

Um sich den technischen Fragestellungen im gesamten Recycling- bzw. Verwertungsprozess zu nähern, ist zunächst der Weg des Abfalls vom jeweiligen Anfallort bis zum finalen Einsatz der Sekundärrohstoffe in geeignete Produktionsprozesse zu charakterisieren. Grundsätzlich lässt sich diese Verwertungskette in 4 Stufen gliedern, die je nach Abfallart zum Teil oder vollständig durchlaufen werden müssen.

2.1 Sammlung und Vorsortierung

Der erste Schritt in der Verwertungskette besteht in der Sammlung von Abfällen. Diese können je nach Abfallart lokal, regional oder zentral und in stark vermischten, eingeschränkt gemischten Sammelgruppen oder sortenreinen Abfallarten auftreten. Während Post-Production-Abfälle und Post-Industrial-Abfälle (siehe Kap. 1) meist gut organisiert und in Gebinden in einem „B2B“ (Business-to-Business) System vom Abfallerzeuger an den Entsorger übergeben werden, gelangen Post-Consumer-Abfälle in einem „C2B“ (Consumer-to-Business) System in kleinen Mengeneinheiten vom Letztbesitzer/Konsumenten zum Entsorger. Dies wirkt sich auf die Gestaltung der Sammelsysteme aus. Sammelsysteme für Post-Consumer-Abfälle können

- regional (Letztbesitzer bringt Altprodukt direkt zum Erstbehandler wie z. B. bei Altfahrzeugen üblich),
- lokal als Bringsystem (Letztbesitzer bringt z. B. Altbatterien zum Einzelhandel),
- haushaltsnah als Holsystem (Altpapier, Glas, Textilien etc. in Containern) oder
- haushaltsgebunden als Holsystem (Restabfalltonne, gelber Sack, Biotonne, blaue Tonne für Altpapier)

ausgelegt sein.

Eine sortenreine oder sortenarme Sammlung von Abfällen ist eine erste Sortierstufe, die den nachfolgenden technischen Aufbereitungsprozess vereinfacht, verursacht aber häufig höhere Logistikaufwendungen. Hierbei wird dieser Sortierschritt vom Abfallbesitzer vorgenommen. In welcher Intensität und Effizienz Getrennsammelsysteme umgesetzt werden können, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum einen ist eine Sensibilisierung des Konsumenten erforderlich, der bewusst entsprechende Trennaufgaben wahrnehmen muss. Zur Unterstützung werden häufig Pfandsysteme herangezogen, wenn reine Aufklärungsmaßnahmen nicht den gewünschten Erfolg bringen. Zum anderen hängt der Umfang einer möglichen Getrennsammlung von den urbanen Gegebenheiten an den Anfallstellen ab. In Städten mit extrem hoher Bevölkerungsdichte und großer Ausdehnung ist eine stark ausdifferenzierte Getrennsammlung aus Mangel an Platz für mehrere Abfalltonnen vor der Haustür oder großen Transportentfernungen für kleinere Abfallmengen nicht realisierbar. In dünn besiedelten Regionen scheitert eine stark ausdifferenzierte Getrennsammlung an den zu hohen Logistikkosten. Ideale Voraussetzungen ergeben sich dagegen in mittelgroßen, verkehrstechnisch gut verknüpften Siedlungsgebieten, wie sie für Deutschland eher typisch sind.

In jedem Fall wirken sich die Sammelsysteme auf die nachgeschalteten Sortierprozesse aus. Während einige Stoffströme wie Altpapier oder Bioabfall für eine hochwertige Verwertung (Papierproduktion, Kompostierung) unbedingt getrennt gesammelt werden müssen, schaffen neue Aufbereitungsverfahren Möglichkeiten, Restmüll, Verpackungsabfall und/oder Elektrokleingeräte effizient nach Stoffgruppen zu separieren, auch wenn diese gemeinsam gesammelt werden. Was selektiv oder kollektiv zu sammeln ist, bewegt derzeit die Diskussion um die Einführung der Wertstofftonne.

An den Sammelstellen und insbesondere bei den Metallschrotthändlern findet außerdem eine weitere manuelle Vorsortierung statt. Das erfolgt oft auf Basis einer visuellen Identifizierung aber zunehmend auch mittels Hand-Analysatoren (z. B. NIR- und Röntgensysteme). Daran schließt sich dann die manuelle Vorsortierung an.

2.2 Vorbehandlung und Demontage

1. Eine *Vorbehandlung von Abfallströmen* muss immer dann stattfinden, wenn bestimmte Inhaltsstoffe oder Komponenten die weiteren Behandlungsstufen des Verwertungsprozesses empfindlich stören, Sekundärrohstoffe irreversibel kontaminieren oder zu problematischen Emissionen führen können. Bei sortenrein gesammelten Abfällen wie Altfahrzeugen oder Elektroaltgeräten sind z. B. Batterien oder Betriebsflüssigkeiten zu entnehmen, Quecksilber- oder Asbest-haltige Bauteile zu entfernen und explosive Baugruppen wie Airbags zu neutralisieren. Ebenso sind produktfremde Inhalte (z. B. Kanister oder Abfälle in PKWs) zu entnehmen. Diese Behandlungsschritte bezeichnet man als Schadstoffentfrachtung.
2. Für große und sehr komplexe Altprodukte ist außerdem als Vorbehandlung eine *Demontage* notwendig. Das ist besonders für Altfahrzeuge zutreffend. Die Entscheidung zwischen Demontage oder komplettem mechanischen Aufschluss (siehe Stufe 3) ist

vom technischen Stand der Aufschlussverfahren, den möglichen Sortierverfahren und auch ökologischen und ökonomischen Bedingungen abhängig. Für Bauwerke (Brücken, Gebäude, Stahlkonstruktionen) kommt immer eine Demontage (Rückbau) zur Anwendung. Demontage und Vorbehandlung sind in der Regel mit relativ hohem Personalaufwand verbunden, da die entsprechenden Arbeitsschritte zwar mit mechanischen Hilfsmitteln (Werkzeuge, Manipulatoren, Kräne etc.), nicht aber voll mechanisiert durchgeführt werden können. Beispiele hierzu werden in den Abschn. 3.1, 12.1 und 13.2 dargestellt.

3. Letztlich kann auch die *Entnahme von wiederverwendbaren Komponenten* aus Altprodukten mit dem Ziel einer direkten Wiederverwendung (z. B. Gebrauchtersatzteile aus Altfahrzeugen) oder einer Wiederverwendung nach Aufarbeitung (Austauschteilproduktion) der Vorbehandlung zugerechnet werden.

2.3 Mechanische und chemische Aufbereitung

Die Aufbereitung ist der Prozessabschnitt, in welchem durch Aufschluss, Klassierung und Sortierung sowie in Einzelfällen auch mittels chemischer Prozesse aus den ggfs. nach Stufe 2 vorbehandelten Abfällen Sekundärrohstoffe gewonnen werden und die in nachfolgenden Prozessen endgültig zu neuen Grund- und Werkstoffen verarbeitet werden (Stufe 4). Je nach Komplexität des Abfallstroms, von Alterungs- sowie Verschmutzungseffekten einerseits und den Anforderungen der Weiterverarbeitung der Sekundärrohstoffe an deren Qualität andererseits erfolgt die Aufbereitung unterschiedlich tiefgreifend.

Komplette Altprodukte (Kühlschränke, Elektrogeräte usw.) und demontierte Komponenten bestehen aus verschiedenen Werkstoffen und Werkstücken, die durch vielfältige Verbindungstechniken (Schraub-, Niet-, Schweiß-, Klebverbindungen u. a.) miteinander verbunden sind (Abb. 2.1). Dazu kommen oft Beschichtungen der Werkstoffe (Lackierungen, Metallschichten, Kunststoffschichten) und z. T. Verbundwerkstoffe. Unter Verbundwerkstoffen (Abb. 2.1) versteht man Werkstoffe, die aus mehreren Einzelstoffen bestehen, welche zu einem neuen Werkstoff verbunden sind (z. B. Schleifscheiben, Bremsbeläge, glasfaserverstärkte Kunststoffe, Hartmetalle). Unterschieden werden faserverstärkte und partikelverstärkte Verbundwerkstoffe sowie Schichtverbundwerkstoffe (z. B. Sicherheitsglas). Für die spätere Sortierung der Werkstoffe müssen die Werkstoffverbindungen bzw. -verbunde gelöst (aufgeschlossen) werden. *Die Auftrennung (Zerlegung) der vorliegenden Werkstoffverbindungen* kann durch Demontage, Zerschneiden, Brechen, Shreddern, Mahlen, elektrodynamische Fragmentierung oder Trennschweißen erfolgen. Beschichtungen können falls erforderlich chemisch abgelöst, verdampft, abgeschmolzen oder abgebrannt werden. Erst nach dieser Auftrennung – dem sogenannten Aufschluss – ist eine Sortierung der Werkstoffe möglich. Eine unvollständige Auftrennung der Verbindungen bewirkt deshalb zwangsläufig eine entsprechend unvollständige Sortierung. Deshalb ist es erforderlich, den Zerlegungserfolg zu definieren und messtechnisch zu erfassen. Dafür verwendet man den so genannten *Aufschlussgrad*.

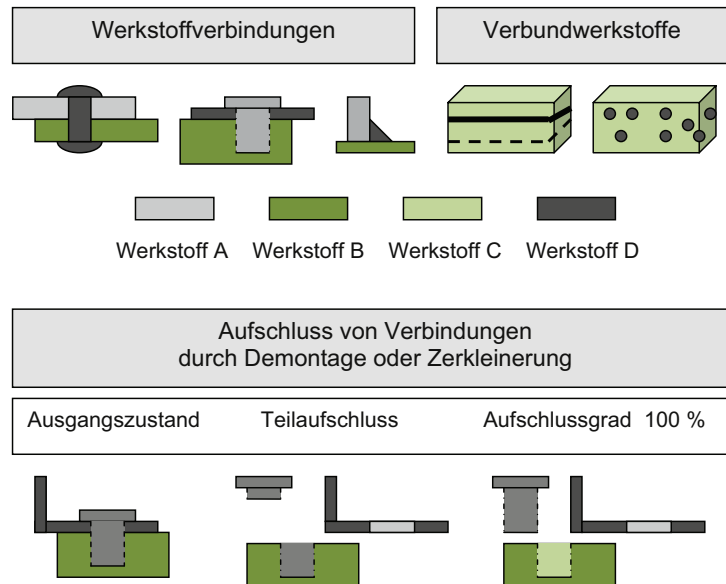


Abb. 2.1 Werkstoffverbindungen, Verbundwerkstoffe und Aufschlussgrad von Werkstoffverbindungen

$$\text{Aufschlussgrad (\%)} = \frac{\text{Werkstoffmasse (vollst. aufgeschlossen)}}{\text{Gesamtwerkstoffmasse}} \times 100$$

Zerlegung und Aufschlussgrad sind in Abb. 2.1 nochmals bildlich erläutert.

Sortierung der Stoffe nach Stoffgruppen

Die Sortierung erfolgt unter Ausnutzung der unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Stoffe. Die wesentlichen Sortierverfahren auf rein physikalischer Basis sind die Dichtesortierung, die Magnetscheidung, die Elektrosortierung einschließlich der Wirbelstromsortierung, die sensorgestützte Sortierung sowie die Sortierung nach der Kornform. Ebenfalls zu den mechanischen Sortierverfahren wird die Flotation gezählt, die aber auf physikalischen und chemischen Eigenschaften und Prozessen basiert. Letztlich sind die Verfahren der chemischen Aufbereitung zu nennen, bei denen z. B. in Lauge- und Aufkonzentrationsprozessen Metallkonzentrate für die abschließende Verwertung in der Metallurgie erzeugt werden. Die physikalischen und physikalisch-chemischen Sortierverfahren setzen nicht nur voneinander getrennt vorliegende Stoffe voraus, sondern vor allem auch bestimmte, für die Sortierverfahren geeignete Stückgrößen und auch Stückformen. Um das zu erreichen, sind die Zerlege- und Zerkleinerungsprozesse für die Verbindungstrennung entsprechend auszuwählen und durch Klassierprozesse (Sieben, Sichten etc.) geeignet zu ergänzen. Neben der Anreicherung der gewünschten Wertstoffe in Konzentraten mit hohem Wertstoffausbringen und möglichst hohen Wertstoffgehalten ist im Hinblick

auf die nachgeschalteten Verwertungsprozesse auch der Gehalt an Störstoffen (siehe Abschn. 1.5) in ausreichendem Maße zu reduzieren.

Im Gegensatz zu Primärrohstoffen, die fast immer aus dreidimensional ausgedehnten, intensiv und kompakt miteinander verwachsenen Partikeln bestehen, können in Abfällen zusätzlich ein- oder zweidimensional ausgedehnte Komponenten (z. B. Fasern oder Folien), Hohlkörper (wie Flaschen oder Dosen) oder beschichtete bzw. laminierte Verbände auftreten. Zudem ist die Spannweite bezüglich Härte, Sprödigkeit/Duktilität oder Elastizität um ein vielfaches höher als bei Primärrohstoffen. Dabei ist die Vielfältigkeit und Komplexität bei Produktionsabfällen in der Regel geringer als bei Altprodukten bzw. Altproduktsammlungen. Produktionsabfälle fallen zum Einen in kompakter Form als Formkörper, Rohre, Bleche, Profile, Gussstücke, Platten, Steine usw. an. Zum Anderen ist mit leicht verformbaren und sehr feinteiligen Abfällen wie Gummipartikeln, Folien, Drähten, Litzen, Papier, Faserstoffen, Leder, Spänen, Schleifschlämmen u. a. Formen umzugehen. Altprodukte/Altgeräte (Fahrzeuge, Maschinen, elektrische Geräte usw.), die aus sehr verschiedenen Bauteilen und Werkstoffen aufgebaut sind, weisen in der Regel eine höhere Komplexität auf.

Die Verfahrensstufen der Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung führen zu einer Vermischung der einzelnen Abfallchargen und garantieren dadurch auch die für die Weiterverarbeitung in Stufe 4 erforderliche Homogenisierung.

2.4 Herstellung von Werkstoffen und Grundstoffen

Der letzte Prozessschritt in der Recyclingkette ist das Einbringen und Nutzen von Sekundärrohstoffen in etablierten Produktionsprozessen. Dies können Hüttenprozesse zur Erzeugung von Metallen und Legierungen, Compoundierungsprozesse zur Erzeugung von Kunststoff-Werkstoffen, Prozesse der Glas- oder Papiererzeugung und ähnliches sein. Diese Prozesse zeichnen sich dadurch aus, dass sie Grund- oder Werkstoffe produzieren, die prinzipiell und originär aus Primärrohstoffen hergestellt werden. Werden dabei Sekundärrohstoffe zugesetzt, darf dies nicht zu einer Veränderung der Grund- und Werkstoffqualitäten führen. Können Sekundärrohstoffe in ausreichenden Mengen und Qualitäten bereitgestellt werden, ist es häufig sinnvoll, eine getrennte Verarbeitung der Sekundärrohstoffe einzurichten. Das ist auch dann notwendig, wenn die Sekundärrohstoffe spezielle Verunreinigungen oder Beimengungen (z. B. Legierungskomponenten) enthalten, die zusätzliche Trennverfahren erfordern oder nur spezielle Recyclatqualitäten ermöglichen. Gerade für die Hauptmetalle Stahl/Eisen, Aluminium und Kupfer haben sich deshalb eigene metallurgische Verfahren durchgesetzt. Dies ist auch der Tatsache geschuldet, dass gegenüber Primärrohstoffkonzentraten, die oxidisch, sulfidisch oder anders gebundene Metalle enthalten, hier bereits metallische Phasen vorliegen, für deren Umschmelzen nicht mehr der hohe Energieaufwand für eine Reduktion erforderlich ist. Auch können Legierungselemente, die für die Werkstoffherzeugung wie die Veredelung von Roheisen zu Stahl benötigt werden, häufig aus Sekundärrohstoffen mitgebracht werden.

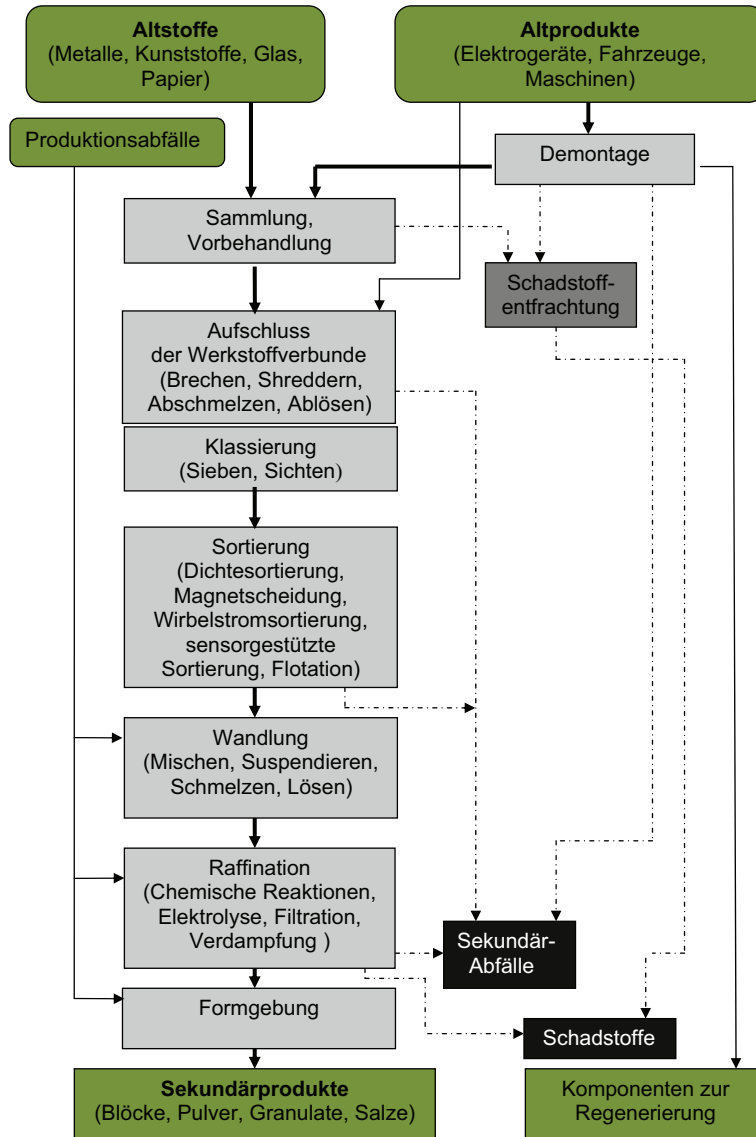


Abb. 2.2 Allgemeines Verfahrensschema des Recyclings

Zwar lassen sich nicht aus allen Sekundärrohstoffen alle Werkstoffqualitäten erzeugen, solange der Markt für die erzeugbaren Qualitäten aber groß genug ist, ist die Basis für eine wirtschaftliche Nutzung gegeben [2.2].

Die beschriebenen Stufen der Vorbehandlung, der Aufbereitung und der Herstellung der sekundären Werkstoffe bzw. Grundstoffe stellen den technologischen Kern der Recyclingtechnik dar, sind stark voneinander abhängig und miteinander verschränkt. In den Hauptteilen II und III dieses Buches wird hierauf detailliert eingegangen.

Beispielhaft ist das allgemeine Verfahrensschema des Recyclings in Abb. 2.2 nochmals dargestellt.

Dabei spielen bewährte Verfahren der mechanischen Aufbereitung von Erzen, Kohlen, Steinen und Erden die überragende Rolle, werden aber durch spezielle Neuentwicklungen für den Abfallbereich ergänzt. Das sind vor allem die grundlegenden Verfahren (Unit Operations) der Zerkleinerung, Klassierung und Stoffsortierung. Häufig können erst nach dieser erfolgreichen Aufbereitung die Prozesse zum Schmelzen, Lösen oder Reinigen effektiv angewandt werden.

Literatur

- 2.1 Moeller, E. (Hrsg.), Handbuch Konstruktionswerkstoffe, Kap. V 3 Recycling, Hanser Verlag München 2014
- 2.2 Worrell, E., Reuter, M. (ed.), Handbook of recycling, Elsevier Inc., 2014