

# Inhaltsverzeichnis

---

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>   | 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  |
| <b>2</b> | <b>Technische Grundlagen des Werkstoffrecyclings</b>  | 9  |
| <b>3</b> | <b>Mechanische Verfahren zur Auftrennung von Werkstoffverbindungen und zur Sortierung von Feststoffen</b> | 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 |
| <b>4</b> | <b>Physikalische und chemische Recyclingverfahren und Vorbehandlungsverfahren</b>                         | 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 |
| <b>5</b> | <b>Recycling von metallischen Werkstoffen und metallhaltigen Abfällen</b>                                 | 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   | <b>Recycling von Aluminiumwerkstoffen und aluminiumhaltigen Abfällen sowie von Magnesiumwerkstoffen .....</b>                       | 94  |
| 5.3.1 | Zusammensetzung von Aluminiumwerkstoffen, Schrotten und aluminiumhaltigen Abfällen .....  | 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   | <b>Recycling von Kupfer- und Nickelwerkstoffen und kupferhaltigen bzw. nickelhaltigen Abfällen .....</b>                            | 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 | Nasschemische Recyclingverfahren für nickelhaltige Abfälle .....  | 131 |
| 5.5   | <b>Recycling von Bleiwerkstoffen, Bleiverbindungen und bleihaltigen Abfällen .....</b>  | 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   | <b>Recycling von Zinkwerkstoffen und zinkhaltigen Abfällen .....</b>  | 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   | <b>Recycling von Edelmetallen und Edelmetallsalzen .....</b>  | 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   | <b>Recycling von Titan- und Tantalwerkstoffen .....</b>   | 158 |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| <b>6</b> | <b>Recycling von Kunststoffen</b>   | 161 |
| 6.1      | Kunststoffgruppen und Kunststoffsorten  | 162 |
| 6.2      | Zusatzzstoffe, 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 |
| <b>7</b> | <b>Recycling von Glas, Keramik und mineralischen Baustoffen</b>                       | 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 |
| <b>8</b> | <b>Recycling von Papier und Pappe</b>   | 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 |
| <b>9</b> | <b>Recycling von speziellen flüssigen und gasförmigen Stoffen</b>                     | 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<br>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     | <b>Verwertung und Recycling von Altfahrzeugen .....</b>   | 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     | <b>Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten .....</b>                                       | 273 |
| 11.1   | EU-Richtlinie und deutsches Elektrogesetz .....   | 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,<br>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)-<br>Altgerätegruppen 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     | <b>Energetische Verwertung von festen Abfällen und Einsatz von<br/>Ersatzbrennstoffen .....</b> | 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 | <b>Recyclinggerechte Konstruktion und Fertigung von Produkten mit der Zielstellung eines Werkstoffrecyclings .....</b> | 327 |
|    | <b>Literaturnachweise und weiterführende Literatur .....</b>   | 333 |
|    | <b>Sachwortverzeichnis .....</b>   | 341 |