
Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Kreislaufwirtschaft	1
1.1	Motivation und Zielstellung des Recyclings	1
1.2	Verwertbare Komponenten und Stoffe	3
1.3	Abfallkategorien, Produktlebensdauer	4
1.4	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Zielsetzungen und Stoffströme	8
1.5	Qualitätsanforderungen an Recyclate	12
1.6	Recyclingeigenschaften der Stoffe	13
1.7	Technische, wirtschaftliche und ökologische Anforderungen an Recycling- und Verwertungsverfahren	15
	Literatur	17
2	Stufen der Recyclingkette	19
2.1	Sammlung und Vorsortierung	19
2.2	Vorbehandlung und Demontage	20
2.3	Mechanische und chemische Aufbereitung	21
2.4	Herstellung von Werkstoffen und Grundstoffen	23
	Literatur	25
3	Manuelle und mechanische Verfahrenstechniken zur Aufbereitung von Abfällen und zur Schadstoffentfrachtung	27
3.1	Demontage, Schadstoffentfrachtung und Rückbau	29
3.2	Zerkleinerung	31
3.3	Klassierung	41
3.4	Sortierung von Feststoffen	44
3.4.1	Dichtesortierung	45
3.4.2	Sortieren im Magnetfeld (Magnetsortieren)	49
3.4.3	Sortieren im elektrischen Feld	52
3.4.4	Flotation	54
3.4.5	Sortieren nach anderen mechanischen Eigenschaften	55
3.4.6	Manuelle Klaubung und sensorgestützte Sortierung	57
3.4.7	Einsatzgebiete der Feststoffsartierung	61
3.5	Kompaktieren	61

3.6	Feststoff-Fluid-Trennung	63
3.6.1	Feststoff-Flüssigkeits-Trennung.	64
3.6.2	Abscheidung von Feststoffen aus Gasen	66
	Literatur.	66
4	Thermische Verfahrenstechniken und Chemische Verfahren	69
4.1	Thermische Verfahrenstechniken	70
4.1.1	Physikalische Löseprozesse	70
4.1.2	Destillations- und Verdampfungsverfahren	71
4.1.3	Kristallisation	74
4.1.4	Membranverfahren	75
4.1.5	Adsorptions- und Absorptionsverfahren.	78
4.2	Chemische und Elektrochemische Verfahren (Hydrometallurgie)	80
4.2.1	Chemische Auflösung fester Abfälle	80
4.2.2	Chemische Fällung und Fällungskristallisation	82
4.2.3	Elektrochemische Verfahren	85
4.2.4	Anreicherungsverfahren über Ionenaustausch	91
	Literatur.	97
5	Hochtemperatur-Verfahren	99
5.1	Hochtemperaturreaktionen	99
5.2	Abgasproblematik.	103
	Literatur.	106
6	Recycling von metallischen Werkstoffen und metallhaltigen Abfällen	107
6.1	Allgemeine Verfahrenstechniken für das Recycling von Metallen	109
6.1.1	Schmelzmetallurgische Recyclingtechnik.	109
6.1.2	Verwertung von metallhaltigen Abfällen und Lösungen	119
6.1.3	Metallpreise und Schrottpreise	120
6.2	Recycling von Eisenwerkstoffen und eisenhaltigen Abfällen	120
6.2.1	Zusammensetzung der häufigsten Eisenwerkstoffe	120
6.2.2	Verfahren der Stahlerzeugung.	124
6.2.3	Verfahren zur Herstellung von Eisenguss und Stahlguss	132
6.2.4	Schrottsorten und Schrottaufbereitung	135
6.2.5	Verwertung eisenhaltiger Abfälle (Eisenverbindungen).	138
6.3	Recycling der Leichtmetalle Aluminium, Magnesium und Titan sowie aluminiumhaltiger Abfälle	142
6.3.1	Zusammensetzung von Aluminiumwerkstoffen, Schrotten und aluminiumhaltigen Abfällen	142
6.3.2	Grundlegende Eigenschaften von Aluminiumschmelzen und Möglichkeiten ihrer Behandlung	146
6.3.3	Aufbereitungsverfahren für Aluminium-Schrotte	151
6.3.4	Schmelzverfahren und Schmelzapparate für Aluminium- Schrotte	157

6.3.5	Verarbeitung von aluminiumhaltigen Abfällen	165
6.3.6	Recycling von Magnesiumwerkstoffen	167
6.3.7	Recycling von Titanwerkstoffen	170
6.4	Recycling von Kupfer- und Nickelwerkstoffen und kupferhaltigen bzw. nickelhaltigen Abfällen	171
6.4.1	Zusammensetzung von Kupferwerkstoffen, Kupferschrotten und kupferhaltigen Abfällen.	172
6.4.2	Aufbereitung von Kupfer-Schrotten und kupferhaltigen Abfällen.	176
6.4.3	Schmelzmetallurgische Verarbeitung von Kupferschrotten und kupferhaltigen Abfällen mit abschließender Raffinationselektrolyse	179
6.4.4	Hydrometallurgische Verarbeitung von kupferhaltigen Abfällen	186
6.4.5	Zusammensetzung von Nickelwerkstoffen, Nickelverbindungen, Nickelschrotten und nickelhaltigen Abfällen	190
6.4.6	Schmelzmetallurgische Verarbeitung von Nickelschrotten und nickelhaltigen Abfällen	192
6.4.7	Hydrometallurgische Recyclingverfahren für nickelhaltige Zwischenprodukte und Abfälle	195
6.5	Recycling von Bleiwerkstoffen, Bleiverbindungen und bleihaltigen Abfällen	200
6.5.1	Zusammensetzung von Bleiwerkstoffen, Bleiverbindungen, Bleischrotten und bleihaltigen Abfällen.	201
6.5.2	Aufbereitung und schmelzmetallurgische Verarbeitung von Bleiakkulatoren	202
6.5.3	Schmelzmetallurgische Verarbeitung von Bleischrotten und bleihaltigen Abfällen	208
6.6	Recycling von Zinkwerkstoffen und zinkhaltigen Abfällen.	209
6.6.1	Zusammensetzung von Zinkwerkstoffen, Zinkschrotten und zinkhaltigen Abfällen	209
6.6.2	Mechanische Aufbereitung von Zinkschrotten und zinkhaltigen Abfällen.	211
6.6.3	Umschmelzen von Zinkschrotten und Raffination durch Destillation	212
6.6.4	Entzinkung von Stahlschrott	213
6.6.5	Zinkrecycling aus Stahlwerks-, Kupolofen- und Kupferhüttenstäuben sowie aus anderen Zinkoxid- und Zinkmetallhaltigen Abfällen	213
6.6.6	Verwertung zinkhaltiger Abfälle als Zinkverbindungen.	219
6.7	Recycling von Edelmetallen und Edelmetallsalzen	221
6.7.1	Edelmetall-Materialien, -Schrotte und -Abfälle.	222

6.7.2	Recycling von reichen Edelmetallschrotten	225
6.7.3	Recycling von verunreinigten und armen Edelmetallabfällen und Edelmetall-Lösungen	226
6.7.4	Edelmetallgewinnung aus Anodenschlämmen von Kupferelektrolysen	237
6.8	Recycling von Refraktärmetallen	239
6.8.1	Einsatzgebiete der Refraktärmetalle und entstehende Abfälle.	240
6.8.2	Recyclingtechnologien	241
6.8.3	Wolframrecycling	243
6.8.4	Tantalrecycling	246
6.8.5	Hartmetallrecycling	246
6.8.6	Recycling von vanadiumhaltigen Abfällen	250
6.9	Recycling von Hochtechnologiemetallen	251
6.9.1	Einsatzgebiete der Hochtechnologiemetalle.	251
6.9.2	Indium-Recycling	252
6.9.3	Recycling von Selen und Tellur	255
6.9.4	Germanium-Recycling	256
6.9.5	Gallium-Recycling	257
6.9.6	Antimon-Recycling	257
6.10	Recycling von Seltenerdmetallen	258
6.10.1	Gewinnung aus NiMH-Batterien	259
6.10.2	Recycling von Leuchtstoffen	260
6.10.3	Recycling von Magnetwerkstoffen	264
	Literatur.	266
7	Recycling von Kunststoffen	271
7.1	Kunststoffgruppen und Kunststoffsorten	272
7.2	Zusatzstoffe, Füllstoffe und Verstärkungsmittel für Kunststoffe	277
7.3	Einsatzgebiete und Produktion der Kunststoffe	279
7.4	Werkstoffrecycling von Kunststoffen	282
7.4.1	Werkstoffrecycling von Thermoplasten	284
7.4.2	Werkstoffrecycling von Elastomeren (Altgummi und PUR)	301
7.4.3	Recycling von Duroplasten und faserverstärkten Kunststoffen (GFK, CFK)	306
7.5	Chemisches Recycling und Rohstoffrecycling von Altkunststoffen.	308
7.5.1	Alkoholyse, Hydrolyse und katalytische Depolymerisation.	309
7.5.2	Hydrierung	313
7.5.3	Pyrolyse	314
7.5.4	Vergasung zu Brenngas oder Synthesegas.	317
7.5.5	Reduktionsmittel im Hochofenprozess	319
7.6	Entscheidungskriterien zur Auswahl des Verwertungsweges für Altkunststoffe	322
	Literatur.	323

8	Recycling von Papier	.325
8.1	Altpapiersorten und Sammlung von Altpapier	.326
8.2	Trockensortierung von gesammeltem Altpapier.	.327
8.3	Nassaufbereitung der Altpapiersorten.	.328
8.4	Recycling von Verbundverpackungen.	.332
8.5	Grenzen und Chancen des Altpapierrecyclings	.333
	Literatur.	.334
9	Recycling von Glas und Keramik.	.335
9.1	Recycling von Glas	.336
9.1.1	Glasschmelzprozess.	.338
9.1.2	Einsatz von Altglasscherben	.340
9.1.3	Aufbereitung von Behälterglas	.343
9.1.4	Flachglasaufbereitung.	.345
9.1.5	Recycling von Spezialgläsern.	.348
9.1.6	Alternative Verwertung von Altglasscherben	.350
9.2	Recycling von Keramik.	.351
	Literatur.	.353
10	Recycling mineralischer Baustoffe und Verwertung von Schlacken und Aschen.	.355
10.1	Recycling mineralischer Baustoffe	.355
10.1.1	Zusammensetzung mineralischer Baustoffe.	.355
10.1.2	Aufbereitung und Verwertung von mineralischen Baustoffen.	.357
10.2	Verwertung von Schlacken und Aschen.	.363
10.2.1	Zusammensetzung, Schadstoffgehalte und Elutionswerte von Schlacken.	.364
10.2.2	Verwertungsgebiete von Schlacken	.368
10.2.3	Zusammensetzung und Verwertung von verschiedenen Aschen	.369
	Literatur.	.375
11	Recycling von speziellen flüssigen und gasförmigen Stoffen	.377
11.1	Recycling von organischen Lösemitteln und lösemittelhaltigen Abfällen.	.377
11.1.1	Destillation von Lösemitteln	.380
11.1.2	Recycling von Lacken.	.382
11.2	Recycling von Mineralölen	.387
11.2.1	Mechanische Rekonditionierung gering verunreinigter Altöle	.388
11.2.2	Physikalisch-chemische Verfahren zur Regeneration von Altölen zu Grundölen	.389
11.2.3	Aufarbeitung von Altöl zu Heizöl und Fluxöl	.392
11.2.4	Umarbeitung von Altöl in Synthesegas oder Einsatz als Reduktionsmittel im Hochofen	.393
11.2.5	Auftrennung von Mineralöl-Wasser-Mischungen und Emulsionen	.393

11.3	Lösemittelrückgewinnung aus Dämpfen und Abluft	396
11.3.1	Rückgewinnung durch Kondensation	397
11.3.2	Rückgewinnung durch Absorption	398
11.3.3	Rückgewinnung durch Adsorption	399
11.3.4	Rückgewinnung durch Gaspermeation	400
11.4	Recycling von Abfallsäuren und Beizlösungen	400
	Literatur.	405
12	Recycling von Altfahrzeugen	407
12.1	Altfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren	407
12.1.1	EU-Altfahrzeug-Richtlinie und deutsche Altfahrzeug- Verordnung	410
12.1.2	Die Verwertungskette im Altfahrzeugrecycling	411
12.1.3	Demontage von Altfahrzeugen und Schadstoffentfrachtung	412
12.1.4	Der Shredderprozess in der Altfahrzeugverwertung.	418
12.1.5	Aufbereitung und Verwertung der Shredderschwerfraktion.	423
12.1.6	Aufbereitung und Verwertung der Shredderleichtfraktion (SLF) bzw. der Shredderrückstände (SR)	425
12.1.7	Thermische Verfahren für die SLF-Behandlung.	432
12.2	Elektro- und Hybridfahrzeuge	436
	Literatur.	437
13	Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten	439
13.1	EU-Richtlinien, deutsches Elektroggesetz und Strategien zum WEEE-Recycling	445
13.2	Strukturen des WEEE-Recycling	452
13.3	Recycling von FCKW-freien Haushaltsgroßgeräten	453
13.4	Recycling von Kühl- und Klimageräten.	453
13.5	Elektro- und Elektronikschrott der Gruppen IT-, TK-, UE-Geräte und Haushaltkleingeräte.	453
13.5.1	Vorsortierung, Schadstoffentfrachtung und Demontage.	455
13.5.2	Mechanische Aufbereitung der Elektro(nik)-Altgeräte	458
13.5.3	Recycling von LCD-Bildschirmen	461
13.5.4	Recycling von Elektro(nik)-Altgeräten durch Pyrolyse, Schmelztechnik und Löseprozesse	463
13.6	Lampenrecycling	466
13.6.1	Gasentladungslampen	466
13.6.2	LED-Lampen	470
13.7	Recycling von Photovoltaikmodulen	471
	Literatur.	474
14	Batterierecycling.	477
14.1	Batterietypen und stofflicher Aufbau	478

14.2	Batteriegesetz	483
14.3	Massenanteile der Batteriesysteme und Anwendungsfelder des Batterierycyclings	484
14.4	Recyclingsysteme und -verfahren	486
14.4.1	Sammelsysteme	487
14.4.2	Sortierverfahren für Gerätebatterien	487
14.4.3	Verarbeitung von Alkali-Mangan-, Zink-Kohle- und Zink- Luft-Batterien	488
14.4.4	Verwertung von Nickel-Cadmium- und Nickel- Metallhydrid-Batterien	490
14.4.5	Verfahrensentwicklungen zur Verwertung von Lithium- Ionen-Batterien	493
	Literatur	499
15	Energetische Verwertung von festen Abfällen und Einsatz von Ersatzbrennstoffen	501
15.1	Monoverbrennung von festen Abfällen	508
15.1.1	Rostverbrennung	509
15.1.2	Wirbelschichtverbrennung	511
15.1.3	Verbrennungsöfen für Biomasse	514
15.2	Abgasreinigung nach Verbrennungsprozessen von Abfällen	514
15.3	Thermische Abfallbehandlung durch Pyrolyse oder Vergasung.	518
15.4	Mechanische Aufbereitung fester Abfälle zu Ersatzbrennstoffen	518
15.5	Mitverbrennung von Abfällen und Ersatzbrennstoffen in Feuerungsanlagen	522
15.5.1	Ersatzbrennstoffe in der Zementindustrie	525
15.5.2	Mitverbrennung in Kraftwerken.	528
15.6	Altöle als Ersatzbrennstoffe.	530
	Literatur	531
16	Recyclinggerechte und umweltgerechte Gestaltung von Produkten	533
16.1	Rahmenbedingungen einer recyclingorientierten Produktgestaltung	533
16.2	Allgemeine technische Hinweise und Richtlinien.	534
16.3	Komponentenrecycling oder stoffliche Verwertung.	536
16.4	Recyclingeigenschaften von Werkstoffen und Materialien	538
16.5	Schlussfolgerungen für die Gestaltung und Fertigung von Produkten bei einem vorgesehenen Materialrecyclings der Altprodukte	540
16.6	Produktgestaltung aus Sicht von Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz	543
	Literatur.	544
	Sachverzeichnis	545