

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundlagen der Kreislaufwirtschaft</b> . . . . .	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
<b>2</b>	<b>Stufen der Recyclingkette</b> . . . . .	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
<b>3</b>	<b>Manuelle und mechanische Verfahrenstechniken zur Aufbereitung von Abfällen und zur Schadstoffentfrachtung</b> . . . . .	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
<b>4</b>	<b>Thermische Verfahrenstechniken und Chemische Verfahren . . . . .</b>	<b>69</b>
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
<b>5</b>	<b>Hochtemperatur-Verfahren . . . . .</b>	<b>99</b>
5.1	Hochtemperaturreaktionen . . . . .	99
5.2	Abgasproblematik. . . . .	103
	Literatur. . . . .	106
<b>6</b>	<b>Recycling von metallischen Werkstoffen und metallhaltigen Abfällen . . . . .</b>	<b>107</b>
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 Bleiakumulatoren . . . . .	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
<b>7</b>	<b>Recycling von Kunststoffen . . . . .</b>	<b>271</b>
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

---

<b>8</b>	<b>Recycling von Papier</b> . . . . .	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
<b>9</b>	<b>Recycling von Glas und Keramik.</b> . . . . .	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
<b>10</b>	<b>Recycling mineralischer Baustoffe und Verwertung von Schlacken und Aschen.</b> . . . . .	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
<b>11</b>	<b>Recycling von speziellen flüssigen und gasförmigen Stoffen</b> . . . . .	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
<b>12</b>	<b>Recycling von Altfahrzeugen . . . . .</b>	<b>407</b>
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
<b>13</b>	<b>Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten . . . . .</b>	<b>439</b>
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
<b>14</b>	<b>Batterierecycling. . . . .</b>	<b>477</b>
14.1	Batterietypen und stofflicher Aufbau . . . . .	478

---

14.2	Batteriegesetz . . . . .	483
14.3	Massenanteile der Batteriesysteme und Anwendungsfelder des Batterierecyclings . . . . .	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
<b>15</b>	<b>Energetische Verwertung von festen Abfällen und Einsatz von Ersatzbrennstoffen . . . . .</b>	<b>501</b>
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
<b>16</b>	<b>Recyclinggerechte und umweltgerechte Gestaltung von Produkten . . . . .</b>	<b>533</b>
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
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>545</b>