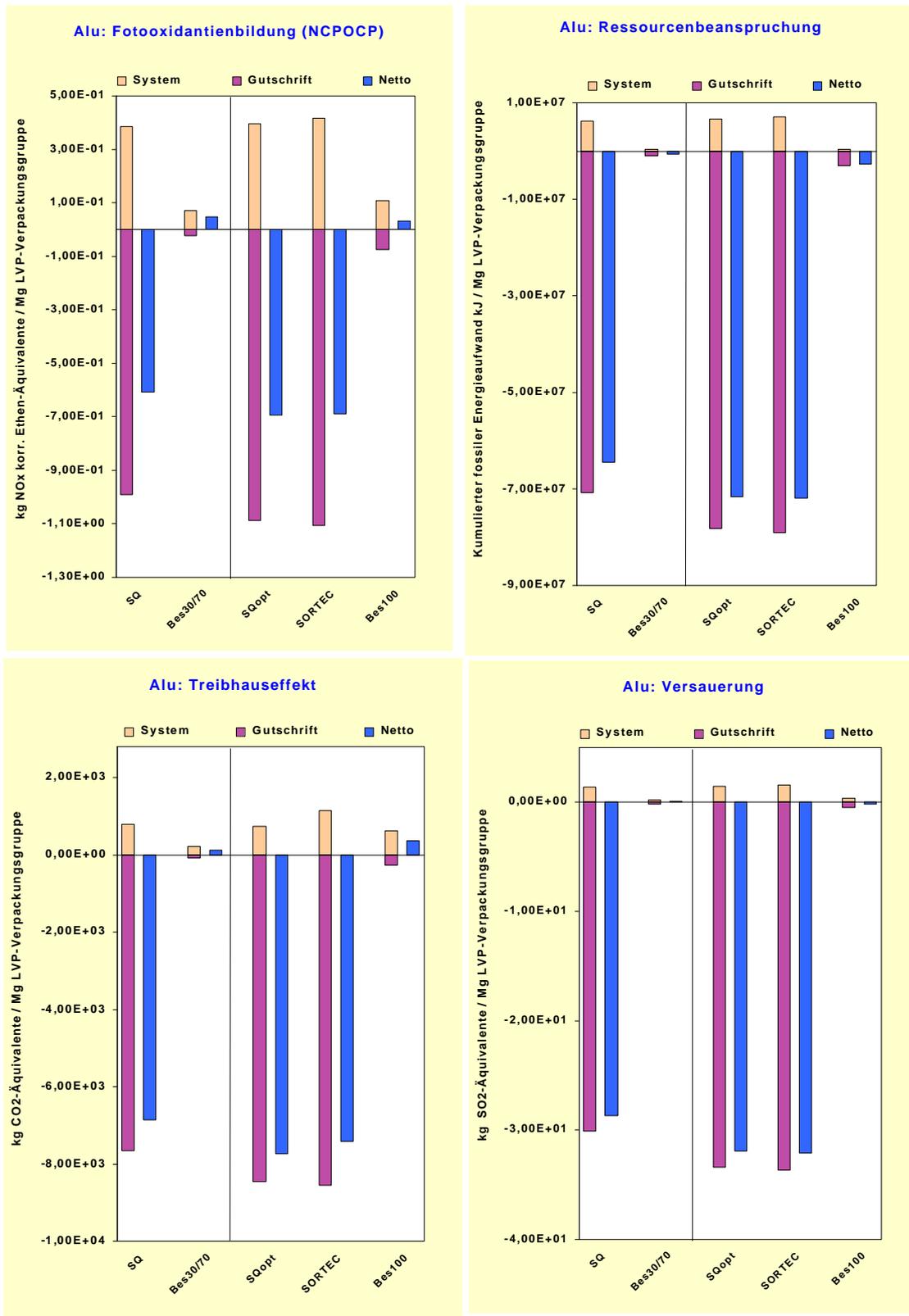


Abb. III-18: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Alu hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung

III.10 Weißblech (Wb)

Tab. III-19: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Wb: Absolutwerte

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	-20.697	-20.863	-20.904	347	-1.530
Treibhauseffekt	-29.637	-30.166	-30.214	1.868	3.710
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	-5.586	-5.654	-5.668	2.250	1.624
Naturraumbeanspruchung	0	0	0	3	0
Versauerung	-29.076	-29.413	-29.431	1.432	490
Terrestrische Eutrophierung	-11.215	-11.361	-11.381	2.487	1.798
Aquatische Eutrophierung	88	40	40	4.003	0
Humantoxizität (Krebsrisiko)	-4.853	-4.874	-4.875	77	-565

Tab. III-20: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Wb: Diffe

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	21.572	20.204	19.784		27.437
Treibhauseffekt	2.764	491		7.838	11.661
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	1.297	96		4.986	3.987
Naturraumbeanspruchung	2.433		24	23.002	23.001
Versauerung	1.737	397		13.345	11.749
Terrestrische Eutrophierung	749	180		5.496	5.215
Aquatische Eutrophierung	1.053	34		10.247	8.440
Humantoxizität (Krebsrisiko)	2.549	2.183	2.261	1.430	

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

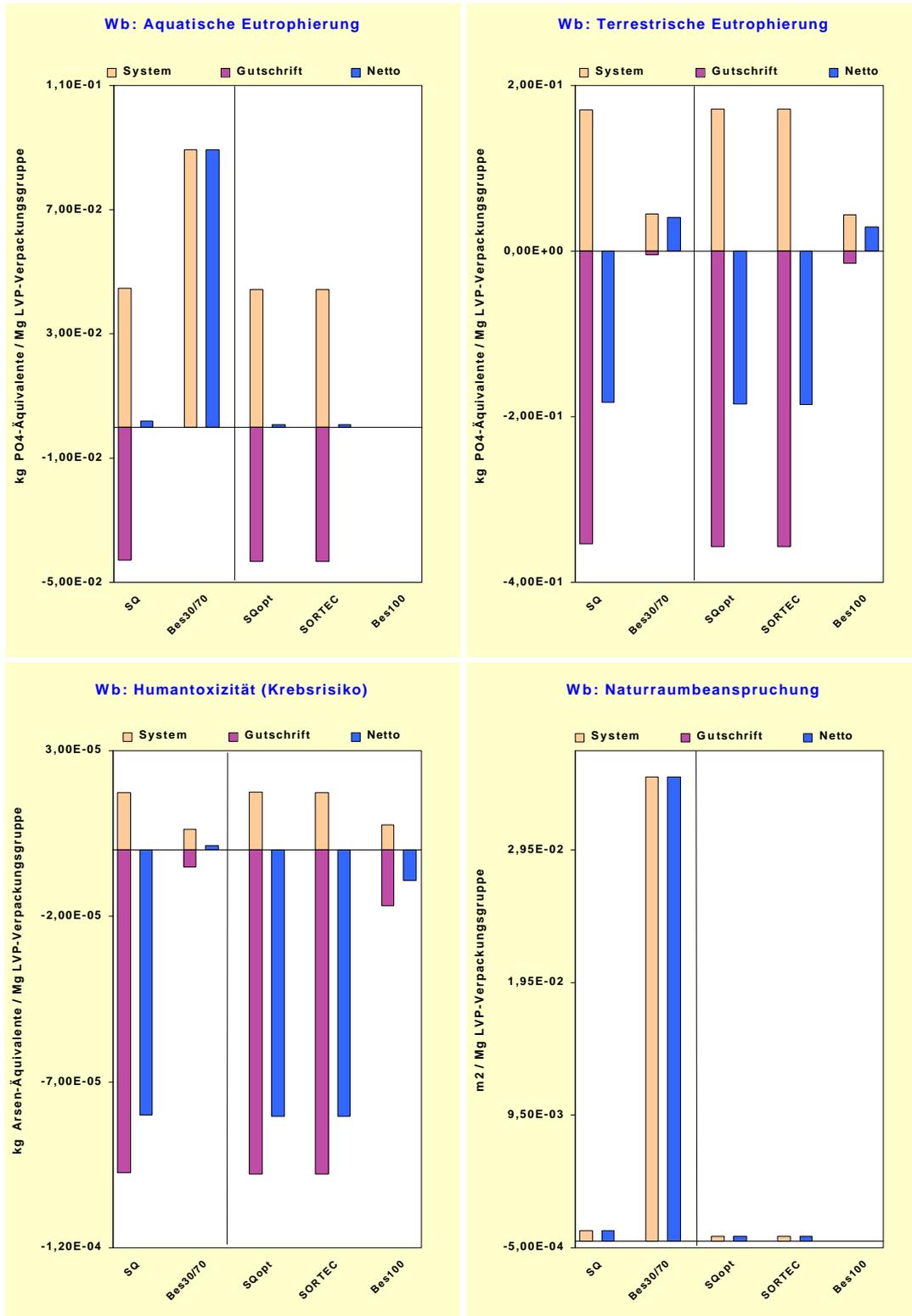


Abb. III-19: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

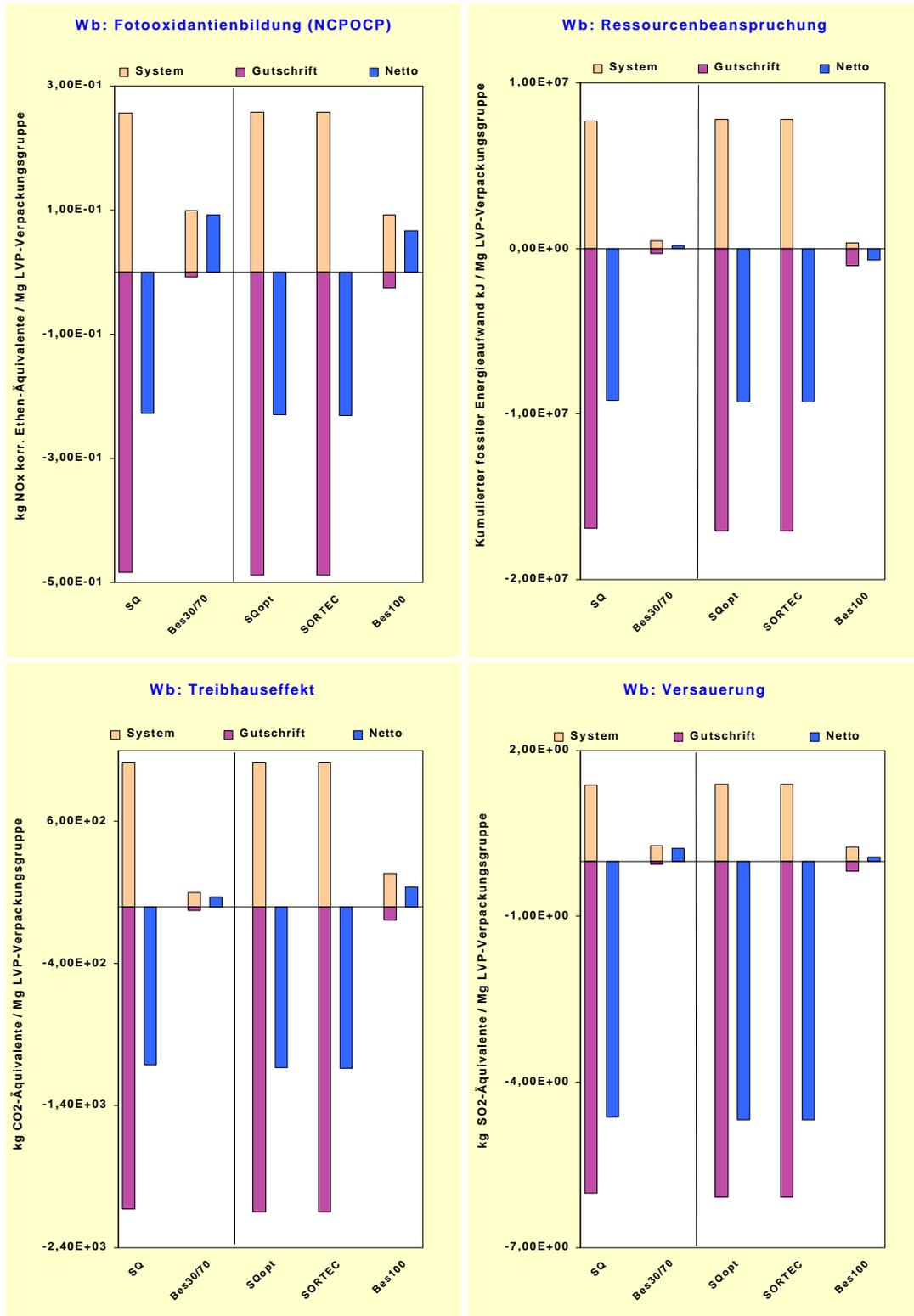


Abb. III-20: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

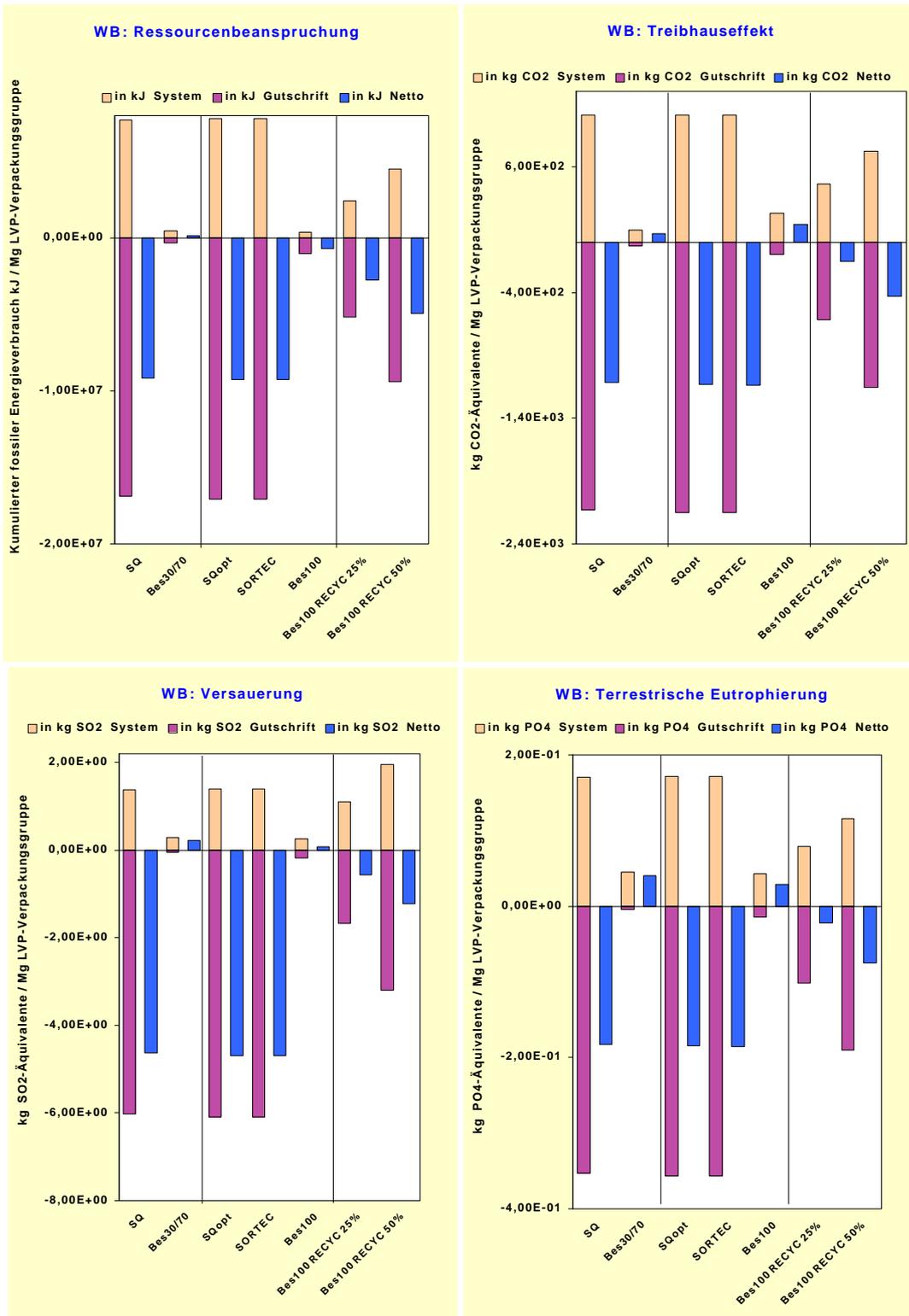


Abb. III-21: Grundlagen der Nettowerte für die Sensitivitätsbetrachtungen des Stahlrecyclings aus der MVA-Schlacke am Beispiel ausgesuchter Wirkungskategorien

III.11 Weißblechverbunde (Wb-Vb)

Tab. III-21: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Wb-Vb:
Absolutwerte

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	-5.074	-5.190	-5.201	114	-340
Treibhauseffekt	-7.115	-7.508	-7.522	474	905
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	-1.346	-1.395	-1.398	608	449
Naturraumbeanspruchung	0	0	0	1	0
Versauerung	-7.091	-7.335	-7.340	392	157
Terrestrische Eutrophierung	-2.705	-2.812	-2.817	671	493
Aquatische Eutrophierung	48	11	11	1.075	0
Humantoxizität (Krebsrisiko)	-1.204	-1.217	-1.217	29	-125

Tab. III-22: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe Wb-Vb:
Differenzwerte zur besten Option

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	127	11		5.315	4.861
Treibhauseffekt	406	13		7.996	8.427
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	53	4		2.006	1.847
Naturraumbeanspruchung	0	0	0	1	
Versauerung	248	5		7.732	7.496
Terrestrische Eutrophierung	112	5		3.487	3.309
Aquatische Eutrophierung	48	11	11	1.075	
Humantoxizität (Krebsrisiko)	14	0		1.246	1.092

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

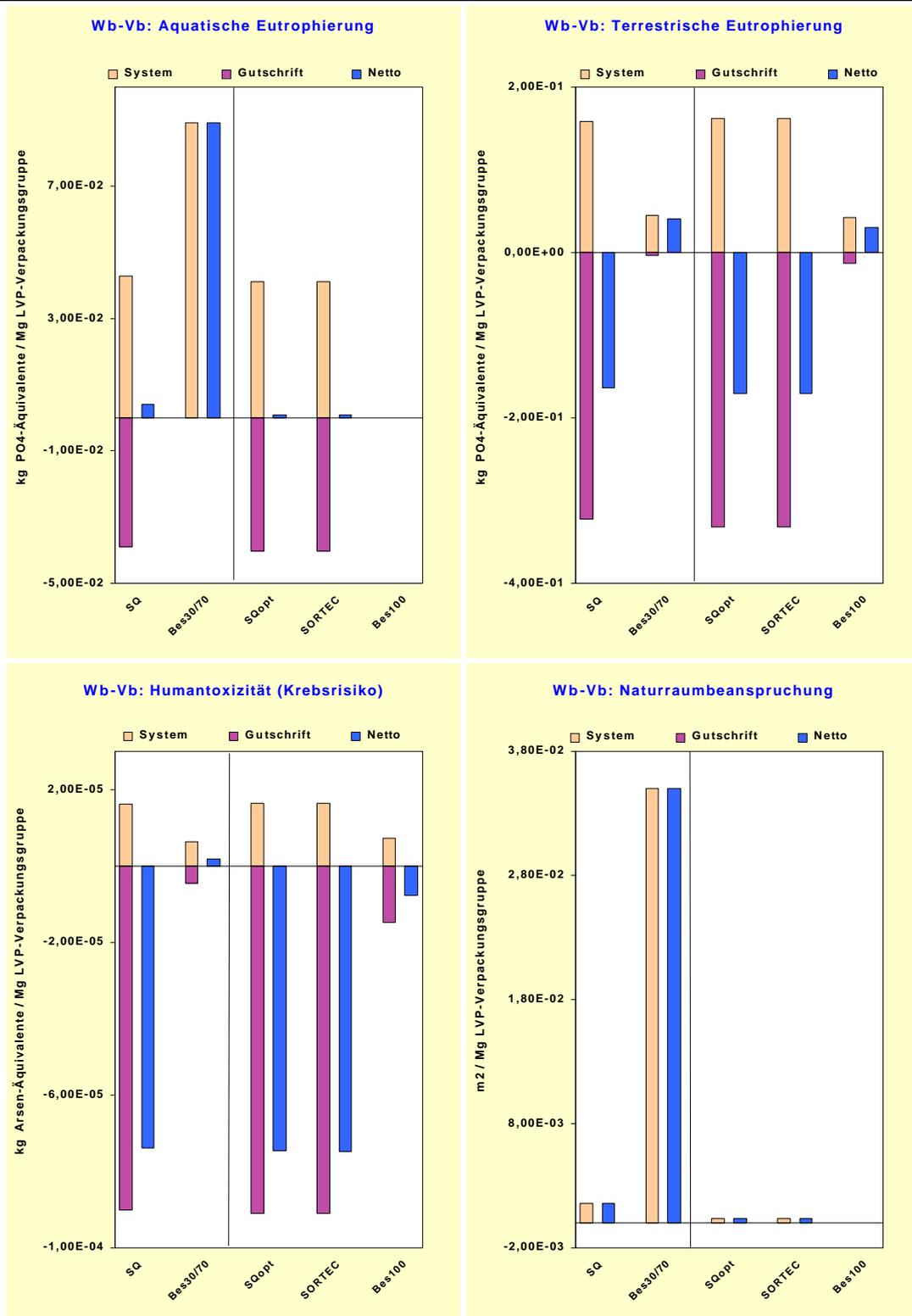


Abb. III-22: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

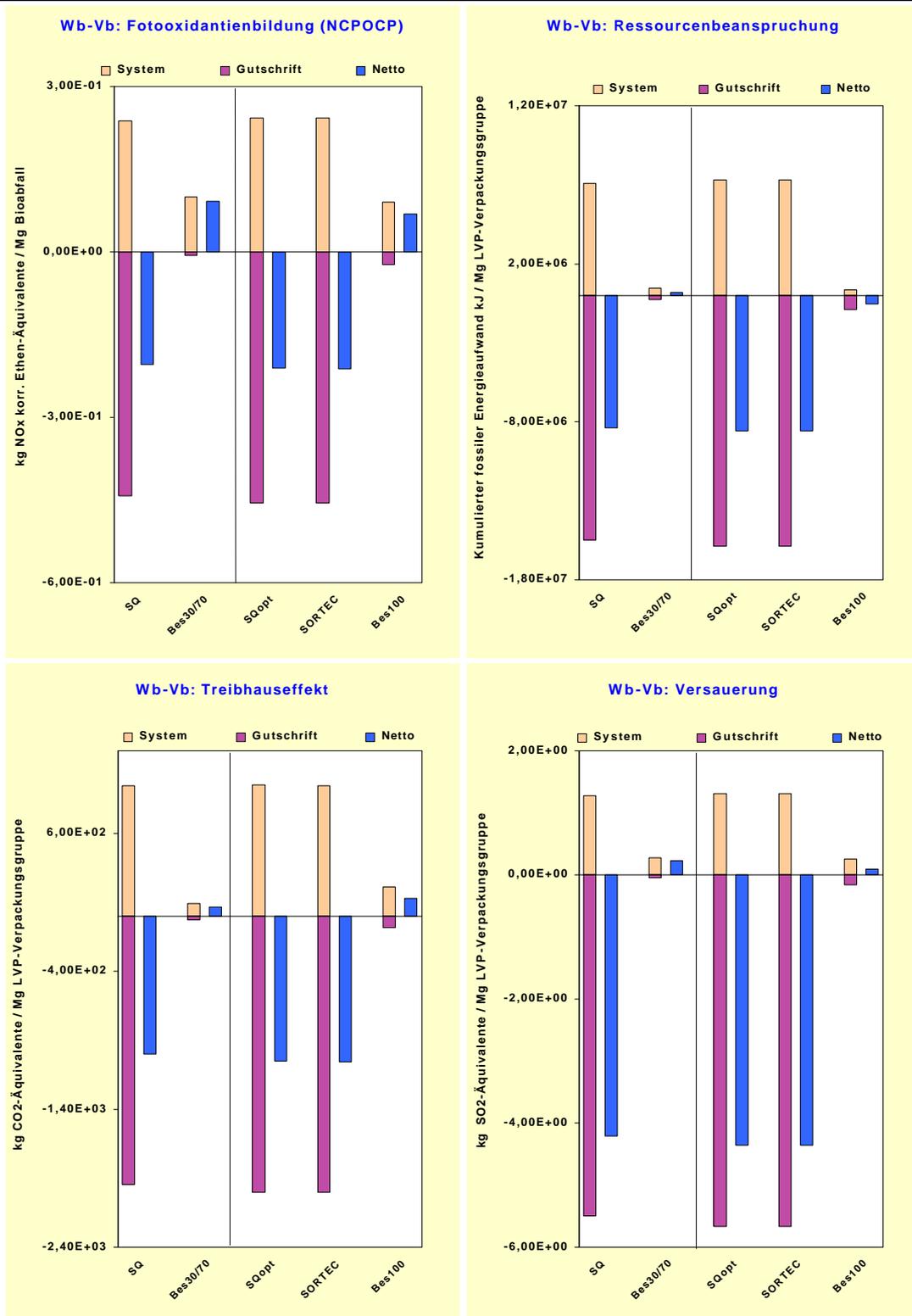


Abb. III-23: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe Wb-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung

III.12 Papierkartonagenverbunde (PPK-Vb)

Tab. III-23: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb:
Absolutwerte

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	-1.412	-2.002	-3.963	-372	-1.225
Treibhauseffekt	-33	-1.192	-3.048	1.546	-220
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	104	-443	-6.360	702	-92
Naturraumbeanspruchung	-1.955	-3.404	-4.062	0	0
Versauerung	-1.148	-2.002	-7.545	31	-324
Terrestrische Eutrophierung	-283	-667	-9.581	192	36
Aquatische Eutrophierung	-588	-1.211	-1.484	275	0
Humantoxizität (Krebsrisiko)	129	-60	-886	379	-413

Tab. III-24: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb:
Differenzwerte zur besten Option

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	2.551	1.960		3.591	2.738
Treibhauseffekt	3.015	1.856		4.594	2.828
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	6.463	5.917		7.061	6.267
Naturraumbeanspruchung	2.107	659		4.063	4.062
Versauerung	6.397	5.543		7.576	7.221
Terrestrische Eutrophierung	9.298	8.913		9.773	9.616
Aquatische Eutrophierung	896	273		1.758	1.484
Humantoxizität (Krebsrisiko)	1.015	826		1.265	473

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

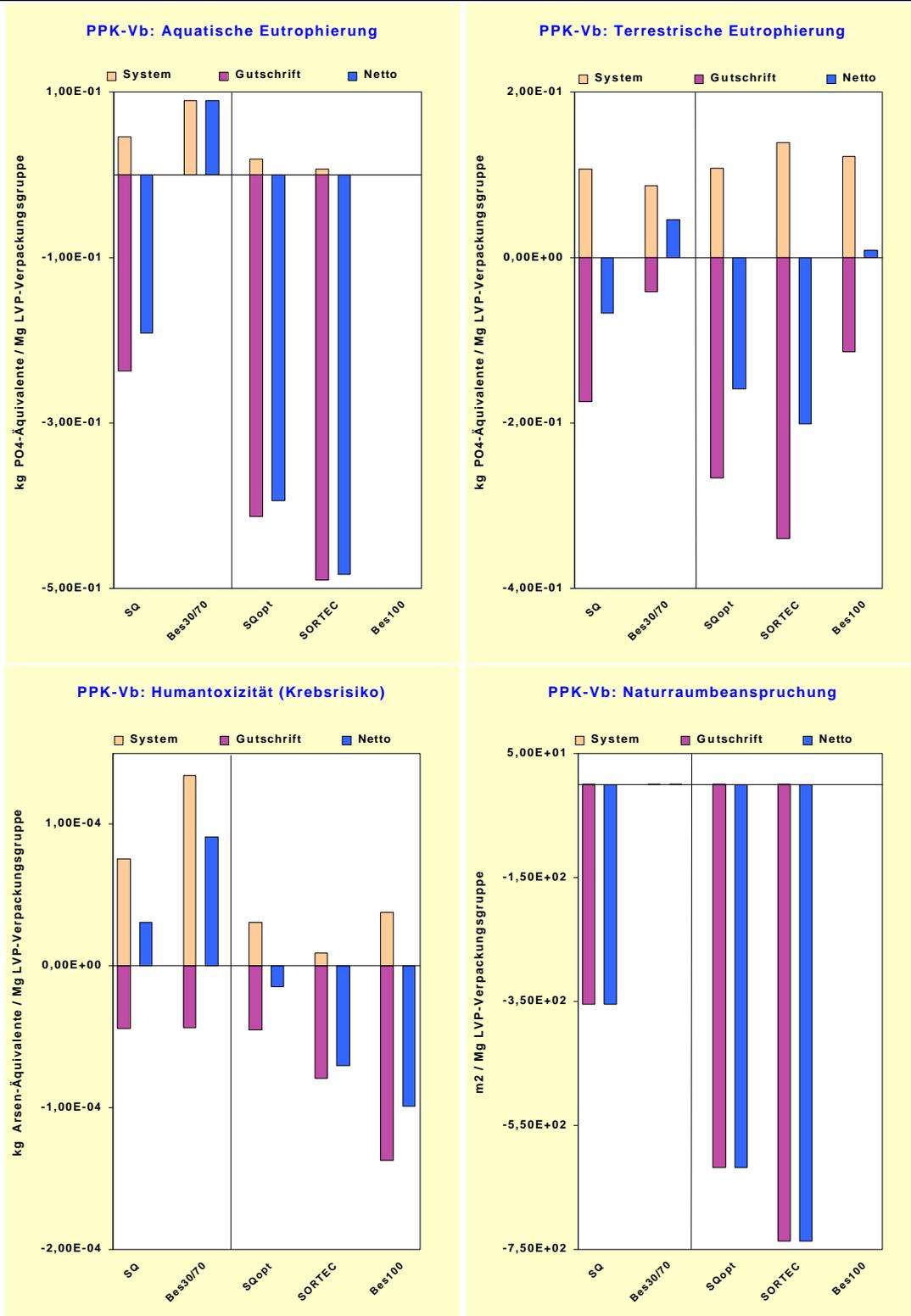


Abb. III-24: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

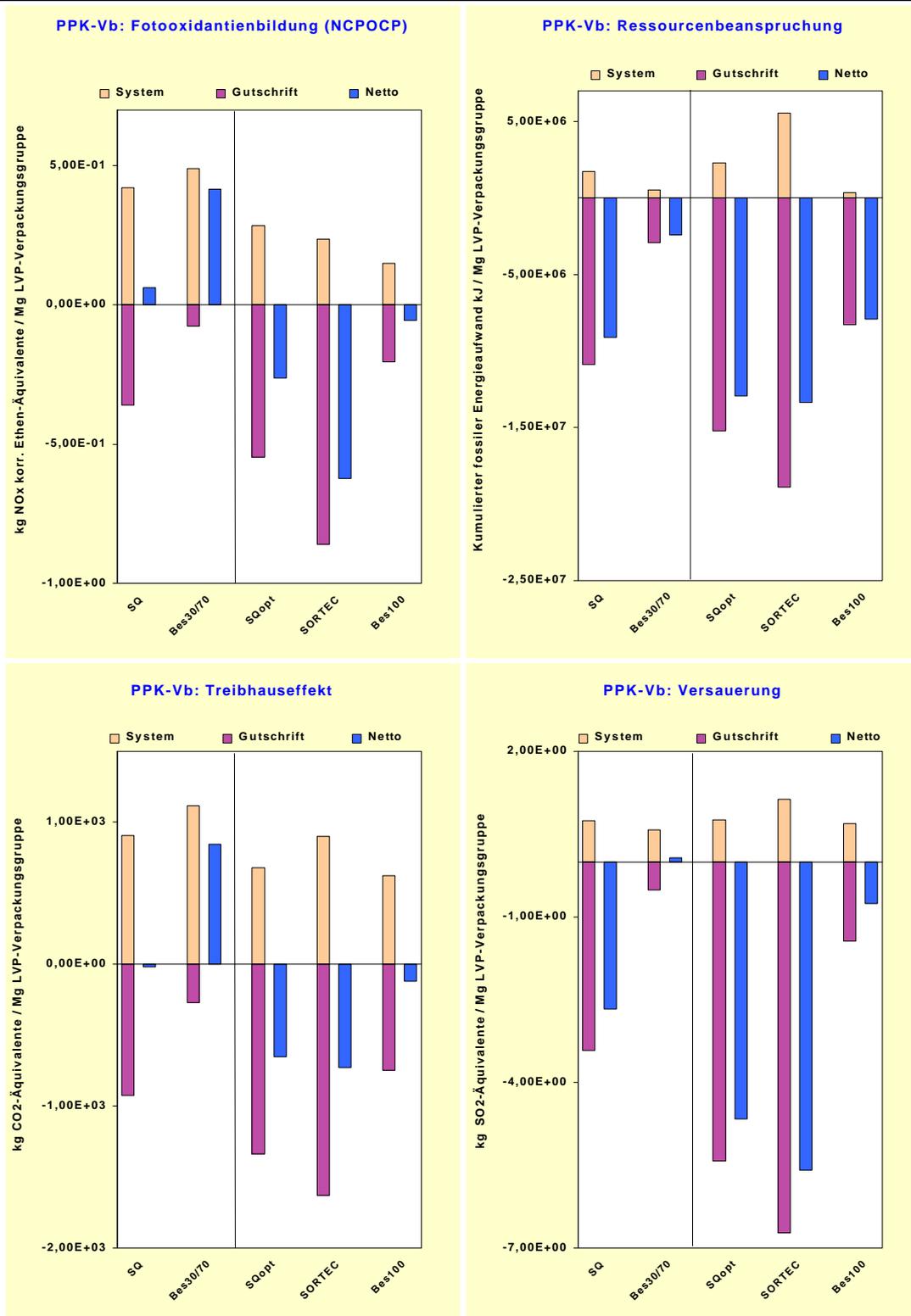


Abb. III-25: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe PPK-Vb hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung

III.13 Flüssigkeitskartons (FKN)

Tab. III-25: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe FKN:
Absolutwerte

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	-14.595	-15.962	-16.382	-36.167	-8.730
Treibhauseffekt	-7.808	-10.082	-10.573	-2.735	1.088
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	-3.456	-4.657	-4.753	233	-766
Naturraumbeanspruchung	-20.568	-23.001	-22.977	1	0
Versauerung	-12.411	-13.750	-14.147	-802	-2.398
Terrestrische Eutrophierung	-4.381	-4.950	-5.130	365	85
Aquatische Eutrophierung	-7.387	-8.406	-8.440	1.807	0
Humantoxizität (Krebsrisiko)	-447	-813	-735	-1.566	-2.996

Tab. III-26: EDW der Untersuchungsoptionen der Verpackungsmaterialgruppe FKN:
Differenzwerte zur besten Option

	SQ	SQopt	SORTEC	Bes30/70	Bes100
Ressourcenbeanspruchung	21.572	20.204	19.784		27.437
Treibhauseffekt	2.764	491		7.838	11.661
Fotooxidantienbildung (NCPOCP)	1.297	96		4.986	3.987
Naturraumbeanspruchung	2.433		24	23.002	23.001
Versauerung	1.737	397		13.345	11.749
Terrestrische Eutrophierung	749	180		5.496	5.215
Aquatische Eutrophierung	1.053	34		10.247	8.440
Humantoxizität (Krebsrisiko)	2.549	2.183	2.261	1.430	

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

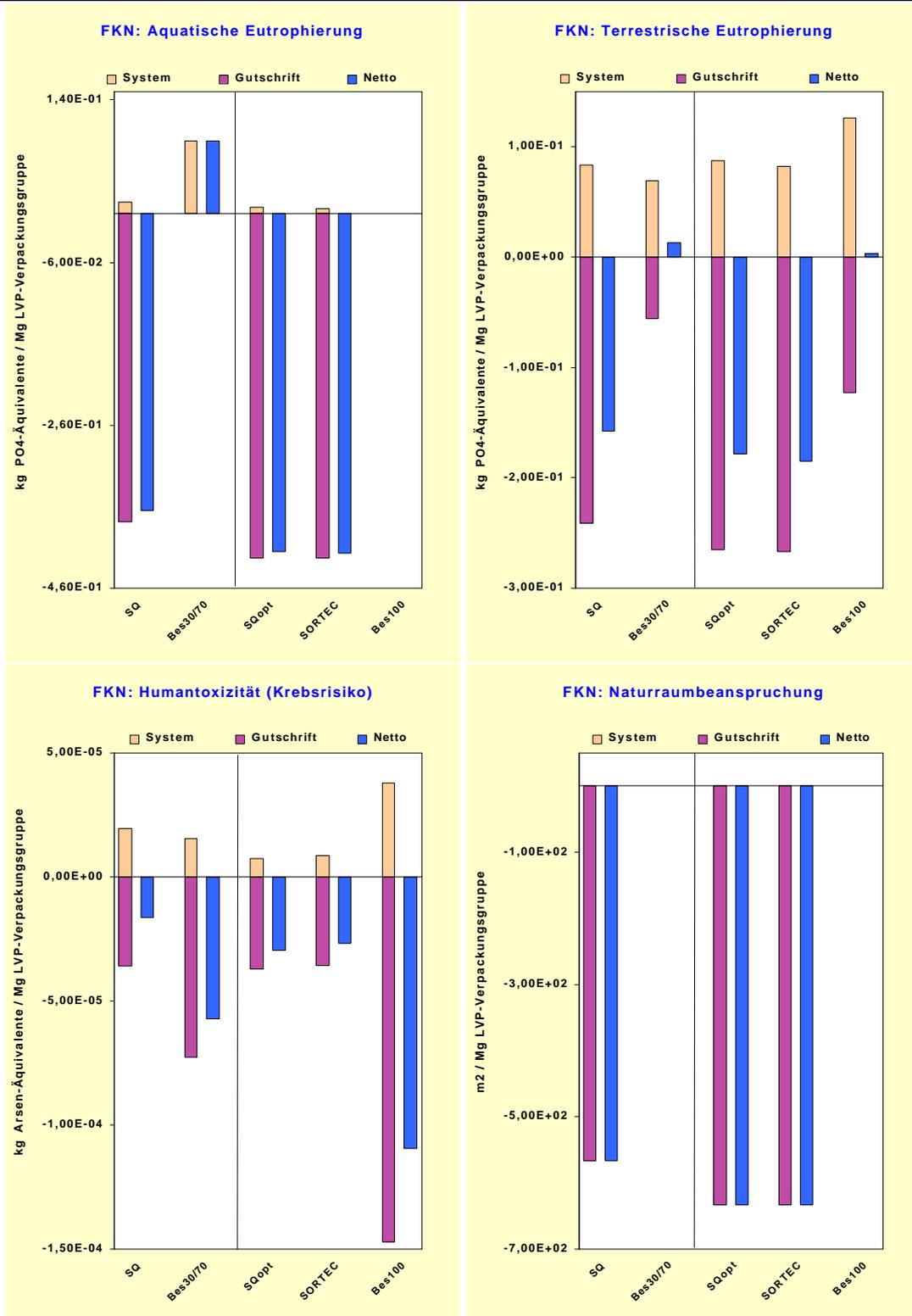


Abb. III-26: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe FKN hinsichtlich der Wirkungskategorien Aquatische Eutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität und Naturraumbeanspruchung

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

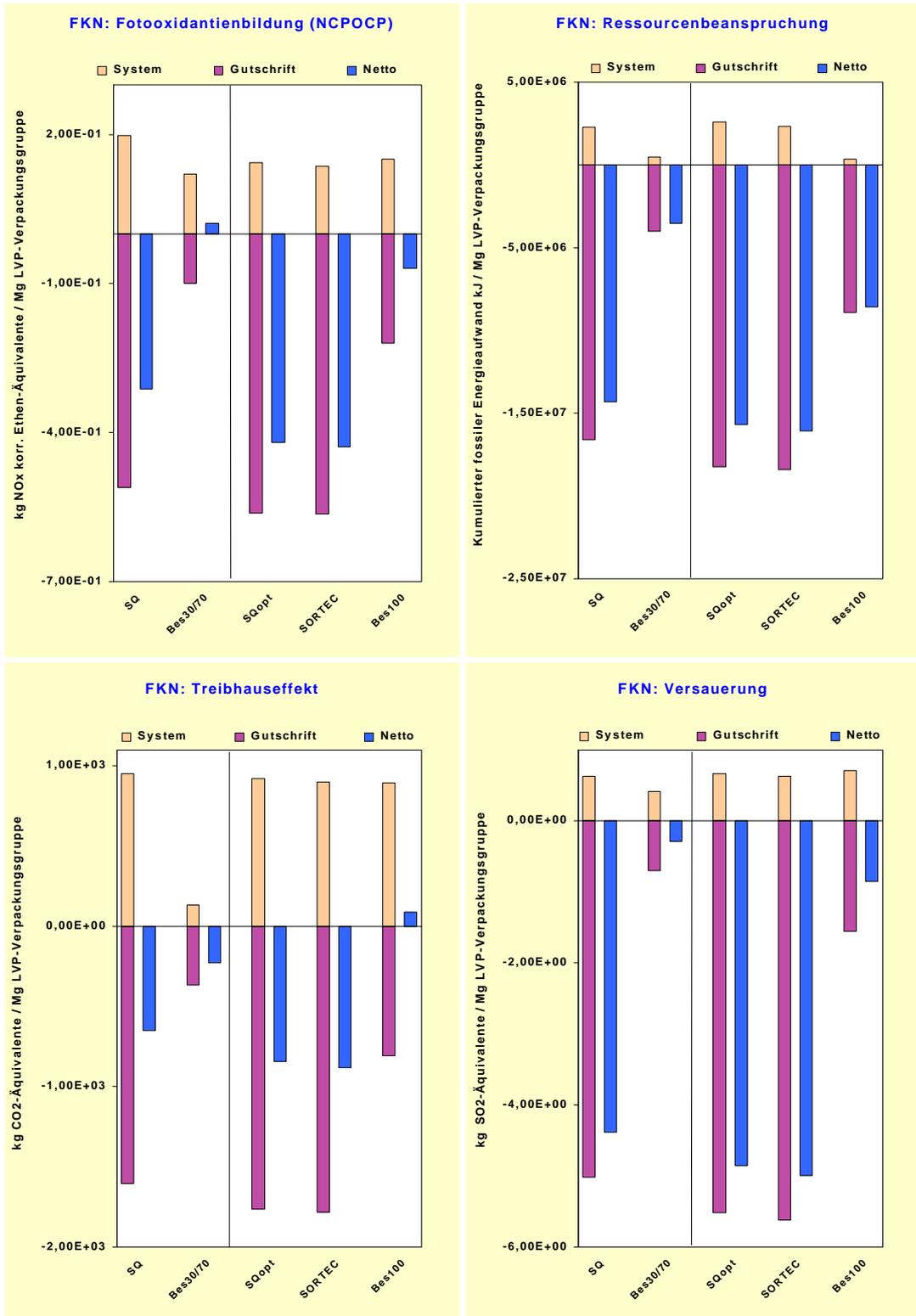


Abb. III-27: Optionsvergleich der Verpackungsmaterialgruppe FKN hinsichtlich der Wirkungskategorien Fotooxidantienbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt und Versauerung

Anhang IV. Vergleich der 13 LVP-Gruppen innerhalb einer Wirkungskategorie

In den folgenden Abbildungen (Abb. IV-1 bis Abb. IV-6) sind jeweils die EDW je LVP innerhalb einer Wirkungskategorie für jede der drei Verwertungsoptionen Status Quo, Status Quo optimiert und SORTEC gegenübergestellt. Die Berechnung der EDW erfolgte basierend auf dem Massenaufkommen jeder einzelnen Verpackungsmaterialgruppe in der BRD (vgl. Kapitel 3 und Anhang II, Berechnung der EDW). Die Einzelwerte eines jeden Balkens in den Diagrammen sind identisch mit denen in den Tabellen „EDW der Untersuchungsoption der Verpackungsmaterialgruppe: Absolutwerte“ im Anhang III (z.B. Tab. III-1) . Für die grafische Darstellung werden die Ergebnisse für die Wirkungskategorien Naturraumbeanspruchung und Aquatische Eutrophierung nicht berücksichtigt, da sie außer bei PPK-Vb und FKN im Vergleich zu den restlichen Wirkungskategorien nur äußerst geringe spezifische Beiträge aufweisen.

Durch die vergleichende Darstellung der EDW kann für jede Verpackungsgruppe ihre relative Bedeutung innerhalb des Gesamtsystems aller LVP abgelesen werden, da der jeweilige absolute (mengenmäßige) Anteil der Verpackungsgruppe im Dualen System in die Berechnung der EDW eingeht. Positive Werte bedeuten somit immer eine Netto-Belastung, negative Werte immer eine Netto-Entlastung hinsichtlich der jeweils betrachteten Wirkungskategorie.

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

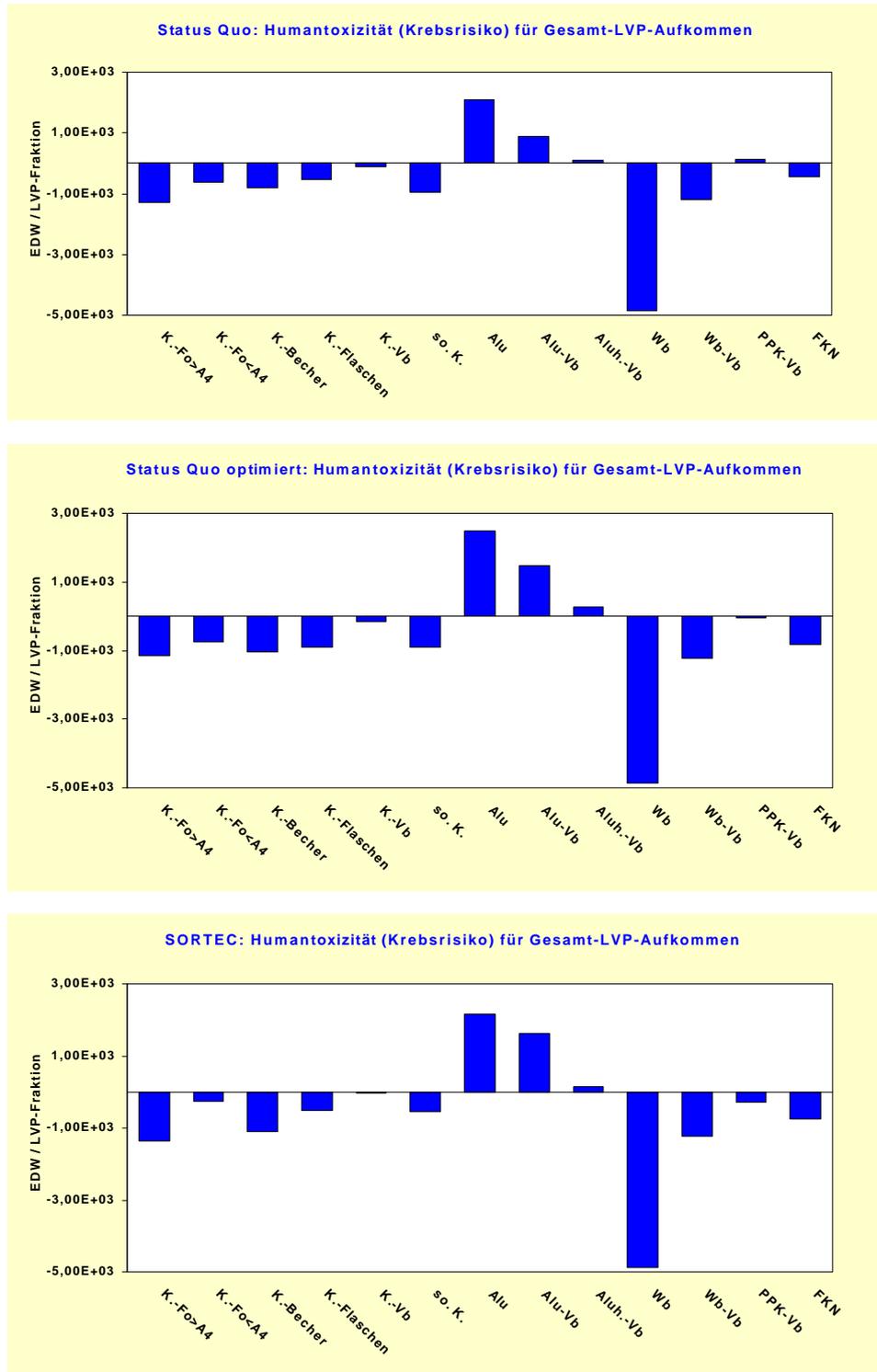


Abb. IV-1: Vergleich aller 13 Leichtverpackungen innerhalb der Wirkungskategorie Humantoxizität (Krebsrisiko) für die Verwertungsoptionen Status Quo, Status Quo optimiert und SORTEC, auf Basis der EDW.

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

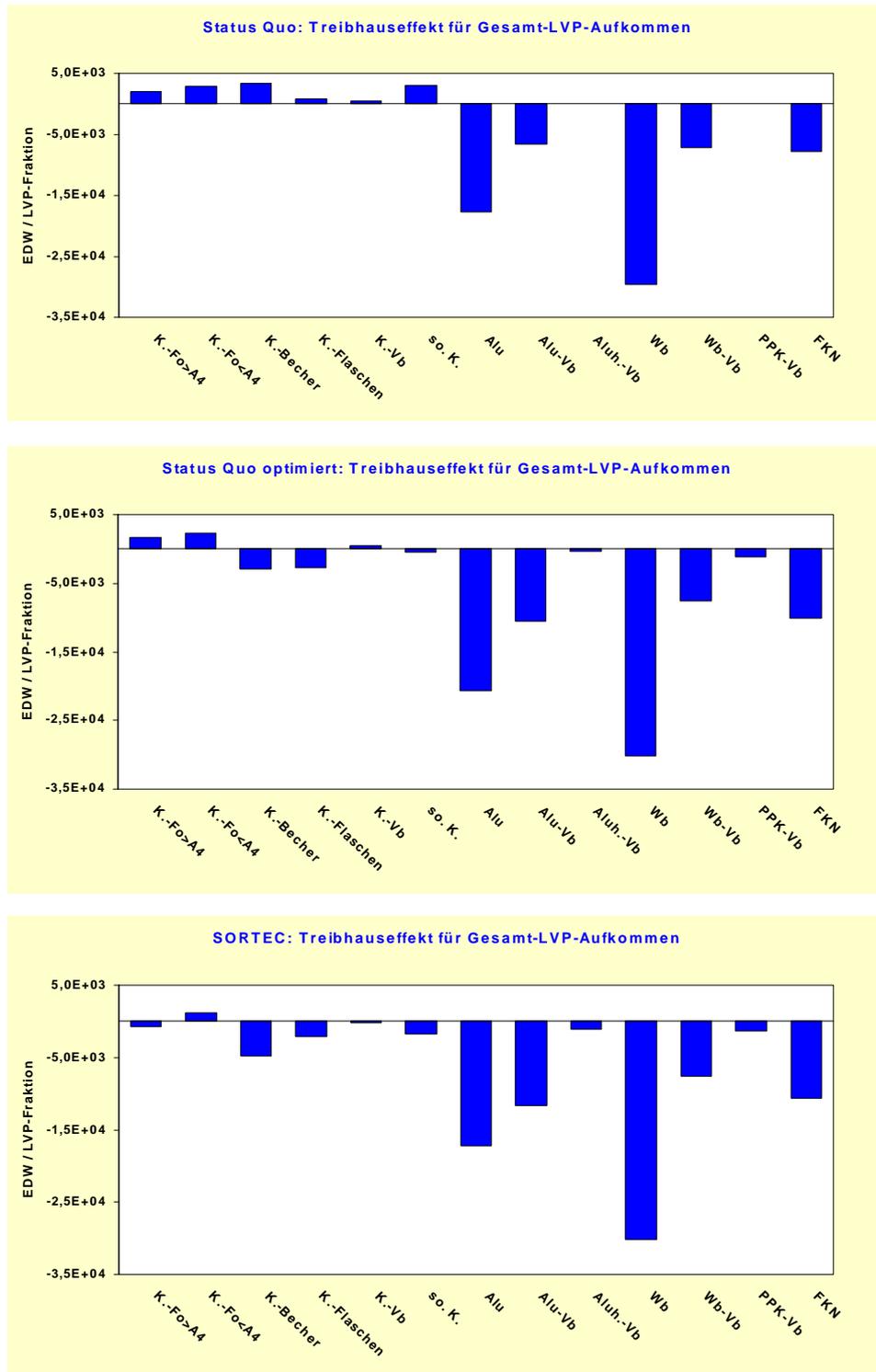


Abb. IV-2: Vergleich aller 13 Leichtverpackungen innerhalb der Wirkungskategorie Treibhauseffekt für die Verwertungsoptionen Status Quo, Status Quo optimiert und SORTEC, auf Basis der EDW.

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

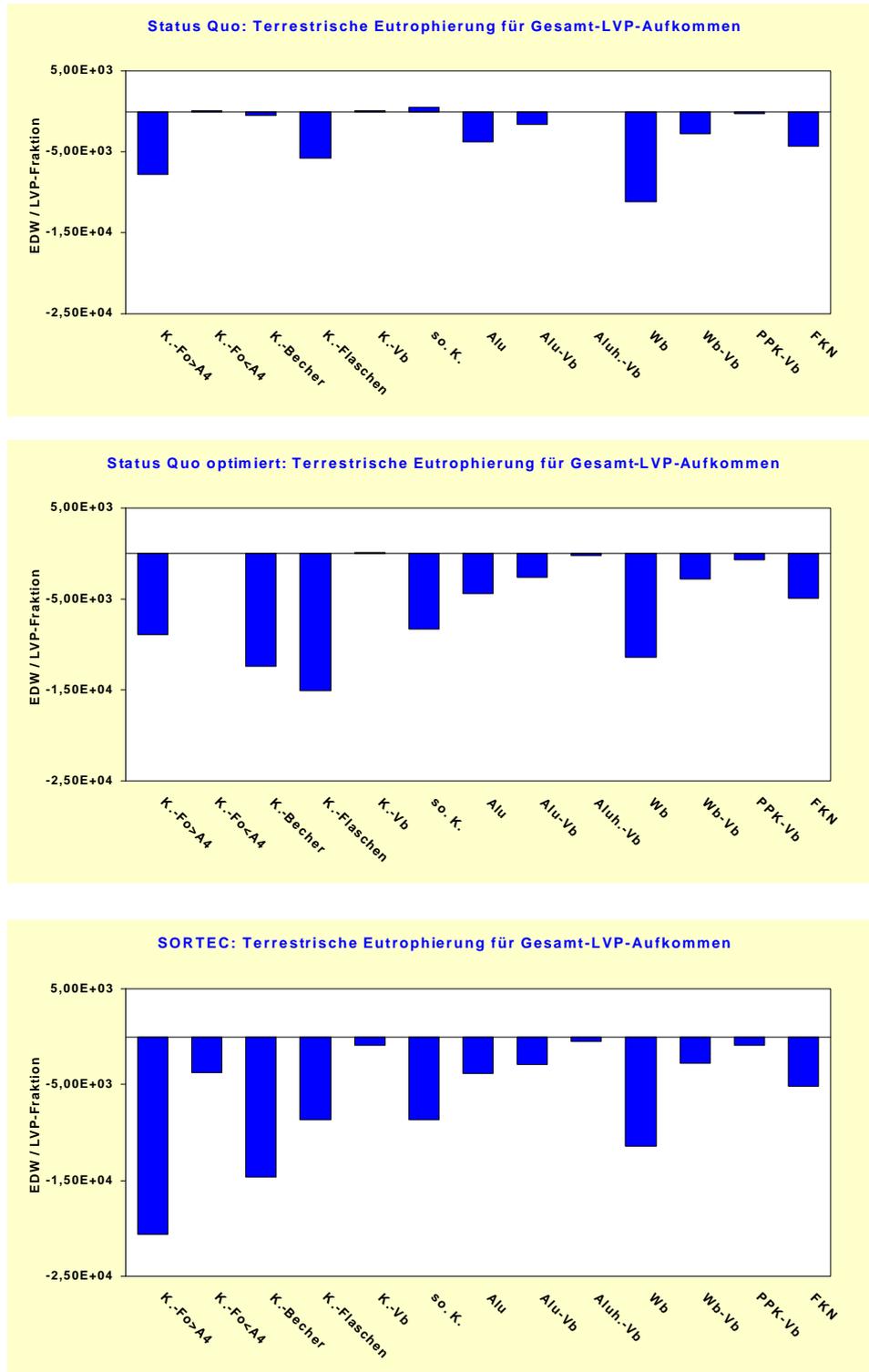


Abb. IV-3: Vergleich aller 13 Leichtverpackungen innerhalb der Wirkungskategorie Terrestrische Eutrophierung für die Verwertungsoptionen Status Quo, Status Quo optimiert und SORTEC, auf Basis der EDW.

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

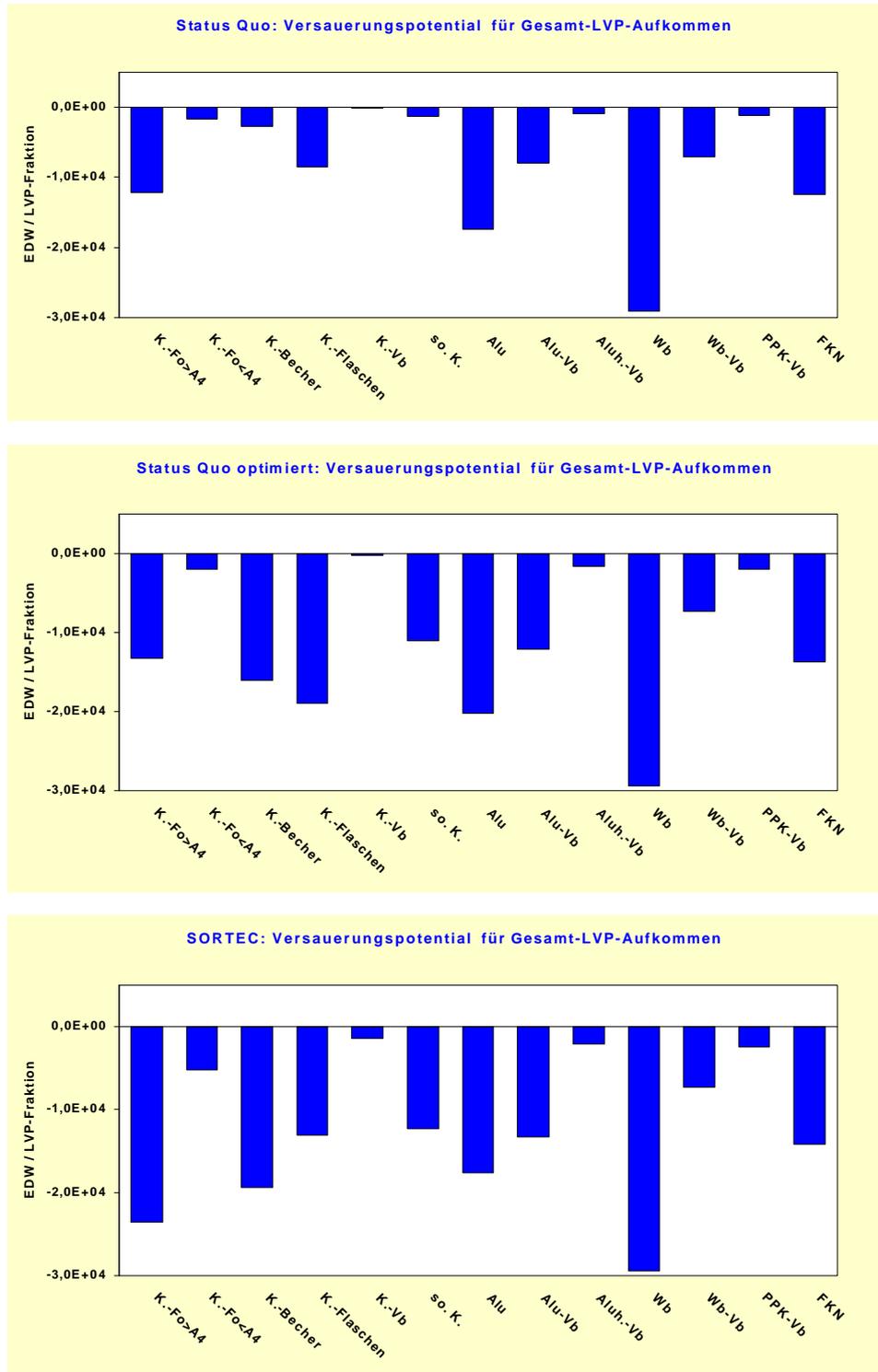


Abb. IV-4: Vergleich aller 13 Leichtverpackungen innerhalb der Wirkungskategorie Versauerung für die Verwertungsoptionen Status Quo, Status Quo optimiert und SORTEC, auf Basis der EDW.

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

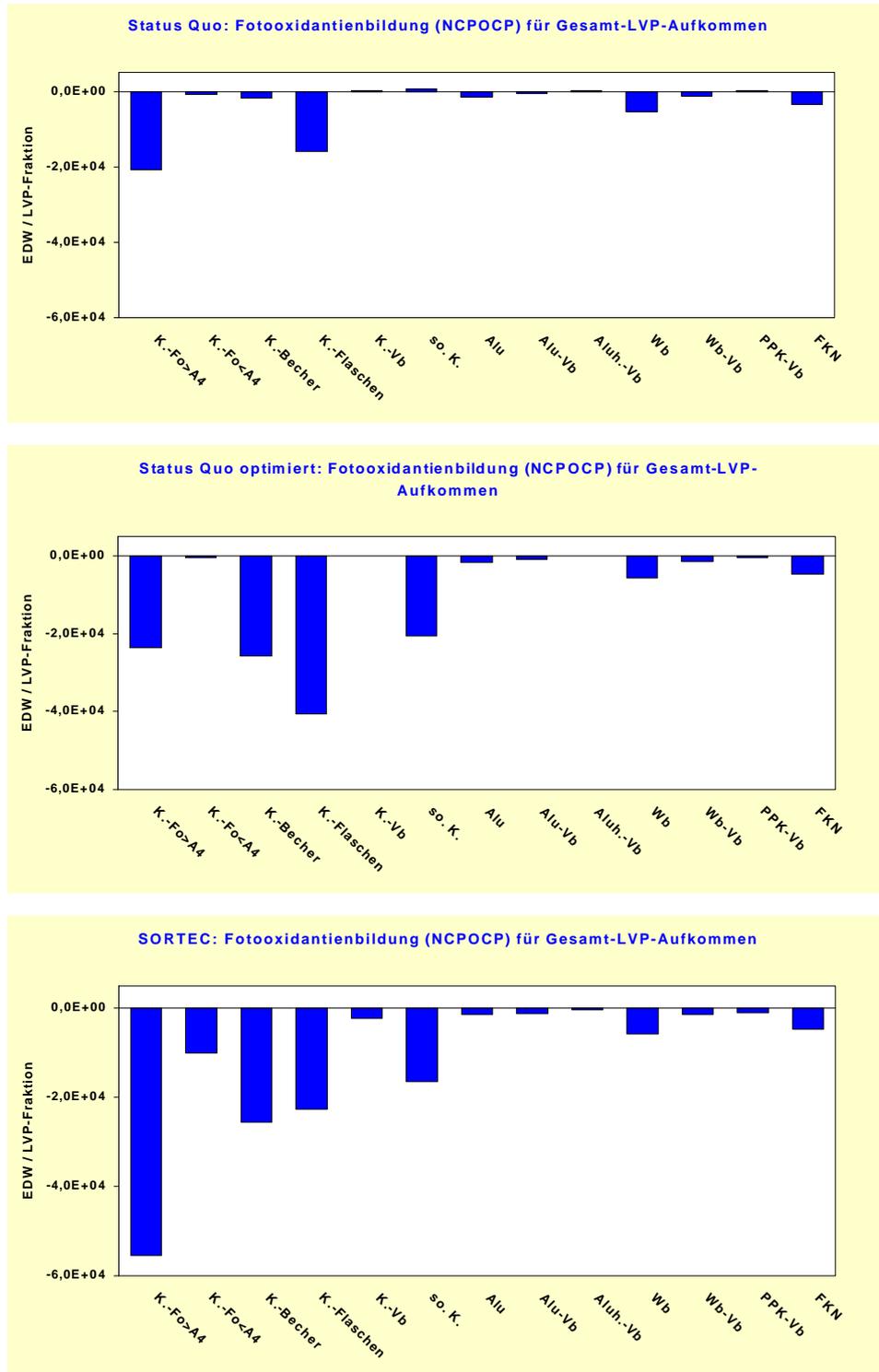


Abb. IV-5: Vergleich aller 13 Leichtverpackungen innerhalb der Wirkungskategorie Fotooxidantienbildung (NCPOCP) für die Verwertungsoptionen Status Quo, Status Quo optimiert und SORTEC, auf Basis der EDW.

Anhang zum Kapitel 3.3 – Ökologische Bewertung

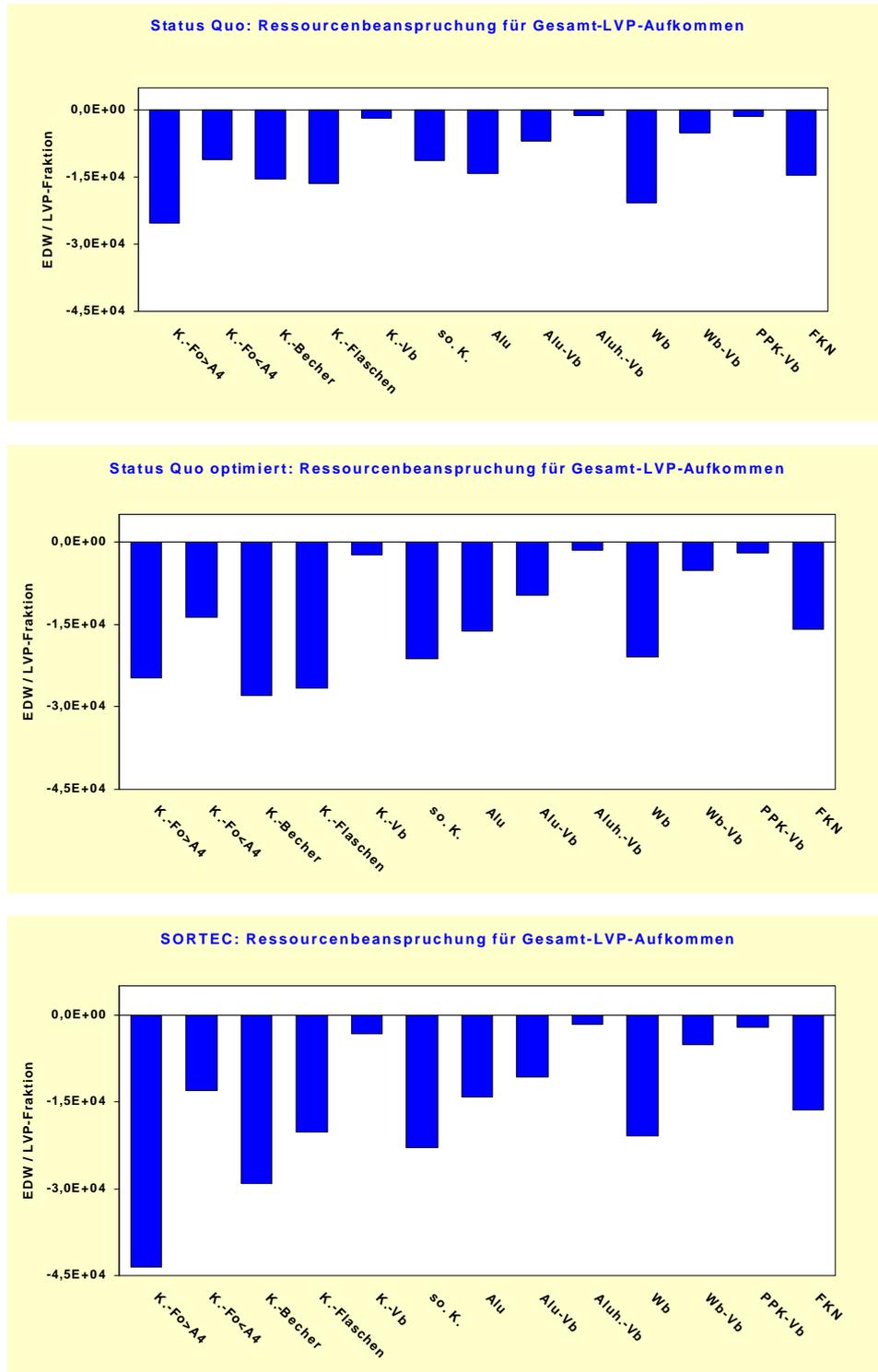


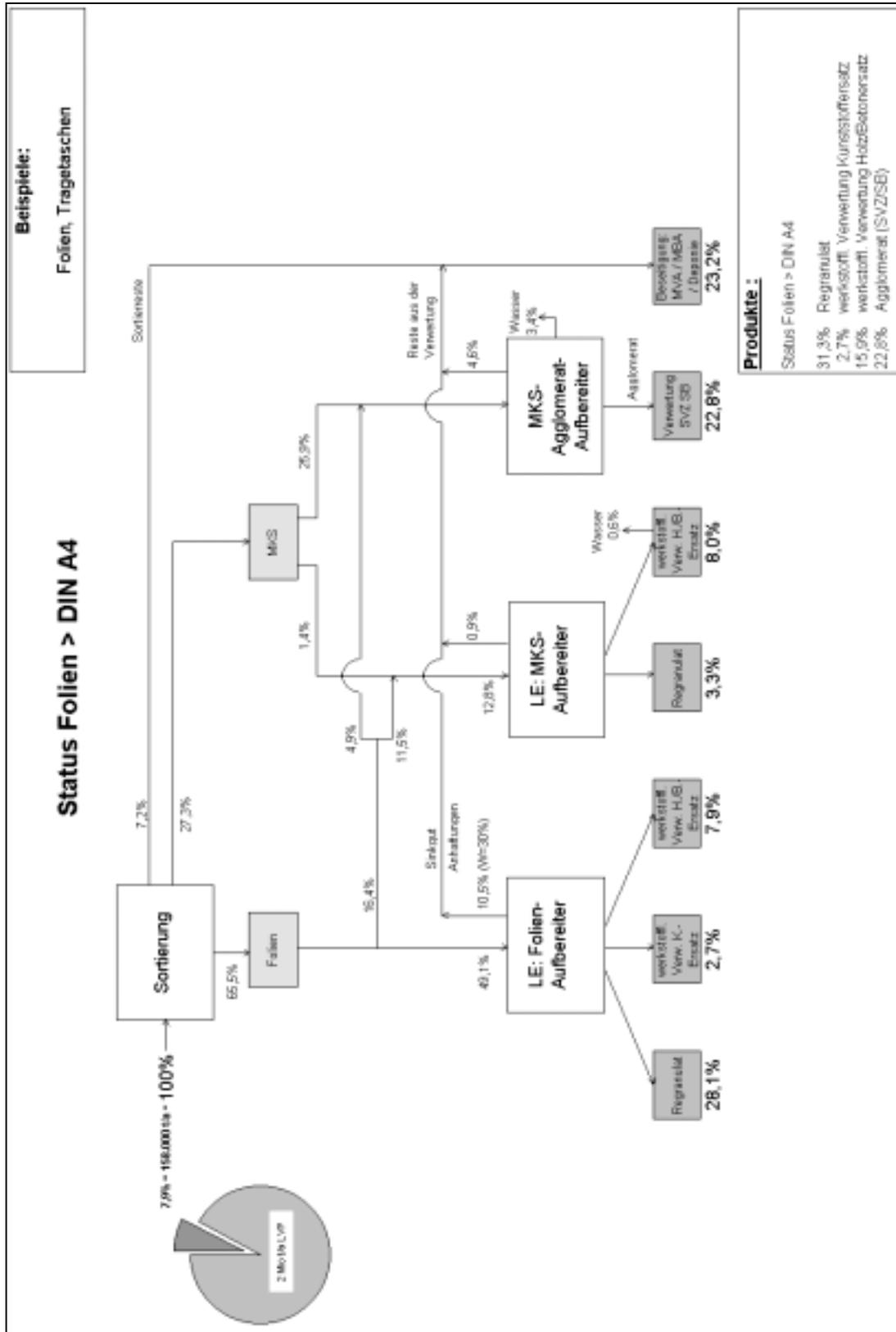
Abb. IV-6: Vergleich aller 13 Leichtverpackungen innerhalb der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung für die Verwertungsoptionen Status Quo, Status Quo optimiert und SORTEC, auf Basis der EDW.

Anhang zum Kapitel 3.1

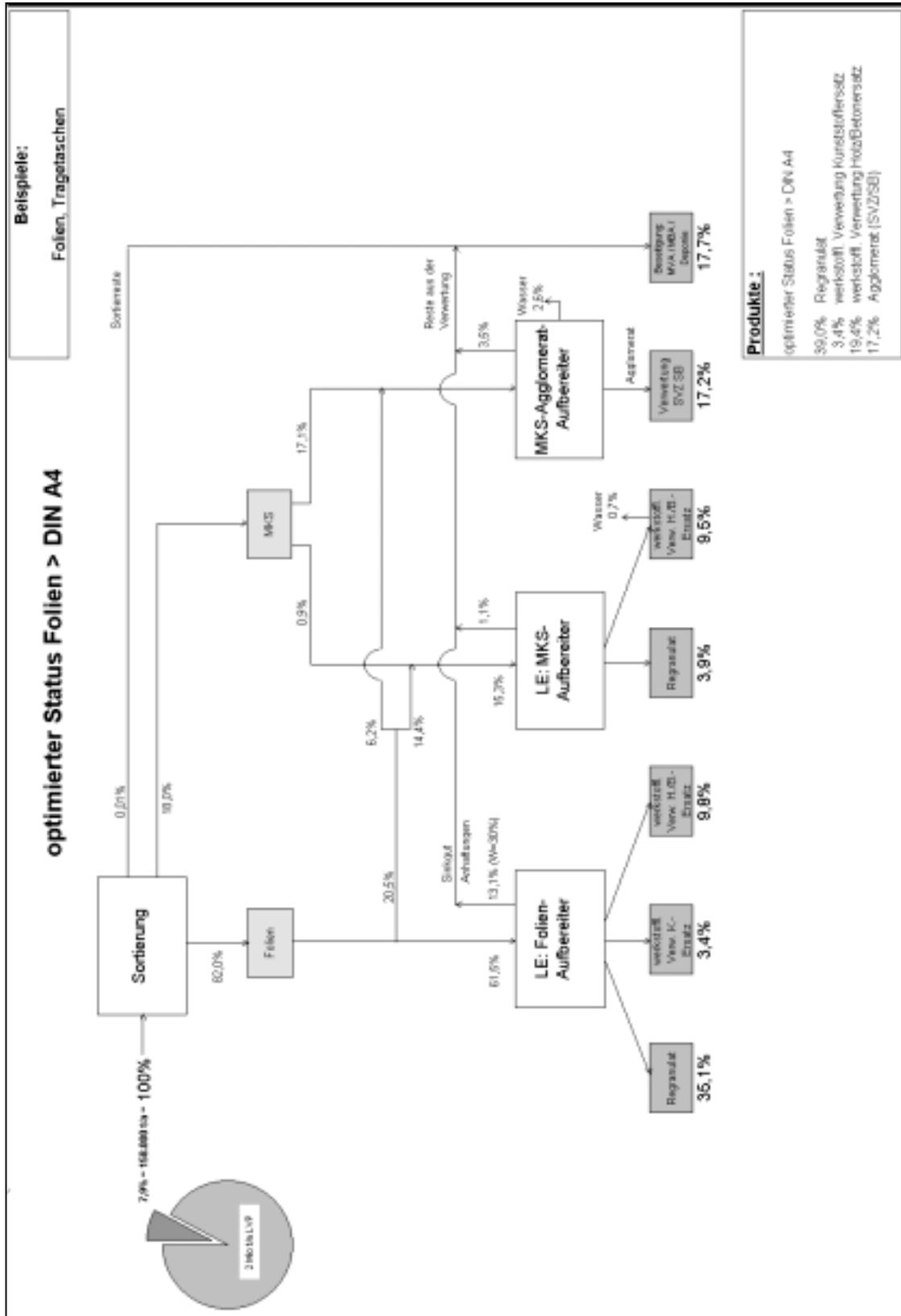
3.1.1	Folien >DIN A4 Status Quo	212
3.1.2	Folien >DIN A4 optimierter Status	213
3.1.3	Folien >DIN A4 Sortec.....	214
3.1.4	Folien < DIN A4 Status Quo	215
3.1.5	Folien < DIN A4 optimierter Status.....	216
3.1.6	Folien < DIN A4 Sortec.....	217
3.1.7	Kunststoffflaschen Status Quo	218
3.1.8	Kunststoffflaschen optimierter Status – Alte Spezifikation	219
3.1.9	Kunststoffflaschen optimierter Status – Neue Spezifikation	220
3.1.10	Kunststoffflaschen Sortec.....	221
3.1.11	Becher Status Quo	222
3.1.12	Becher optimierter Status – Alte Spezifikation	223
3.1.13	Becher optimierter Status – Neue Spezifikation	224
3.1.14	Becher Sortec.....	225
3.1.15	Sonstige Kunststoffe Status Quo.....	226
3.1.16	Sonstige Kunststoffe optimierter Status – Alte Spezifikation.....	227
3.1.17	Sonstige Kunststoffe optimierter Status – Neue Spezifikation	228
3.1.18	Sonstige Kunststoffe Sortec	229
3.1.19	Kunststoffverbunde Status Quo.....	230
3.1.20	Kunststoffverbunde optimierter Status	231
3.1.21	Kunststoffverbunde Sortec	232
3.1.22	Sonstige PPK-Verbunde Status Quo.....	233
3.1.23	Sonstige PPK-Verbunde optimierter Status	234
3.1.24	Sonstige PPK-Verbunde Sortec	235
3.1.25	Flüssigkeitskartons Status Quo	236
3.1.26	Flüssigkeitskartons optimierter Status.....	237

3.1.27	Flüssigkeitskartons Sortec.....	238
3.1.28	Weißblech Status Quo.....	239
3.1.29	Weißblech optimierter Status	240
3.1.30	Weißblech Sortec	241
3.1.31	Weißblechverbunde Status Quo.....	242
3.1.32	Weißblechverbunde optimierter Status	243
3.1.33	Weißblechverbunde Sortec	244
3.1.34	Aluminium Status Quo.....	245
3.1.35	Aluminium optimierter Status.....	246
3.1.36	Aluminium Sortec	247
3.1.37	Aluminiumverbunde Status Quo.....	248
3.1.38	Aluminiumverbunde optimierter Status.....	249
3.1.39	Aluminiumverbunde Sortec	250
3.1.40	Aluminiumhaltige Verbunde Status Quo.....	251
3.1.41	Aluminiumhaltige Verbunde optimierter Status	252
3.1.42	Aluminiumhaltige Verbunde Sortec	253

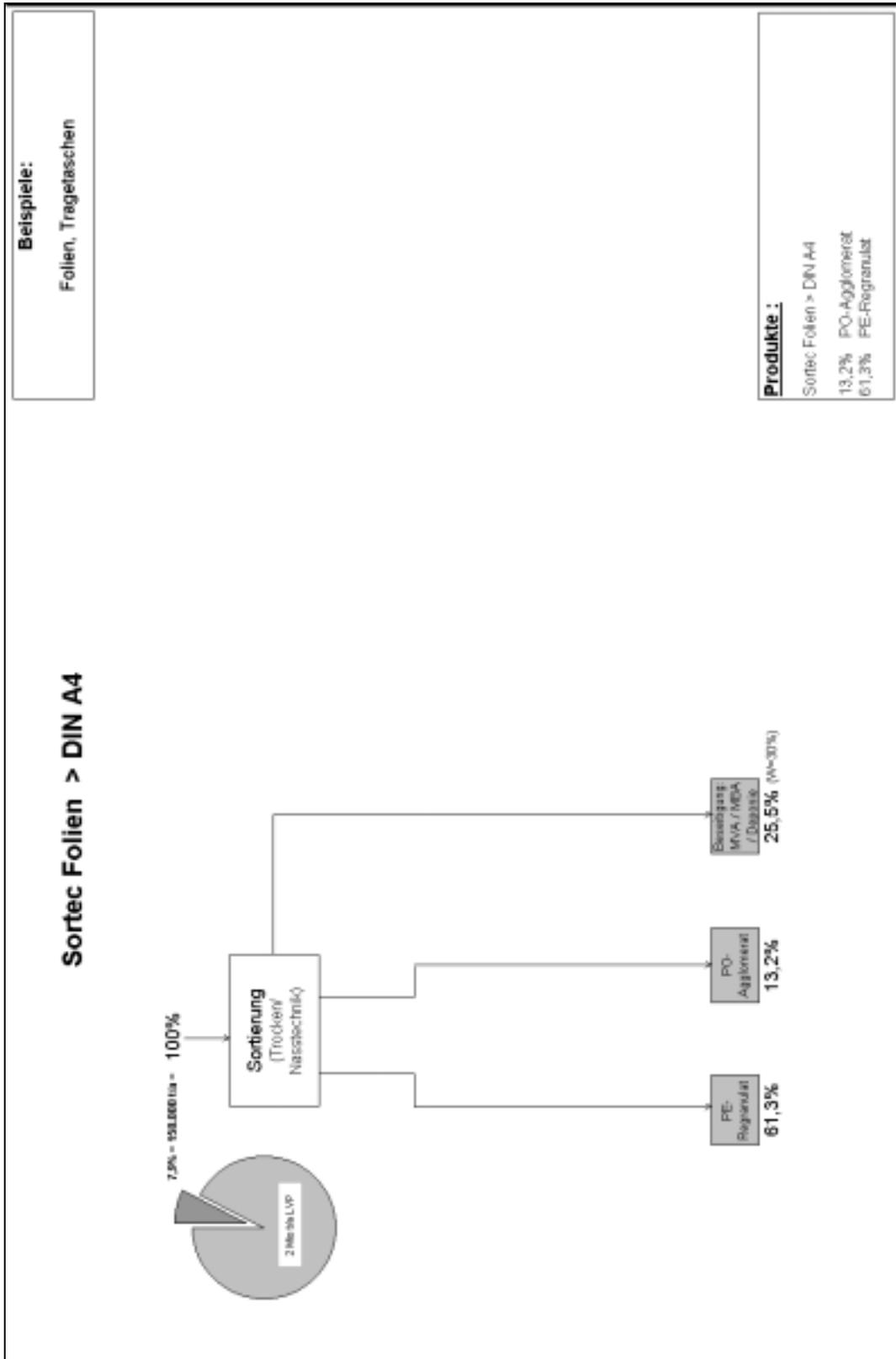
3.1.1 Folien >DIN A4 Status Quo



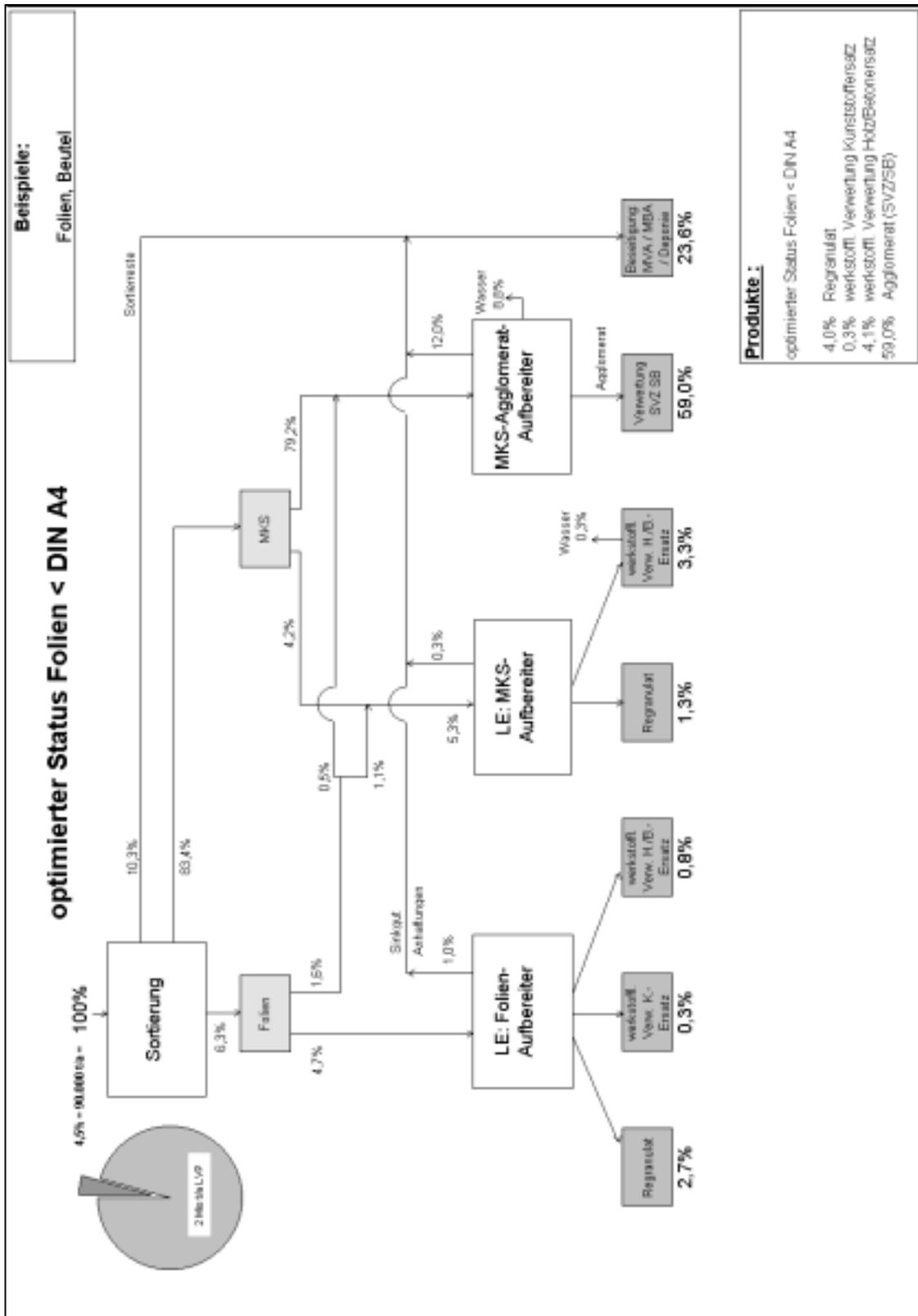
3.1.2 Folien >DIN A4 optimierter Status



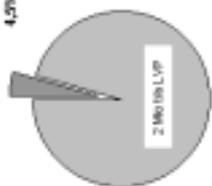
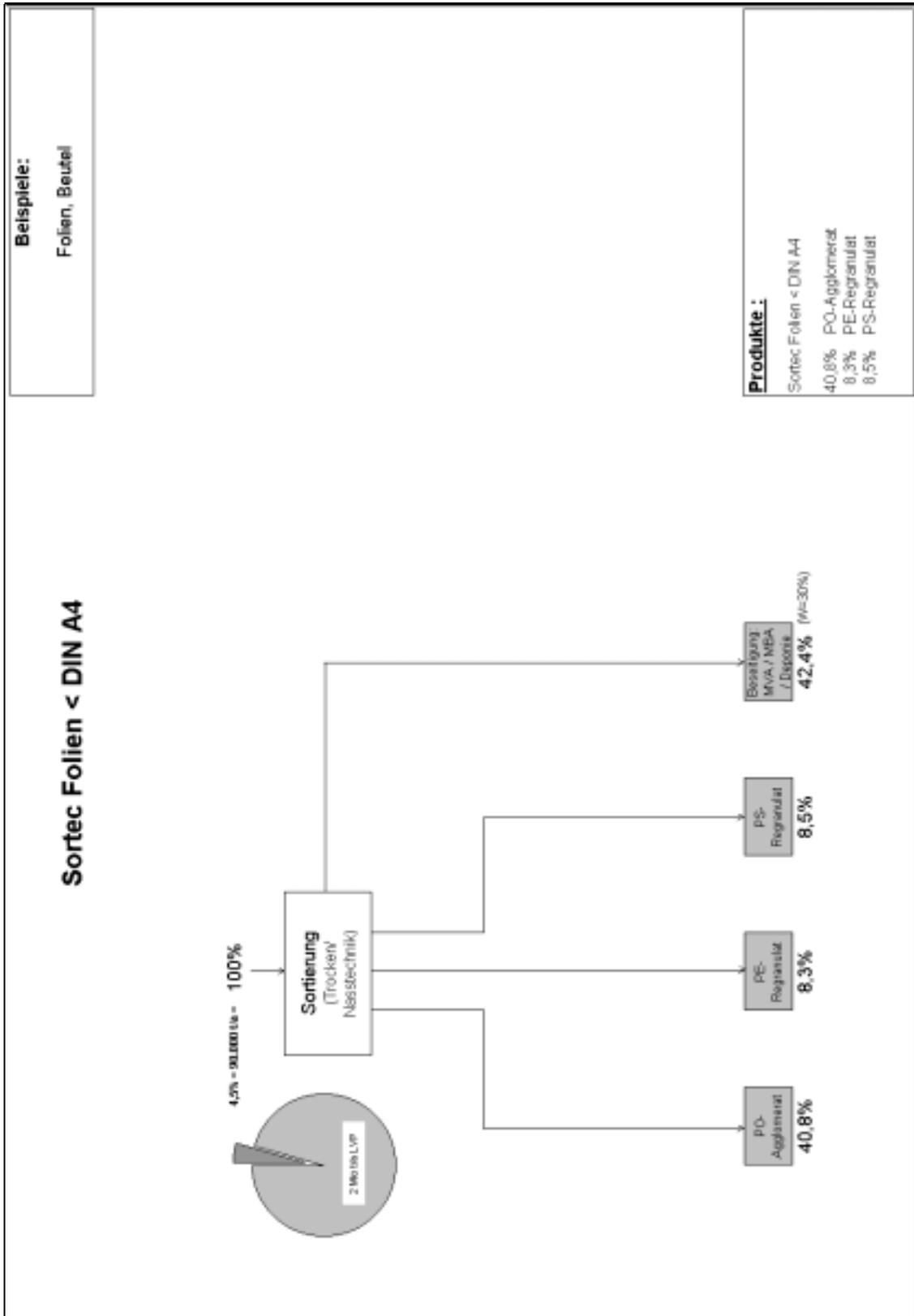
3.1.3 Folien >DIN A4 Sortec



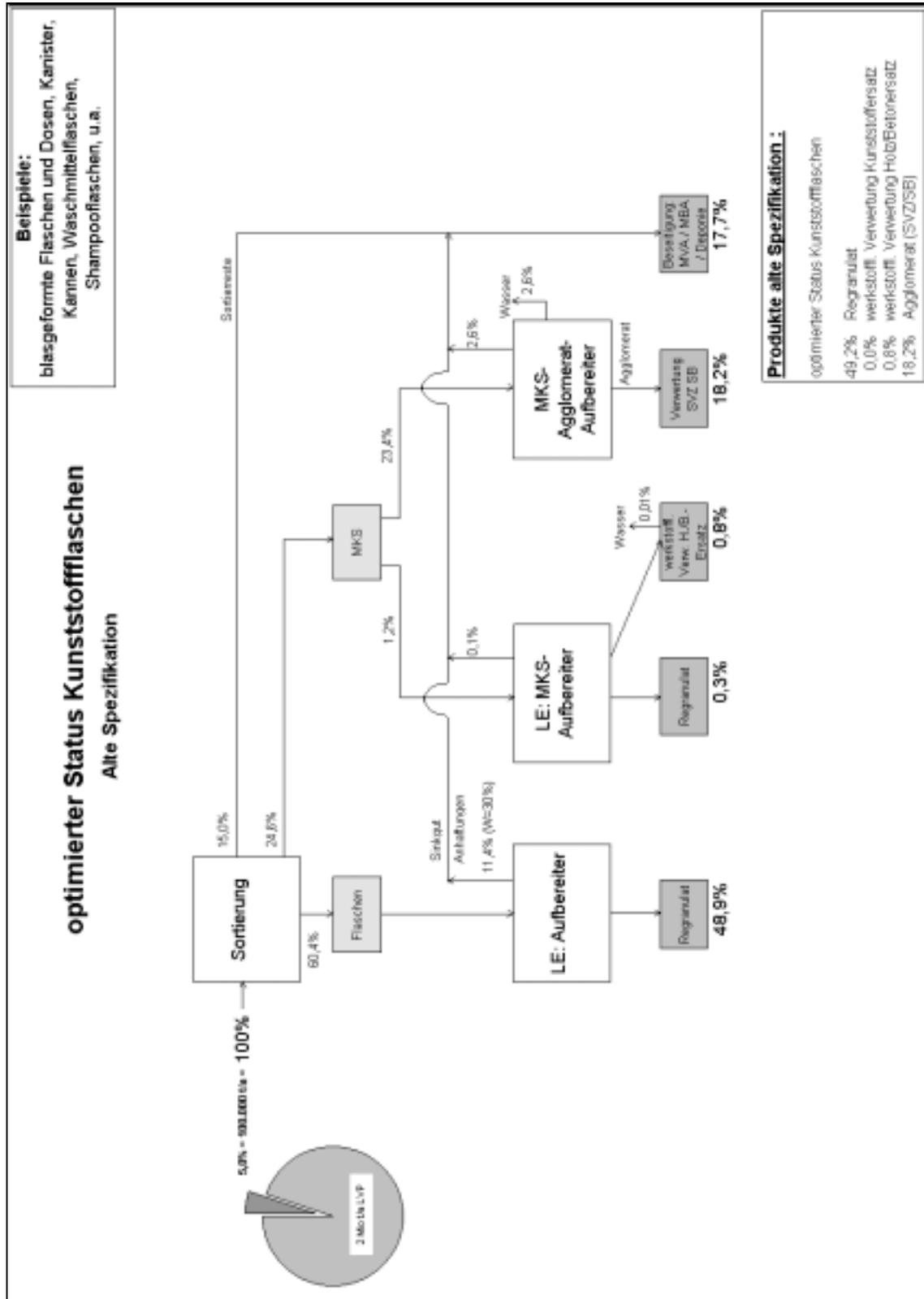
3.1.5 Folien < DIN A4 optimierter Status



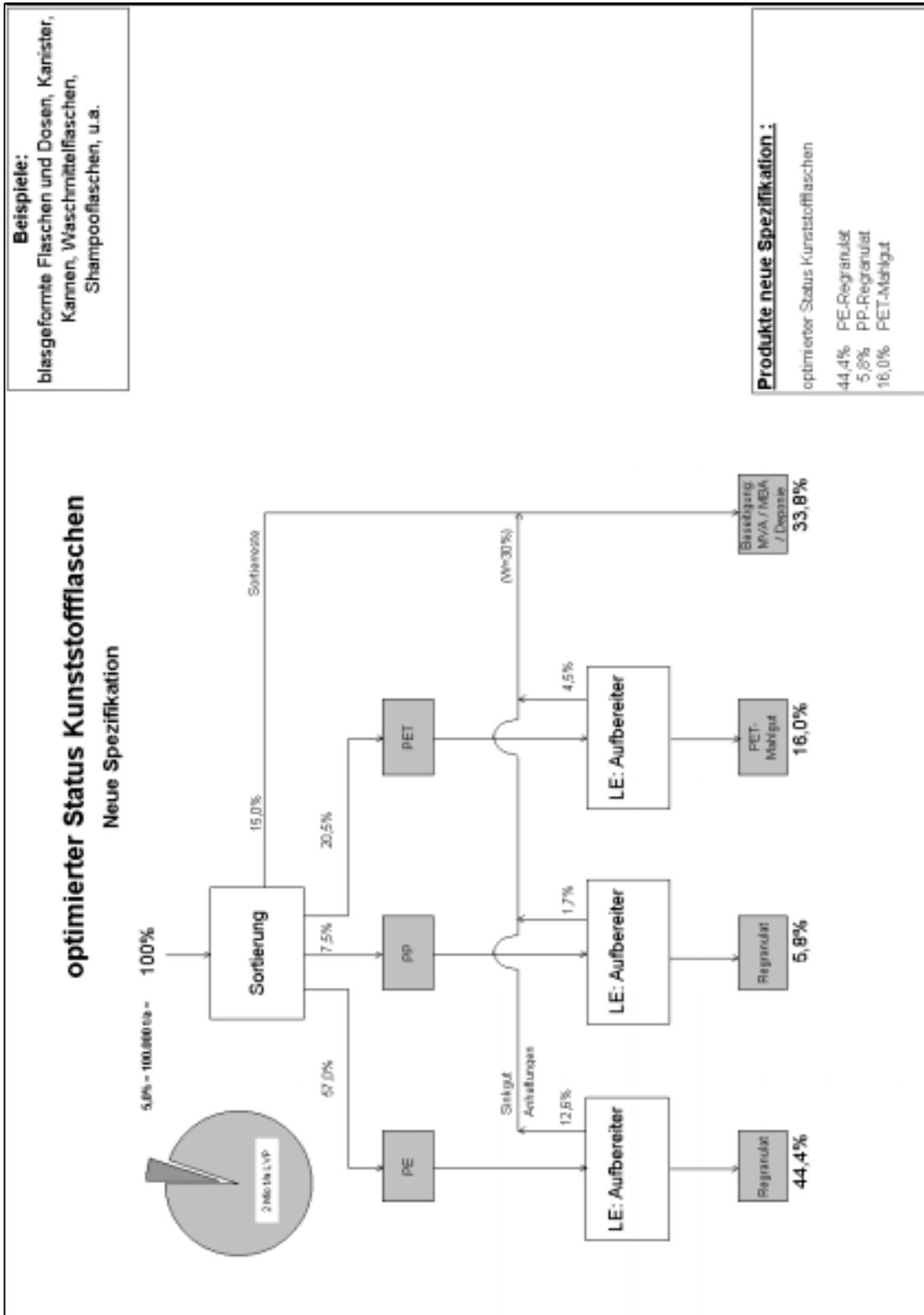
3.1.6 Folien < DIN A4 Sortec



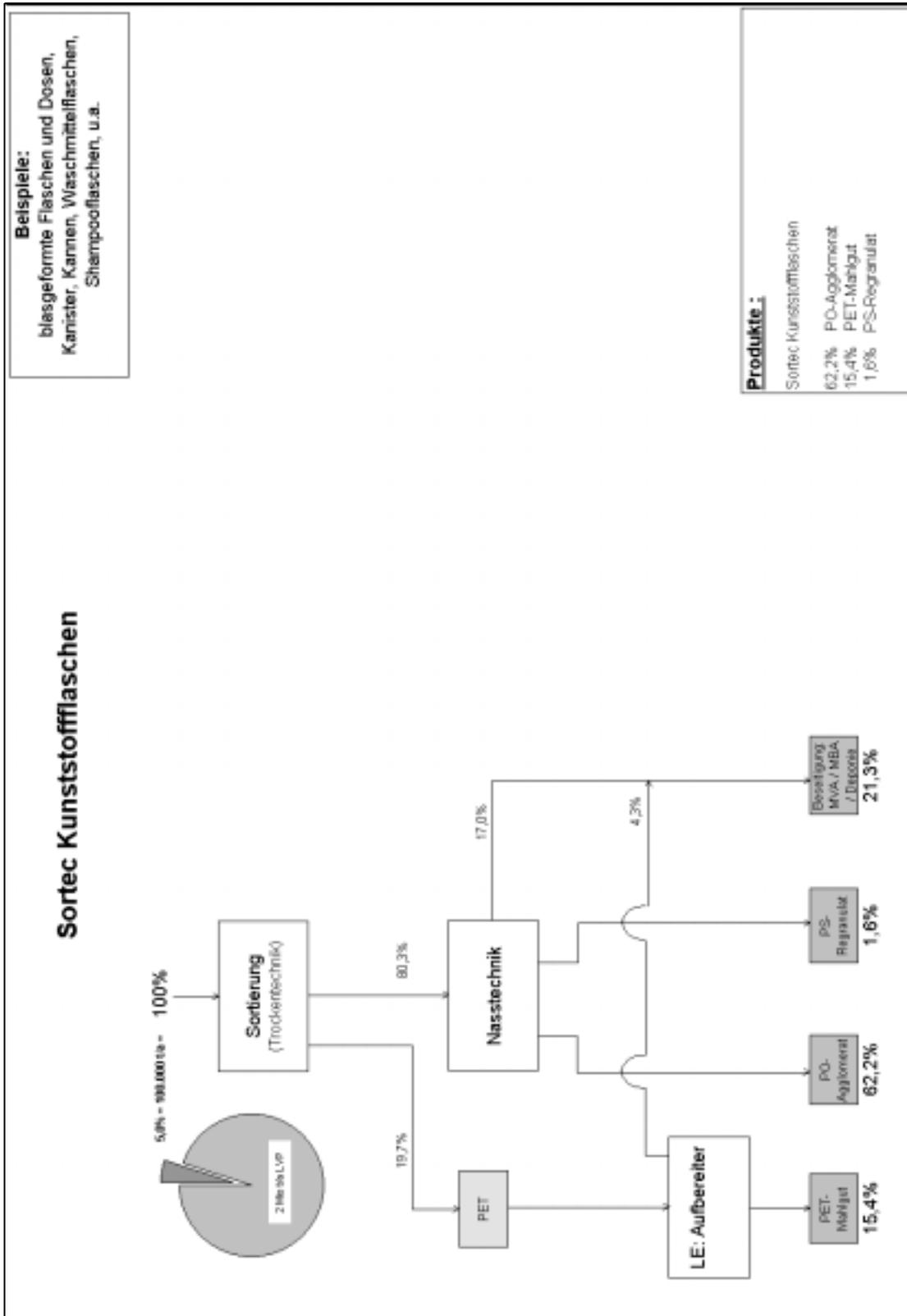
3.1.8 Kunststoffflaschen optimierter Status – Alte Spezifikation



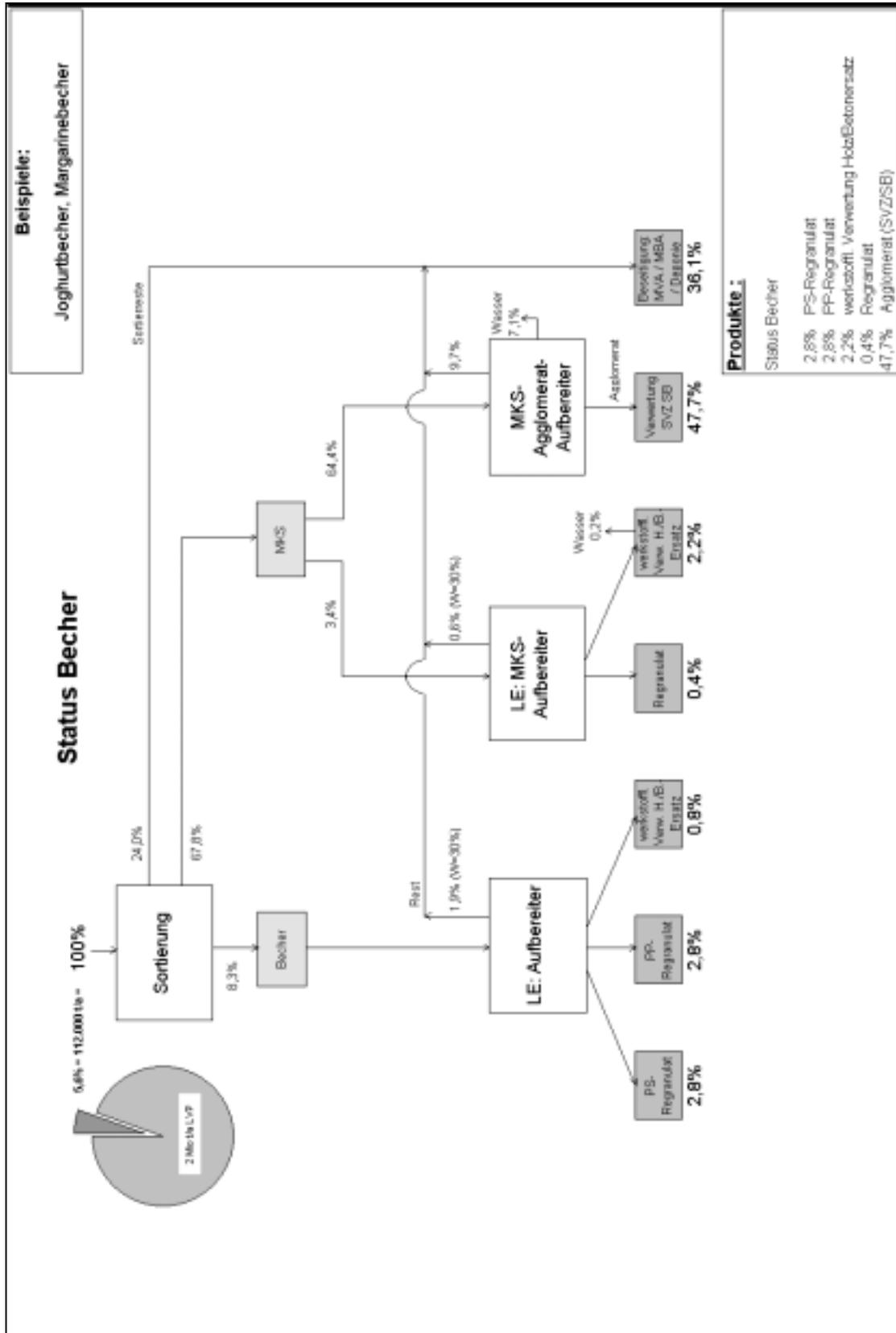
3.1.9 Kunststoffflaschen optimierter Status – Neue Spezifikation



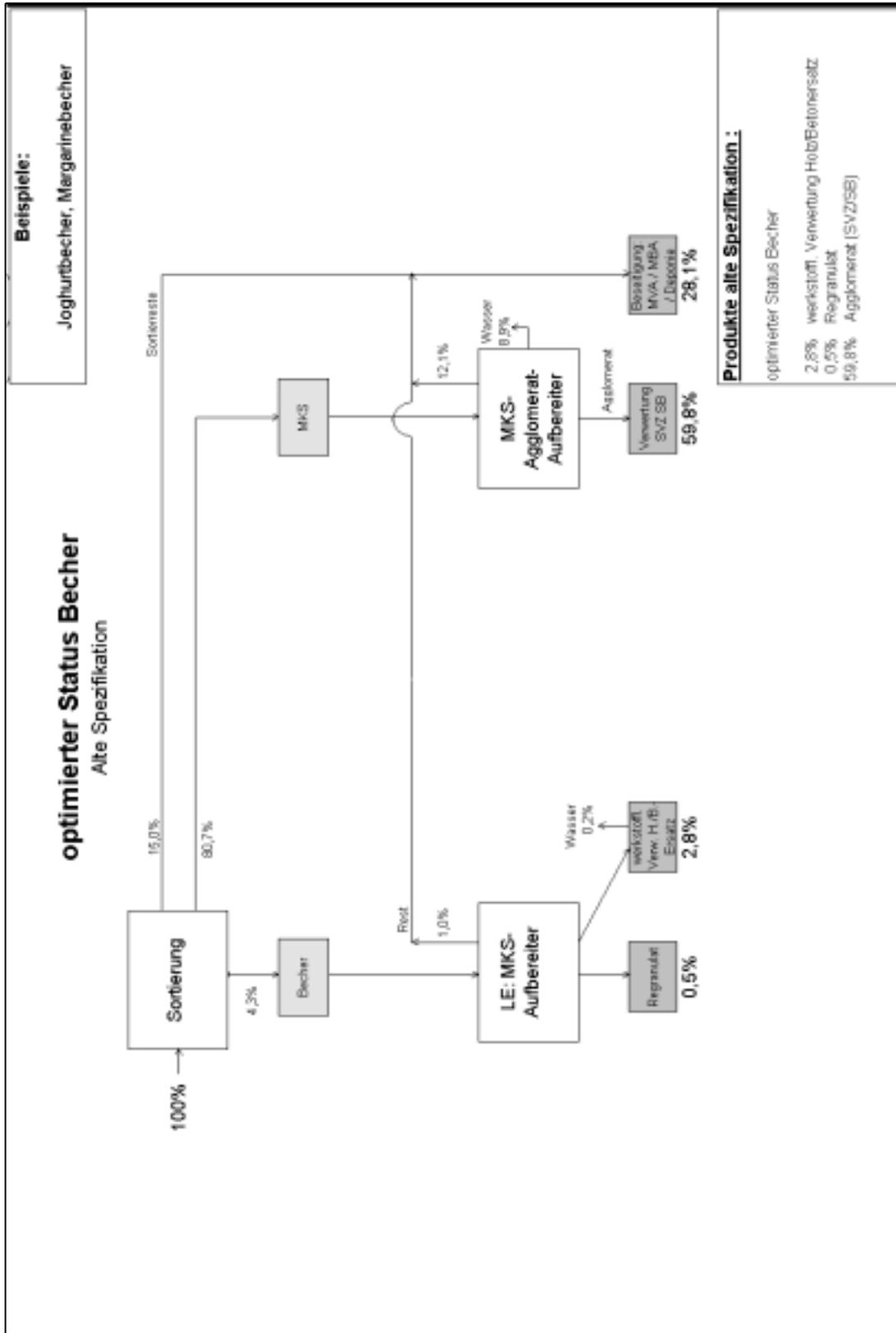
3.1.10 Kunststoffflaschen Sortec



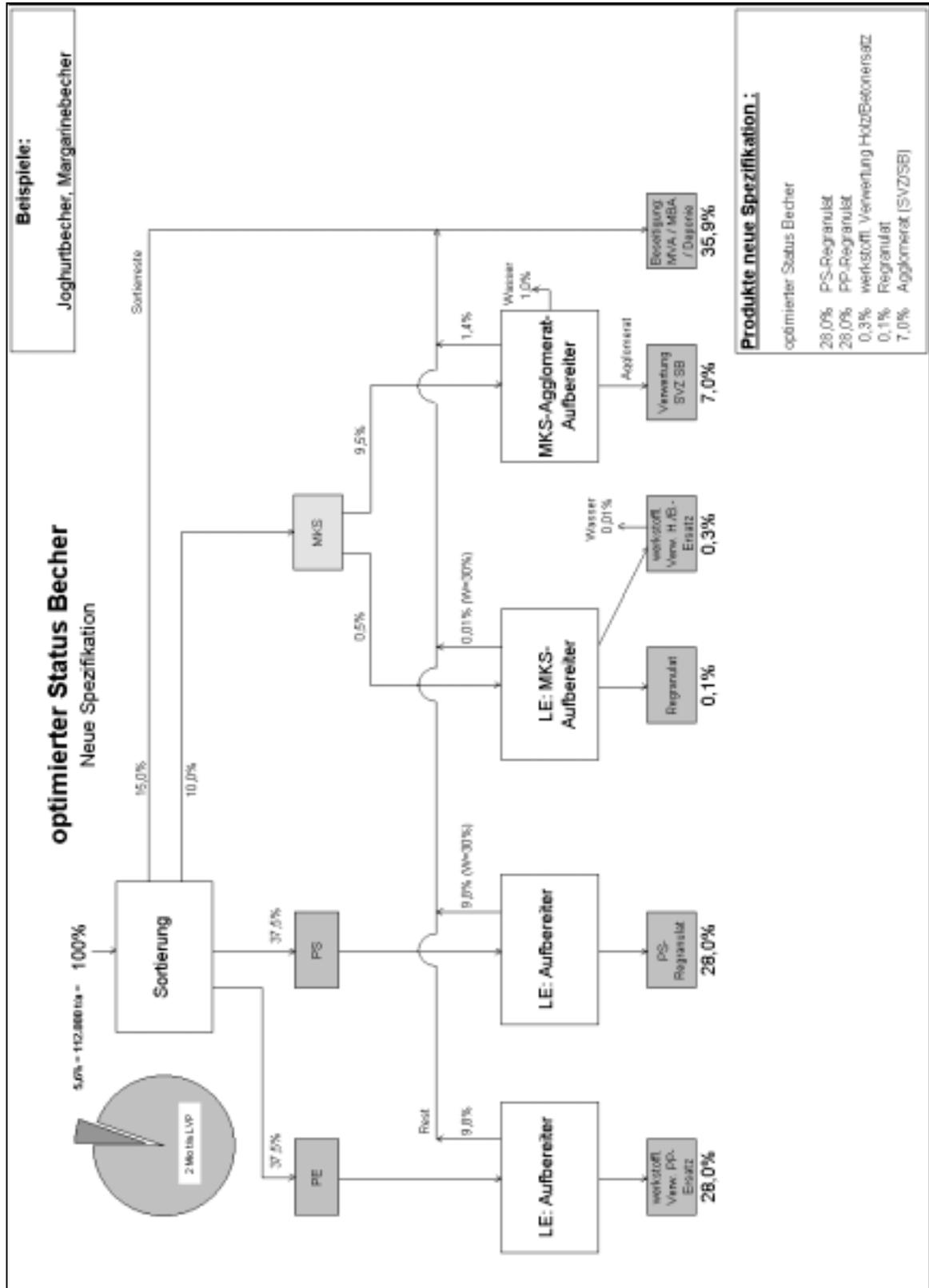
3.1.11 Becher Status Quo



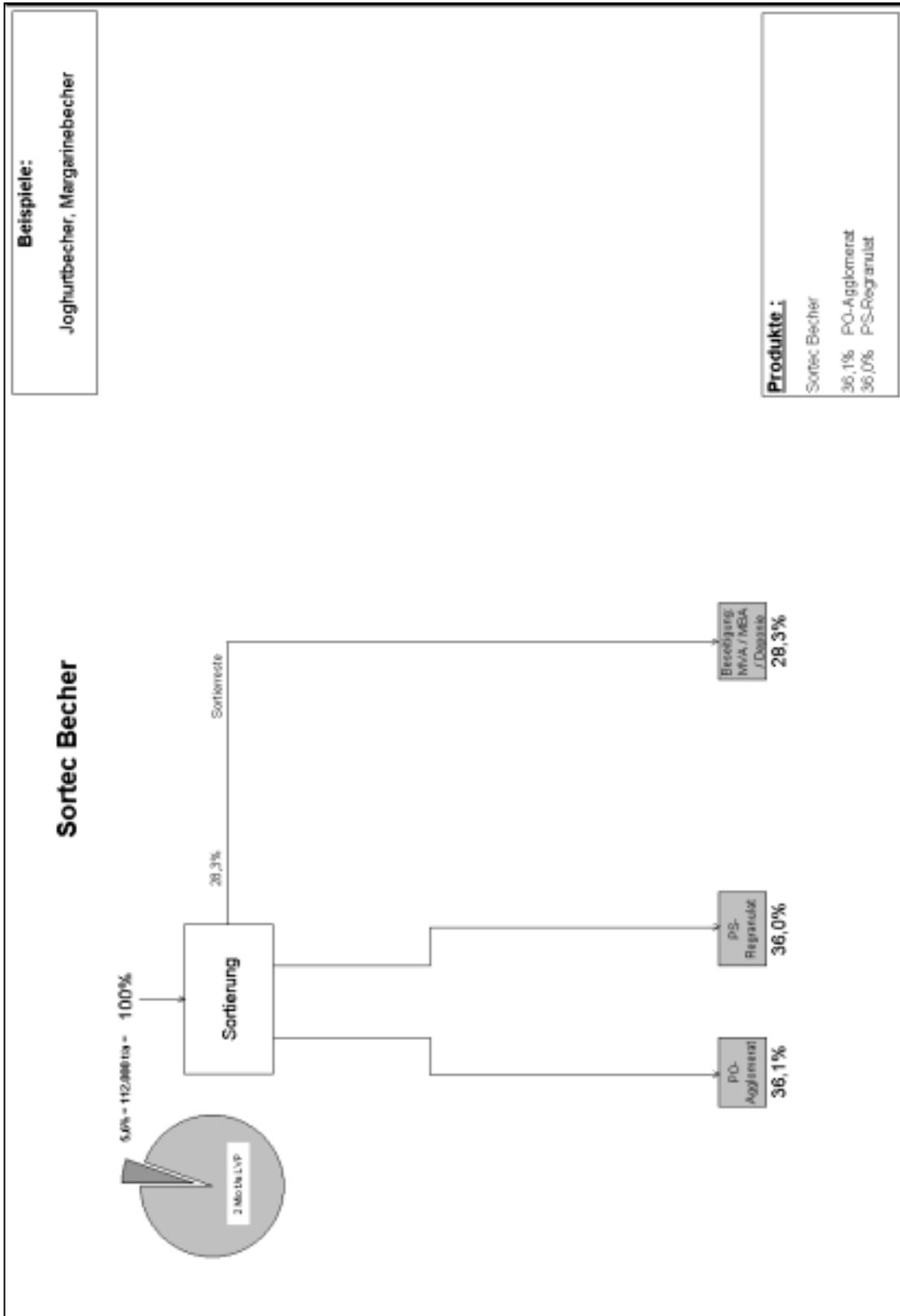
3.1.12 Becher optimierter Status – Alte Spezifikation



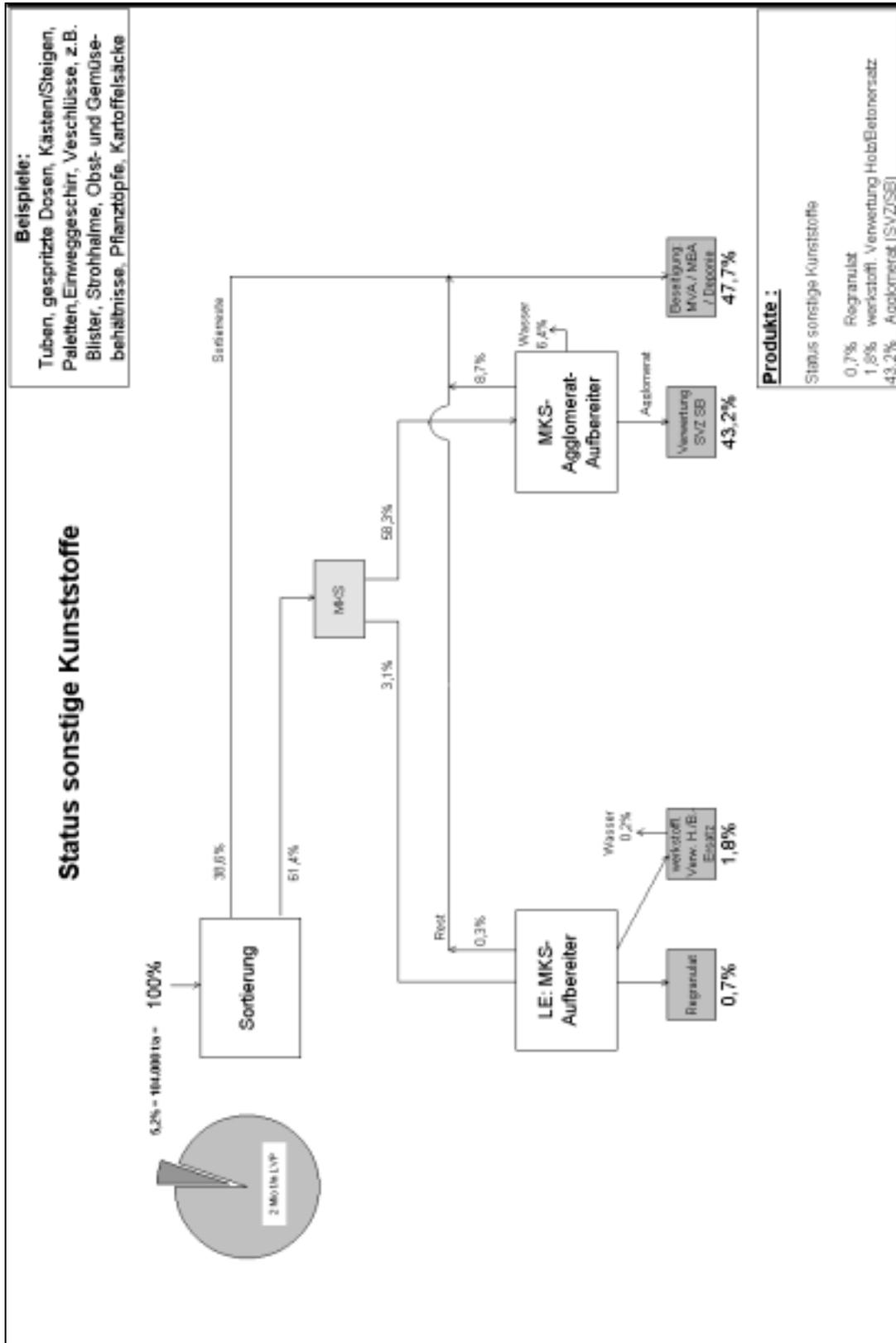
3.1.13 Becher optimierter Status – Neue Spezifikation



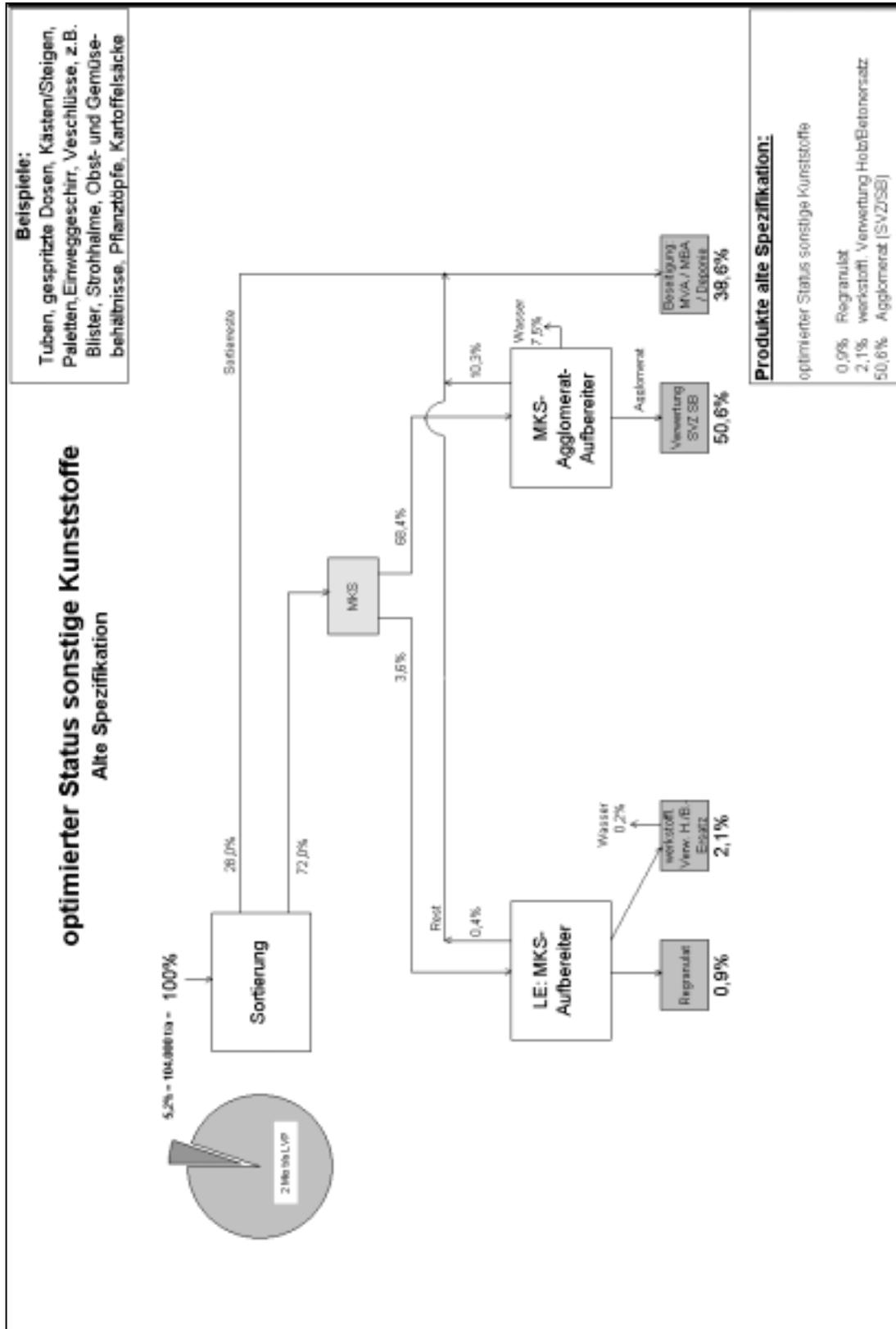
3.1.14 Becher Sortec



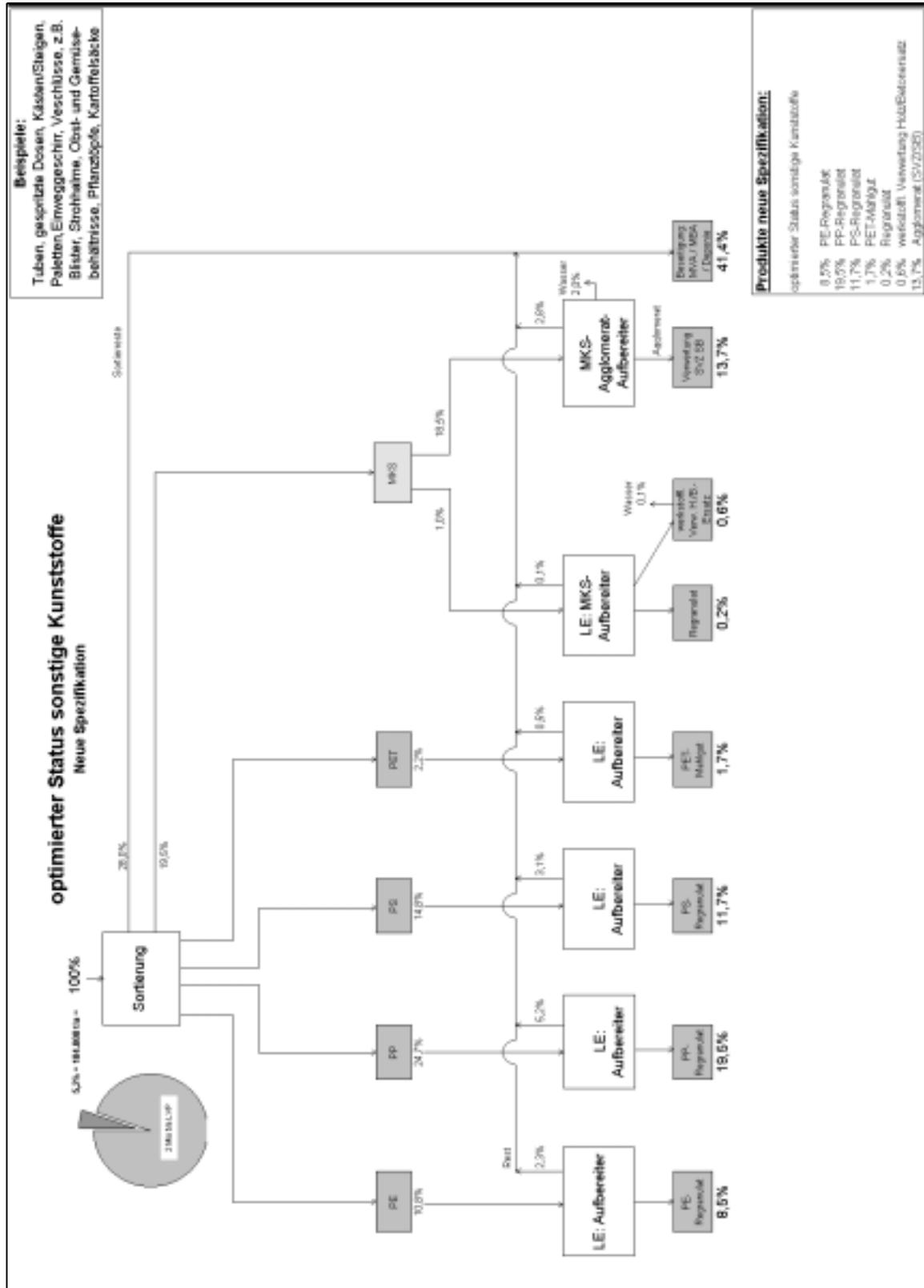
3.1.15 Sonstige Kunststoffe Status Quo



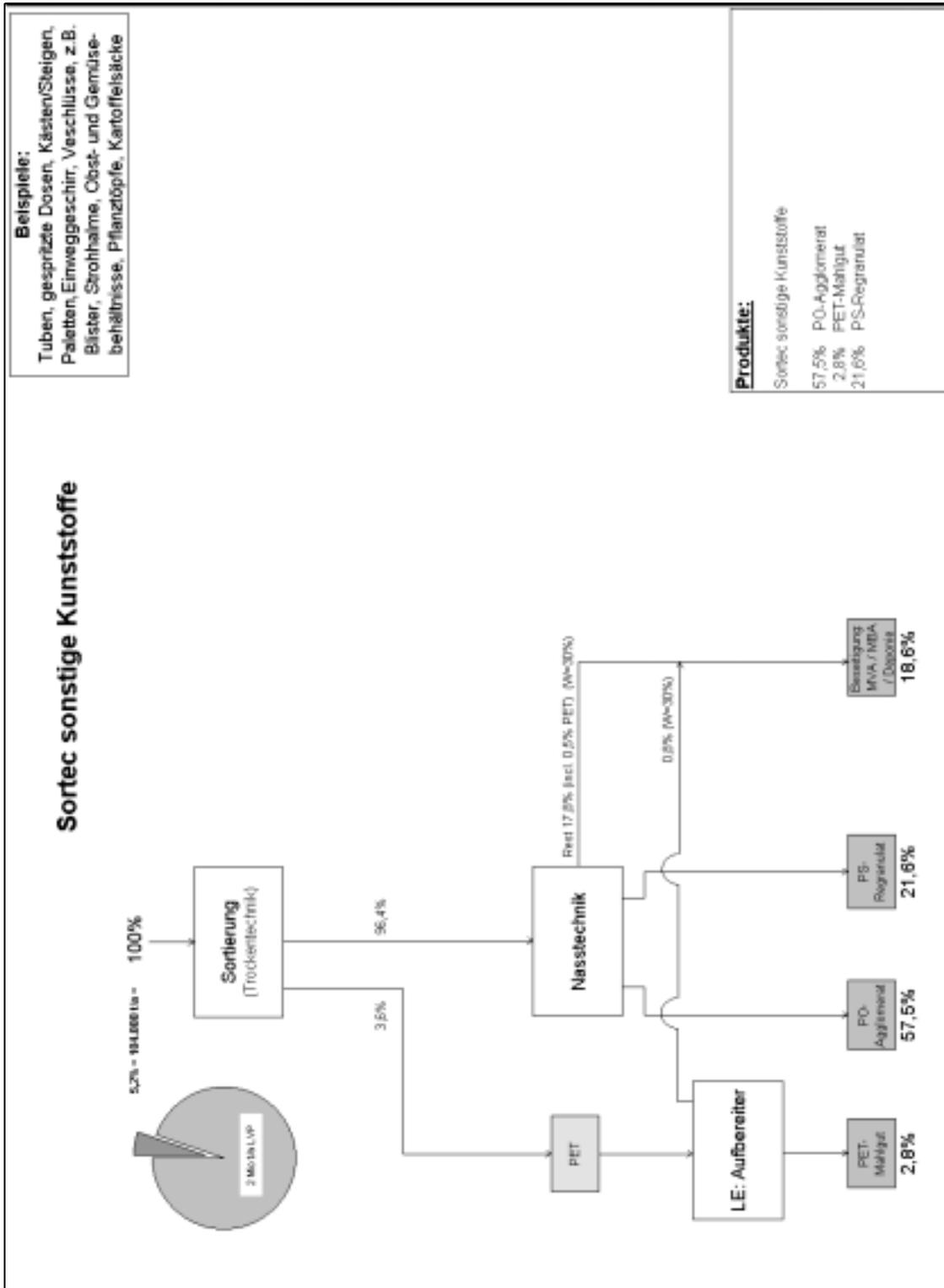
3.1.16 Sonstige Kunststoffe optimierter Status – Alte Spezifikation



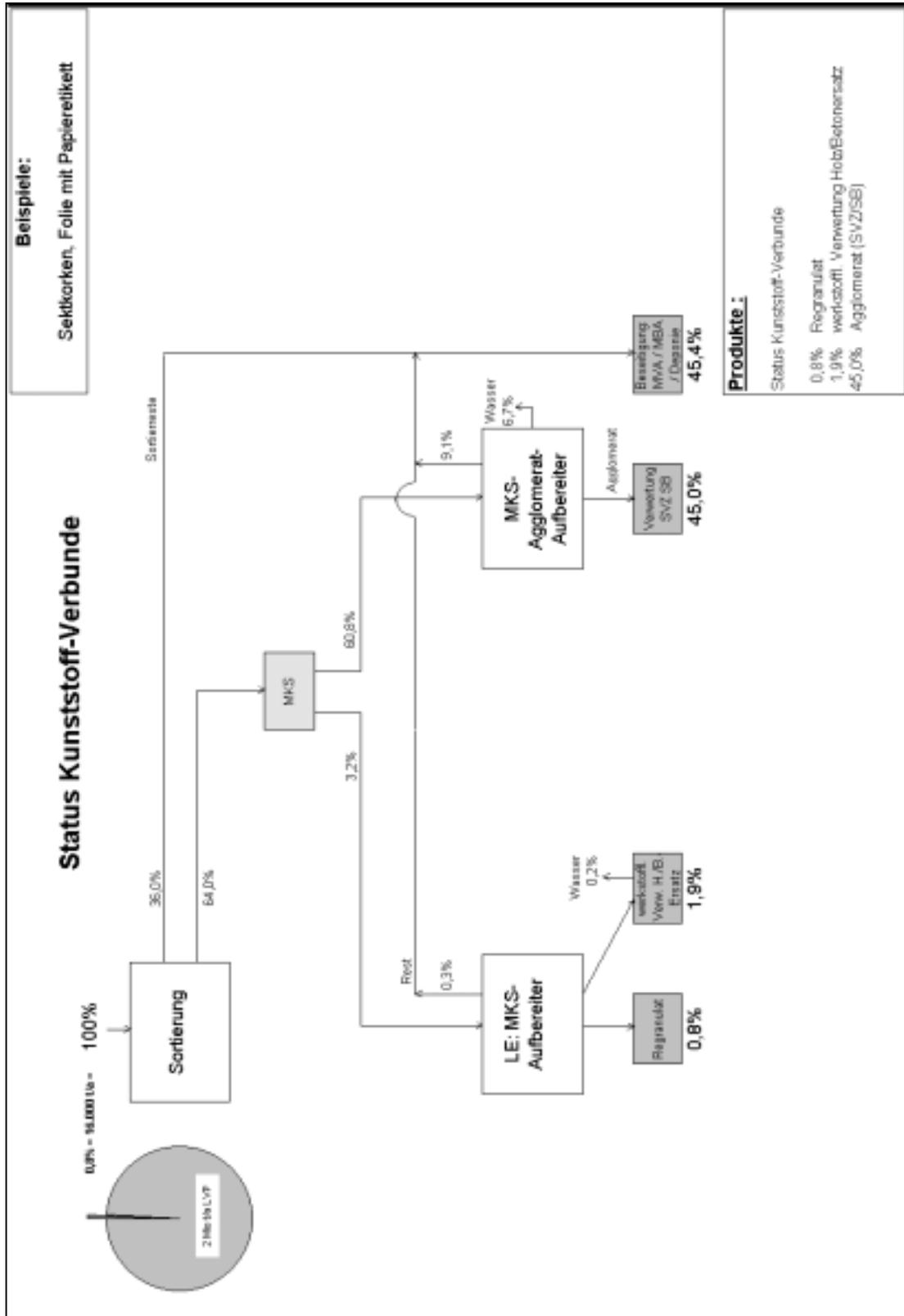
3.1.17 Sonstige Kunststoffe optimierter Status – Neue Spezifikation



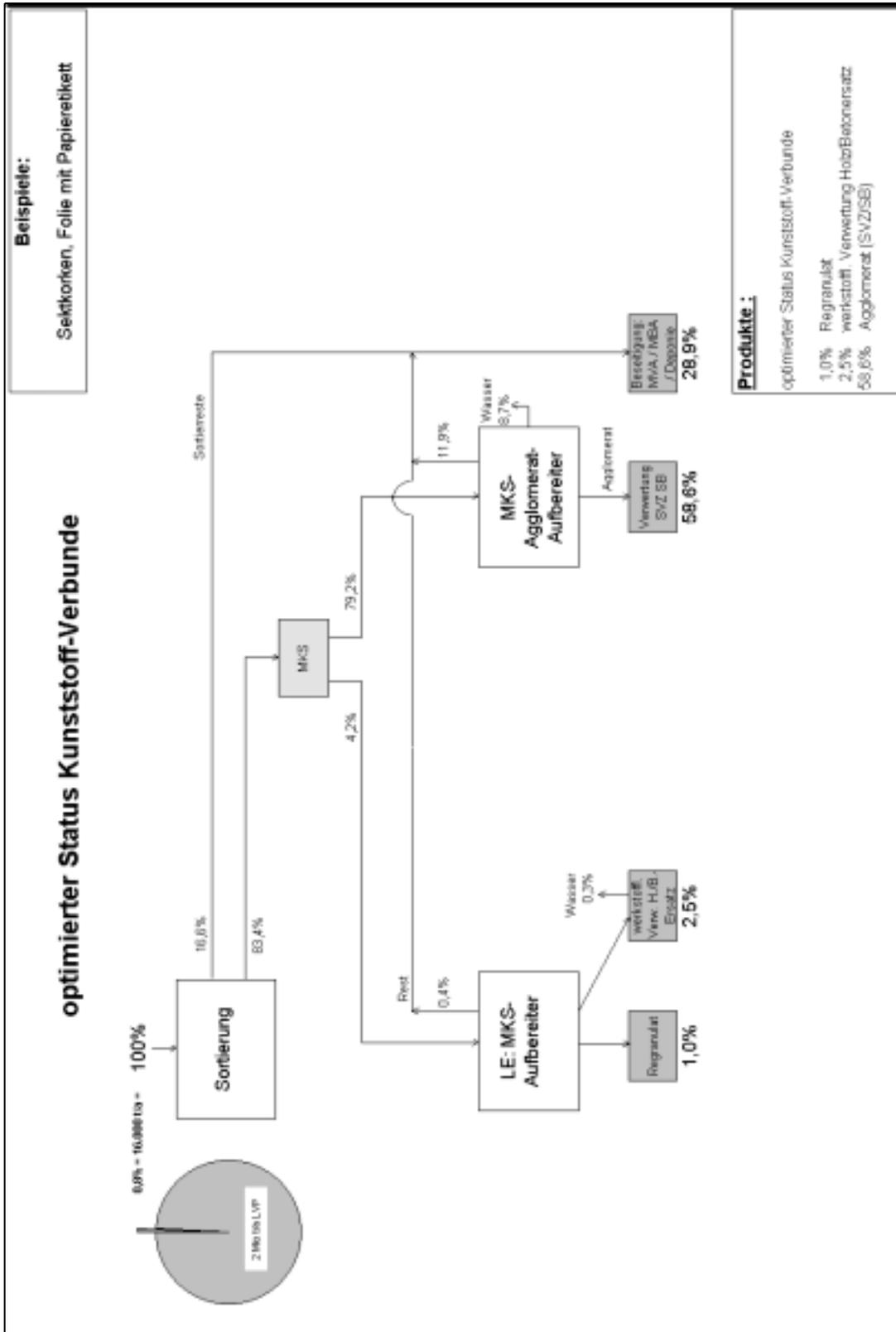
3.1.18 Sonstige Kunststoffe Sortec



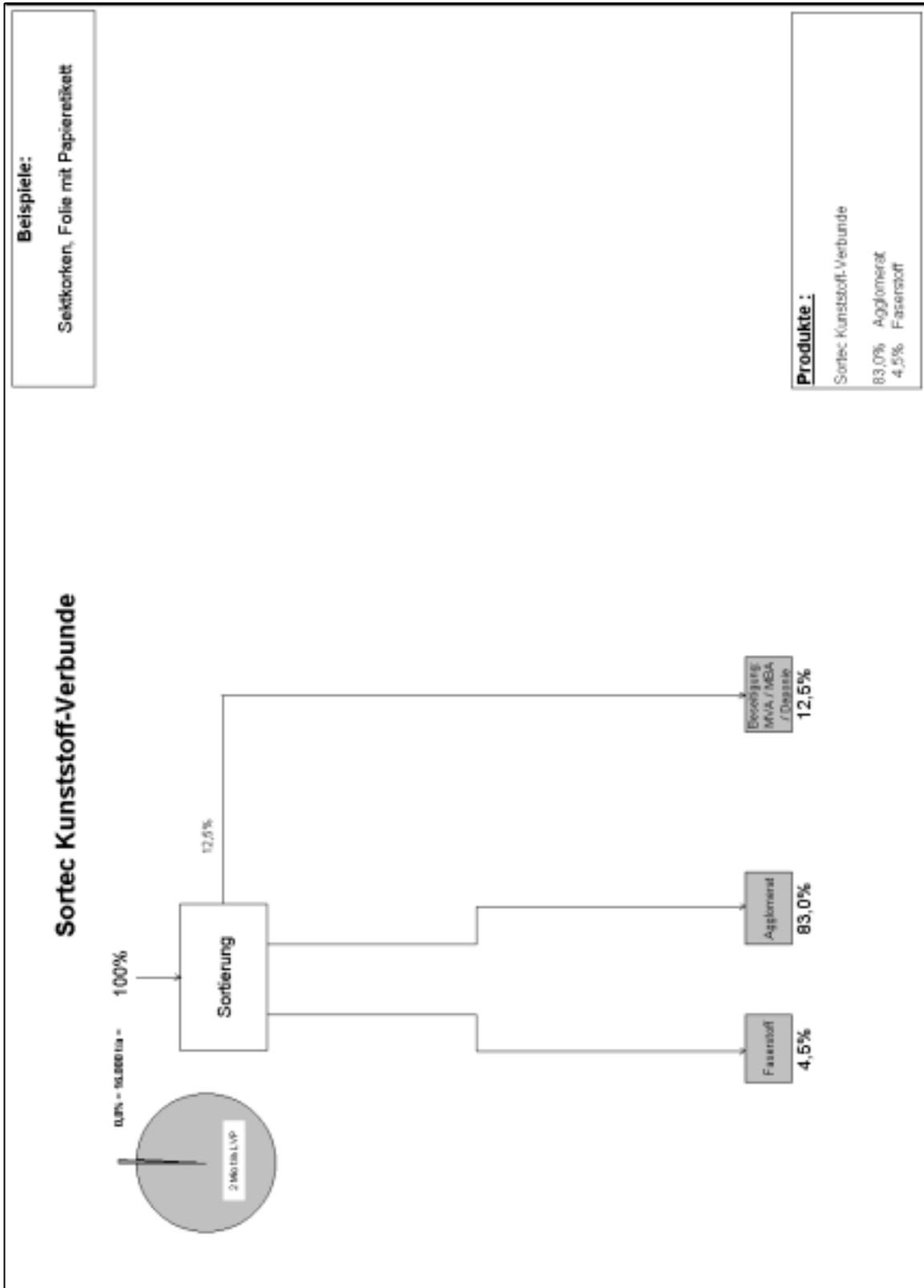
3.1.19 Kunststoffverbunde Status Quo



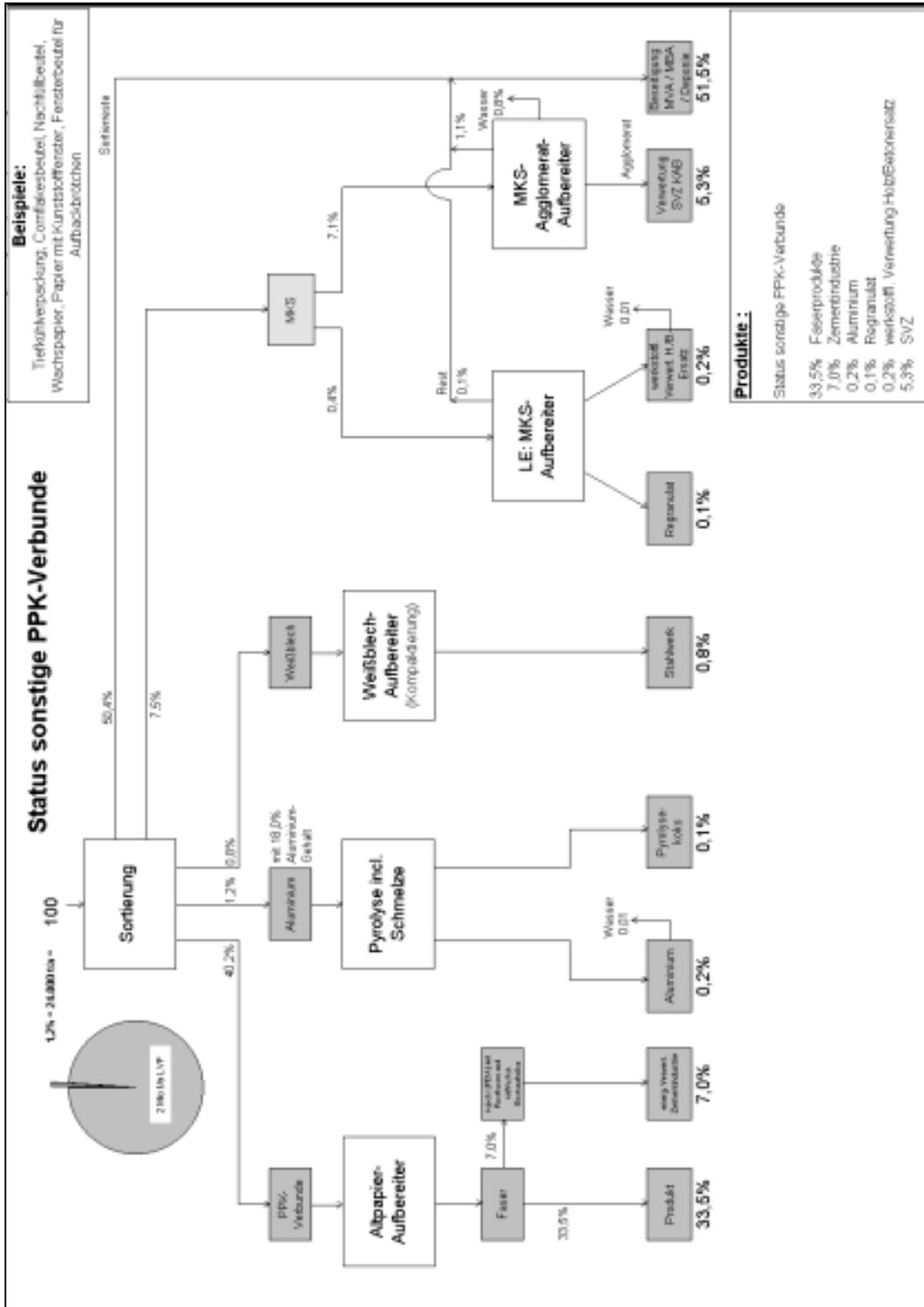
3.1.20 Kunststoffverbunde optimierter Status



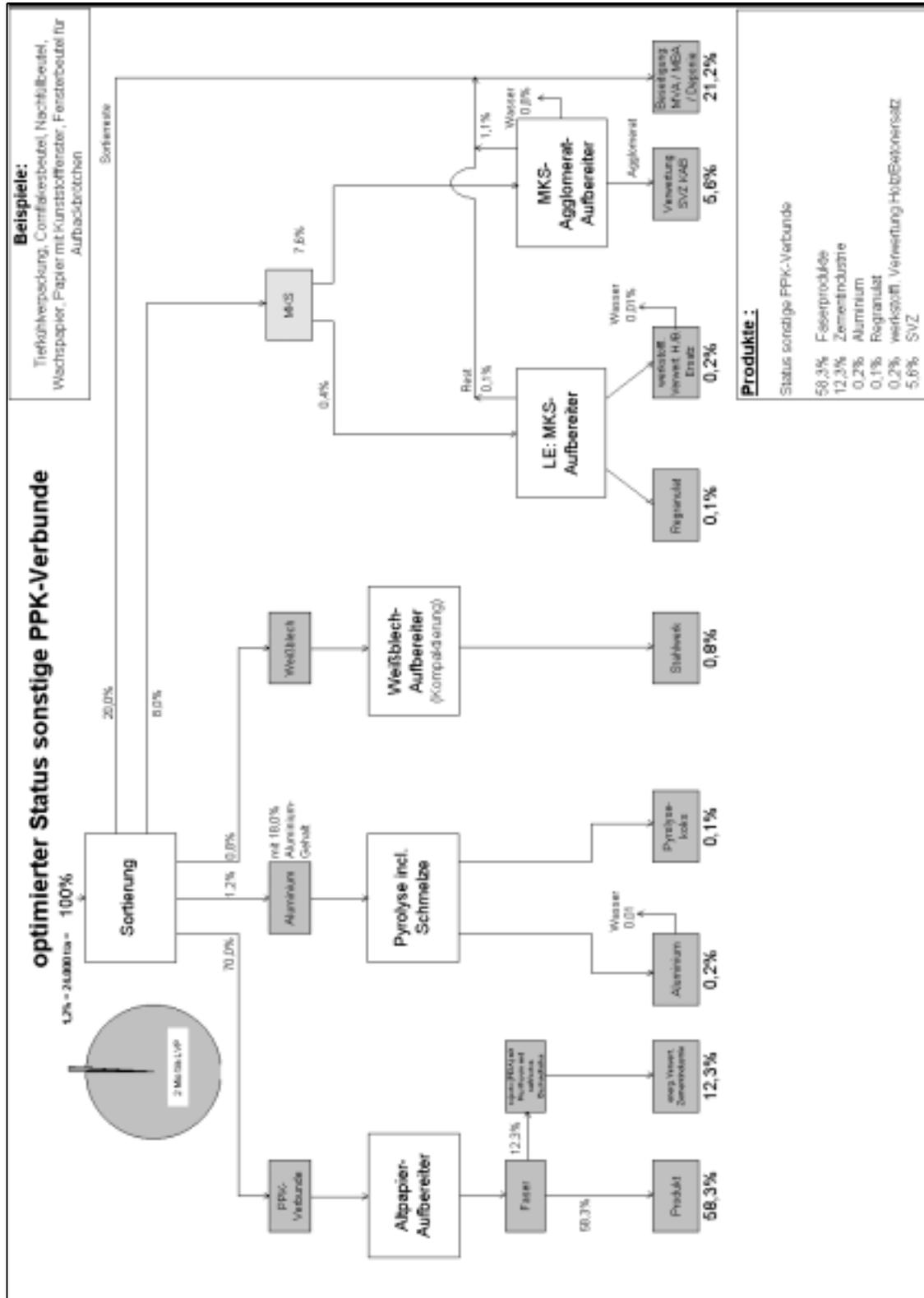
3.1.21 Kunststoffverbunde Sortec



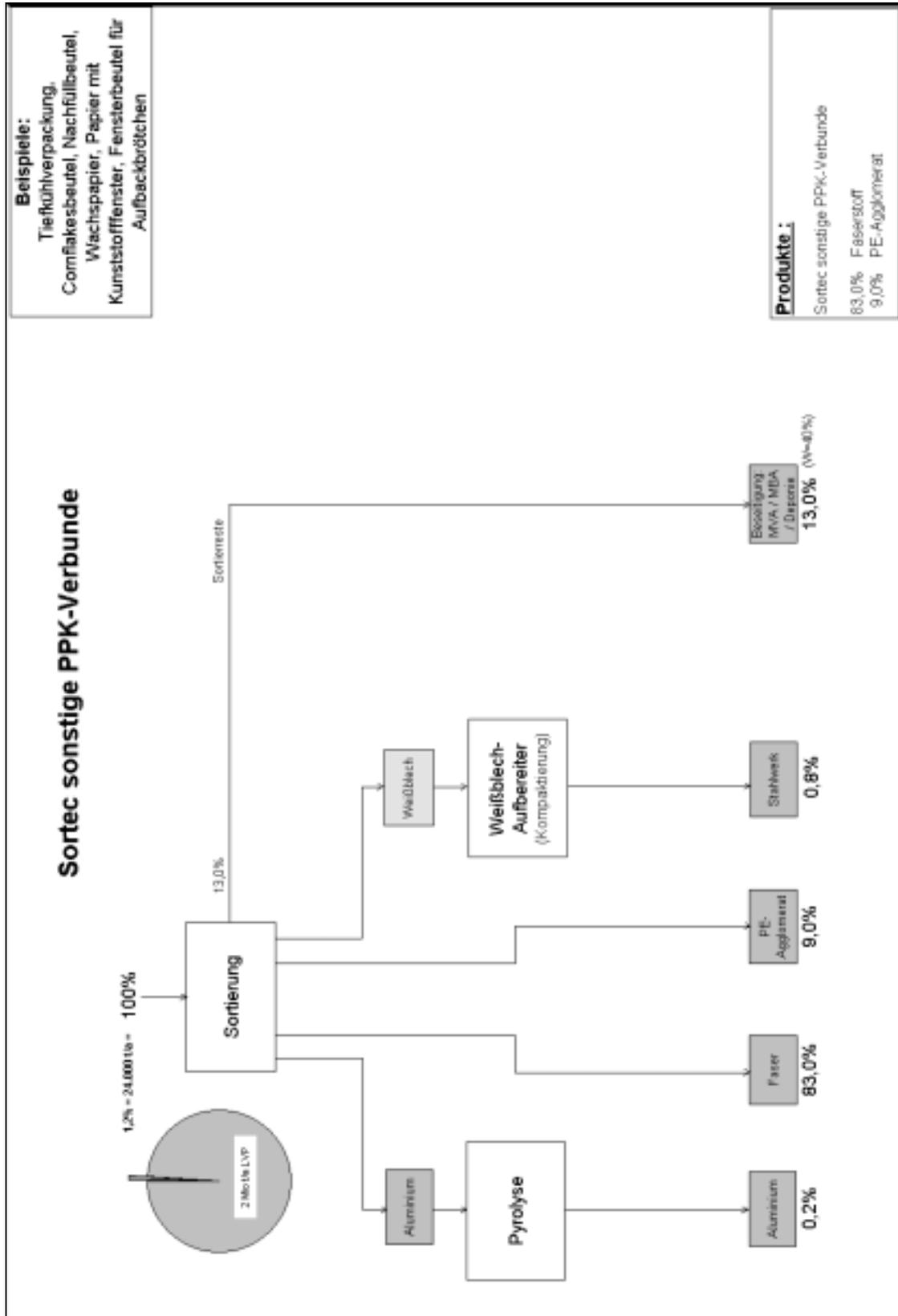
3.1.22 Sonstige PPK-Verbunde Status Quo



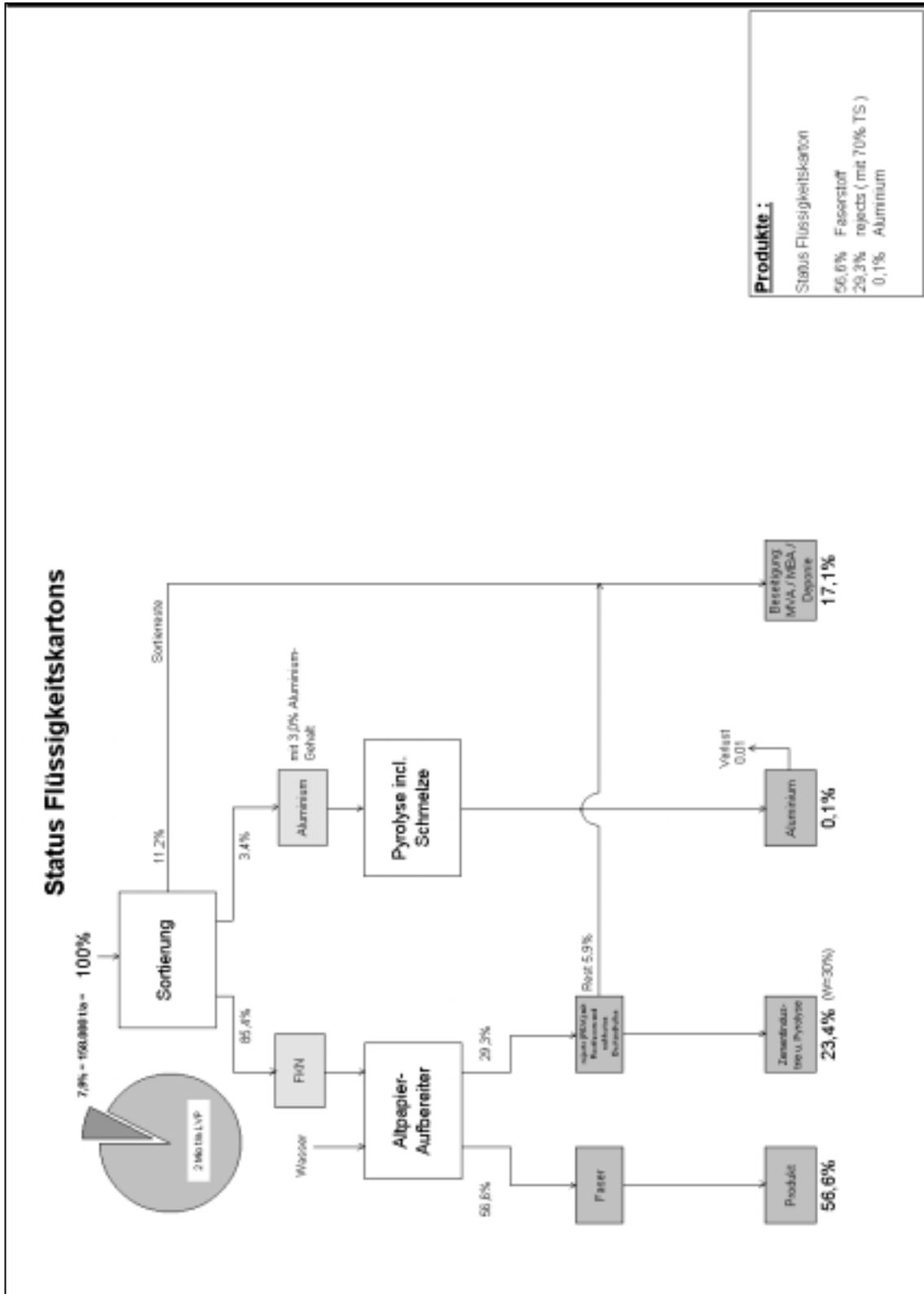
3.1.23 Sonstige PPK-Verbunde optimierter Status



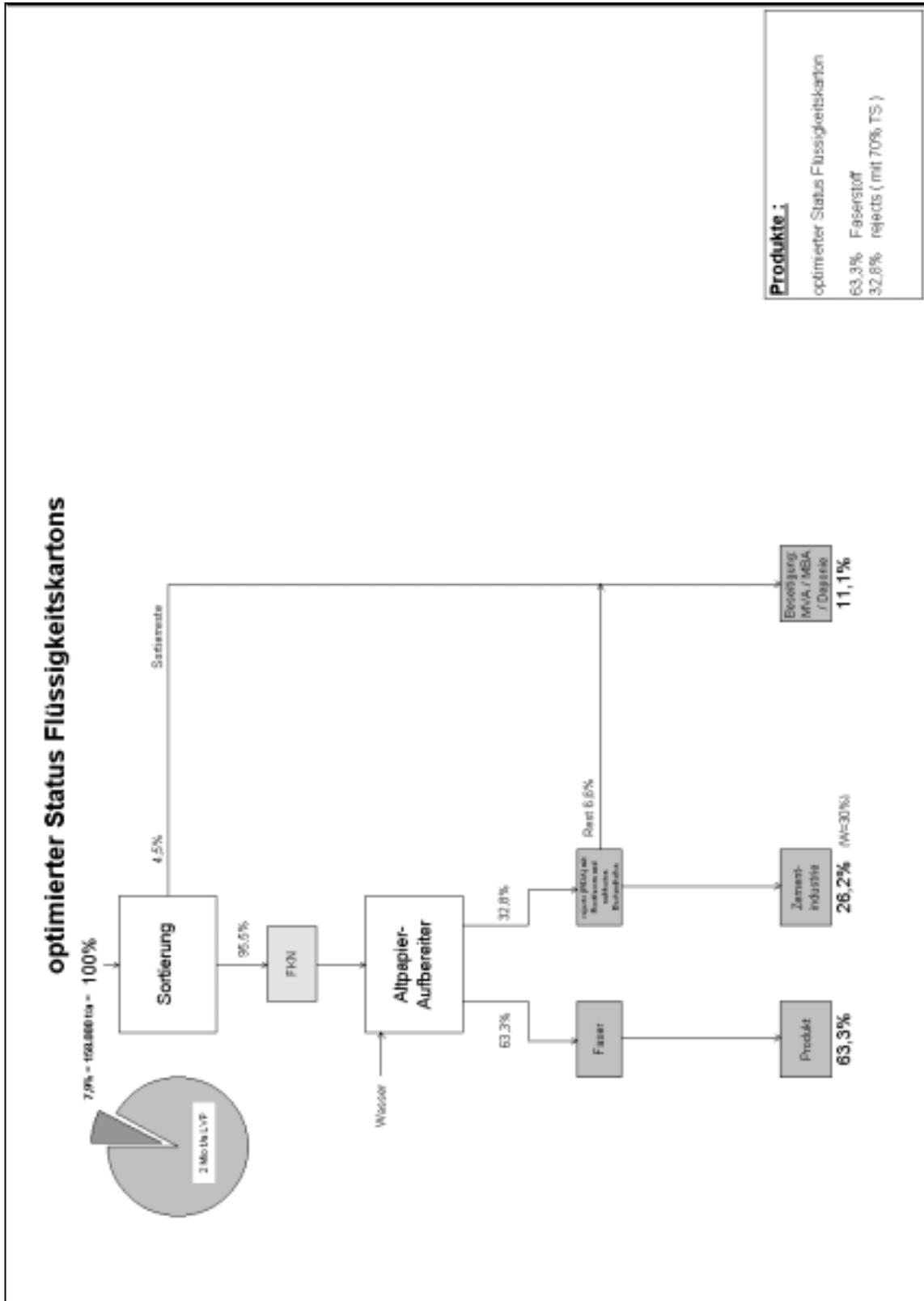
3.1.24 Sonstige PPK-Verbunde Sortec



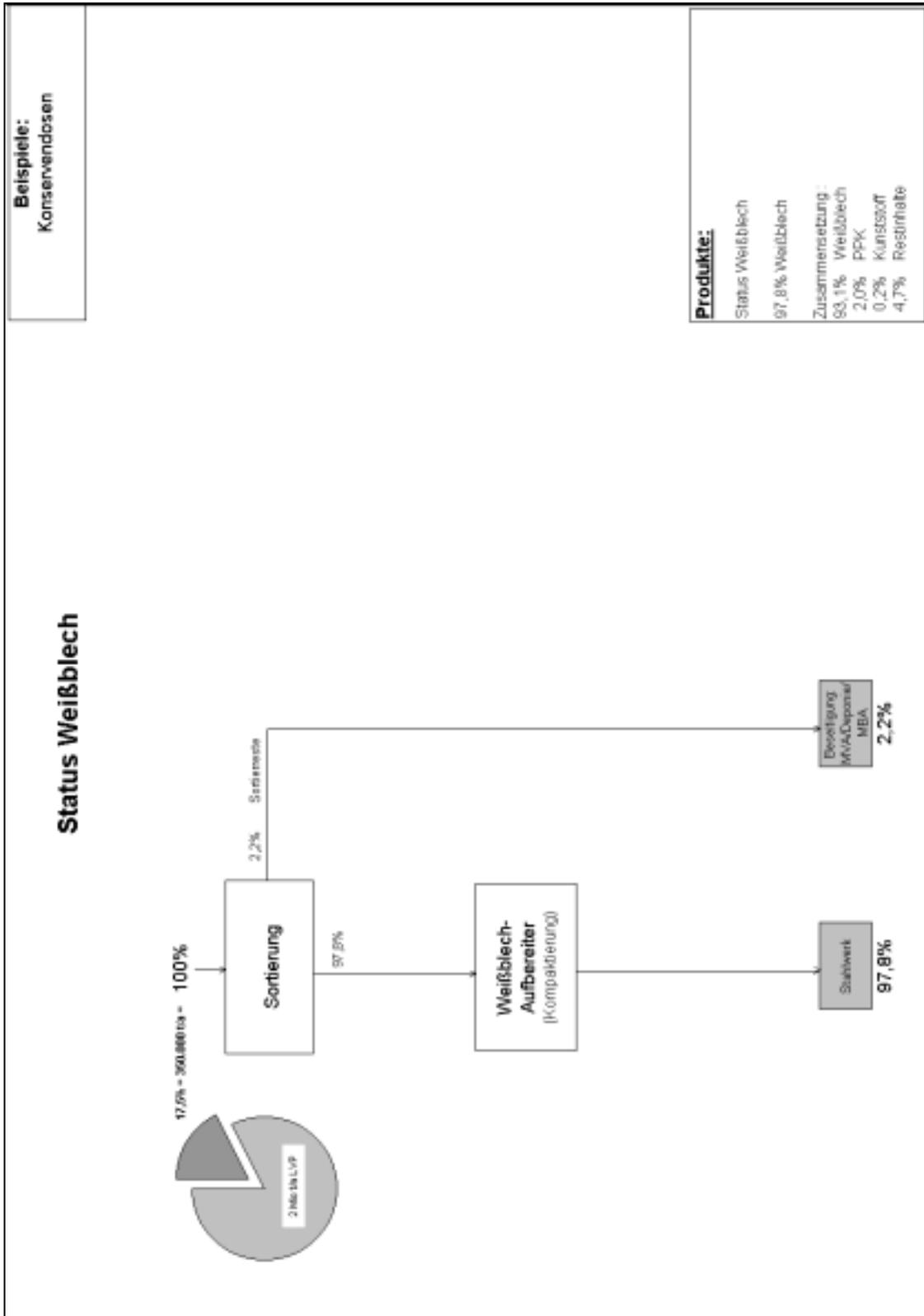
3.1.25 Flüssigkeitskartons Status Quo



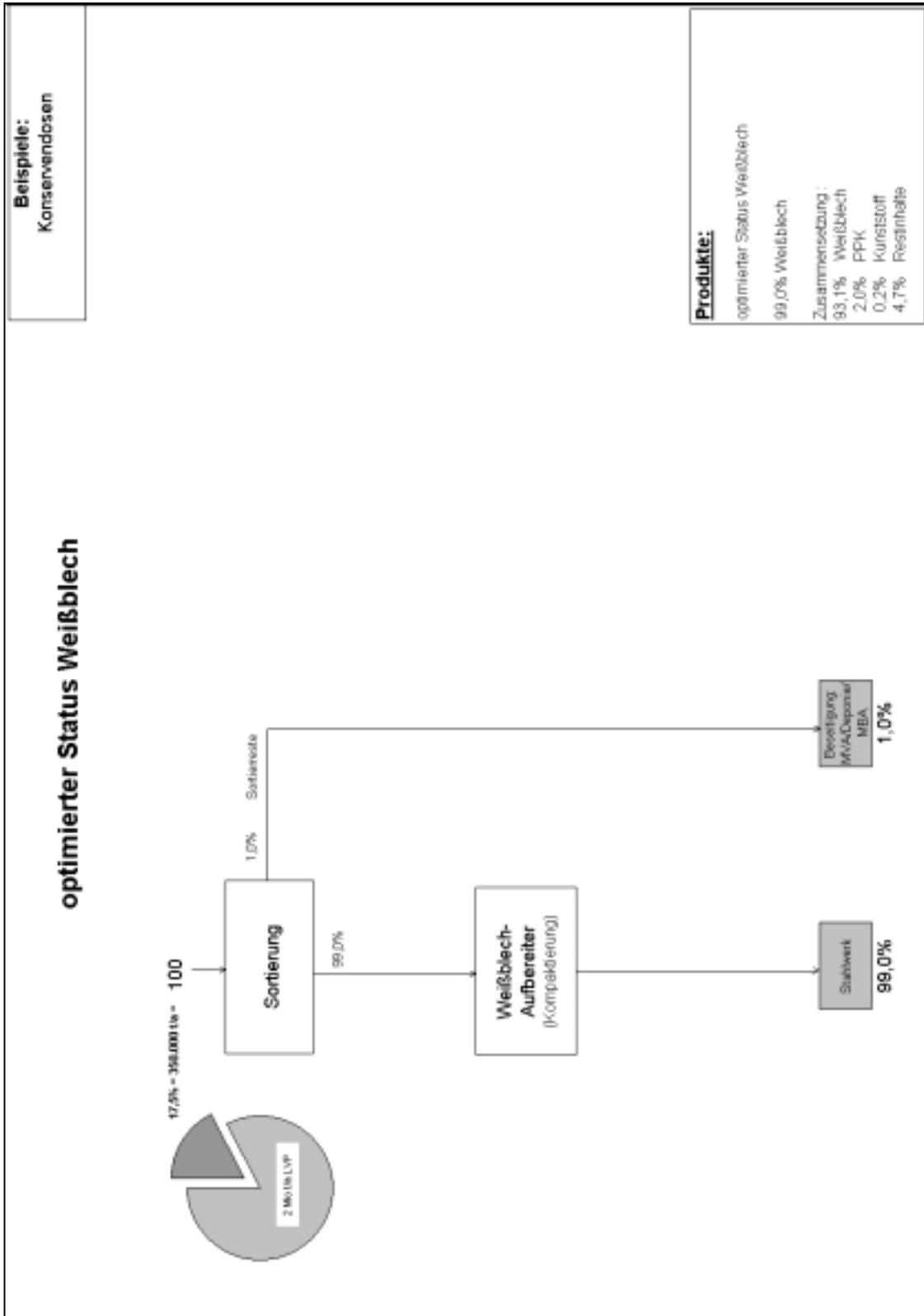
3.1.26 Flüssigkartons optimierter Status



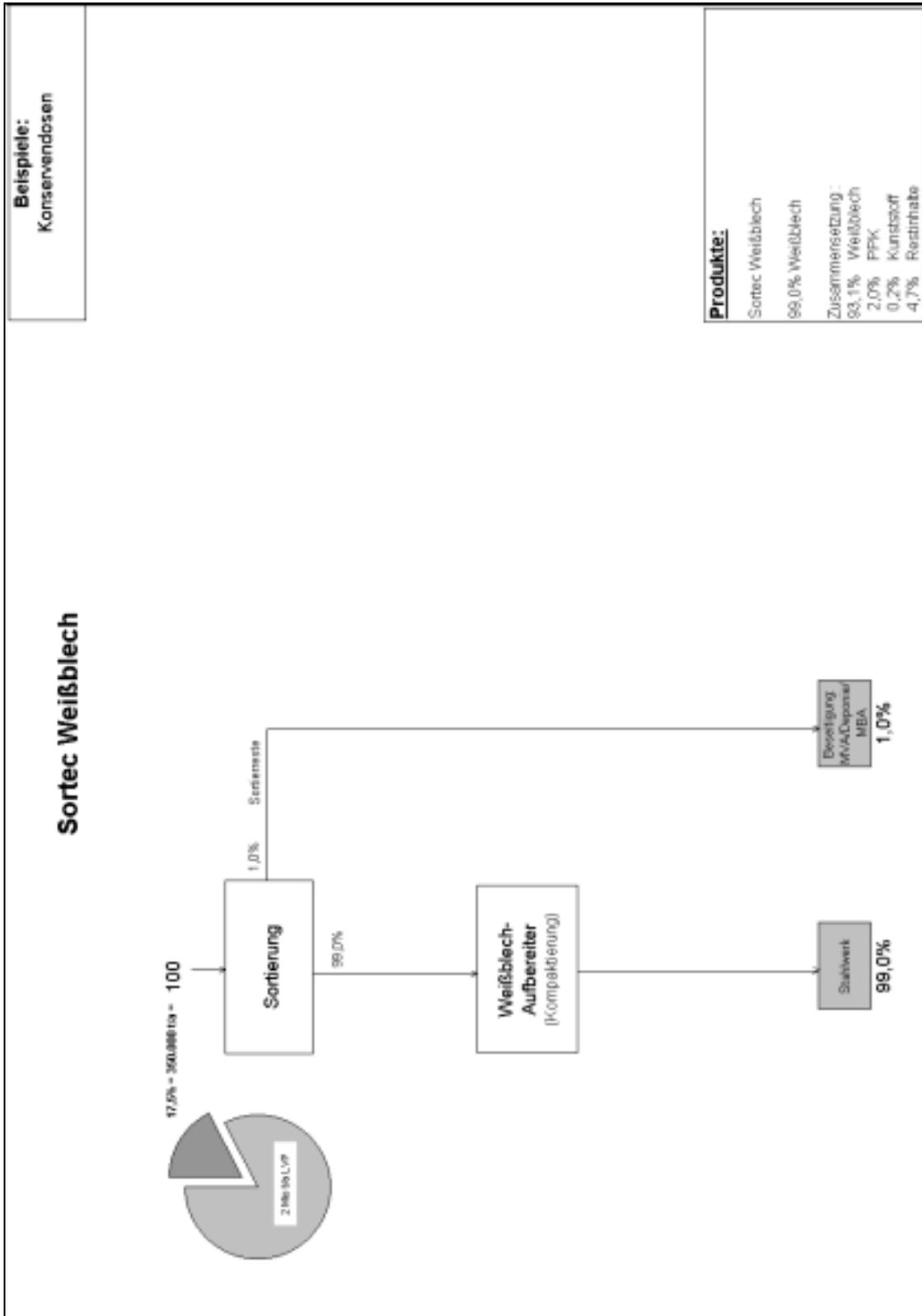
3.1.28 Weißblech Status Quo



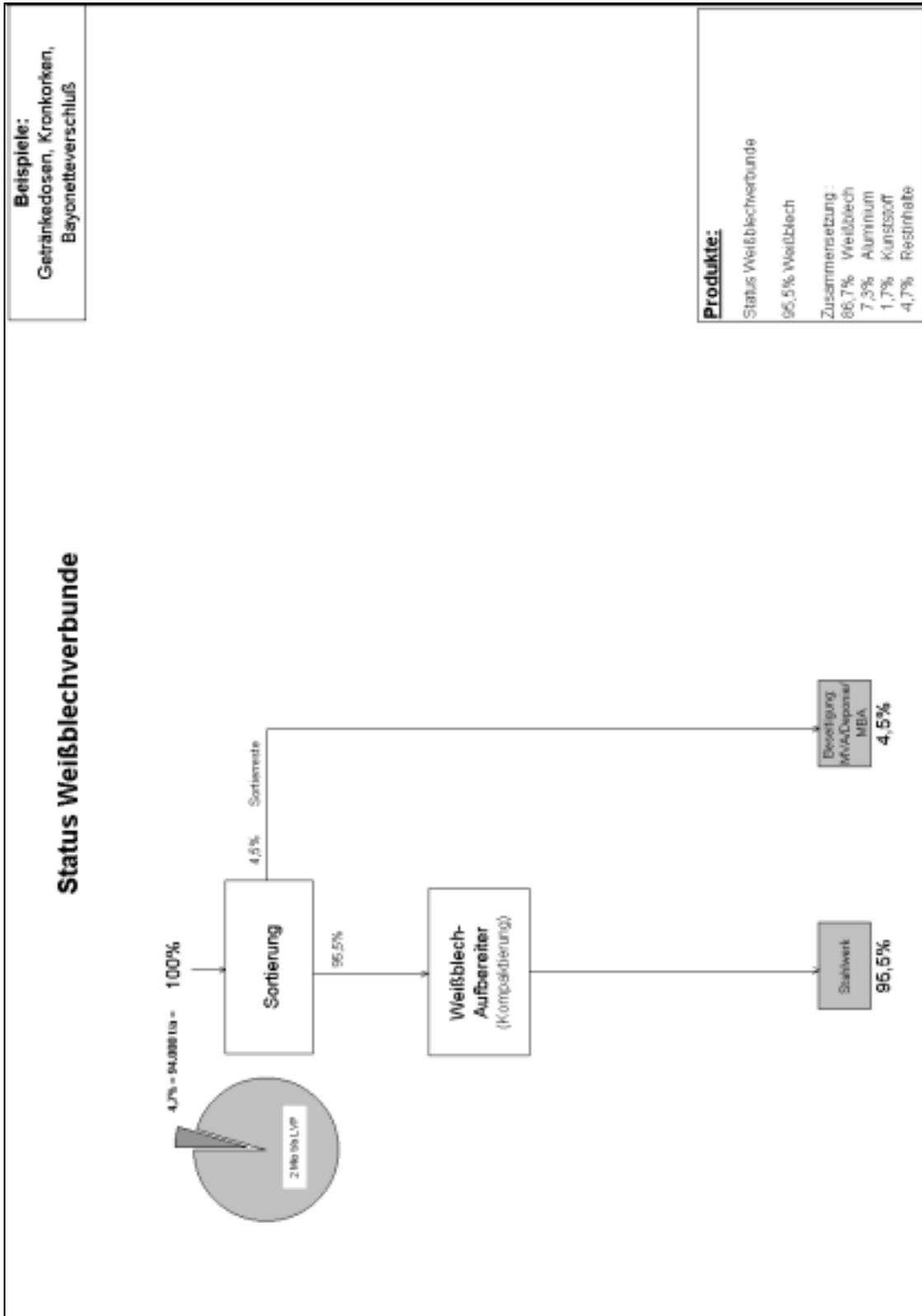
3.1.29 Weißblech optimierter Status



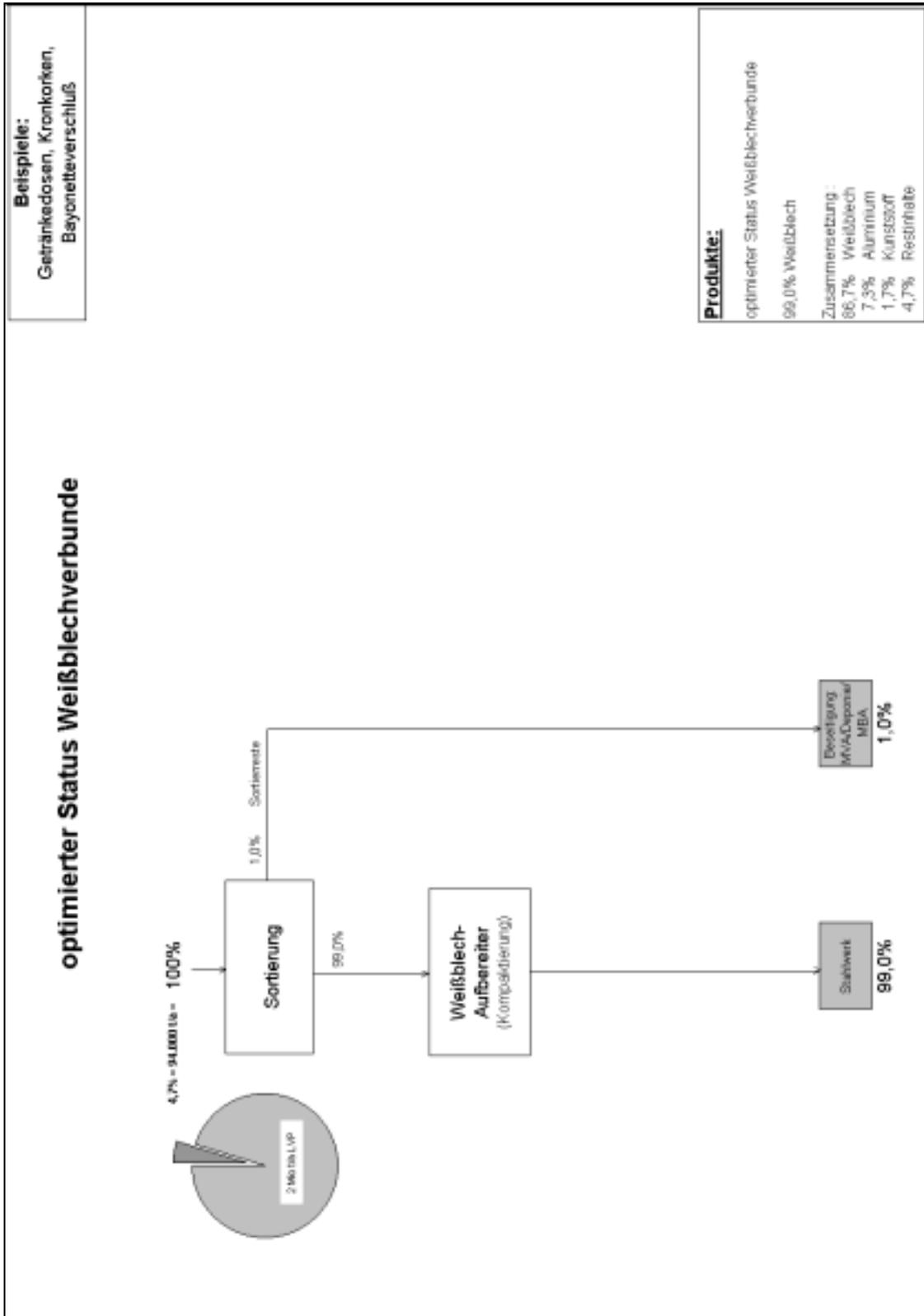
3.1.30 Weißblech Sortec



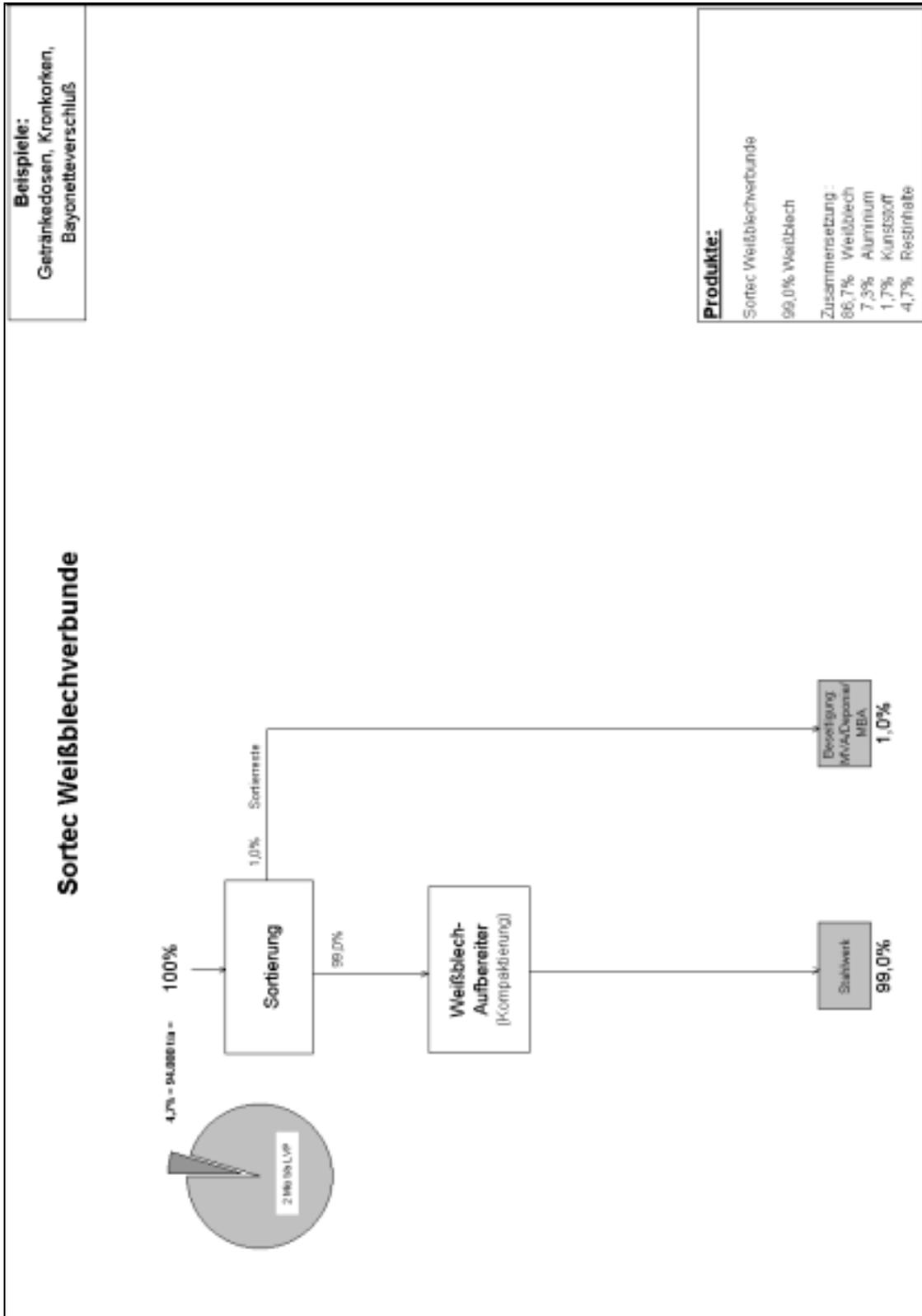
3.1.31 Weißblechverbunde Status Quo



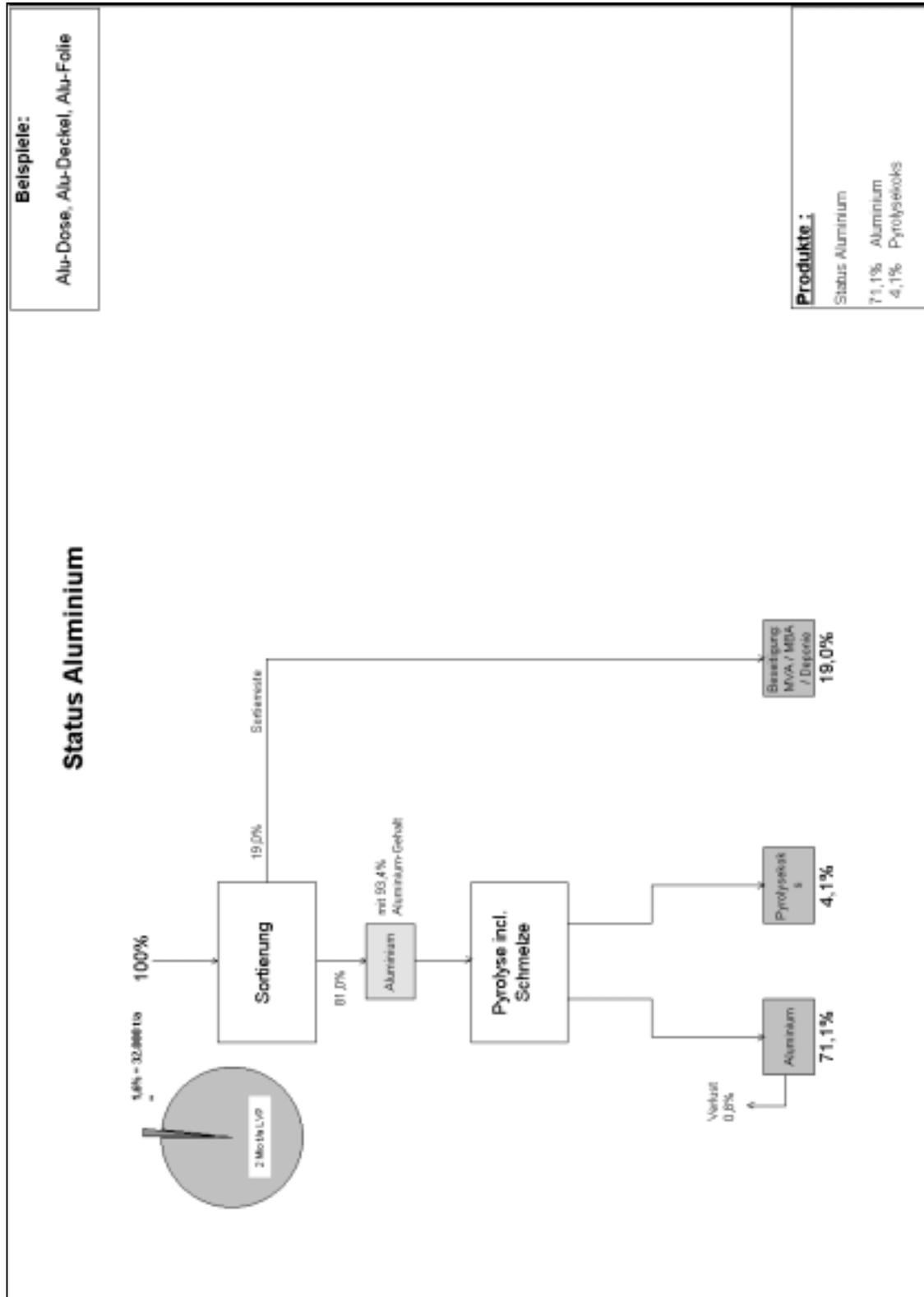
3.1.32 Weißblechverbunde optimierter Status



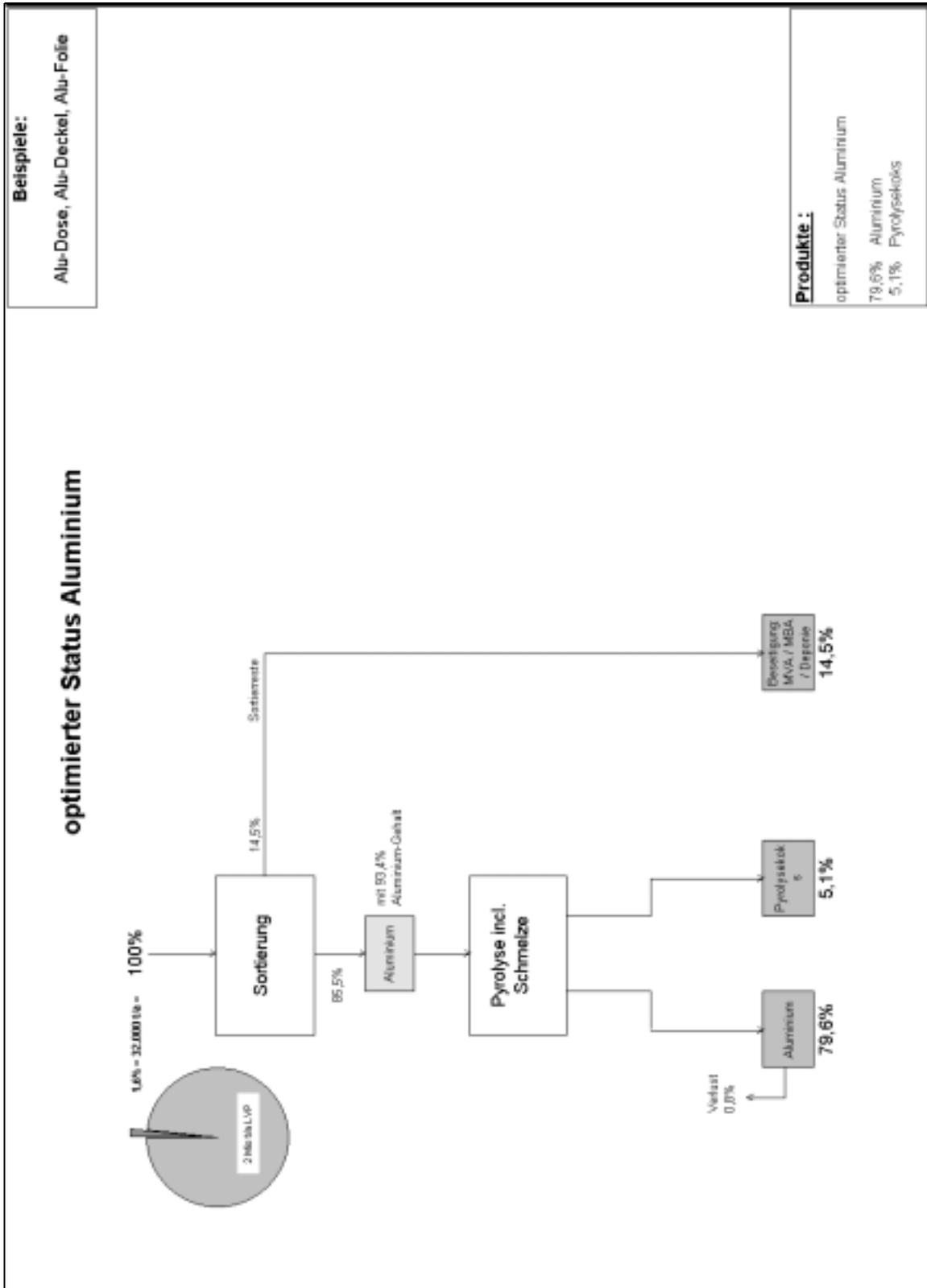
3.1.33 Weißblechverbunde Sortec



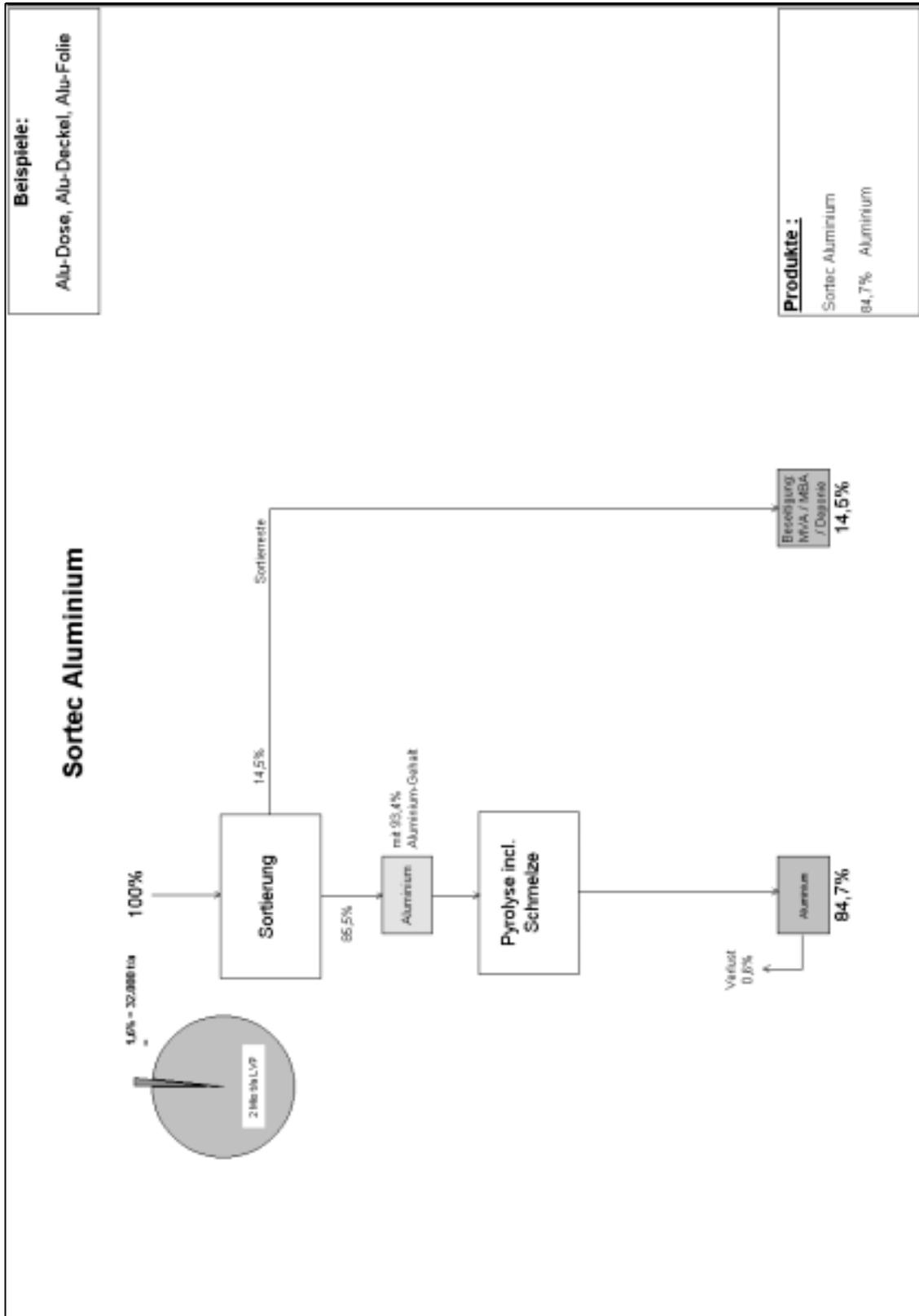
3.1.34 Aluminium Status Quo



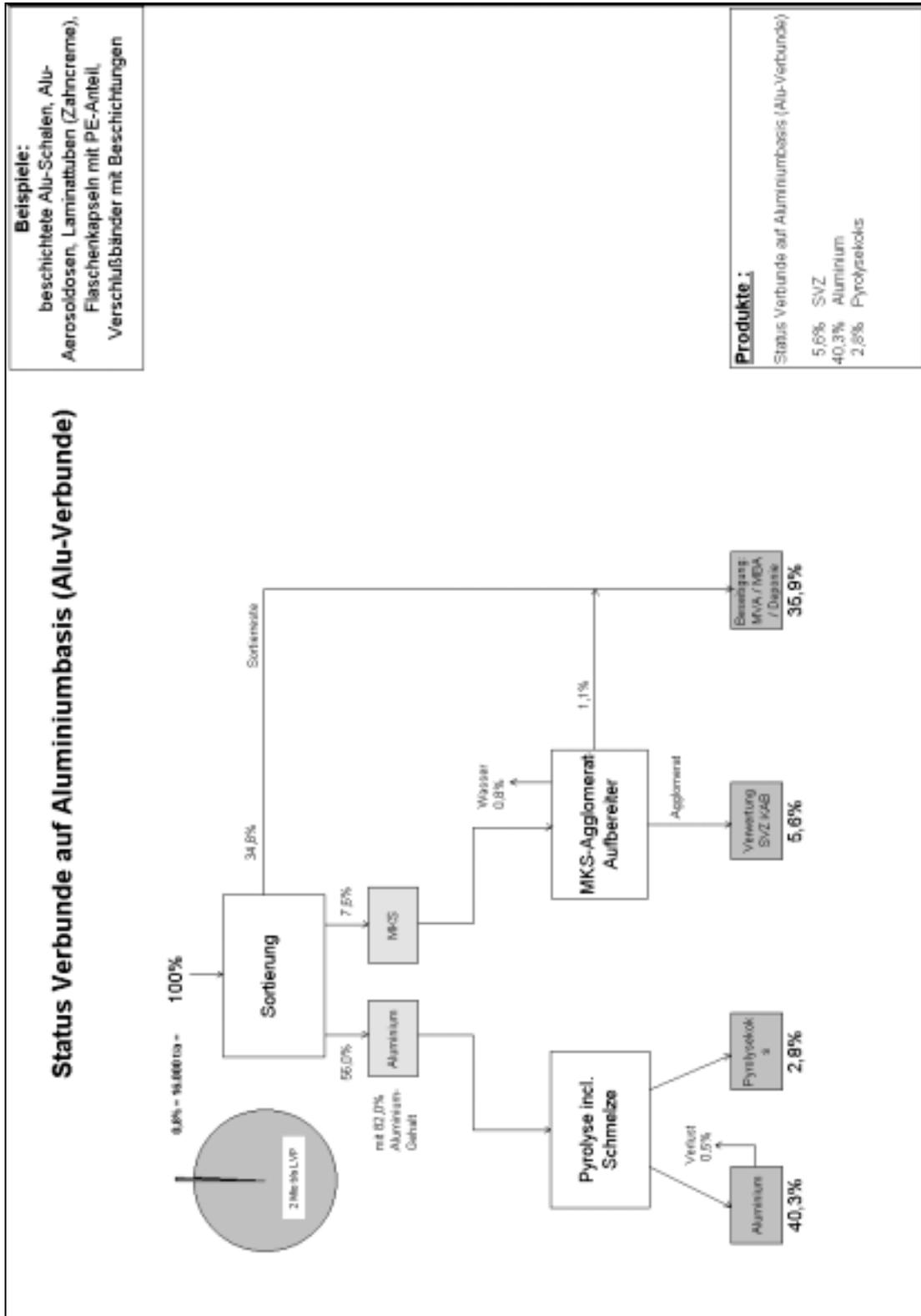
3.1.35 Aluminium optimierter Status



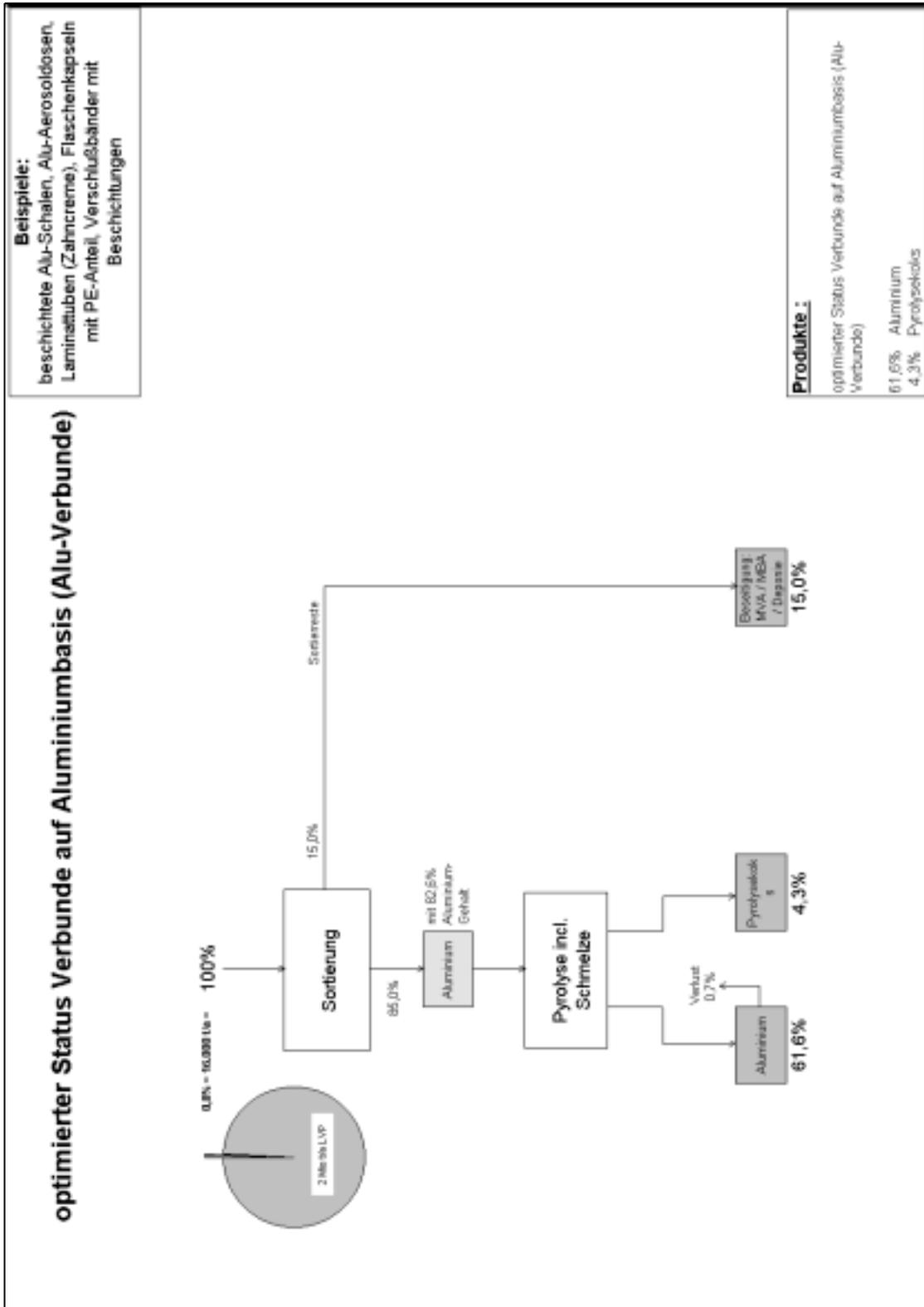
3.1.36 Aluminium Sortec



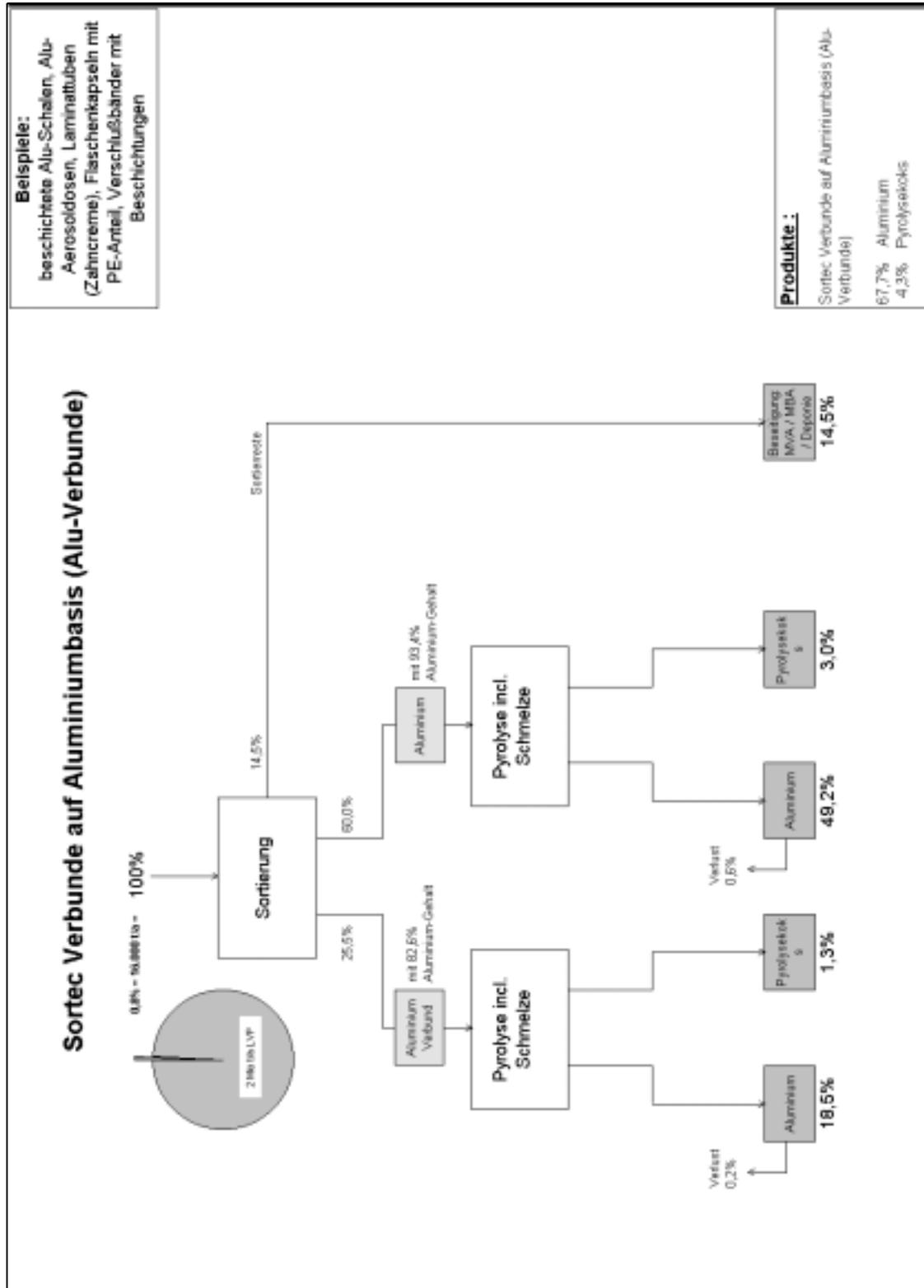
3.1.37 Aluminiumverbunde Status Quo



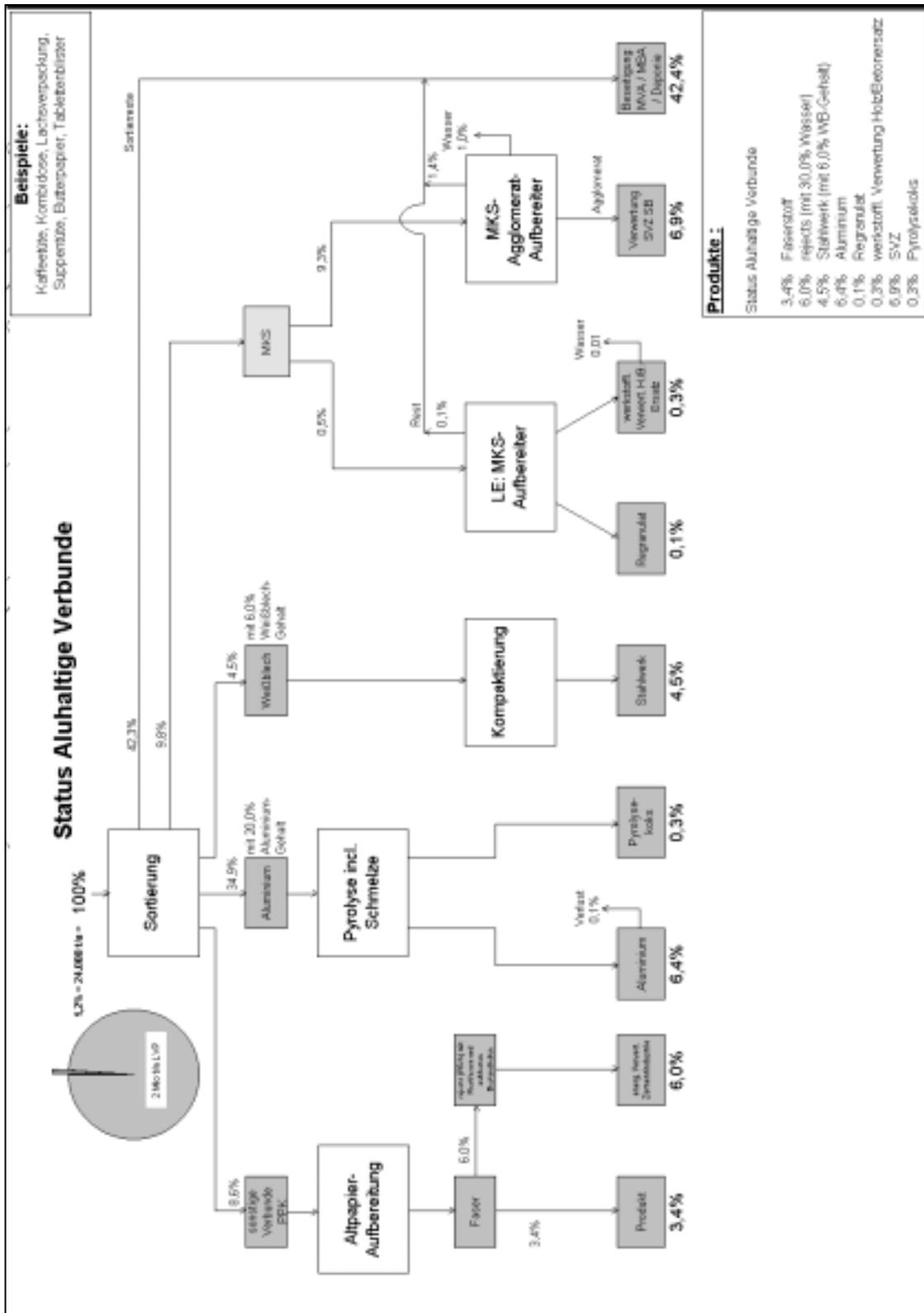
3.1.38 Aluminiumverbunde optimierter Status



3.1.39 Aluminiumverbunde Sortec



3.1.40 Aluminiumhaltige Verbunde Status Quo



3.1.42 Aluminiumhaltige Verbunde Sortec

