

Hans Martens

Recyclingtechnik

Fachbuch für Lehre und Praxis

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation und Zielstellung des Recyclings	2
1.2	Verwertbare Produkte und Stoffe	3
1.3	Qualitätsanforderungen an Recyclingstoffe	6
1.4	Technische, wirtschaftliche und ökologische Anforderungen an Recycling- und Verwertungsverfahren	6
2	Technische Grundlagen des Werkstoffrecyclings	9
3	Mechanische Verfahren zur Auftrennung von Werkstoffverbindungen und zur Sortierung von Feststoffen	15
3.1	Demontage und Rückbau	16
3.2	Aufschlusszerkleinerung	17
3.3	Klassierung	21
3.4	Sortierung von Feststoffen	24
3.4.1	Dichtesortierung	24
3.4.2	Sortieren im Magnetfeld (Magnetsortieren)	27
3.4.3	Sortieren im elektrischen Feld (Elektrosortieren)	30
3.4.4	Flotation	31
3.4.5	Sortieren nach verschiedenen mechanischen Eigenschaften	31
3.4.6	Sensorgestützte Sortierung	32
3.5	Kompaktieren	33
4	Physikalische und chemische Recyclingverfahren und Vorbehandlungsverfahren	37
4.1	Vorbehandlungsverfahren für Werkstoffabfälle	38
4.1.1	Physikalische Verfahren der Vorbehandlung	38
4.1.2	Chemische und elektrochemische Vorbehandlungsverfahren	40
4.1.3	Pyrolyse und thermische Oxidation als Vorbehandlung	42
4.1.4	Entstehung von Dioxinen und Furanen bei thermischen Prozessen	44
4.2	Recyclingverfahren mit physikalischen und chemischen Methoden	45
4.2.1	Löseprozesse für feste Abfälle	45
4.2.2	Aufarbeitung von wässrigen Lösungen	46
4.2.3	Recycling von organischen Flüssigkeiten durch Destillation und Sorption	59
4.2.4	Nutzbarmachung von Abgasen	61
4.2.5	Energetische Verwertung von Gasen, Flüssigkeiten und Schlämmen	64
5	Recycling von metallischen Werkstoffen und metallhaltigen Abfällen	67
5.1	Allgemeine Verfahrenstechniken für das Recycling von Metallen	71
5.1.1	Schmelzmetallurgische Recyclingtechnik	71
5.1.2	Verwertung von metallhaltigen Abfällen und Lösungen	77
5.1.3	Metallpreise und Schrottpreise	78
5.2	Recycling von Eisenwerkstoffen und eisenhaltigen Abfällen	78
5.2.1	Zusammensetzung der häufigsten Eisenwerkstoffe	78
5.2.2	Verfahren der Stahlerzeugung	81

5.2.3	Verfahren zur Herstellung von Eisenguss und Stahlguss	85
5.2.4	Schrottsorten und Schrottaufbereitung	89
5.2.5	Verwertung eisenhaltiger Abfälle (Eisenverbindungen)	91
5.3	Recycling von Aluminiumwerkstoffen und aluminiumhaltigen Abfällen sowie von Magnesiumwerkstoffen	94
5.3.1	<i>Zusammensetzung von Aluminiumwerkstoffen, Schrotten und aluminiumhaltigen Abfällen</i>	94
5.3.2	Grundlegende Eigenschaften von Aluminiumschmelzen und Möglichkeiten ihrer Behandlung	97
5.3.3	Aufbereitungsverfahren für Aluminiumschrotte	101
5.3.4	Schmelzverfahren und Schmelzapparate für Aluminiumschrotte	104
5.3.5	Verarbeitung von aluminiumhaltigen Abfällen	110
5.3.6	Recycling von Magnesiumwerkstoffen	112
5.4	Recycling von Kupfer- und Nickelwerkstoffen und kupferhaltigen bzw. nickelhaltigen Abfällen	113
5.4.1	Zusammensetzung von Kupferwerkstoffen, Kupferschrotten und kupferhaltigen Abfällen	114
5.4.2	Aufbereitung von Kupferschrotten und kupferhaltigen Abfällen	117
5.4.3	Schmelzmetallurgische Verarbeitung von Kupferschrotten und kupferhaltigen Abfällen mit abschließender Raffinationselektrolyse	119
5.4.4	Nassmetallurgische Verarbeitung von kupferhaltigen Abfällen	125
5.4.5	Zusammensetzung von Nickelwerkstoffen, Nickelverbindungen, Nickelschrotten und nickelhaltigen Abfällen	128
5.4.6	Schmelzmetallurgische Verarbeitung von Nickelschrotten und nickelhaltigen Abfällen	129
5.4.7	<i>Nasschemische Recyclingverfahren für nickelhaltige Abfälle</i>	131
5.5	Recycling von Bleiwerkstoffen, Bleiverbindungen und bleihaltigen Abfällen	135
5.5.1	Zusammensetzung von Bleiwerkstoffen, Bleiverbindungen, Bleischrotten und bleihaltigen Abfällen	135
5.5.2	Aufbereitung und schmelzmetallurgische Verarbeitung von Bleiakkumulatoren	136
5.5.3	Schmelzmetallurgische Verarbeitung von Bleischrotten und bleihaltigen Abfällen	139
5.6	Recycling von Zinkwerkstoffen und zinkhaltigen Abfällen	139
5.6.1	Zusammensetzung von Zinkwerkstoffen, Zinkschrotten und zinkhaltigen Abfällen	139
5.6.2	Mechanische Aufbereitung von Zinkschrotten und zinkhaltigen Abfällen	141
5.6.3	Umschmelzen von Zinkschrotten und Raffination durch Destillation	141
5.6.4	Zinkrecycling aus Stahlwerks- und Kupolofenstäuben sowie anderen zinkhaltigen Abfällen	141
5.6.5	Verwertung zinkhaltiger Abfälle als Zinkverbindungen	145
5.7	Recycling von Edelmetallen und Edelmetallsalzen	146
5.7.1	Edelmetallmaterialien, -schrotte und -abfälle	147
5.7.2	Recycling von reichen Edelmetallschrotten	149
5.7.3	Recycling von verunreinigten und armen Edelmetallabfällen und Edelmetalllösungen	150
5.7.4	Edelmetallgewinnung aus Anodenschlämmen von Kupferelektrolysen	156
5.8	Recycling von Titan- und Tantalwerkstoffen	158

6	Recycling von Kunststoffen	161
6.1	Kunststoffgruppen und Kunststoffsorten	162
6.2	Zusatzstoffe, Füllstoffe und Verstärkungsmittel für Kunststoffe	164
6.3	Einsatzgebiete der Kunststoffe und Preise	168
6.4	Werkstoffrecycling von Kunststoffen	168
6.4.1	Werkstoffrecycling von Thermoplasten	171
6.4.2	Werkstoffrecycling von Elastomeren (Altgummi und PUR)	184
6.4.3	Partikelrecycling von Duroplasten	187
6.5	Chemisches Recycling und Rohstoffrecycling von Altkunststoffen	188
6.5.1	Alkoholyse, Hydrolyse und katalytische Depolymerisation	189
6.5.2	Hydrierung	191
6.5.3	Pyrolyse	192
6.5.4	Vergasung zu Brenngas oder Synthesegas	194
6.5.5	Reduktionsmittel im Hochofenprozess	196
7	Recycling von Glas, Keramik und mineralischen Baustoffen	201
7.1	Recycling von Glas	202
7.1.1	Glasschmelzprozess	204
7.1.2	Einsatz von Altglasscherben	205
7.1.3	Aufbereitung von Behälterglas	208
7.1.4	Flachglasaufbereitung	209
7.1.5	Aufbereitung von Spezialgläsern	211
7.2	Recycling von Keramik und mineralischen Baustoffen	212
7.2.1	Ausbau, Zerkleinerung und Aufbereitung von Keramik	214
7.2.2	Aufbereitung von mineralischen Baustoffen	215
8	Recycling von Papier und Pappe	221
8.1	Altpapiersorten und Sammlung von Altpapier	222
8.2	Trockensortierung von gesammeltem Altpapier	223
8.3	Nassaufbereitung der Altpapiersorten	224
8.4	Recycling von Verbundverpackungen	226
8.5	Grenzen und Chancen des Altpapierrecyclings	227
9	Recycling von speziellen flüssigen und gasförmigen Stoffen	229
9.1	Recycling von organischen Lösemitteln und lösemittelhaltigen Abfällen	230
9.1.1	Destillation von Lösemitteln	231
9.1.2	Recycling von Lacken	233
9.2	Recycling von Mineralölen	236
9.2.1	Mechanische Rekonditionierung gering verunreinigter Altöle	237
9.2.2	Physikalisch-chemische Verfahren zur Regeneration von Altölen zu Grundölen	238
9.2.3	Aufarbeitung von Altöl zu Heizöl und Fluxöl	240
9.2.4	Umarbeitung von Altöl in Synthesegas oder Einsatz als Reduktionsmittel im Hochofen	241
9.2.5	Auftrennung von Mineralöl-Wasser-Mischungen und Emulsionen	241
9.3	Lösemittelrückgewinnung aus Dämpfen und Abluft	244
9.3.1	Rückgewinnung durch Kondensation	244
9.3.2	Rückgewinnung durch Absorption	245

9.3.3	Rückgewinnung durch Adsorption	246
9.3.4	Rückgewinnung durch Gaspermeation	246
9.4	Recycling von Abfallsäuren und Beizlösungen	247
10	Verwertung und Recycling von Altfahrzeugen	251
10.1	EU-Altfahrzeug-Richtlinie und deutsche Altfahrzeugverordnung	253
10.2	Demontage von Altfahrzeugen	254
10.3	Shredderanlage	261
10.4	Aufbereitung und Verwertung der Shredderschwerfraktion	263
10.5	Verwertung und Beseitigung der Shredderleichtfraktion	266
10.5.1	VW-SiCon-Technologie	266
10.5.2	Technologievorschläge für mechanische Verfahren zur SLF-Behandlung	268
10.5.3	Thermische Verfahren für die SLF-Behandlung	270
10.6	Metallurgisches Recycling	272
11	Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten	273
11.1	EU-Richtlinie und deutsches Elektroggesetz	276
11.2	Mechanische Aufbereitung der Elektro(nik)-Altgeräte	281
11.2.1	Vorsortierung nach Verwertungsgruppen	281
11.2.2	Verfahrenstechnik der mechanischen Aufbereitung	282
11.3	Recycling von Elektro(nik)-Altgeräten durch Schmelztechnik, Pyrolyse und Löseprozesse	286
11.3.1	Schmelztechnische Verfahren	286
11.3.2	Pyrolyseverfahren	286
11.3.3	Löseverfahren	287
11.4	Recyclingtechnologien für spezielle Elektro(nik)- Altgerätgruppen und -Bauteile	288
11.4.1	Kühlgeräterecycling	288
11.4.2	Lampenrecycling	288
11.4.3	Recycling von Gerätebatterien	291
11.4.4	Flüssigkristallbildschirme (LCD)	298
11.4.5	Solarmodule	299
12	Energetische Verwertung von festen Abfällen und Einsatz von Ersatzbrennstoffen	303
12.1	Monoverbrennung von festen Abfällen	308
12.1.1	Rostverbrennung	308
12.1.2	Wirbelschichtverbrennung	310
12.1.3	Verbrennungsöfen für Biomasse	312
12.2	Abgasreinigung nach Verbrennungsprozessen von Abfällen	312
12.3	Thermische Abfallbehandlung durch Pyrolyse oder Vergasung	315
12.4	Mechanische Aufbereitung fester Abfälle zu Ersatzbrennstoffen	316
12.5	Mitverbrennung von Abfällen und Ersatzbrennstoffen in Feuerungsanlagen	318
12.5.1	Ersatzbrennstoffe in der Zementindustrie	320
12.5.2	Mitverbrennung in Kraftwerken	323
12.6	Altöle als Ersatzbrennstoffe	324

13	Recyclinggerechte Konstruktion und Fertigung von Produkten mit der Zielstellung eines Werkstoffrecyclings	327
	Literaturnachweise und weiterführende Literatur	333
	Sachwortverzeichnis	341