

1

Einführung

Das Thema dieses Buches ist die *Mechanische Aufbereitungstechnik*. Wirtschaftliches Ziel der Aufbereitung ist es, Rohstoffe in Wertstoffe und Abfallstoffe zu trennen. Bei der Mechanischen Aufbereitungstechnik werden verschiedenartige Partikel unter Verwendung physikalischer Kräfte voneinander getrennt. Diese Kräfte können mechanischen Ursprungs oder induziert sein, z. B. durch magnetische oder elektrische Felder. Die *Mechanische Aufbereitungstechnik* ist das Teilgebiet der *Mechanischen Verfahrenstechnik*, das sich zentral mit der Trennung von Feststoffpartikeln voneinander beschäftigt (Abb. 1.1). Andere Teilgebiete der Mechanischen Verfahrenstechnik wie die Materialvorbereitung (z. B. Zerkleinerung), die Nachbereitung der Produkte (z. B. Phasentrennung, Agglomeration) und die Materialbewirtschaftung (Transport und Lagerung) spielen in der mechanischen Aufbereitung eine unterstützende Rolle.

Die Verwendung der Fachausdrücke ist in der verfahrenstechnischen Literatur uneinheitlich. Wir werden uns in diesem Buch an folgende Terminologie halten; zur Übersicht dient das Glossar in Kapitel 8.

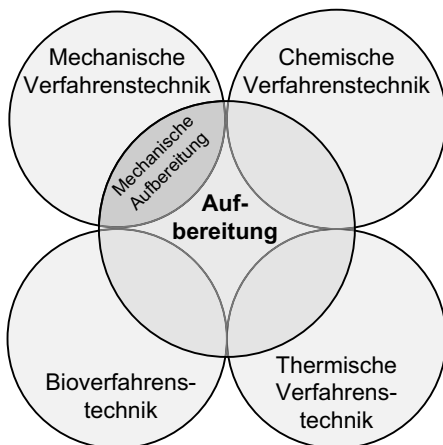


Abbildung 1.1 Die Mechanische Aufbereitungstechnik als Teilgebiet der Mechanischen Verfahrenstechnik (dunkelgrau). Das zentrale Thema der Mechanischen Aufbereitungstechnik ist die Separation von Schüttgutpartikeln durch Einwirkung physikalischer Kräfte.

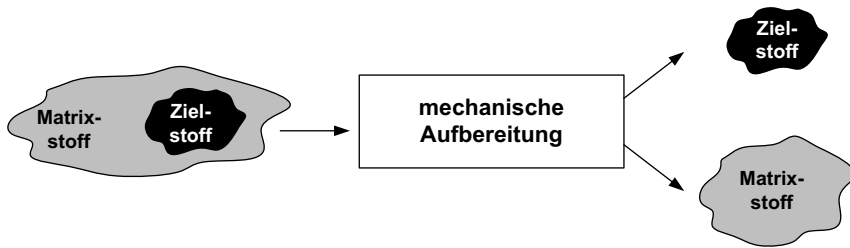


Abbildung 1.2 Technisches Ziel der mechanischen Aufbereitung ist die Separation von Zielstoff und Matrixstoff.

Ein Materialkorn bezeichnen wir als ein *Partikel* (Singular: das Partikel, Plural: die Partikel) oder *Teilchen*. Ein Kollektiv von relativ zueinander beweglichen Partikeln ist ein *Schüttgut*.

Das technische Ziel eines Trennprozesses ist die Abtrennung eines festen *Zielstoffs* aus einem binär zusammengesetzten *Aufgabematerial*. Dieses besteht aus dem Zielstoff selbst sowie aus anderen Feststoffen, die zusammengefasst als *Matrixstoff* bezeichnet werden (Abb. 1.2).

In der Aufbereitung unterscheidet man zwischen „aufgeschlossenen“ Partikeln einerseits, die entweder aus reinem Zielstoff oder aus reinem Matrixstoff bestehen, und Verbundpartikeln andererseits (Abb. 1.3). Ein Partikel, welches aus reinem Zielstoff besteht, ist ein *Zielstoffpartikel*. Ein Partikel, welches aus reinem Matrixstoff besteht, ist ein *Matrixstoffpartikel*. Ein Partikel, welches teils aus Zielstoff und teils aus Matrixstoff besteht, ist ein *Verbundpartikel*.

Als *Trennmerkmal* ξ wird bei der Feststofftrennung eine physikalische Eigenschaft ausgenutzt, die beim Zielstoff stärker ausgeprägt ist als beim Matrixstoff (Abb. 1.4). Das Trennmerkmal ist die qualitative Eigenschaft, auf der die Tren-



Abbildung 1.3 Partikelarten und korrespondierende Schüttgüter.

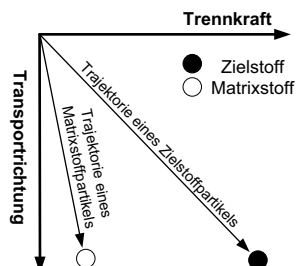


Abbildung 1.4 Beim Zielstoff ist das Trennmerkmal stärker ausgeprägt als beim Matrixstoff. Senkrecht zur allgemeinen Transportrichtung wirkt eine Querkraft, welche die Trajektorien der Teilchen bestimmt. Die Zielstoffpartikel werden durch die Trennkraft stärker aus der Transportrichtung abgelenkt als die Matrixstoffpartikel.

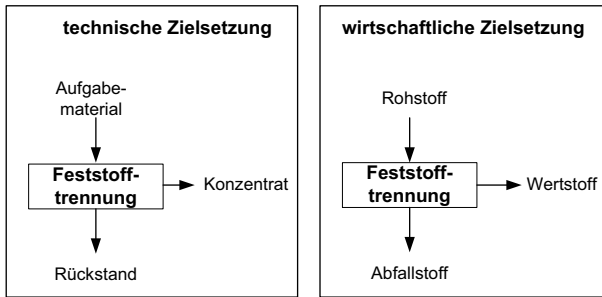


Abbildung 1.5 Schematische Darstellung der Feststoffabtrennung bezogen auf die technische und wirtschaftliche Zielsetzung.

nung beruht, also z. B. die Korngröße, Dichte, Magnetisierbarkeit usw. Die quantitative Ausprägung des Trennmerkmals ist der *Trennmerkmalwert*. Das Trennmerkmal bei der Klassierung ist die Korngröße d , ein Trennmerkmalwert wäre z. B. $d = 0.25 \text{ mm}$.

Ein in einen technischen Prozess hineinfließender Materialstrom heißt *Aufgabematerial* oder kurz *Aufgabe*. Ein aus einem Trennprozess herausfließender Materialstrom ist ein *Produkt* (Abb. 1.5). Bei den Produkten von Trennprozessen unterscheidet man das *Konzentrat*, in welchem der Zielstoff angereichert ist, und den *Rückstand*, in welchem der Zielstoff abgereichert (bzw. der Matrixstoff angereichert) ist.

Das *wirtschaftliche Ziel* der mechanischen Aufbereitung ist die Gewinnung eines festen *Wertstoffs* aus einem binär zusammengesetzten *Rohstoff*, der aus dem Wertstoff selbst besteht sowie aus anderen Feststoffen, die zusammengefasst den *Abfallstoff* ergeben. Bei der Feststofftrennung wird aus einem Ausgang der Anlage ein wertstoffangereichertes Produkt entnommen, das Wertstoffprodukt. Aus dem anderen Ausgang der Anlage wird folglich ein wertstoffabgereichertes (oder abfallstoffangereichertes) Abfallprodukt ausgebracht (Abb. 1.5).

Bei der *Positivtrennung* wird aus dem Rohstoff (Aufgabegut) der Wertstoff aktiv, also durch Einwirkung der Trennkraft auf den Wertstoff, herausgezogen; somit ist der Wertstoff der Zielstoff. Bei der *Negativtrennung* hingegen wird der Abfallstoff aktiv herausgezogen; hier ist der Abfallstoff der Zielstoff (Abb. 1.6).

Da der Matrixstoff in der Regel aus einem Gemisch verschiedener Stoffe mit verschiedenen Eigenschaften besteht, der Zielstoff hingegen eng definierte Eigenschaften ausweist, ist die Positivtrennung der Normalfall. Daher wird in diesem Buch, falls nicht ausdrücklich anders vermerkt, bei der Diskussion von Separationsprozessen von Positivtrennungen ausgegangen.

■ Beispiel: Gewinnung von Gold aus dem Sand eines Flusses durch Positivtrennung

Der Wertstoff ist in diesem Fall das Gold, der Abfallstoff ist der Sand. Durch eine „Dichtesortierung“ wird als Trennmerkmal die Dichte ausgenutzt und so das spezifisch schwere Gold vom leichteren Sand abgetrennt. Zielstoff

dieser Trennung ist also das Gold, der Matrixstoff ist der Sand. Da der Wertstoff (Gold) gleichzeitig auch der Zielstoff der technischen Trennung ist, handelt es sich um eine „Positiv-Feststofftrennung“.

■ Beispiel: Aufbereitung von Weißglas durch Negativtrennung

Primäres wirtschaftliches Ziel der Aufbereitung ist die Gewinnung von Weißglas aus einem Separatsammlungscontainer für Weißglas. Der Wertstoff ist also das Weißglas. Der „Abfallstoff“ besteht aus fehlgeworfenen Stücken aus Braun- und Grünglas. Bei der Separation wird die Lichtundurchlässigkeit als Trennmerkmal ausgenutzt. Aufgrund ihrer höheren Lichtundurchlässigkeit werden die farbigen Glasstücke identifiziert und entfernt. Zielstoff dieser Separation ist also das Farbglas. Der Matrixstoff dieser Trennung besteht aus dem (sehr gut lichtdurchlässigen) Weißglas. Also werden ein Konzentrat aus Farbglas und ein Rückstand aus Weißglas ausgebracht. Es handelt sich folglich um eine „Negativtrennung“, denn der Wertstoff (Weißglas) wird nur indirekt durch Abtrennung des Abfallstoffs (Farbglas) angereichert.

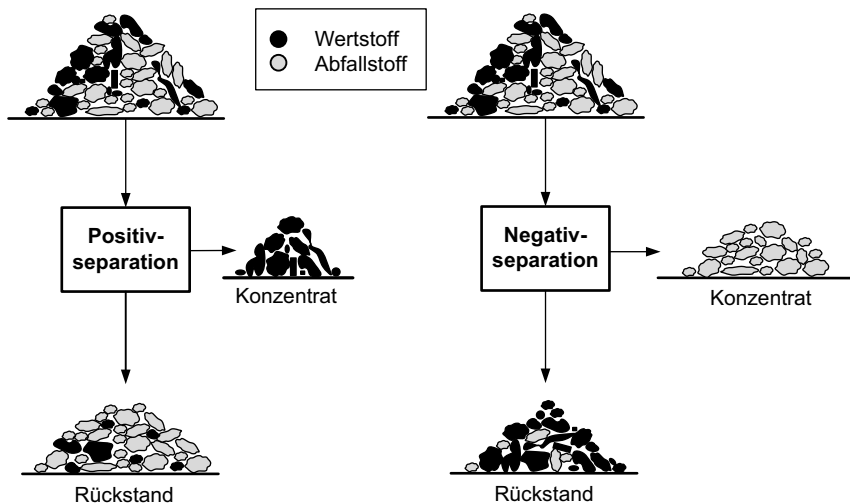


Abbildung 1.6 Bei der Positivseparation ist der Zielstoff der Wertstoff, der im Konzentrat angereichert wird. Bei der Negativseparation ist der Zielstoff der Abfallstoff. Hierdurch wird der Rückstand der Negativseparation in Bezug auf den Abfallstoff angereichert.

Bei der Feststofftrennung unterscheidet man zwischen der Trennung nach geometrischen Trennmerkmalen (Korngröße bzw. Kornform) und der Trennung nach physikalischen Trennmerkmalen (Magnetisierbarkeit, Dichte ...). Die erstere nennen wir *Klassierung* (Abb. 1.7a), die letztere *Sortierung* (Abb. 1.7b). Bei der Klassierung benutzen wir folgende Terminologie: Material, das größer ist als eine vorgegebene Korngröße, ist das *Grobkorn*, solches mit kleinerer Korngröße ist das *Feinkorn*. Das Grobkorn ist der „Zielstoff“ einer Klassierung, denn das Trennmerk-

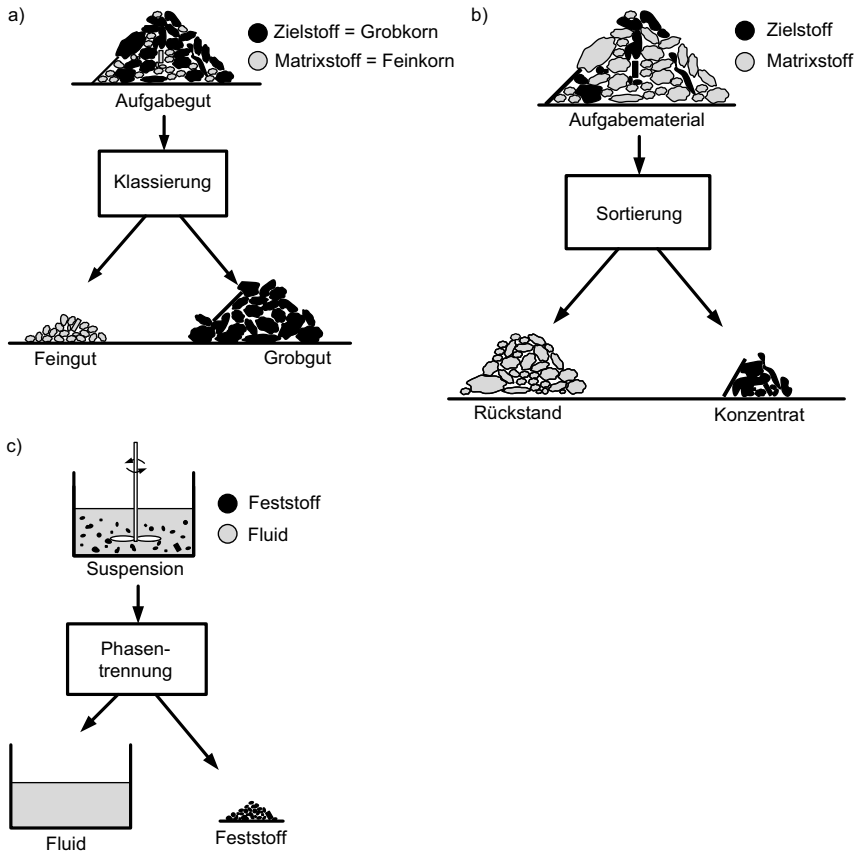


Abbildung 1.7 a) Trennprozesse in der mechanischen Aufbereitung: „perfekte“ Klassierung. Das Feingut besteht nur aus Feinkorn und das Grobgut nur aus Grobkorn. b) Trennprozesse in der mechanischen Aufbereitung: „perfekte“ Sortierung. Das Konzentrat besteht nur aus Zielstoff und der Rückstand nur aus Matrixstoff. c) Trennprozesse in der mechanischen Aufbereitung: „perfekte“ Phasentrennung. Das Fluid enthält keinen Feststoff und der Feststoff kein Fluid.

mal „Partikelgröße“ ist hier stärker ausgeprägt als beim Feinkorn. Das Feinkorn ist folglich der „Matrixstoff“ einer Klassierung. Das Konzentrat der Klassierung wird als *Grobgut* bezeichnet und der Rückstand als *Feingut*. Bei einer nicht perfekten Trennung enthält das Grobgut also fehlausgetragene Feinkornanteile, das *Unterkorn*. Umgekehrt kann das Feingut fehlausgetragene Grobkornanteile enthalten, das *Überkorn*.

Die Abtrennung von Feststoffen aus einer fluiden kontinuierlichen Phase ist eine *Phasentrennung* (Abb. 1.7c). Bei der Abtrennung fester Zielstoffe von festen Matrixstoffen werden oft Fluide als „Hilfsphasen“ verwendet, z. B. um den Transport der Feststoffe zu ermöglichen oder die Feststoffe im Fluidstrom zu trennen.

Eine *Dispersion* enthält eine oder mehrere Arten von Feststoffpartikeln, die *dispersen Phasen*, die in feste oder fluide *kontinuierliche Phasen* eingebettet sind. Eine typische Dispersion besteht aus Zielstoffpartikeln als fester disperser Phase, die

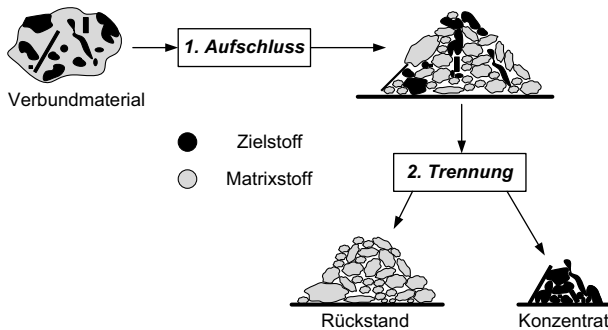


Abbildung 1.8 Voraussetzung für eine perfekte Separation von Zielstoff und Matrixstoff ist der vollständige Aufschluss des Zielstoffs.

von Matrixstoff als kontinuierlicher fester Phase umgeben sind. Bei einem anderen typischen Fall sind Zielstoffpartikel, Matrixstoffpartikel und Verbundpartikel als disperse Phasen in einem Fluid als kontinuierliche Phase suspendiert. Ist der Zielstoff als disperse Phase in den Matrixstoff als kontinuierliche Phase eingelagert, so erfordert der Separationsprozess einen vorgeschalteten Aufschlussprozess, der den Zielstoff für die eigentliche Trennung freilegt. (Abb. 1.8).

Der Aufschluss geschieht in der Regel durch Zerkleinerung des Verbundmaterials. Mögliche andere Aufschlussmechanismen sind chemischer Natur, z. B. die

Tabelle 1.1 Beispiele für Feststoff-Separationsprozesse.

Zielstoff	Matrixstoff	Trennmerkmal	Separationsprinzip
Kies	Sand	Korngröße	Siebung: Kies bleibt auf einem Sieb liegen, Sand rieselt hindurch
Blaubeeren	Blätter	Dichte	Schwimm-/Sink-Sortierung in Wasser: die Blätter schwimmen auf, die Beeren sinken herab
Armierungseisen	Beton	Magnetisierbarkeit	Magnetscheidung: Eisenteile bleiben am Magneten hängen, Beton nicht
Aluminium	Glas	elektrische Leitfähigkeit	Wirbelstromsortierung: im Aluminium bilden sich Wirbelströme, im Glas nicht
faule Äpfel	gute Äpfel	Farbe	Optische Sortierung: die faulen Äpfel sind schwarz verfärbt
Druckerschwärze	Papierfasern	Benetzbarkeit mit Wasser	Flotation: die Papierfasern sind wasserbenetzbar, die Druckerschwärze ist wasserabstoßend
Weizen	Spreu	Sedimentationsgeschwindigkeit	Querstromsichtung: die Weizenkörner fallen herab, die Spreu wird vom Wind fortgetragen

Auflösung des Matrixstoffs in Säure, oder das „Freibrennen“ des Zielstoffs, bei dem der Matrixstoff (z. B. Kunststoff) verbrannt wird und der Zielstoff (z. B. Metall) zurückbleibt. Beispielsweise werden Industriediamanten aus abgenutzten Diamant-Schneidwerkzeugen wiedergewonnen, indem die umgebende Matrix aus Sinterkobalt in Säure aufgelöst wird. „Freigebrannte“ Metalle mit hohen Schmelzpunkten, wie Kupfer und Eisen, finden sich als Nägel oder Drähte in großer Menge in den Verbrennungsrückständen von Müllverbrennungsanlagen, nachdem die umgebenden organischen Matrixstoffe (Holz, Textilien oder Kunststoffe) abgebrannt sind.

Eine Aufbereitungsanlage besteht aus einzelnen *Apparaten*, in denen die verfahrenstechnischen *Grundoperationen* umgesetzt werden, z. B. Zerkleinerung, Magnetscheidung oder Filtration. Diese Apparate sind durch *Fördereinrichtungen* miteinander verbunden, zumeist Förderbänder oder Rohrleitungen.

Die Separation von Feststoffen funktioniert im Allgemeinen wesentlich besser in wässriger Suspension als trocken. In Suspension werden störende Haftkräfte zwischen Ziel- und Matrixstoff unterdrückt (z. B. kapillare Haftkräfte bei feuchten Gütern). Überdies wird die Wirkung der (unselektiven) Gravitationskräfte durch den hydrostatischen Auftrieb reduziert, wodurch die spezifischen Trennkräfte relativ stärker zur Wirkung kommen. Weiterhin sind die Strömungsbedingungen bei Partikeln in Wasser häufig laminar, was einer geordneten Trennung ebenfalls entgegen kommt.

Allerdings müssen heute aus Gründen des Umweltschutzes die meisten Aufbereitungsanlagen mit einem weitgehend geschlossenen Wasserkreislauf arbeiten. Da sich in geschlossenen Wasserkreisläufen Schlämme und lösliche Inhaltsstoffe sukzessive anreichern, müssen diese durch eine aufwändige Abwasserreinigung entfernt werden. So sind die Kosten für nassmechanische Verfahren meist deutlich höher als für trockenmechanische Verfahren. Außerdem sind viele Aufbereitungsprodukte nur in trockenem Zustand handelsfähig, was bei der nassen Aufbereitung einen zusätzlichen Prozessschritt erfordert: zumindest eine Entwässerung, gegebenenfalls sogar eine Trocknung. Dies hat dazu geführt, dass trockene Separationsverfahren wie beispielsweise die Wirbelstromsortierung und die Sensortechnologie (anstatt nasser Sortierung) eine immer wichtigere Rolle einnehmen. Das gilt insbesondere bei der Aufbereitung von Abfällen und Nahrungsmitteln.

Eine allgemeine Anmerkung zum Thema „Theorie und Praxis“: Die Fachbücher zur Mechanischen Verfahrenstechnik sind z. T. stark wissenschaftlich ausgerichtet; Zusammenhänge werden aus den physikalischen Grundlagen hergeleitet. Dabei können in der Regel nur die Haupteinflussgrößen einigermaßen exakt berücksichtigt werden. Fast immer wirken aber zusätzlich Störeffekte (z. B. Einfluss der Kornform, Wechselwirkung der verschiedenen Komponenten des Aufgabeguts, der Zwischen- und der Endprodukte, Abhängigkeit von der Feuchtigkeit ...). Die Wirkungen solcher Störeffekte sind oft durchaus nicht klein oder gar vernachlässigbar. Sie werden teils auf Grund von vereinfachten Modellen, meist aber auf empirischer Basis durch Korrekturgrößen (z. B. Formfaktoren) in den grundlegenden Formeln berücksichtigt. Ansätze der erwähnten Art sind natürlich nur so gut

wie die Voraussetzungen, die in die Ableitungen und Modellbildungen eingegangen sind. So nötig auch die Theorie zum Begreifen allgemeiner Zusammenhänge ist – für die Kenntnis des wirklichen Betriebsgeschehens sind die Beobachtung der Abläufe, die messtechnische Erfassung der entscheidenden Betriebsparameter und ihre Verknüpfung zu übersichtlichen Kenngrößen unabdingbar.