


Technische Grundlagen des Werkstoffrecyclings

Die bei weitem umfangreichste Abfallgruppe sind die Werkstoffe, für die allgemeine technische Grundlagen des Recyclings vorausgeschickt werden können. Die enorme Vielfalt dieser festen Abfälle muss nach Werkstoffgruppen geordnet werden, um daraus technisch und wirtschaftlich sinnvolle Zielprodukte recyceln zu können. Diese Einteilung in *recyclingverträgliche Werkstoffgruppen* ist nur möglich auf Basis guter Kenntnisse der physikalischen und chemischen Eigenschaften der Stoffe und vor allem der grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der möglichen Verfahren zur Stoffverarbeitung sowie deren ökonomischen und ökologischen Auswirkungen. Die für das Recycling entscheidenden physikalischen und chemischen Eigenschaften werden sehr stark von den chemischen Bindungsverhältnissen in den Stoffen bestimmt. In  Abb. 2.1 sind die vier Bindungsformen und die daraus resultierenden Stoffarten und Werkstoffgruppen dargestellt. Die schwächsten Bindungskräfte liegen bei den Polymerwerkstoffen vor, so dass bereits mechanische Prozesse und Erwärmung eine teilweise Zerstörung der Polymere hervorrufen können. Dadurch wird deren Recyclingfähigkeit vermindert. Dagegen sind kovalente Bindungen und Ionenbindungen sehr starke Bindungen, die durch mechanische Prozesse nicht geknackt werden, d. h., Stoffe wie z. B. Oxide oder Silikate bleiben vollständig erhalten. Die Metalle sind chemische Elemente und deshalb durch mechanische und physikalische Prozesse unzerstörbar (Einschränkung Kernspaltung). Die Metalle besitzen auch deshalb eine günstige Recycelbarkeit. Die Werkstoffabfälle fallen überwiegend in kompakter Form als Rohre, Bleche, Profile, Gussstücke, Platten, Verbindungselemente, Federn, Drähte usw. an. Aber auch leicht verformbare und sehr feinteilige Abfälle wie Gummi, Folien, Litzen, Papier, Faserstoffe, Leder, Späne und Schleifschlämme sind zu berücksichtigen. Eine große Gruppe sind außerdem die Altprodukte/Altgeräte (Autos, Maschinen, elektrische Geräte usw.), die aus sehr verschiedenen Bauteilen und Werkstoffen aufgebaut sind. Die in den vorangehenden Abschnitten genannten Zielstellungen, Bedingungen und Anforderungen an Recyclingprozesse bedingen ihrerseits eine bestimmte Aufgabenstellung für die logistischen und technischen Prozesse und die notwendigen Verfahrensstufen. Dieser allgemeine

Ablaufplan wird zweckmäßigerweise in sechs allgemeine Stufen gegliedert.



- **Stufe 1: Sammlung der Altstoffe nach Abfallgruppen**

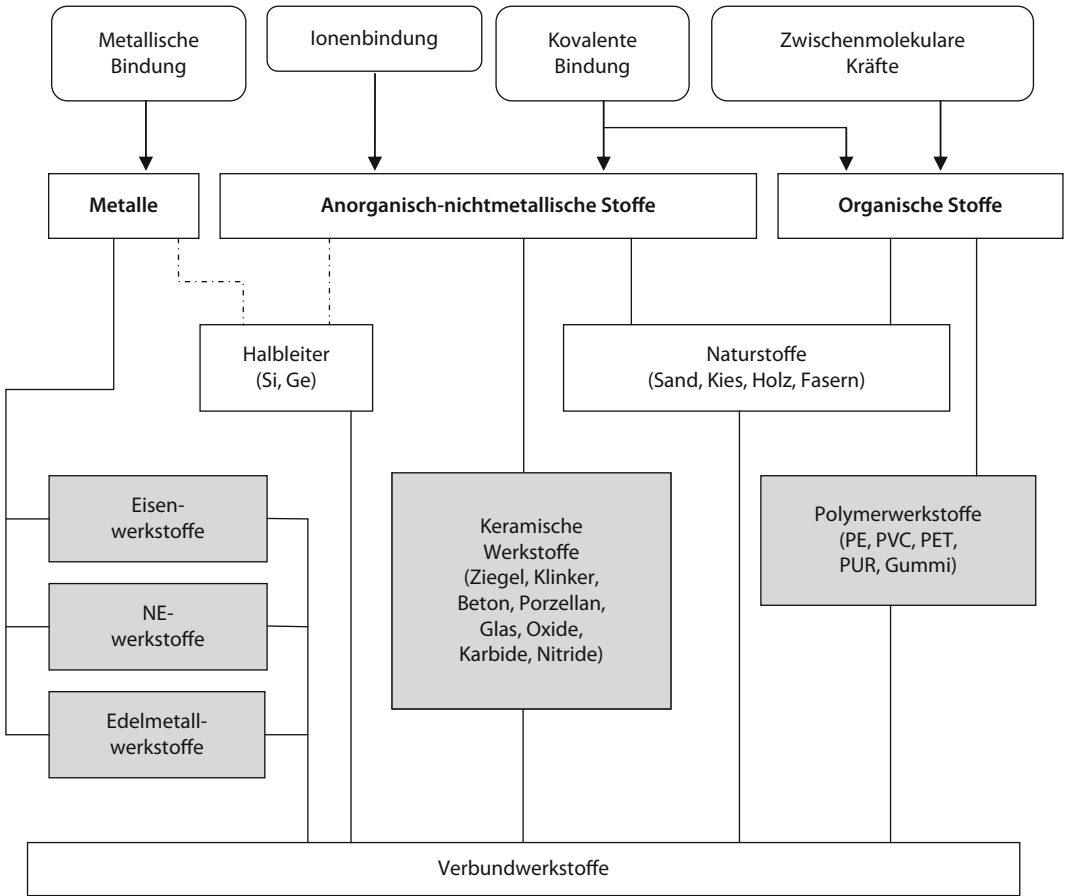
Die getrennte Sammlung nach Abfallgruppen in den Unternehmen und Kommunen trägt als erste Sortierstufe prinzipiell zur Kostensenkung des Recyclings bei. Und diese Kostensenkung kann direkt an die Bevölkerung weitergegeben werden. Bei Unternehmen kann die konsequente Trennung der Altstoffe häufig zu direkten Erlösen bei z. B. Abgabe an den Schrotthandel führen. Aus diesen sachlichen und wirtschaftlichen Gründen sind einige Kenntnisse zu Werkstoffen und zum Recycling in der Bevölkerung und in den Unternehmen unverzichtbar.

- **Stufe 2: Identifizierung des Werkstofftyps**

Eine erste Identifizierung erfolgt bereits beim Sammeln nach Abfallgruppen. Die weiteren Prozesse erfordern aber oft eine sehr detaillierte Unterscheidung verschiedener Werkstoffe. Bei Eisen und Aluminium ist z. B. die Unterscheidung nach verschiedenen Legierungen oder nach Guss- und Knetwerkstoffen notwendig. Die Kunststoffsorten sind ebenfalls zu identifizieren. In einer ersten Stufe kann der Altstoffhandel die Identifizierung noch visuell durchführen. Es stehen dort aber auch manuell handhabbare Analysegeräte (NIR-Messung, Röntgengeräte) zur Verfügung. Bei den komplexen Altprodukten/Altgeräten ist die Identifizierung von Werkstoffen oft erst nach ersten Demontage- oder Trennoperationen möglich oder sinnvoll (Kühlschrank, PKW usw.).

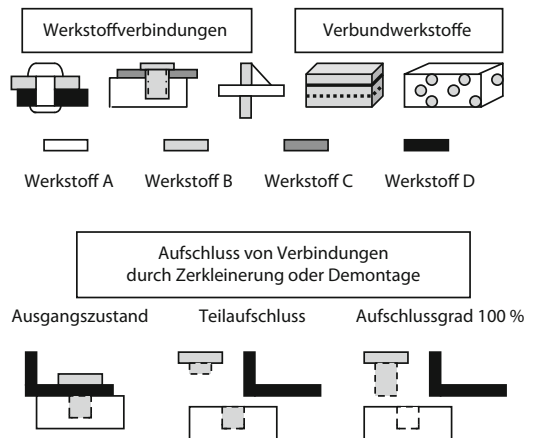
- **Stufe 3: Separierung der Werkstoffsorten in recyclingverträgliche Werkstoffgruppen durch Zerlegung und Sortierung**

Die Altprodukte (Kühlschränke, PKWs usw.) bestehen aus verschiedenen Werkstoffen und Werkstücken, die durch vielfältige Verbindungstechniken (Schraub-, Niet-, Schweiß-, Klebverbindungen u. a.) miteinander verbunden sind ( Abb. 2.2). Dazu kommen oft Beschichtungen der Werkstoffe (Lackierungen, Metallschichten, Kunststoffschichten) und z. T. Verbundwerkstoffe. Unter Verbundwerkstoffen ( Abb. 2.2) versteht man Werkstoffe, die

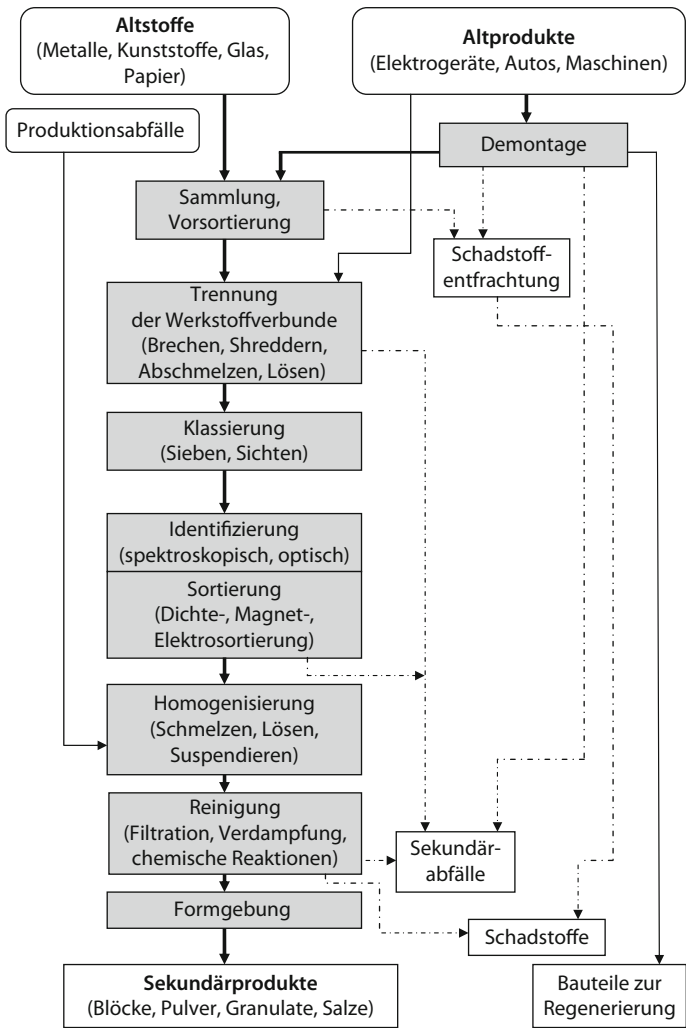


■ **Abb. 2.1** Einteilung der Feststoffe nach chemischen Bindungsverhältnissen und Zuordnung der Stoffgruppen und Werkstoffgruppen (NE = Nichteisenmetalle).

aus mehreren Einzelstoffen bestehen, die zu einem neuen Werkstoff verbunden sind (z. B. Schleifscheiben, Bremsbeläge, glasfaserverstärkte Kunststoffe, Hartmetalle). Man unterscheidet 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, Breschen, Mahlen oder Trennschweißen erfolgen. Beschichtungen können, falls erforderlich, chemisch abgelöst, verdampft, abgeschmolzen oder abgebrannt werden. Die Auftrennung von Verbundwerkstoffen ist allerdings sehr kompliziert oder z. T. unmöglich. Erst



■ **Abb. 2.2** Werkstoffverbindungen, Verbundwerkstoffe und Aufschlussgrad von Werkstoffverbindungen [7].



■ Abb. 2.3 Allgemeines Verfahrensschema des Werkstoffrecyclings [7].

nach dieser Verbindungsauftrennung (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 sog. *Aufschlussgrad* [6].

$$\text{Aufschlussgrad} = \frac{\text{aufgeschlossene Werkstoffmasse}}{\text{Gesamtwerkstoffmasse}}$$

Zerlegung und Aufschlussgrad sind in ■ Abb.2.2 nochmals bildlich dargestellt.

Sortierung der Stoffe nach Stoffgruppen Die Sortierung erfolgt unter Ausnutzung der unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Stoffe. Die wesentlichen Sortierverfahren auf physikalischer Basis sind Dichtesortieren, Magnetscheiden, Elektrosortieren und Wirbelstromsortieren. Diese Sortierverfahren setzen nicht nur voneinander getrennte Stoffe voraus, sondern vor allem auch bestimmte geringe Stückgrößen und auch Stückformen. Um das zu erreichen, sind die Zerlege- und Zerkleinerungsprozesse für die Verbindungstren-

nung entsprechend auszuwählen und durch Klassierprozesse (Sieben) geeignet zu ergänzen. In der Sortierstufe besteht auch häufig die Aufgabe, bestimmte Schadstoffe (Bleiverbindungen, chlorierte organische Verbindungen, Öle, Lösemittel u. a.) abzutrennen und so aus dem weiteren Verarbeitungsprozess herauszuhalten. Prinzipiell sind Schadstoffe so früh wie möglich aus den Altprodukten oder Altstoffen zu entfernen, und dies kann schon in der Sammel- oder Identifizierungsstufe vorteilhaft sein. Für diese spezielle Aufgabe der Heraushaltung von Schadstoffen aus weiteren Verarbeitungsstufen hat man den Begriff der *Schadstoffentfrachtung* geprägt. Das Sortieren lässt sich bei wenigen speziellen Materialkombinationen auch durch Verdampfen oder Ablösen (physikalische, chemische oder elektrochemische Löseverfahren) erreichen.

■ Stufe 4: Homogenisierung der Sortierprodukte und Massenvergrößerung

Die weitere getrennte Verarbeitung der Stoffgruppen kann wirtschaftlich nur mit größeren homogenen Massen erfolgen. Auch im Hinblick auf die endgültigen Zielprodukte sind immer bestimmte Losgrößen mit gleichmäßiger Qualität anzustreben. Die Homogenisierung ist am günstigsten durch Mischprozesse im fluidisierten Zustand zu erreichen. Dieser fluidisierte Zustand kann bei Gläsern, Metallen und Thermoplasten durch *Aufschmelzen* erreicht werden. Er ist aber auch durch *Auflösen* (Metalle, Kunststoffe) oder durch *Suspendieren* in Wasser (Papier) realisierbar.

■ Stufe 5: Abtrennung von Verunreinigungen und Erzeugung der Endqualität

Bei den vorliegenden Verunreinigungen muss man zwei Gruppen unterscheiden. Eine erste Grup-

pe hat eine negative Auswirkung auf die Qualität des Zielproduktes und ist deshalb aus Qualitätsgründen abzutrennen (z. B. die Druckfarben beim Papierrecycling). Kritischer ist eine zweite Gruppe der speziellen Schadstoffe, die auf Grund ihrer Giftwirkung in der Natur und in Recyclingprodukten zu entfernen sind und einer Sondermüllablagerung oder Inertisierung zugeführt werden müssen. Die Abtrennung von Verunreinigungen kann in dem bereits in Stufe 4 erläuterten fluidisierten Zustand z. B. durch Filtration, Verdampfung, Ausfällung, chemische oder elektrochemische Reaktionen sehr effektiv durchgeführt werden.

■ Stufe 6: Herstellung marktfähiger Formen

Übliche vermarktungsfähige Formen von *Recyclingprodukten* sind Metallblöcke, Metallpulver, Kunststoffgranulat, Salze, Oxide, Flüssigkeiten und Pulver.

Das allgemeine Verfahrensschema des Werkstoffrecyclings ist in ■ Abb. 2.3 nochmals dargestellt. Dabei spielen offensichtlich bewährte Verfahren der mechanischen Aufbereitung von Erzen, Kohlen, Steinen und Erden die überragende Rolle. 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.