

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	4
1.3	Vorgehensweise	4
2	Grundlagen der Kreislaufwirtschaft	7
2.1	Aufkommen an Reststoffen und Abfällen aus dem produzierenden Gewerbe	7
2.2	Reststoff- und Abfallanfall im Produktionssystem	11
2.3	Einordnung der Kreislauf- und Abfallwirtschaft in die strategische Unternehmensplanung	13
2.4	Kreislaufwirtschaft und logistische Fragestellungen	16
2.4.1	Maßnahmen- und Verfahrenswahl	18
2.4.2	Standortwahl	20
2.4.3	Transport	21
2.5	Kreislaufwirtschafts- und Abfallsysteme	22
2.6	Planungszeitraum	23
3	Bestehende und zukünftige rechtliche Anforderungen zur Reststoffvermeidung und -verwertung	25
3.1	Europäische Rechtsgrundlagen	26
3.1.1	EG-Abfallrahmenrichtlinie	27
3.1.2	EU-Verordnung zum Umweltaudit	28
3.2	Das Bundes-Immissionsschutzgesetz	30
3.2.1	Ziele, Grundsätze und Aufbau	30
3.2.2	Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen	30
3.2.3	Genehmigungsbedürftige Anlagen	31
3.2.4	Reststoffvermeidungs- und Verwertungsgebot nach § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG	32
3.2.5	Auslegung der unbestimmten Rechtsbegriffe zur Technik	34
3.2.5.1	Stand der Technik	35
3.2.5.2	Stand von Wissenschaft und Technik	36
3.2.5.3	Regeln der Technik	36
3.2.5.4	Technische Möglichkeit	37

3.2.6	Verbindung des § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG mit anderen gesetzlichen Regelungen des BImSchG.....	38
3.2.7	Auswirkungen des § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG für Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagenarten.....	39
3.2.7.1	Klärung der Rangfolge: Vermeidung - Verwertung - Beseitigung	39
3.2.7.2	Verfahrensauswahl.....	40
3.2.7.3	Räumliche Befristung der Reststoffverwertungspflicht.....	41
3.2.7.4	Zeitliche Befristung der Reststoffverwertungspflicht.....	41
3.2.7.5	Beauftragung Dritter.....	42
3.2.8	Zielkonflikte zwischen den verschiedenen Pflichten und Geboten des BImSchG.....	42
3.2.9	Vollzug des Reststoffvermeidungs- und -verwertungsgebots	43
3.2.10	Fazit	43
3.3	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz.....	44
3.3.1	Grundgedanken und vorliegende Probleme des Abfallgesetzes.....	44
3.3.2	Ziele und Aufbau des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes.....	45
3.3.3	Grundsätze und Grundpflichten der abfallarmen Kreislaufwirtschaft	47
3.3.4	Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft.....	48
3.3.5	Pflichten für Anlagenbetreiber.....	49
3.3.6	Auswirkungen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes auf Anlagenbetreiber.....	50
3.4	Ausgewählte Verordnungen und Technische Anleitungen.....	51
3.4.1	Altauto-Verordnung.....	52
3.4.2	Altölverordnung.....	52
3.4.3	TA Shredderrückstände und TA Abfall	53
3.4.4	Verordnung der EU zur Abfallverbringung EWG 259/93	54
3.5	Zusammenfassung.....	55
4	Altproduktverwertung am Beispiel des Altautorecyclings	57
4.1	Pkw-Bestand, Neuzulassungen und Altfahrzeugbestand in Deutschland	58
4.2	Einsatzstoffe im Automobil	60
4.3	Istanalyse der Altautoverwertung.....	61
4.3.1	Altautoverwerter.....	62
4.3.2	Shredderbetreiber.....	63
4.3.3	Aufbereitung und Entsorgung weiterer Fraktionen	67
4.3.4	Probleme der heutigen Altautoverwertung	67
4.4	Bestehende Ansätze zur zukünftigen Altautoverwertung	68
4.4.1	Konzept des Verbandes der Automobilindustrie (VDA)	68

5.2.4.2	Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen	96
5.2.4.3	Anfallende Reststoffe	96
5.2.5	Elektrostahlwerk	97
5.2.5.1	Verfahrensbeschreibung	98
5.2.5.2	Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen	98
5.2.5.3	Anfallende Reststoffe	98
5.2.6	Sekundärmetallurgie	99
5.2.7	Stranggießanlage und Walzwerk	100
5.2.7.1	Verfahrensbeschreibung	100
5.2.7.2	Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen	100
5.2.7.3	Anfallende Reststoffe	101
5.2.8	Gesamtübersicht des Hüttenwerksprozesses	101
5.3	Istanalyse der Kreislaufwirtschaft in der Eisen- und Stahlindustrie	103
5.3.1	Eisenhüttenschlacken	104
5.3.1.1	Hochofenschlackenverwertung	105
5.3.1.2	Stahlwerksschlackenverwertung	106
5.3.2	Hüttenschutt	107
5.3.3	Staub-, Schlamm- und Walzunderverwertung	108
5.4	Technisch mögliche Maßnahmen gemäß § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG	109
5.4.1	Inputseitige Maßnahmen	110
5.4.1.1	Eisenerze	110
5.4.1.2	Kohle, Koks und Schweröl	111
5.4.1.3	Zuschlagstoffe	111
5.4.1.4	Schrott	111
5.4.2	Verfahrensseitige Maßnahmen	112
5.4.2.1	Direkt- und Schmelzreduktionsverfahren	112
5.4.2.2	Endabmessungsnahes Gießen	113
5.4.2.3	Rezirkulation der Stäube im Elektrolichtbogenofen	114
5.4.2.4	Organisatorische Maßnahmen	114
5.4.3	Outputseitige Maßnahmen	114
5.4.3.1	Heißbrikettierung	115
5.4.3.2	Wälzverfahren	117
5.4.3.3	Zirkulierendes-Wirbelschichtverfahren (ZWS)	119
5.4.3.4	Hydrozyklonverfahren	121
5.4.3.5	Inmetcoverfahren	123
5.4.3.6	Drehrohrverfahren	126
5.4.3.7	Reduktion im Hochofen	127
5.5	Zusammenfassung des Beispiels Produktionsrückstände der Eisen- und Stahlindustrie	128

6	Konzeption eines formalen Modells zur strategischen Planung von Kreislaufwirtschaftssystemen	131
6.1	Problemstrukturanalyse.....	131
6.2	Graphentheoretische Überlegungen.....	133
6.3	Zielkriterien, Modellanforderungen und -abgrenzungen.....	134
6.4	Ansätze simultaner Standort-, Auswahl- und Transportprobleme	137
6.4.1	Ein- und mehrstufige Transportprobleme.....	138
6.4.1.1	Einstufige Transportprobleme.....	138
6.4.1.2	Mehrstufige Transportprobleme.....	138
6.4.2	Kombinierte Standort- und Tourenplanung.....	138
6.4.3	Modelle der betrieblichen Standortwahl.....	139
6.4.3.1	Standortbestimmung in einem homogenen Territorium.....	139
6.4.3.2	Standortbestimmung in Netzen	140
6.4.3.3	Diskrete Standortwahl	140
6.4.4	Bewertung der Ansätze	142
6.5	Übertragung und Weiterentwicklung des WLP-Ansatzes auf Kreislaufwirtschaftssysteme.....	144
6.5.1	Einstufiges, kapazitiertes Kreislaufwirtschaftssystem-Problem (EKSP)	145
6.5.2	Zweistufiges Kreislaufwirtschaftssystem-Problem (ZKSP) im Einreststofffall.....	145
6.5.3	Mehrstufiges Kreislaufwirtschaftssystem-Problem (MKSP) im Mehrreststofffall	148
6.5.4	Direktfluß zwischen Quellen und Senken.....	153
6.5.5	Einbeziehung der simultanen Maßnahmenplanung.....	154
6.5.6	Ressourcenbeschränkungen.....	156
6.5.7	Einbeziehung weiterer Zielkriterien.....	158
6.6	Lösungsmethoden.....	159
6.6.1	Exakte Lösungsverfahren für gemischt ganzzahlige Probleme.....	160
6.6.2	Branch-and-Bound Verfahren zur Lösung gemischt ganzzahliger Probleme.....	161
6.6.3	Verminderung des Lösungsaufwandes exakter Verfahren durch Vorschaltung oder Verknüpfung mit einer Heuristik	162
6.7	Zusammenfassung	163

4.4.2	Konzept des europäischen Herstellerkreises Autorecycling (Eurhekar).....	70
4.4.3	Metallurgisches Recycling, Konzept der Mercedes-Benz AG.....	71
4.4.4	Weitere Konzepte und Pilotprojekte im In- und Ausland.....	72
4.5	Industrielle Umsetzung der Altautoverwertung	72
4.5.1	Trockenlegungs- und Demontageziele	72
4.5.2	Demontageabläufe.....	73
4.5.3	Platzgestaltung.....	74
4.5.4	Organisation und Logistik	75
4.6	Wirtschaftliche Rahmenbedingungen der zukünftigen Altautoverwertung.....	76
4.7	Zusammenfassung des Beispiels Altautorecycling.....	77

5 Produktionsrückstandsverwertung am Beispiel der Eisen- und Stahlindustrie

79

5.1	Internationales und wirtschaftliches Umfeld der Stahlindustrie	80
5.1.1	Weltweite Stahlproduktion.....	80
5.1.2	Konkurrenzfähigkeit der deutschen Stahlindustrie.....	81
5.1.2.1	Produktionstechnologien	81
5.1.2.2	Energie.....	82
5.1.2.3	Arbeitsproduktivität.....	83
5.1.2.4	Umweltschutz und Subventionen	83
5.1.3	Zusammenfassung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Eisen- und Stahlindustrie.....	85
5.2	Analyse des Reststoffanfalls in einem integrierten Hüttenwerk und einem Elektrostahlwerk	86
5.2.1	Sinteranlage	87
5.2.1.1	Verfahrensbeschreibung.....	88
5.2.1.2	Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen	88
5.2.1.3	Analyse der anfallenden Reststoffe.....	89
5.2.2	Hochofenanlage	90
5.2.2.1	Verfahrensbeschreibung.....	90
5.2.2.2	Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen	91
5.2.2.3	Analyse der anfallenden Reststoffe.....	92
5.2.3	Roheisenvorbehandlung.....	94
5.2.3.1	Verfahrensbeschreibung und spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen.....	94
5.2.3.2	Anfallende Reststoffe.....	95
5.2.4	Stahlwerk.....	95
5.2.4.1	Verfahrensbeschreibung.....	95

7	Modellanwendung auf das Altautorecycling und die Eisen- und Stahlindustrie	164
7.1	Anwendung des Modells auf das Altautorecycling	164
7.1.1	Quellenstruktur: Altfahrzeuganfall in Nordrhein-Westfalen	165
7.1.2	Verfahrensstruktur	166
7.1.2.1	Abbildung der Demontagezentren und Demontagevarianten	167
7.1.2.2	Abbildung der Shredderanlagen	168
7.1.2.3	Metallurgisches Recycling	168
7.1.2.4	Verwertungsoptionen	169
7.1.3	Sammlung, Transport und Lagerung	170
7.1.4	Implementation	171
7.1.5	Ergebnisse der Modellberechnungen	172
7.1.5.1	Herstellerübergreifende Lösung	172
7.1.5.2	Vorgabe der Demontagetiefe	174
7.1.5.3	Einfluß des Exports	174
7.1.5.4	Herstellerspezifische Lösungen und firmenübergreifende Kooperationen	177
7.1.5.5	Sensitivitätsanalysen	180
7.1.6	Schlußfolgerungen und Handlungsempfehlungen	181
7.2	Anwendung des Modells auf die Kreislaufwirtschaft der Eisen- und Stahlindustrie	184
7.2.1	Eingrenzung der betrachteten Reststoffe	184
7.2.2	Reststoffanfall und Vorauswahl der Aufbereitungsstandorte	185
7.2.3	Abbildung der Aufbereitungsverfahren	186
7.2.4	Zuordnung der Reststoffe zu den Verfahren	188
7.2.5	Transport, Lagerung, Be- und Entladen	190
7.2.6	Verwertungsoptionen	191
7.2.7	Ergebnisse der Modellberechnungen	192
7.2.7.1	Ausgangsszenario	194
7.2.7.2	Erhöhung des Deponiepreises	195
7.2.7.3	Einbeziehung der Reduktion im Hochofen	196
7.2.7.4	Einbeziehung von Konverterschlämmen bei der Aufbereitung	197
7.2.7.5	Ausschluß weiterer Hydrozyklonanlagen	198
7.2.7.6	Kombinierte Betriebsweise des Inmetcoverfahrens	199
7.2.7.7	Einbeziehung der Rezirkulation von Elektroofenstäuben	200
7.2.7.8	Scale up Faktor 4	200
7.2.7.9	Sensitivitätsanalysen	201
7.2.8	Schlußfolgerungen und Handlungsempfehlungen	202

7.3	Kritische Würdigung und Ausblick.....	207
7.3.1	Modellkritik.....	207
7.3.2	Erkenntnisse der Modellbildung und Rückschlüsse auf weitere Kreislaufwirtschaftssysteme.....	208
7.3.4	Ausblick.....	209
8	Zusammenfassung	211
	Literaturverzeichnis	214

Abbildungsverzeichnis

1.1 Abfallbilanz der Bundesrepublik Deutschland.....	2
2.1 Verschiedene Reststoff-/Rückstandskomponenten	8
2.2 Reststoffe und Abfälle im Produktionssystem.....	12
2.3 Kostenanstieg bei der Deponierung der Shredderleichtfraktion.....	13
2.4 Anfall- und Anforderungscharakteristiken als Kriterien des Kreislaufwirtschafts- und Abfallsystems	18
3.1 Auswahl der rechtlichen Anforderungen an den betrieblichen Umweltschutz	26
3.2 Entscheidungsabfolge aufgrund des § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG	40
4.1 Pkw-Bestand, Neuzulassungen und Löschungen in Deutschland 1970-2010.....	59
4.2 Heutiger Ablauf der Altautoverwertung	62
4.3 Größenklassen von Altautoverwertern	63
4.4 Prinzipskizze einer Shredderanlage mit nachgeschalteter Separierung.....	64
4.5 Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen beim Shredderprozeß	64
4.6 Shredderstandorte	66
4.7 Konzept der deutschen Automobilindustrie zur zukünftigen Altautoverwertung	70
4.8 Eurhekar-Modell zur Altautoverwertung	71
4.9 Industrielle Altautoverwertung	73
4.10 Prinzipielles Schema einer Seriendemontageanlage	74
4.11 Schematische Darstellung des entsorgungslogistischen Verbundes der zukünftigen Altautoverwertung	75
5.1 Entwicklung der Weltstahlproduktion.....	80
5.2 Aufteilung der Jahresstahlproduktion auf die verschiedenen Verfahrensrouten für ausgewählte Länder	82
5.3 Schematische Darstellung der Stahlerzeugung	87
5.4 Schematischer Aufbau einer Hochofenanlage	91
5.5 Zinkein- und -austrag im Hochofen - Angaben in g Zn/t Roheisen.....	93
5.6 Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen eines integrierten Hüttenwerkes.....	102
5.7 Eisenhüttenschlacken.....	105
5.8 Aufkommen und Verbleib der Hochofenschlacke in den Jahren 1981 und 1991 (alte Bundesländer)	106
5.9 Aufkommen und Verbleib der Stahlwerksschlacke in den Jahren 1981 und 1991	107
5.10 Scale up des Corexverfahrens	113
5.11 Fließschema der Heißbrikettierung, Lurgi Verfahren.....	115
5.12 Fließschema des Wälzverfahrens.....	118

5.13 Fließschema des Zirkulierenden Wirbelschichtverfahrens	120
5.14 Fließschema des Hydrozyklonverfahrens	122
5.15 Fließschema des Inmetcoverfahrens Variante 1	124
5.16 Fließschema des Drehrohrverfahrens	127
5.17 Theoretische Verschaltungsmöglichkeiten von Aufbereitungsverfahren für ausgewählte Stäube- und Schlämme	130
6.1 Mögliche Knotenverbindungen	136
6.2 OR-Modelle zur Standort-, Zuordnungs- und Transportplanung	137
6.3 Mutative und multiple, stückweise linearisierte Betriebsgrößenvariation	141
6.4 Analogie zwischen WLP und ZKSP	146
7.1 Nach Kreisen gegliederte Löschungen in NRW	166
7.2 Durchschnittliche spezifische Mengen und Kosten der Altautoverwertung	167
7.3 Darstellung der Datenzusammenführung in GAMS	171
7.4 Kostenminimales Rücknahmesystem für Nordrhein-Westfalen	173
7.5 Veränderung des Rücknahmesystems unter Einfluß von umfangreicheren Exporten	176
7.6 Herstellerbezogenes Konzept - Marktanteil Renault	178
7.7 Herstellerbezogenes Konzept - Marktanteil BMW/Renault/Fiat	179
7.8 Vergleichende Betrachtung der Szenarien	181
7.9 Berücksichtigte Stahlwerksstandorte und bestehende Aufbereitungsanlagen	187
7.10 Im Modell berücksichtigte Zuordnungen der betrachteten Reststoffe und Produkte zu den Verfahren	189
7.11 Kreislaufwirtschaftskonzept für die Eisen- und Stahlindustrie bei einem Deponiepreis von 50 DM/t	195
7.12 Kreislaufwirtschaftskonzept für die Eisen- und Stahlindustrie bei einem Deponiepreis von 200 DM/t	198
7.13 Kreislaufwirtschaftskonzept für die Eisen- und Stahlindustrie bei Berücksichtigung der Rezirkulation von Elektroofenstäuben	201
7.14 Vergleichende Betrachtung der Szenarien	204

Tabellenverzeichnis

2.1	Aufkommen und Entsorgung von Abfällen und Reststoffen mit Verwertungsanteil im produzierenden Gewerbe nach Wirtschaftsbereichen - alte Bundesländer.....	9
3.1	Einordnung der Reststoffe der Eisen- und Stahlindustrie in den Reststoff- /Abfallartenkatalog.....	54
4.1	Materialanteile im Automobil.....	60
4.2	Gesamtmen gen der Einsatzstoffe in Altautos in 1992 und 2002.....	61
5.1	Subventionen und Investitionen in vier Ländern der europäischen Union in den Jahren 1975 bis 1991.....	85
5.2	Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen einer Sinteranlage.....	89
5.3	Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen einer Hochofenanlage.....	92
5.4	Chemische Zusammensetzung von Hochofen-Gichtgasschlamm und -staub in %.....	93
5.5	Siebmetallanalyse HO-Gichtgasschlamm.....	94
5.6	Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen der Roheisenvorbehandlung.....	95
5.7	Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen des Oxygenstahlwerkes.....	96
5.8	Zusammensetzung von Konverterstäuben.....	97
5.9	Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen eines Elektrostahlwerks.....	98
5.10	Chemische Zusammensetzung von Elektroofenstäuben.....	99
5.11	Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen der Sekundärmetallurgie.....	99
5.12	Spezifische Einsatz- und Ausbringungsmengen des Walzwerkes.....	100
6.1	Gegenüberstellung der Problemstruktur des Altautorecyclings und der Kreislaufwirtschaft der Eisen- und Stahlindustrie.....	132
7.1	Durchschnittliche Erlöse und Kosten der Wertstofffraktionen und der Produkte im Basisszenario.....	169
7.2	Ausgewählte Bestandteile und Mengen der im Modell der Eisen- und Stahlindustrie berücksichtigten Reststoffe.....	185
7.3	Auswahl techno-ökonomischer Parameter der betrachteten Aufbereitungsverfahren.....	188
7.4	Durchschnittliche Markt- oder Verrechnungspreise von Basisprodukten.....	192
7.5	Gegenüberstellung der Rahmenbedingungen in den untersuchten Szenarien.....	193