

1

Einführung

Das Thema dieses Buches ist das Mechanische Recycling, auch als physikalisches oder werkstoffliches Recycling bezeichnet. Ziel ist es, feste Abfälle in Wertstoffe und Reststoffe zu trennen. Die Wertstoffe werden in den industriellen Stoffkreislauf zurückgeführt, während die Reststoffe durch nachfolgende Recyclingprozesse weiter aufbereitet oder endgültig entsorgt werden.

Die Geschichte des Recyclings reicht bis in die Antike zurück. Schon die frühen Hochkulturen praktizierten die Wiederverwertung von Materialien, um Ressourcen zu schonen und Abfälle zu minimieren. Im alten Mesopotamien und in Ägypten wurden Metalle wie Bronze und Kupfer eingeschmolzen, um daraus neue Werkzeuge und Waffen herzustellen. Auch in der römischen Welt spielte Recycling eine wichtige Rolle: Glas wurde gesammelt, eingeschmolzen und zu neuen Gegenständen verarbeitet. Auch Keramik und Bauschutt wurden wiederverwertet.

Im Mittelalter wurde Recycling vor allem aus wirtschaftlichen Gründen betrieben: Der Erlös für die Recyclingprodukte deckte den Aufwand zur Sammlung und Aufbereitung. Metalle, vor allem Zinn, Kupfer und Eisen, wurden wieder eingeschmolzen und umgeformt. Lumpensammler zogen durch die Städte und sammelten alte Stoffe, die zur Herstellung von Papier verwendet wurden. Holz war knapp, sodass in manchen Regionen bereits Altpapier zur Herstellung neuer Papierprodukte verwendet wurde. Auch Glasflaschen wurden häufig gesammelt und wiederverwendet.

Mit der Industrialisierung im 19. Jahrhundert stieg der globale Rohstoffverbrauch rapide an und stellte die Abfallwirtschaft vor neue Herausforderungen. In den Städten wurde der Müll zu einem ernsthaften Problem und eine geordnete Abfallwirtschaft wurde erforderlich, in der die Wertstoffe recycelt und die Reststoffe entsorgt wurden, zumeist in Deponien.

In vielen europäischen Ländern entstanden Schrottplätze, auf denen Metalle wie Kupfer, Zinn und Eisen wiederverwertet wurden. Auch Knochen wurden gesammelt und zur Herstellung von Leim oder Dünger verwendet. In England begann man, Baustoffe aus Asche und Koksrückständen herzustellen. Während der Weltkriege gewann das Recycling nochmals enorm an Bedeutung. Rohstoffe waren knapp, sodass Metalle, Gummi, Textilien und sogar Papier aktiv gesammelt und wiederverwertet wurden. Die Bevölkerung wurde aufgefordert, Altmaterialien zu sammeln, um die Kriegswirtschaft zu unterstützen.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wuchs das Umweltbewusstsein. Gesetzliche Regelungen und technische Innovationen führten zur Entwicklung moderner Recyclingverfahren. Programme zur Mülltrennung und das Konzept der Kreislaufwirtschaft entstanden.

1.1 Paradigmenwechsel: Von der Entsorgungs- zur Kreislaufwirtschaft

1.1.1 Von der linearen zur zirkulären Wirtschaftsweise

Traditionell erfolgte die Abfallwirtschaft linear: Rohstoffe wurden gewonnen, genutzt und schließlich entsorgt. Bei diesem „Take-Make-Dispose“-Modell sind Rohstoffeinsatz und Abfallproduktion direkt gekoppelt: Eine Tonne Rohstoffe führt zu einer Tonne Abfall. Langfristig führt dies erstens zu Ressourcenverknappung und zweitens zu steigenden Abfallmengen.

Deponien und Müllverbrennungsanlagen dominierten lange Zeit die Abfallwirtschaft. Die massiv ansteigende Vielfalt der im 20. Jahrhundert verwendeten Materialien bildete sich in einer immer komplexeren Abfallzusammensetzung ab und führte zu großen Mengen von toxikologisch relevanten „Sonderabfällen“. Ein weiterer Treiber der Modernisierung der Abfallwirtschaft wurde damit, neben dem Ressourcenschutz, der Schutz der Umwelt vor Giftstoffen.

Erfreulicherweise wird die Weltbevölkerung immer wohlhabender, was sich in einem steigenden Bruttoinlandsprodukt niederschlägt. Allerdings korreliert der Anstieg des Bruttoinlandsprodukts in einer linearen Abfallwirtschaft mit dem Ressourcenverbrauch, der sich wiederum in einem steigenden Abfallaufkommen proportional niederschlägt.

Mehr Wohlstand bedeutet mehr Konsum und damit mehr Ressourcenverbrauch und mehr Abfall (Abb. 1.1). Hier setzt die Kreislaufwirtschaft an, deren Kerngedanke

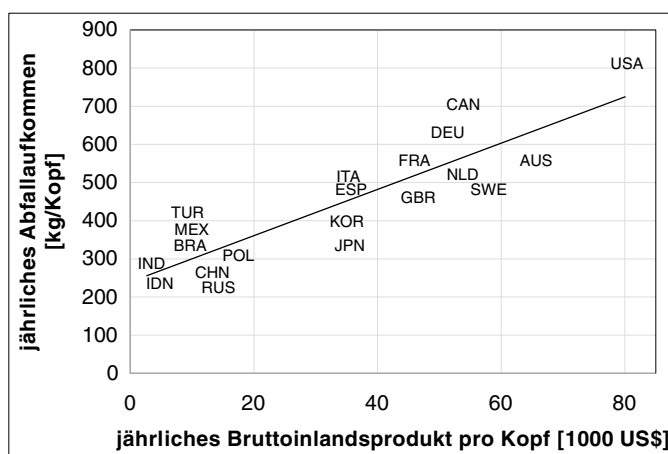


Abb. 1.1 Daten von 20 Industrie- und Schwellenländern. Das Abfallaufkommen steigt mit dem Bruttoinlandsprodukt (Basis 2024).

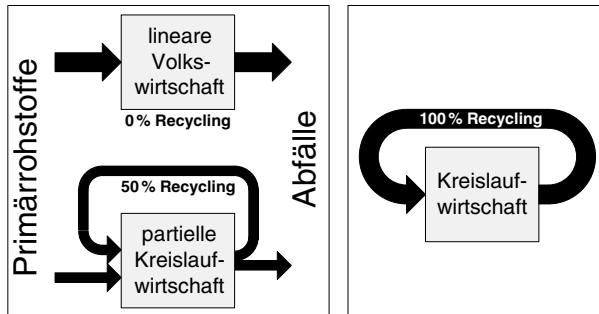


Abb. 1.2 (links) Lineare Volkswirtschaft und partielle Kreislaufwirtschaft. (rechts) 100% Kreislaufwirtschaft.

es ist, Rohstoffe durch Wiederverwendung, Reparatur und Recycling möglichst lange im Wirtschaftskreislauf zu halten (Abb. 1.2). Dies erfordert technologische Innovationen, neue Geschäftsmodelle und ein Umdenken in der Gesellschaft.

Ein weiterer wesentlicher Treiber für den Wandel von der Entsorgungs- zur Kreislaufwirtschaft ist der technologische Fortschritt, insbesondere in den Bereichen Recycling, Materialwissenschaften und Digitalisierung. Innovative Sortiertechniken und neue Materialdesigns ermöglichen eine immer effizientere Rückgewinnung von Rohstoffen. Digitale Lösungen wie Rückverfolgbarkeitssysteme und intelligente Recyclinghöfe helfen, Recyclingprozesse zu optimieren. Auch die Gesetzgebung spielt eine wichtige Rolle. In der EU wurden mit dem „Green Deal“ und dem „Circular Economy Action Plan“ verbindliche Vorgaben zur Förderung der Kreislaufwirtschaft geschaffen.

Der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft hat weitreichende wirtschaftliche Auswirkungen. Unternehmen können durch eine effizientere Nutzung von Ressourcen Kosten sparen und neue Märkte erschließen. Gleichzeitig entstehen neue Geschäftsmodelle, beispielsweise im Bereich „Product as a Service“, bei dem Unternehmen ihre Produkte nicht mehr physisch verkaufen, sondern die Nutzung als Dienstleistung anbieten (zum Beispiel Mietmodelle für elektronische Geräte). Zur Orientierung: Der Umsatz der Recyclingindustrie liegt in den Industrienationen bei etwa einem Prozent des Bruttoinlandsprodukts.

Gesellschaftlich erfordert die Transformation ein Umdenken sowohl bei Unternehmen als auch bei Verbrauchern. Bildung und Bewusstseinsbildung spielen dabei eine zentrale Rolle. Eine gesetzlich verordnete Kreislaufwirtschaft stemmt sich jedoch gegen die Grundlagen der Marktwirtschaft und kann daher sehr ineffizient sein (siehe Abschnitt 1.3). Erschwerend kommt hinzu, dass das Thema Kreislaufwirtschaft in der politischen Diskussion ideologisch aufgeladen ist. Das führt dazu, dass auch wirtschaftlich nicht tragfähige Maßnahmen durchgesetzt werden. Es gibt zahlreiche Beispiele für umweltpolitisch motivierte Eingriffe, bei denen viel Geld für Maßnahmen aufgewendet wurde, deren ökologischer Nutzen zwar intuitiv plausibel erschien, die aber objektiv betrachtet fragwürdig waren. Eine ausgewogene Kreislaufwirtschaft sollte also immer alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit gleichermaßen berücksichtigen: Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft. Der

Paradigmenwechsel von einer linearen Entsorgungswirtschaft hin zu geschlossenen Stoffkreisläufen ist zwar unverzichtbar, aber mit „Augenmaß“ umzusetzen. Technologische Innovationen, gesetzliche Maßnahmen und gesellschaftliches Engagement, bei gleichzeitiger Berücksichtigung finanzieller Limitationen, sind entscheidende Faktoren für das Gelingen dieser Transformation. Nur so führt die Kreislaufwirtschaft zu nachhaltigem Wirtschaftswachstum bei gleichzeitigem Umwelt- und Ressourcenschutz.

1.1.2 Recycling und Ökologie

In der Regel ist die Bereitstellung von Industrierohstoffen (z. B. Metallen) durch Recycling ökologisch wesentlich besser als durch die Aufbereitung von Primärrohstoffen. Die meisten Primärrohstoffe durchlaufen im Vergleich zum Recycling eine wesentlich längere Verarbeitungskette. Dabei benötigen sie unter anderem mehr Energie und Wasser und geben mehr CO₂ und Schadstoffe an die Umwelt ab. Die durch Recyclingprozesse verursachten Umweltbelastungen liegen meist nur im Bereich von 5–20% der Umweltbelastungen durch die Primärrohstoffverarbeitung. Die Differenz der Umweltbelastungen zwischen der Primärrohstoffverarbeitung (z. B. aus Erdöl) und dem Recycling (z. B. von PET-Flaschen) wird dem Recycling durch *Ökobilanzen* als ökologischer Bonus gutgeschrieben. Die in der Recyclingbranche verwendete Terminologie ist uneinheitlich und verwirrend. Im Rahmen dieses Buches werden folgende Definitionen verwendet:

- Ein *Rohstoff* ist das Ausgangsmaterial für die Herstellung von *Industrierohstoffen*. Er kann ein natürlicher *Primärrohstoff* (Erdöl, Erz, Holz) oder ein *Sekundärrohstoff* mit Abfallcharakter (Elektronikschrott, Mischabbruch) sein.
 - Der Prozess, der einen Rohstoff in einen Industrierohstoff umwandelt, ist entweder eine *Primärrohstoffverarbeitung* oder ein *Recyclingprozess*. Beispiel Primärrohstoffverarbeitung: Verarbeitung eines natürlichen Rohstoffes (z. B. Erz zu Roheisen, Erdöl zu Naphtha).
 - In einem anschließenden Verarbeitungsschritt werden Industrierohstoffe zu branchenspezifischen *Grundstoffen* veredelt. Beispiele:
 - Roheisen (Industrierohstoff) zu Stahl (Grundstoff für z. B. Maschinenbauindustrie).
 - Naphtha (Industrierohstoff) zu Polyethylengranulat (Grundstoff für die Kunststoffverarbeitung).
- Bei Recyclingprozessen werden Sekundärrohstoffe häufig in einem Schritt zu Grundstoffen verarbeitet. Dafür ist eine möglichst sortenreine Sammlung von Abfällen vorteilhaft. Beispiel: Verarbeitung von hochwertigem Stahlschrott zu Baustahl.
- Industrierohstoffe und Grundstoffe, die aus Primärrohstoffen bzw. Sekundärrohstoffen gewonnen wurden, werden als *Primär-* bzw. *Sekundärrohstoffprodukte* (=Recyclingprodukte) bezeichnet.

In Tab. 1.1 sind einige Beispiele für die Produktionsketten von Primär- und Sekundärrohstoffen zu den korrespondierenden Produkten aufgeführt.

Tab. 1.1 Beispiele für die Produktionsketten der Grundstoffbereitstellung.

	Primärrohstoffe	Sekundärrohstoffe
Rohstoff	Erdöl Eisenerz Kies	PET-Flaschen Eisenschrott Mischabbruch
Industrierohstoff	Naphta Roheisen Waschkiesfraktionen	PET-flakes aufbereiteter Stahlschrott Betongranulat Ziegelgranulat
Grundstoff	Polyethylengranulat Stahl zertifizierter Betonzuschlag	PET-Regranulat RC-Stahl zertifizierter RC-Baustoff

1.2 Bedeutung des Recyclings für die Abfallwirtschaft

Durch Recycling werden Kunststoffe, Metalle, mineralische und andere Wertstoffe aufbereitet und in den Produktionskreislauf zurückgeführt. Dadurch wird die Abfallmenge, die verbrannt oder deponiert werden muss, reduziert und die Umweltbelastung minimiert. Der Bezug des Recyclings zu anderen Bereichen der Abfallwirtschaft kann anhand der *Abfallpyramide* veranschaulicht werden. Diese dient als Faustregel für die Prioritäten in der Abfallbewirtschaftung. Die Rangfolge richtet sich nach dem ökologischen Nutzen, wobei die Abfallvermeidung die höchste und die Deponierung die niedrigste Priorität hat (Abb. 1.3). Das Recycling steht an zweiter Stelle und hat damit Vorrang vor allen anderen Entsorgungsvorfahren für nicht vermeidbare Abfälle.

Innerhalb des Recyclings gibt es eine Abstufung in Up- und Downcycling:

- Upcycling führt zu einer Aufwertung des Ausgangsmaterials. Beispiele hierfür sind die Verwendung von Kaffeesatz zur Herstellung von Kaffeetassen oder das Design hochwertiger Modeaccessoires aus Textilabfällen. In der Praxis sind Beispiele für erfolgreiches Upcycling vor allem kreative Kuriositäten, sodass die entsprechenden Stoffströme im Vergleich zu denen des Downcyclings vernachlässigbar sind.
- Beim Downcycling werden Materialien durch Recycling in minderwertigere Produkte umgewandelt. Dies ist häufig bei Kunststoffen oder Papier der Fall, deren Bestandteile (Makromoleküle, Fasern) durch wiederholtes Recycling an Qualität verlieren. Ebenso bei mineralischen Abfällen, deren Recyclingprodukte meist noch Restgehalte an Schadstoffen enthalten. Zusammengefasst: Recycling ist de facto Downcycling.

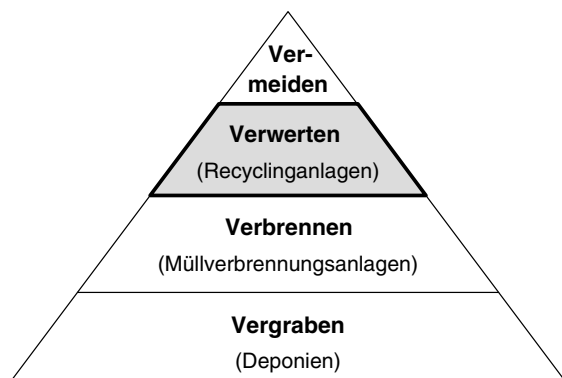


Abb. 1.3 Stellung des Recyclings in der Abfallpyramide. Für unvermeidbare Abfälle hat Recycling die höchste Priorität.

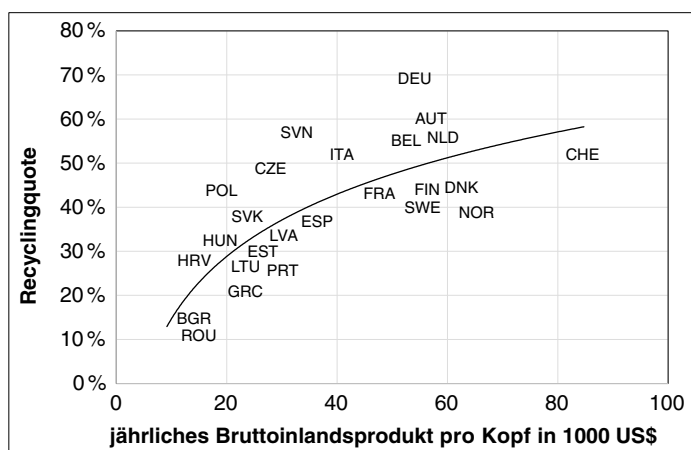


Abb. 1.4 Daten ausgewählter europäischer Staaten. Nicht nur die Abfallmenge steigt mit höherem Bruttoinlandsprodukt, sondern auch die Recyclingquote. Nur reiche Länder können sich eine Kreislaufwirtschaft leisten (Basis 2024).

Ein weiteres wesentliches Argument für die Bedeutung des Recyclings ist seine wirtschaftliche Relevanz. In vielen Ländern ist die Recyclingwirtschaft ein bedeutender Wirtschaftszweig, der Arbeitsplätze schafft und innovative Technologien fördert. Moderne Recyclinganlagen optimieren kontinuierlich ihre Prozesse, um die Qualität der Recyclingprodukte zu verbessern und neue Anwendungsfelder zu erschließen.

Gleichzeitig unterstützt die Kreislaufwirtschaft eine nachhaltige Entwicklung, indem sie Unternehmen und Verbraucher dazu anregt, Ressourcen effizienter zu nutzen. Abb. 1.4 zeigt, dass die Recyclingquote mit steigendem Bruttoinlandsprodukt zunimmt. Damit relativiert sich die Aussage aus Abb. 1.1, die den Anstieg des Abfallaufkommens mit dem Bruttoinlandsprodukt darstellt. Reiche Länder produzieren zwar mehr Abfall, entsorgen ihn aber wesentlich umweltgerechter als ärmere Länder, insbesondere durch Recycling und Verbrennung anstatt durch Deponierung. Die Belastung der Umwelt durch die viel höhere Abfallmenge in den Industrieländern wird durch das forcierte Recycling und die geregelte Abfallverbrennung mit Energienutzung mehr als kompensiert. Per saldo belasten daher Länder mit

hohem Bruttoinlandsprodukt trotz größerer Abfallmengen die Umwelt mit ihren Abfällen weniger als Länder mit niedrigem Bruttoinlandsprodukt.¹

Die Marktpreise für die Recyclingprodukte lassen eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit des Recyclings der verschiedenen Materialgruppen zu. Zur größenordnungsmäßigen Orientierung dient die folgende Liste, in welcher der Erlös für Recyclingaluminium mit 100 % normiert ist:

Kupfer:	500 %
Aluminium:	100 %
Edelstahl:	100 %
Kunststoffgranulat:	100 %
Stahl:	10 %
Recyclingpapier:	10 %
Kiessand:	1 %

Es liegt auf der Hand, dass hochpreisige Materialien besonders engagiert recycelt werden (z. B. Edelmetalle). Das Recycling erfordert aber auch eine entsprechende Infrastruktur. Industriemetalle wie Eisen, Kupfer und Aluminium werden praktisch auf jedem Schrottplatz der Welt zu Tagespreisen aufgekauft und in die bestehenden Prozessketten der Metallerzeugung zurückgeführt. Je höher der im regionalen Schrotthandel erzielte Umsatz, desto besser die Recyclinginfrastruktur und desto höher die Recyclingquote (Abb. 1.5). Interessanterweise folgt der Rohstoff Papier in etwa dem gleichen Trend wie die Metalle.

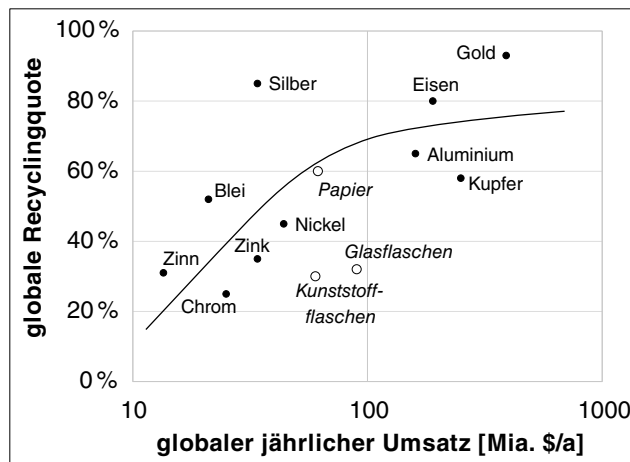


Abb. 1.5 Umsatz vs. Recyclingquote. Materialien, die global in großen Mengen und/oder zu hohen Preisen umgesetzt werden, haben hohe Recyclingquoten (Basis 2024).

1 Achtung: Diese Aussage gilt nur für die **Umweltschäden durch die Abfallentsorgung**. Konsumseitig, also inklusive den **Umweltschäden durch die Herstellung der konsumierten Produkte**, belasten die reicheren Länder die Umwelt sehr viel mehr als die ärmeren Länder!

Dagegen sind die Recyclingquoten z. B. bei Glas- und Kunststoffflaschen trotz des weltweit hohen Absatzes überraschend niedrig. Die Gründe dafür sind vielfältig. Ein wesentlicher Unterschied zu Metallen und Papier besteht darin, dass das Recycling von Glas und Kunststoffen zwar ökologisch vorteilhaft, aber wesentlich teurer ist als das von Metallen. Ein Kostentreiber ist der Umstand, dass bei Glas und Kunststoff die Farbe ein wesentliches Qualitätsmerkmal darstellt (insbesondere hohe Transparenz) und schon geringste Verunreinigungen die Verwertbarkeit des Recyclinggranulats einschränken. Das Kunststoffrecycling ist auch deshalb teuer, weil aufgrund der geringen Dichte von Kunststoffflaschen die Transportkosten etwa 5-mal höher sind als bei den wesentlich schwereren Materialien wie Metallen, Papier und Glas. Das Recycling von Glas- und Kunststoffflaschen ist daher meist nicht „marktgetrieben“, sondern es wird durch gesetzliche Vorgaben erzwungen. Ein ökologisch sinnvolles, aber teures, gesetzlich erzwungenes Recycling ist praktisch nur in Industrieländern durchsetzbar (vgl. Kap. 1.3.2). Dies bezieht sich insbesondere auf die Sammlung und das Recycling von Kunststoffen.

Ein wesentlicher wirtschaftlicher Treiber zur Förderung des Recyclings ist heute die zunehmende Verknappung von Deponieraum, insbesondere in dicht besiedelten Regionen. Diese Problematik ist häufig nicht ökologisch oder geologisch begründet, sondern gesellschaftlicher Natur. Die Bevölkerung erkennt zwar grundsätzlich die Notwendigkeit von Deponien an, wehrt sich aber vehement gegen deren Errichtung in unmittelbarer Nähe – ein Phänomen, das unter dem Begriff „Not in My Backyard“ (NIMBY) bekannt ist. Diese ablehnende Haltung führt dazu, dass der Bau neuer Deponien immer schwieriger wird und die bestehenden Deponien zunehmend an ihre Kapazitätsgrenzen stoßen.

Dort wo Deponieraum eine knappe Ressource darstellt, z. B. in unmittelbarer Umgebung von Städten, steigen die Kosten für die Abfallablagerung. Dieser Preisanstieg begünstigt wiederum die Wirtschaftlichkeit alternativer Entsorgungswege: Recycling wird marktwirtschaftlich attraktiver. Dieser Aspekt betrifft besonders die Aufbereitung von Bauabfällen. Das Bauabfallrecycling ist wegen der niedrigen Produkterlöse im Vergleich zu Metallen oder Kunststoffen im Allgemeinen zwar eher „Low-Tech“ und entsprechend kostengünstig. Wo allerdings NIMBY-bedingte hohe Deponiepreise durchschlagen, werden zur Minimierung der zu entsorgenden Rückstände durchaus auch Hightech-Anlagen zur Bauschuttaufbereitung betrieben.

1.3 Grenzen des Recyclings

Recycling reduziert den Rohstoffverbrauch, spart Energie, vermindert Umweltbelastungen und bietet wirtschaftlich attraktive Perspektiven. Was jedoch häufig in der politischen Diskussion vergessen wird: Auch das Recycling hat Grenzen.

1.3.1 Wirtschaftliche Grenzen

Zwar steht das Recycling in der Rangfolge der Abfallpyramide vor der Verbrennung und der Deponierung, sehr hohe Recyclingraten führen jedoch zu untragbaren

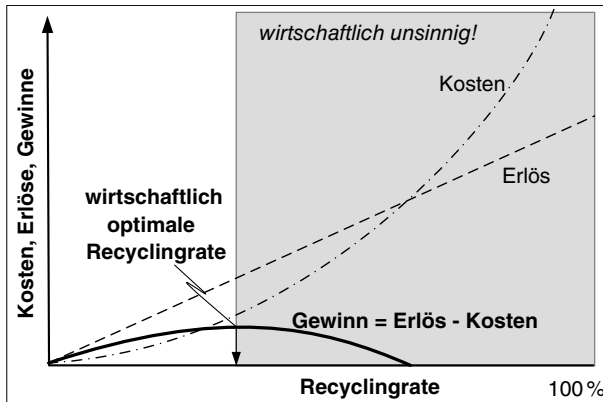


Abb. 1.6 Der „wirtschaftliche Gewinn“ durchläuft mit zunehmender Recyclingrate ein Maximum (wirtschaftliches Optimum) und geht danach in den negativen Bereich über. 100 % Recycling ist nicht wirtschaftlich tragfähig.

Kosten. Wie in Abb. 1.6 dargestellt, steigen die Erlöse aus dem Verkauf der Wertstoffe proportional mit der Recyclingrate. Die Kosten der stofflichen Verwertung steigen jedoch überproportional – je näher die Verwertungsrate an 100% heranrückt, desto aufwendiger ist die Behandlung pro Tonne Wertstoff und desto höher sind die spezifischen Kosten („zunehmende Grenzkosten“). Der Gewinn ergibt sich aus dem Erlös abzüglich der Kosten. Er steigt zunächst an, durchläuft ein Optimum und fällt bei hohen Recyclingraten wieder ab. Oberhalb einer bestimmten Recyclingrate ist der akkumulierte Gewinn nicht nur aufgezehrt, sondern er wird sogar negativ (Verlust). Würde man das Recycling der Marktwirtschaft überlassen, würde sich die Recyclingquote auf das ökonomische Optimum einpendeln. Dort, wo die Kosten des Recyclings niedriger sind als die Kosten der Primärrohstoffverarbeitung, funktioniert das Recycling sogar mit sehr hohen Rückgewinnungsraten allein aufgrund marktwirtschaftlicher Mechanismen.

1.3.2 Ökologische Grenzen

Bei der Gewinnung von Primärrohstoffen entstehen neben den „internen“ Produktionskosten auch „externe“ Kosten für die verursachten Umweltschäden (z. B. CO₂-Emissionen, Schadstoffbelastungen von Boden, Luft und Wasser ...). Diese externen Kosten werden in der Regel auf die Allgemeinheit abgewälzt, sodass der betriebswirtschaftliche Gewinn der Unternehmen zum Teil auf Kosten der Gesellschaft erzielt wird. Um dies zu verhindern, erhöht der Staat – völlig zu Recht – durch Umweltgesetze die internen Produktionskosten „künstlich“, sodass zumindest ein Teil der externen Kosten auf die Verursacher verschoben und damit durch die Unternehmen „internalisiert“ werden. Diese geben die durch zusätzliche Umweltauflagen höheren Produktionskosten über die Preise an die Konsumenten weiter, was zu Problemen führt, wenn konkurrierende (ausländische) Unternehmungen keine entsprechenden Umweltauflagen einhalten müssen.

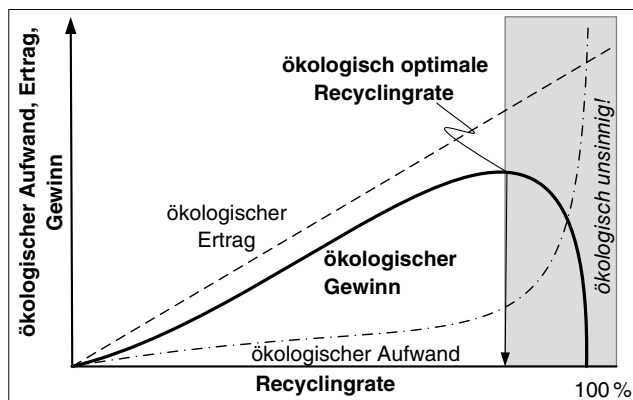


Abb. 1.7 Auch der „ökologische Gewinn“ durchläuft mit zunehmender Rückgewinnungsrate ein Maximum (ökologisches Optimum) und fällt danach in den negativen Bereich. Recyclingraten höher als das ökologische Optimum sind daher ökologisch unsinnig.

Eifrige Umweltpolitiker sollten nicht vergessen, dass auch die getrennte Sammlung ausgewählter Abfallfraktionen und deren Verwertung industrielle Prozesse sind, die Ressourcen verbrauchen und Schadstoffe freisetzen (z. B. CO₂-Emissionen durch Transport, elektrische Energie, Chemikalieneinsatz, Wasserverbrauch ...). Dies kann – ganz abgesehen von den enormen Kosten anspruchsvoller Recyclingziele – zu einem ökologischen Dilemma führen. Bei exzessiv hohen Recyclingquoten übersteigt der spezifische ökologische Aufwand zur Bereitstellung der Recyclingprodukte den ökologischen Aufwand für Primärrohstoffprodukte. Die Ökobilanz kippt dann in den negativen Bereich (Abb. 1.7).

Fazit: Recycling ist gut, mehr Recycling ist besser, aber zu viel Recycling ist schlecht! Eine 100%ige Kreislaufwirtschaft ist weder bezahlbar noch ökologisch sinnvoll.

Um einen Überblick über die Stellung einzelner Recyclingmaßnahmen in der gesamten Recyclinglandschaft zu erhalten, wurde eine Auswahl von Recyclingmaßnahmen in Tab. 1.2 aufgelistet und in Abb. 1.8 dargestellt. Auf der horizontalen Achse von Abb. 1.8 sind die Mehrkosten der betrachteten Umweltmaßnahmen im Vergleich zum Basisszenario aufgetragen. Auf der vertikalen Achse sind die Umweltentlastungen gegenüber dem Basisszenario aufgetragen.² Die folgenden Beispiele aus Tab. 1.2 dienen der Veranschaulichung:

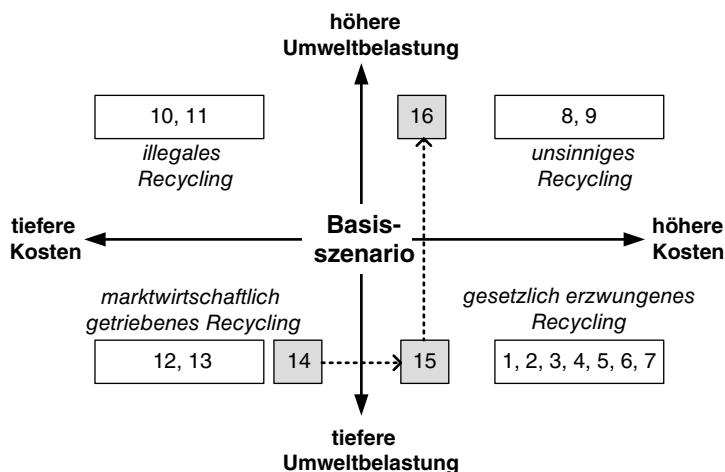
- **Kunststoffrecycling vs. Verbrennung oder Deponierung** (Maßnahme 1 in Tab. 1.2): Kunststoffrecycling ist ökologisch vorteilhafter als Verbrennung oder Deponierung, aber auch teurer. Daher ist diese Maßnahme in Abb. 1.8 im unteren rechten Quadranten („gesetzlich vorgeschriebenes Recycling“) eingeordnet. Gleiches gilt für die Maßnahmen 2–7.

² Für Leser, die nicht mit Ökobilanzen vertraut sind: Der Nutzen oder Schaden einer Umweltmaßnahme im Vergleich zu einem Basisszenario kann durch sogenannte Ökobilanzen quantifiziert werden. Ein Beispiel ist die Umrechnung von vermiedenen Methanemissionen in CO₂-Äquivalente. Je nach Methode und Betrachtungszeitraum ist die Emission von 1 t Methan etwa gleich klimaschädlich wie die Emission von 60 t CO₂.

Tab. 1.2 Bewertung von Umweltmaßnahmen gegenüber Basisszenarien.

	Recyclingmaßnahme	vs. Basisszenario	erhöht die Umweltbelastung	erhöht die Kosten
1	Kunststoffrecycling	Müllverbrennung/Deponie	–	+
2	Recycling von Haushaltsbatterien	Müllverbrennung/Deponie	–	+
3	Papierrecycling	Müllverbrennung	–	+
4	Biomassenrecycling	Deponie	–	+
5	Glasrecycling	Deponie	–	+
6	Bauschuttrecycling	Deponie	–	+
7	Aludosenrecycling	Müllverbrennung/Deponie	–	+
8	Recycling Indium aus Monitoren	Extraktion Indium aus Erz	+	+
9	Recycling mit überrissener Quote	Standardrecycling	+	+
10	Altreifenverbrennung privat	Müllverbrennung	+	–
11	Export Elektronikschrott in Schwellenland	Müllverbrennung	+	–
12	Goldrecycling	Müllverbrennung/Deponie	–	–
13	Recycling Platin-/Palladium-Katalysatoren	Deponie	–	–
14	40 % NE-Metall aus Müllverbrennungsasche	Deponie	–	–
15	70 % NE-Metall aus Müllverbrennungsasche	Deponie	–	+
16	95 % NE-Metall aus Müllverbrennungsasche	Deponie	+	+

NE-Metall = Nichteisenmetalle

**Abb. 1.8** Einordnung von Recyclingmaßnahmen in die Koordinaten „Kosten“ und „Umweltbelastung“. Als Referenz dient das in der Mitte positionierte Basisszenario.

- **Politisch motivierte, überhöhte Verwertungsquoten** (Maßnahme 9, oberer rechter Quadrant in Abb. 1.8: „unsinniges Recycling“): Wie bereits diskutiert, können überhöhte Recyclingquoten paradoxerweise zu zusätzlichen Umweltbelastungen führen. Ein Beispiel ist das Recycling von Indium, das als Indium-Zinn-Oxid in winzigen Spuren im Kunststoff-Glas-Sandwich von Computermonitoren vorkommt. Je nach Verfahren kann die Rückgewinnung dieses hochdispersen Indiums aus Monitoren ökologisch aufwendiger sein als die Gewinnung aus Primärrohstoff oder die Rückgewinnung aus Bergbauabfällen, die ihrerseits ebenfalls eine Recyclingmaßnahme darstellt. Ein ähnliches Problem kann bei Biomasse auftreten: Wird diese mit großem Nachdruck für die Vergärung oder Kompostierung gesammelt, anstatt sie der Müllverbrennung zuzuführen, kann dies ökologisch nachteilig sein. Untersuchungen zeigen, dass forcierte Verwertungsquoten für Biomasse dazu führen können, dass erhebliche Mengen an Kunststoffen in Recyclingkompost gelangen und als Mikroplastik in die Umwelt freigesetzt werden.
- **Lukrative Geschäftsmodelle zulasten der Umwelt** (Maßnahmen 10 und 11): Hier geht es um Praktiken, bei denen finanzielle Interessen auf Kosten der Umwelt durchgesetzt werden. Ein drastisches Beispiel wäre das Verbrennen von Altfreifen im eigenen Garten statt einer fachgerechten, kostenpflichtigen Entsorgung – eine erhebliche Umweltbelastung, die zu Recht verboten ist. Eine andere Variante ist der Export von Elektroschrott in Schwellenländer, wo er zwar mit finanziellem Gewinn, aber unter Freisetzung von massiven Schadstoffemissionen „recycelt“ wird. In der Regel übersteigt die Umweltbelastung durch unsachgemäßes Recycling, wie häufig in Schwellenländern gesehen, den ökologischen Nutzen der zurückgewonnenen Metalle bei Weitem.
- **Marktgesteuertes Recycling** (Maßnahmen 12 und 13): Bestimmte Recyclingprozesse funktionieren ohne gesetzlichen Zwang, da der wirtschaftliche Wert der recycelten Materialien den Aufwand rechtfertigt. Dies gilt z. B. für das Recycling von Gold und Platin, das allein durch die Verkaufserlöse finanziert wird. Schätzungen zufolge sind 90 % des jemals auf der Erde geförderten Goldes und 65 % des jemals geförderten Kupfers noch im Umlauf.
- **Bereichsübergreifende Zuordnung von Recyclingverfahren:** Nicht alle Recyclingmaßnahmen lassen sich eindeutig einem der Quadranten in Abb. 1.8 zuordnen. Ein Beispiel ist die Rückgewinnung von Nichteisenmetallen (Aluminium, Kupfer, Messing) aus der Rostasche von Müllverbrennungsanlagen. In der EU liegt diese Rückgewinnung marktgetrieben bei einer Quote von ca. 40 % und fällt daher in den unteren linken Quadranten (Maßnahme 14). In der Schweiz hingegen ist eine gesetzliche Mindestquote von 70 % vorgeschrieben (Maßnahme 15), wodurch die Maßnahme in den Quadranten „gesetzlich erzwungenes Recycling“ (rechter unterer Quadrant) rutscht. Werden jedoch unrealistisch hohe Verwertungsquoten von z. B. 95 % gefordert, kann die Maßnahme in den Bereich „unsinniges Recycling“ (Maßnahme 16) fallen.

1.3.3 Recyclinggerechtes Produktdesign

Die Idee, eine spätere Verwertung bereits bei der Produktentwicklung zu berücksichtigen, liegt auf der Hand. Die recyclinggerechte Produktgestaltung ist ein häufig genanntes Element der modernen Abfallwirtschaft, um die Verwertung von Produkten am Ende ihrer Nutzungsdauer zu erleichtern. Ziel ist es, durch intelligentes Design eine bessere Trennbarkeit der Materialien, ein effizienteres Recycling und letztlich eine nachhaltigere Ressourcennutzung zu ermöglichen.

Allerdings ist dieser ökologische Zusatznutzen in der Regel nicht „gratis“ zu bekommen. In der Praxis werden Produkte primär auf maximalen Kundennutzen hin optimiert, sodass recyclinggerechtes Design häufig einen Kompromiss mit anderen Faktoren darstellt und Zielkonflikte z. B. in den Bereichen Technik, Kosten und Ästhetik entstehen.

Ein physikalischer Widerspruch macht die Problematik besonders deutlich: Während der Nutzungsphase soll ein Produkt möglichst stabil und langlebig sein, am Ende seiner Lebensdauer aber, zwecks einfachen Recyclings, idealerweise „spontan“ in seine Einzelteile zerfallen. Technisch favorisierte hochfeste Verbindungen – etwa durch Kleben, Schweißen oder Nieten – sind per Definition schwer lösbar. Alternativ können lösbare Schraubverbindungen verwendet werden, die jedoch eine manuelle Demontage erfordern. Gerade bei miniaturisierten Produkten, wie elektronischen Bauteilen, wird die Demontage extrem aufwendig und teuer. Der ökologische Vorteil des Recyclings wird in solchen Fällen durch einen erhöhten technischen und finanziellen Aufwand erkaufte.

Eine recyclinggerechte Produktgestaltung kann sogar zu ökologischen Zielkonflikten führen. Um z. B. die Anforderungen „geringes Gewicht, hohe Stabilität und lange Lebensdauer“ zu erfüllen, werden viele Produkte aus Verbundwerkstoffen hergestellt – z. B. Schuhe, Autokarosserien oder die Rotoren von Windkraftanlagen. Ein typisches Beispiel ist der Getränkekarton, der aus Kunststoff, Karton und Aluminium besteht. Im Vergleich zu Glasverpackungen bietet er durch sein geringes Gewicht eine bessere Ökobilanz beim Transport als z. B. Glasflaschen. Gleichzeitig ist das Recycling der drei Materialkomponenten aufwendig und nicht wirtschaftlich durchführbar (Stand 2025).

Recyclinggerechte Konstruktionen erfordern daher immer einen Kompromiss zwischen technischen, ökonomischen und ökologischen Anforderungen. Die optimale Lösung hängt vom jeweiligen Produkt, den Marktbedingungen und den gesetzlichen Vorgaben ab. Derzeit spielt die recyclinggerechte Produktgestaltung in der Praxis eine untergeordnete Rolle und beschränkt sich weitgehend auf größere, leicht demontierbare Baugruppen – insbesondere in der Automobilindustrie, bei Elektrogeräten und Bausperrgütern (z. B. Türen, Geländer). Zukünftige Entwicklungen im Bereich der Kreislaufwirtschaft, der Digitalisierung, der Robotik und der Materialwissenschaften könnten jedoch dazu beitragen, diese Zielkonflikte weiter zu entschärfen.

1.4 Mechanisches Recycling: Verfahrenstechnische Einordnung

Mechanische, biologische, thermische und chemische Verwertung sind die vier grundlegenden verfahrenstechnischen Ansätze der Abfallverwertung (Abb. 1.9). Von diesen hat die mechanische Verwertung die weitaus größte Bedeutung für die Abfallwirtschaft. Wenn allgemein von „Recycling“ ohne nähere Spezifizierung gesprochen wird, ist in der Regel das mechanische Recycling gemeint.

Beim **biologischen Recycling** werden organische Abfälle mithilfe von Mikroorganismen oder Enzymen in neue Produkte umgewandelt. Ein typisches Beispiel ist die Vergärung zur Erzeugung von Biogas, einer erneuerbaren Energiequelle, die fossile Brennstoffe ersetzen kann.

Beim **thermischen Recycling** werden die Abfälle durch Einwirkung von Wärme aufbereitet, wobei die Temperaturen in der Regel über dem Schmelzpunkt der enthaltenen Wertstoffe liegen. Beispiele sind die Pyrometallurgie, Destillationsverfahren und die Pyrolyse von Kunststoffen – Letztere wird manchmal irreführend auch als „chemisches Recycling“ bezeichnet.

Beim **chemischen Recycling** werden die Abfälle durch gezielte chemische Reaktionen, z. B. Laugung, elektrolytische Verfahren, Fällung oder Ionenaustausch, aufgelöst und weiterverarbeitet. Typische Beispiele sind:

- Hydrometallurgie: Auslaugen von Metallen mit Säuren, Laugen oder Komplexbildnern,
- Solvolyse: Auflösen von Kunststoffen in organischen Lösungsmitteln,
- Hydrolyse: Umwandlung von Holz in Zucker mit starken Säuren oder Basen.

Da viele dieser Prozesse durch erhöhte Temperaturen beschleunigt werden, gibt es eine breite Grauzone zwischen chemischem und thermischem Recycling.

Mechanisches Recycling hingegen zielt auf die Aufbereitung von Materialien ohne Veränderung ihrer chemischen Struktur ab. Ein klassisches Beispiel ist das Recycling von PET-Flaschen: Diese werden zerkleinert, von Störstoffen befreit und

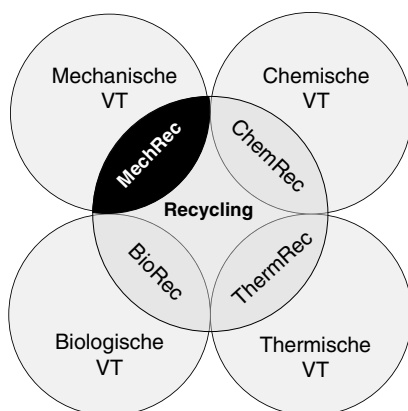


Abb. 1.9 Mechanisches Recycling als Schnittmenge der mechanischen Verfahrenstechnik und des Abfallrecyclings.

als gereinigtes PET-Granulat wieder der Flaschenproduktion zugeführt. Im Mittelpunkt stehen dabei physikalische Trennverfahren für Schüttgutpartikel. In diesem Buch wird der Begriff „(mechanische) Aufbereitung“ als Synonym für „werkstoffliches Recycling“ verwendet, sofern klar ist, dass es sich um Grundoperationen der mechanischen Verfahrenstechnik handelt und keine Verwechslungsgefahr mit anderen Recyclingverfahren besteht.

1.5 Grundlagen des mechanischen Recyclings

In der verfahrenstechnischen Literatur werden viele Fachausdrücke uneinheitlich verwendet. In diesem Buch halten wir uns an die in diesem Kapitel eingeführte Terminologie. Eine Übersicht bietet das Glossar im Anhang. Ein einzelnes Materialkorn wird als Partikel (Singular: *das* Partikel, Plural: *die* Partikel) oder Teilchen bezeichnet. Ein Kollektiv relativ zueinander beweglicher Partikel wird als Schüttgut bezeichnet. Eine Aufbereitungsanlage besteht aus mehreren Apparaten, in denen die verfahrenstechnischen Grundoperationen umgesetzt werden, z. B. Zerkleinerung, Magnetscheidung oder Filtration. Diese Apparate sind durch Fördereinrichtungen – meist Förderbänder oder Rohrleitungen – miteinander verbunden.

1.5.1 Technische Grundoperationen

Das technische Ziel der Aufbereitung besteht darin, einen festen Zielstoff aus einem Aufgabematerial abzutrennen, das aus dem Zielstoff und dem Matrixstoff besteht (Abb. 1.10). Der Zielstoff ist dabei in der Regel tatsächlich ein einzelner Stoff (z. B. PVC), gelegentlich auch eine klar abgegrenzte Stoffklasse (z. B. sämtliche Nichteisenmetalle). Der Matrixstoff umfasst demgegenüber alle im Materialstrom vorkommenden Feststoffe, die **nicht Zielstoff** sind. Da der Matrixstoff häufig aus vielen unterschiedlichen Feststoffen besteht, wird der Begriff „Stoff“ hier bewusst technisch erweitert und nicht im engeren chemischen Sinn verwendet. Dadurch lässt sich das Aufgabematerial als binäres Gemisch aus Zielstoff und Matrixstoff darstellen, was die Beschreibung technischer Trennverfahren mit zwei Produktströmen deutlich erleichtert.

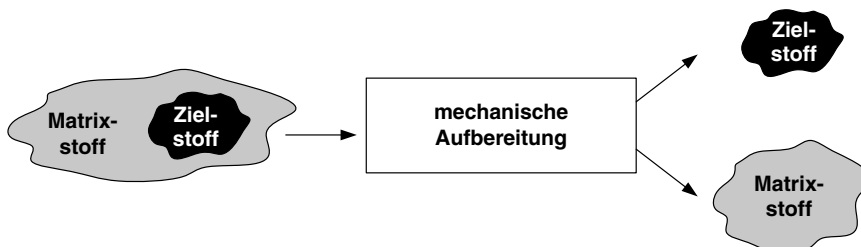


Abb. 1.10 Technisches Ziel der mechanischen Aufbereitung ist die Separation von Zielstoff und Matrixstoff.

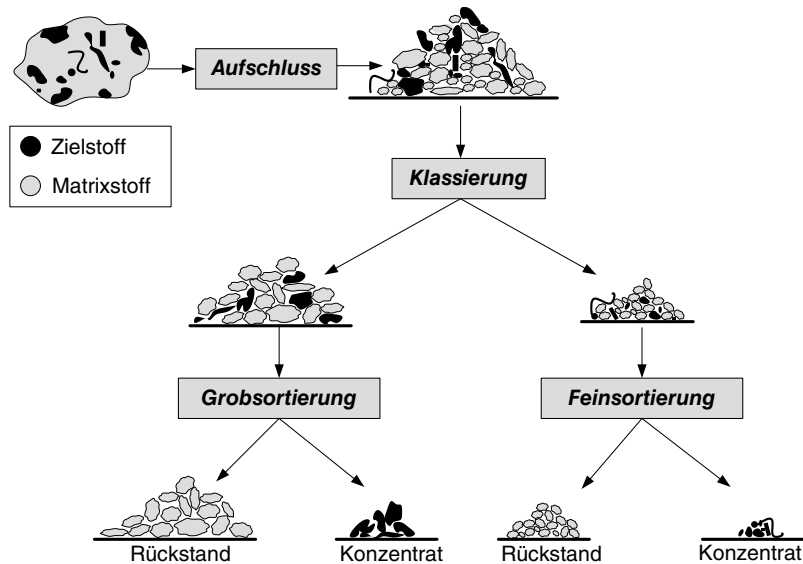


Abb. 1.11 Typischer Aufbau einer Recyclinganlage. Voraussetzung für eine perfekte Separation von Zielstoff und Matrixstoff ist der vollständige Aufschluss des Zielstoffes und eine enge Klassierung der zu sortierenden Materialströme.

Mechanische Aufbereitungsverfahren umfassen im Wesentlichen die folgenden drei Schritte (Abb. 1.11):

1. Aufschluss durch Zerkleinerung: Freisetzung der Wertstoffe aus dem Verbund mit anderen Stoffen. Danach liegen die Wertstoffe als reine Partikel in einem Schüttgut vor. Dieses Schüttgut wird in den weiteren Schritten aufbereitet.
2. Klassierung nach Korngröße.
3. Sortierung der einzelnen Korngrößenklassen nach Stoffeigenschaften.

Aufschluss: In der Regel liegen die Ziel- und Matrixstoffe in Abfällen im Verbund vor. Wichtige recyclingrelevante Verbundformen sind in Abb. 1.12 skizziert. Beschichtungen können z. B. oberflächlich aufgetragene Lackierungen sein. Beschichtungscharakter hat beispielsweise auch druckimprägniertes Holz, bei dem eine etwa 25 mm tiefe äußere Schicht mit einem Fungizid durchtränkt ist, während der Holzkern unbelastet bleibt (z. B. Bahnschwellen). Ein typisches Beispiel für Lamine sind Sicherheitsgläser (z. B. Fahrzeug-Frontscheiben), in denen ein „Sandwich“ aus Glas und Kunststofffolien vorliegt.

Volumendisperse Verbunde zeichnen sich dadurch aus, dass eine Stoffart in Form von Partikeln (disperse Phase) in der kontinuierlichen Phase (Matrix) eingelagert ist. Beispiele sind Asphaltbelag und Beton, in denen Mineralpartikel im Bindemittel (Bitumen, Zementleim) eingebunden sind. Ein weiteres Beispiel sind Schlacken aus der Metallurgie oder gesinterte mineralische Rückstände aus der Müllverbrennung, in denen Metallstücke eingelagert sind.

Oberflächendisperse Verbunde sind ähnlich wie Beschichtungen, jedoch ist die disperse Phase nicht zusammenhängend, sondern in Form von „Inseln“ auf der Oberfläche vorliegend. Beispiele sind Nägel, die in Holzplatten eingeschlagen sind.

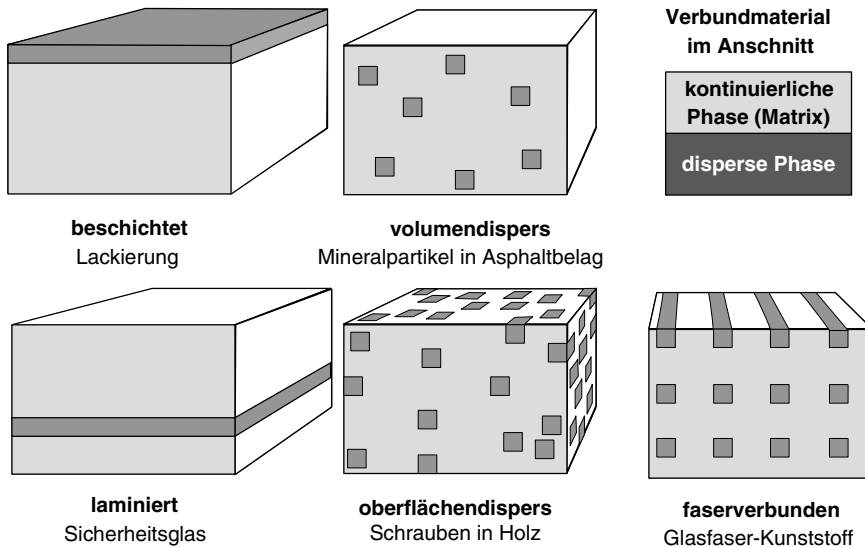


Abb. 1.12 Recyclingrelevante Verbundverhältnisse. Häufig handelt es sich in der Praxis um Mischformen zwischen den dargestellten 5 Typen, z.B. 4-lagige Leiterplatten.

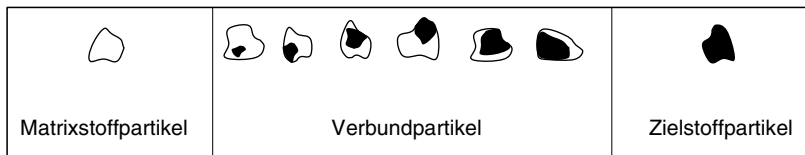


Abb. 1.13 Verbund und Aufschluss.

Im Unterschied zum volumendispersen Verbund befinden sich die dispersen Partikel auf der Oberfläche und können die anschließende Sortierung erleichtern, z. B. durch Farberkennung. Im Gegensatz dazu sind die volumendispersen Partikel völlig von der kontinuierlichen Phase umschlossen.

Faserverbunde sind häufig im Zusammenhang mit Kunststoffen (GFK, CFK), bei denen eine aus flexiblen reißfesten Fasern bestehende Armierung von einer spröden kontinuierlichen Matrix eingeschlossen ist. Analog kann auch Stahlbeton oder faserverstärkter Spritzbeton als Faserverbund interpretiert werden.

Im Aufbereitungsprozess ist die disperse Phase zumeist der Zielstoff und die kontinuierliche Phase der Matrixstoff. Sofern nicht spezifiziert, werden in diesem Buch die Begriffe synonym verwendet („disperse Phase“=Zielstoff; „kontinuierliche Phase“=Matrixstoff). Bei der Aufbereitung unterscheidet man zwischen „aufgeschlossenen“ Partikeln, die entweder aus reinem Zielstoff oder aus reinem Matrixstoff bestehen, und Verbundpartikeln (Abb. 1.13).

- Ein Partikel aus reinem Zielstoff ist ein Zielstoffpartikel.
- Ein Partikel, das aus reinem Matrixstoff besteht, ist ein Matrixstoffpartikel.
- Ein Partikel, das teilweise aus Zielstoff und teilweise aus Matrixstoff besteht, ist ein Verbundpartikel.

Der Aufschluss des Zielstoffes erfolgt entsprechend den Verbundverhältnissen und den physikalischen Eigenschaften der involvierten Stoffe. Beschichtungen und Laminierungen können gelegentlich durch Schälen und/oder eine Reibbehandlung (Attrition) abgetragen werden. In der Regel ist jedoch eine weitgehende Zerkleinerung des Verbundmaterials erforderlich, um die disperse Phase freizulegen. Andere mögliche Aufschlussmechanismen sind z. B. das Auflösen des Matrixmaterials in Säure oder organischen Lösungsmitteln. Beispielsweise können Industriediamanten aus abgenutzten Diamantschneidwerkzeugen zurückgewonnen werden, indem die umgebende Matrix aus gesintertem Kobalt in Säure aufgelöst wird.

Ein weiteres Beispiel ist das „Freibrennen“ von Metallen in der Müllverbrennung. Metalle mit hohem Schmelzpunkt wie Kupfer und Eisen finden sich, nachdem die umgebende organische Matrix (Holz, Textilien oder Kunststoffe) verbrannt ist, in Form von Nägeln oder Drähten in großen Mengen in der Asche von Müllverbrennungsanlagen.³ Wenn die kontinuierliche Phase organisch ist, kann diese durch eine Pyrolyse zunächst versprödet werden und anschließend der Pyrolysekoks „selektiv“ zerkleinert werden, um eine duktile eingelagerte disperse Phase freizulegen.

Klassierung: Klassierung ist die Trennung nach Korngröße oder Kornform (Abb. 1.14). Dabei wird folgende Terminologie verwendet: Material, das größer als eine vorgegebene Korngröße ist, wird als Grobkorn, Material, das kleiner als eine vorgegebene Korngröße ist, wird als Feinkorn bezeichnet. Das Grobkorn ist per Konvention der „Zielstoff“ einer Klassierung. Das Feinkorn ist somit der „Matrixstoff“ einer Klassierung. Analog bei der Kornform: Auf einem Langteilsseparator sind die Langteile der Zielstoff.

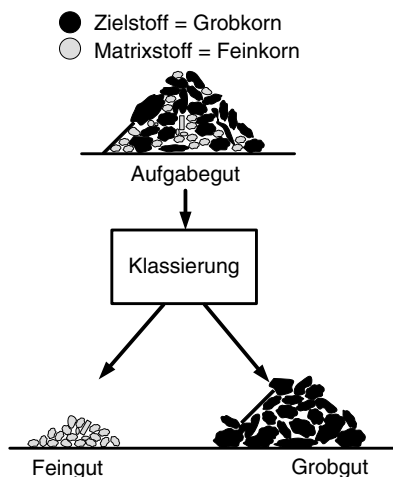


Abb. 1.14 „Perfekte“ Klassierung: Das Feingut besteht ausschließlich aus Feinkorn und das Grobgut ausschließlich aus Grobkorn.

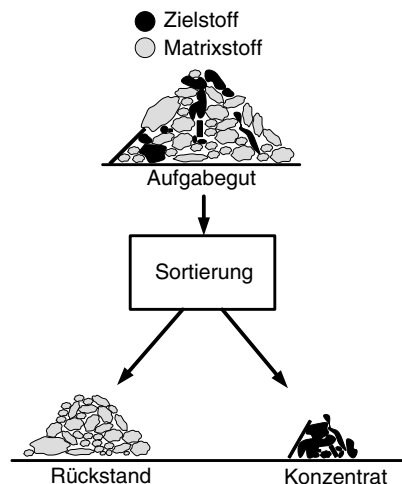


Abb. 1.15 „Perfekte“ Sortierung: Das Konzentrat besteht nur aus Zielstoff und der Rückstand nur aus Matrixstoff.

³ Die Asche aus der Müllverbrennung enthält ungefähr 10 % Metallstücke.

Das (zielstoffangereicherte) Konzentrat der Korngrößenklassierung wird als Grobgut und der Rückstand als Feingut bezeichnet. Die Bereitstellung klassierter Produkte ist – im Gegensatz zur Primärbaustoffindustrie (Kies, Schotter ...) – nicht das primäre Ziel der Aufbereitung, sondern nur ein Mittel zum Zweck der besseren Sortierung. Das Ergebnis der Sortierung hängt in der Regel sehr stark von der Breite des angebotenen Kornspektrums ab. Insbesondere bei der Aufschlusszerkleinerung wird ein breites Korngrößenspektrum erzeugt, das sich typischerweise über ein bis zwei Größenordnungen erstreckt. Daher ist es aus verfahrenstechnischen Gründen erforderlich, den Gesamtgutstrom, durch Klassierung in Teilströme mit engen Korngrößenverteilungen, aufzuteilen. Diese Teilströme werden dann über parallele Sortierstraßen geführt (Abb. 1.11).

Sortierung: Sortierprozesse sind das Herzstück der mechanischen Aufbereitung, denn hier findet die Wertschöpfung statt. Die vorgeschalteten Prozesse (Zerkleinerung, Klassierung) dienen lediglich der Materialvorbereitung für die Sortierung. In Tab. 1.3 sind einige Beispiele für Sortierprozesse aufgelistet.

Sortierverfahren nutzen physikalische Stoffeigenschaften als Trennmerkmale (Abb. 1.15). Das *Trennmerkmal* ist die qualitative Eigenschaft, auf der die Trennung

Tab. 1.3 Beispiele für Sortierprozesse.

Zielstoff	Matrixstoff	Trennmerkmal/Branche	Separationsprinzip
Heidelbeeren	Blätter	Dichte / Haushalt	Schwimm-/Sink-Sortierung: Die Blätter schwimmen in Wasser auf; die Beeren sinken herab
Armierungseisen	Beton	Magnetisierbarkeit / Bauschuttaufbereitung	Magnetscheidung: Eisenteile bleiben am Magneten hängen; Beton nicht
Aluminium-Schraubdeckel	Glas	Elektrische Leitfähigkeit / Glasaufbereitung	Wirbelstromsortierung: Im Aluminium bilden sich Wirbelströme aus – im Glas nicht
faule Äpfel	gute Äpfel	Farbe / Nahrungsmittelaufbereitung	Optische Sortierung: Die faulen Äpfel sind schwarz verfärbt
Druckerschwärze	Papierfasern	Benetzbarkeit mit Wasser / Altpapieraufbereitung	Flotation: Die Papierfasern sind wasserbenetzbar; die Druckerschwärze ist wasserabstoßend (Unterabschnitt 2.1.5)
Weizen	Spreu	Sedimentationsgeschwindigkeit / Nahrungsmittelaufbereitung	Querstromsichtung: Die Weizenkörner fallen herab und die Spreu wird vom Wind fortgetragen

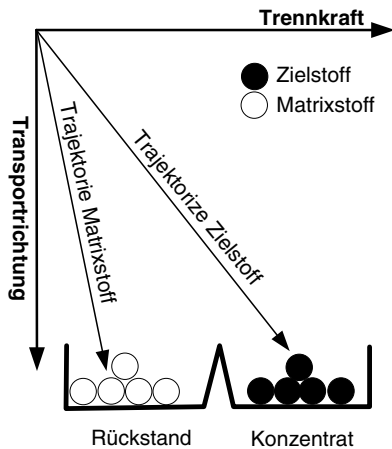


Abb. 1.16 Zur allgemeinen Transportrichtung wirkt eine Feldkraft, welche die Trajektorien der Teilchen bestimmt. Die Zielstoffpartikel werden durch die Feldkraft stärker aus der Transportrichtung abgelenkt als die Matrixstoffpartikel.

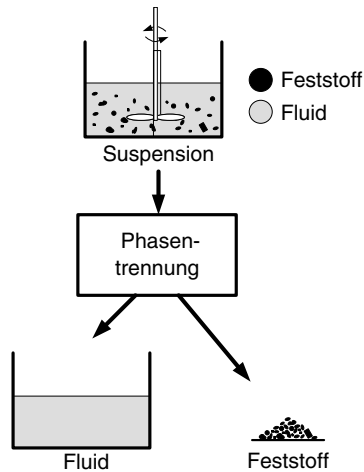


Abb. 1.17 „Perfekte“ Phasentrennung: Das Fluid enthält keinen Feststoff und der Feststoff kein Fluid. Besonders relevant sind diese Prozesse bei der Feinstkornabtrennung durch eine fluide Phase, die anschließend wieder gereinigt werden muss (Entstaubung, Entschlammung).

beruht (z. B. Dichte, elektrische Leitfähigkeit, Magnetisierbarkeit). Die quantitative Ausprägung des Trennmerkmals ist der *Trennmerkmalwert*. Das Trennmerkmal bei der Dichtesortierung ist die Stoffdichte ρ , ein Trennmerkmalwert z. B. $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$. Der Stoff mit der stärkeren Trennmerkmalausprägung ist im Trennprozess der Zielstoff, alle anderen Bestandteile sind der Matrixstoff. Durch die Sortierung wird der Zielstoff im Konzentrat und der Matrixstoff im Rückstand angereichert.

Zur Trennung von Ziel- und Matrixstoffpartikeln wird der Gutstrom durch ein physikalisches Feld gefördert (z. B. ein Magnetfeld). Dieses Feld erzeugt Trennkraften, die in Abhängigkeit vom Trennmerkmalwert auf die Stoffteilchen wirken und beim Zielstoff definitionsgemäß größer sind als beim Matrixstoff. Dadurch werden die Zielstoffteilchen stärker aus der ursprünglichen Transportrichtung abgelenkt als die Matrixstoffteilchen. Dies ermöglicht ihre gezielte Abtrennung als Konzentrat (Abb. 1.16).

Hilfsprozesse: Wichtige Hilfsprozesse in der mechanischen Aufbereitung sind Phasentrennungen, bei denen Feststoffe aus Fluiden abgetrennt werden (Abb. 1.17). Sie spielen dort eine wichtige Rolle, wo feinste Feststoffpartikel aus großen Fluidströmen abgetrennt werden müssen, z. B. bei der Filtration von Schlämmen (nass) oder Stäuben (trocken).

1.5.2 Wirtschaftliche Perspektive

Das wirtschaftliche Ziel des Recyclings ist die Gewinnung eines festen Wertstoffes aus einem binär zusammengesetzten Rohstoff, der aus dem Wertstoff selbst

und anderen Feststoffen besteht, die zusammen den Reststoff bilden. Bei der Feststofftrennung wird aus dem einen Ausgang der Anlage ein mit Wertstoffen angereichertes Wertstoffprodukt ausgebracht. Aus dem anderen Ausgang der Anlage wird dementsprechend ein an Wertstoffen abgereichertes Reststoffprodukt ausgeschleust (Abb. 1.18).

Bei der Positivtrennung wird der Wertstoff aktiv, d.h. durch Einwirkung der Trennkraft auf den Wertstoff, aus dem Rohstoffstrom (Aufgabegut) abgezweigt. Der Wertstoff ist in diesem Fall der Zielstoff. Bei der Negativtrennung hingegen wird der **Reststoff** aktiv abgetrennt. Hier ist also der Reststoff der Zielstoff (Abb. 1.19). Zur besseren Übersicht werden die Ausgänge der Abscheider, aus denen der Zielstoff austritt, manchmal mit einem „+“ gekennzeichnet.

Da der Matrixstoff in der Regel aus einem Gemisch verschiedener Stoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften besteht, der Zielstoff jedoch eng definierte

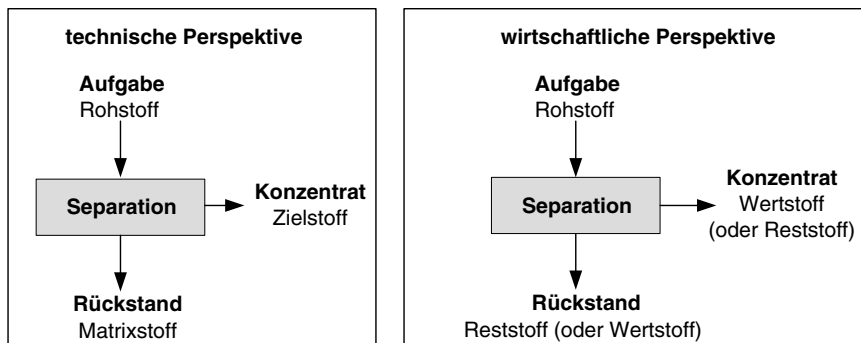


Abb. 1.18 Schematische Darstellung der Feststoffabtrennung bezogen auf die technische (links) und wirtschaftliche (rechts) Zielsetzung.

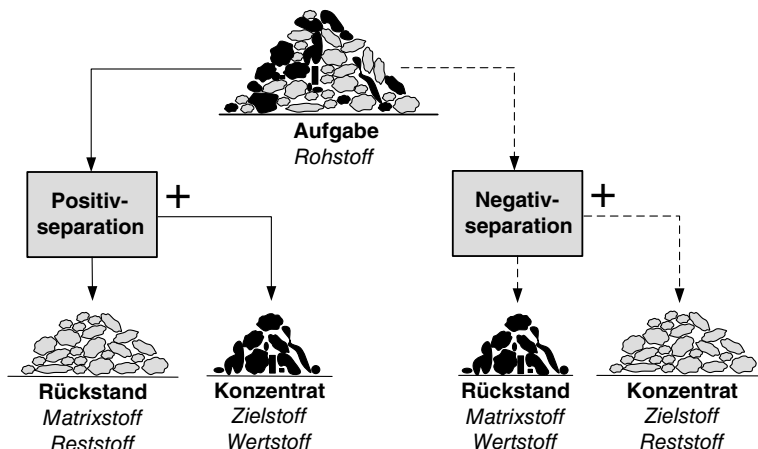


Abb. 1.19 Bei der Positivseparation ist der Zielstoff der Wertstoff, welcher im Konzentrat angereichert wird. Bei der Negativseparation ist der Zielstoff der Reststoff. Hierdurch wird der Rückstand der Negativseparation von Reststoff abgereichert.

Eigenschaften aufweist, ist die Positivtrennung der Normalfall. Daher wird bei der Diskussion von Trennverfahren, sofern nicht ausdrücklich anders angegeben, implizit von Positivtrennungen ausgegangen.

Beispiel 1.1: Gewinnung von Eisen aus Müllverbrennungsasche (Positivtrennung)

Der Wertstoff ist in diesem Fall das Eisen, der Reststoff ist der (vorwiegend mineralische) Anteil der Asche. Durch eine Magnetsortierung wird als Trennmerkmal die „Magnetisierbarkeit“ ausgenutzt und so das ferromagnetische Eisen vom unmagnetischen mineralischen Aschenmaterial getrennt. Zielstoff dieser Trennung ist also das Eisen. Da der Wertstoff (Eisen) gleichzeitig auch der Zielstoff der technischen Trennung ist, handelt es sich um eine „Positiv-Feststofftrennung“.

Beispiel 1.2: Aufbereitung von Betonabbruch durch die Entfernung von Armierungseisen (Negativtrennung)

Primäres wirtschaftliches Ziel der Aufbereitung von Betonabbruch ist die Gewinnung von Recycling-Betongranulat. Der Wertstoff ist also der Beton, während die im Betonabbruch eingeschlossene Stahlarmerung als „Störstoff“, also Reststoff, gilt.⁴ Nach Aufschlusszerkleinerung des Betonabbruchs liegen die Armierungseisen vermischt mit den Betonbruchstücken vor. Dieses Armierungseisen ist der Zielstoff der anschließenden Magnetsortierung, durch die es in das Konzentrat überführt wird. Der Wertstoff Betongranulat ist der Matrixstoff und wird **indirekt** durch „Negativseparation“ aufkonzentriert, indem der Störstoff Eisen durch die Magnetseparation entfernt wird. Besonders häufig wird die Negativseparation eingesetzt, wenn der Wertstoff bereits als Vorkonzentrat vorliegt und nun durch die Entfernung der wenigen noch verbleibenden Reststoffpartikel weiter aufgereinigt werden muss.

1.5.3 Anlagentechnik: Trocken- und Nassaufbereitung

Die Abtrennung von Feststoffen ist in wässriger Suspension in der Regel wesentlich effizienter als im trockenen Zustand. In Suspension werden störende Adhäsionskräfte zwischen Ziel- und Matrixmaterial unterdrückt, insbesondere kapillare Adhäsionskräfte bei feuchten Materialien. Zudem sind die Strömungsverhältnisse der Partikel in Wasser häufig laminar und begünstigen damit eine geordnete Trennung, im Gegensatz zur typischen turbulenten Bewegung von Partikeln in einem Luftstrom.

Die Betriebskosten nassmechanischer Verfahren sind in der Regel deutlich höher als bei trockenmechanischen Verfahren (rund doppelt so hoch). Ein Grund ist der

⁴ Dies gilt auch, wenn das Armierungseisen verkauft werden kann.

erhebliche Aufwand für die Wasserreinigung. Aus Umweltschutzgründen müssen nass arbeitende Aufbereitungsanlagen mit weitgehend geschlossenen Wasserkreisläufen arbeiten. In diesen Kreisläufen sammeln sich Schlämme und gelöste Stoffe an, die durch eine aufwendige Abwasserreinigung entfernt werden müssen. Nasse Verfahren erfordern zudem häufig auch spezialisiertes Personal, insbesondere mit Kenntnissen in der aquatischen Chemie. Hinzu kommt, dass viele Aufbereitungsprodukte nur in trockenem Zustand vermarktet werden können, sodass nach der Nassaufbereitung zumindest eine Entwässerung oder sogar eine vollständige Trocknung erforderlich ist.

Diese Herausforderungen haben dazu geführt, dass trockene Trennverfahren im Recycling stark bevorzugt sind. Trockene Verfahren wie die Wirbelstromsortierung und die Sensortechnik werden häufig anstelle der klassischen nassen Dichtesortierung eingesetzt. Für anspruchsvolle Trennaufgaben (Feinkorn < 4 mm) mit stringenten Produktspezifikationen sind nassmechanische Verfahren jedoch oft unverzichtbar. In der Schweiz zeigt sich dieser Trend insbesondere in der Bauschutttaufbereitung, wo immer mehr Anlagen von Trocken- auf Nassaufbereitung umgestellt werden. Dieser Trend wird auch durch die aktuell anlaufende PFAS-Problematik unterstützt, wobei man versucht die PFAS entweder ins Prozesswasser zu überführen, oder sie mit dem Feinkornanteil „Schlamm“ auszutragen.

Häufig werden Kombinationen von Nass- und Trockenaufbereitung eingesetzt. Das Aufgabematerial wird zunächst trocken aufbereitet und dann werden die so gewonnenen Feinkornfraktionen (z. B. alles Material < 8 mm) in die nasse Aufbereitungsstufe übergeben.

