

8 Mechanische Trennprozesse

8.1 Kennzeichnung der Trennprozesse

Die mechanischen Trennprozesse (Begriffsdefinitionen nach [31]) lassen sich in vier verschiedene Arten gliedern:

- **Klassierprozesse** dienen zur Trennung fester Teilchenkollektive nach Feinheitsmerkmalen wie Korngröße oder Sinkgeschwindigkeit.
- **Sortierprozesse** führen zur Trennung fester Teilchenkollektive nach Partikeleigenschaften wie Dichte, Farbe, Form oder Zusammensetzung.
- **Fest-Flüssig-Trennverfahren** dienen zur Abtrennung disperser fester Partikeln aus einer flüssigen Phase.
- **Fest-Gasförmig-Trennverfahren** leisten eine Abtrennung disperser fester Partikeln (Staub) aus Gasen.

Bei **Klassierungen** wird das **Aufgabegut** als Teilchenkollektiv einem Klassierapparat zugeführt, der es in zwei oder mehr Teilmengen (**Fraktionen**) zerlegt. Bei Zweiguttrennungen unterscheidet man **Grobgut** und **Feingut**. Ihre jeweiligen Anteile bezogen auf das Aufgabegut, **Grobgutanteil** g und **Feingutanteil** f , addieren sich stets zu 1.

Im Idealfall wird so getrennt, dass sich die Verteilungsdichtekurven von Grob- und Feingut nicht überschneiden, d. h. die Verteilungsdichtekurve des Aufgabegutes durch einen senkrechten Schnitt in zwei Flächen geteilt wird (Bild 8.1A).

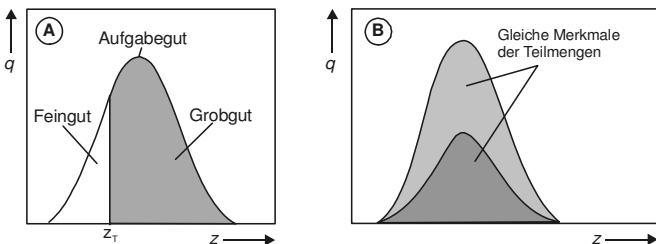


Bild 8.1: Verteilungsdichtekurven für ideale Trennung (A) und ideale Teilung (B)

Bei einer **idealen Teilung** wird dagegen ein Aufgabegut so zerlegt, dass die betrachteten Merkmale (z. B. Feinheit) in beiden Teilmengen gleich und gleich denen der Ausgangsmenge sind (Bild 8.1B)

Bei **Sortierprozessen** verwendet man abhängig von der Partikeleigenschaft andere Bezeichnungen für die sich ergebenden Teilmengen, z. B. bei **Dichtesortierern Leichtgut** und **Schwergut**.

Bei einer **realen Trennung** überschneiden sich dagegen die Verteilungsdichtekurven von Fein- und Grobgut. Je nach Güte des Trennapparats ist die Überschneidung mehr oder weniger groß. Zur Kennzeichnung von Zweigut-Klassierprozessen werden die Verteilungsdichtekurven von Aufgabegut, Grob- und Feingut meist in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt (vgl. Bild 8.2). Man gewichtet dann die Verteilungsdichten des Grobguts q_G und des Feinguts q_F mit Hilfe ihrer Mengenanteile g und f , sodass sich die aufgespannten Flächen der Grobguts- und Feingutskurve zur Aufgabegutkurve $q_A(z)$ addieren. Für jeden Wert des Feinheitsmerkmals z gilt dann:

$$q_A(z) = g q_G(z) + f q_F(z) \quad (8.1)$$

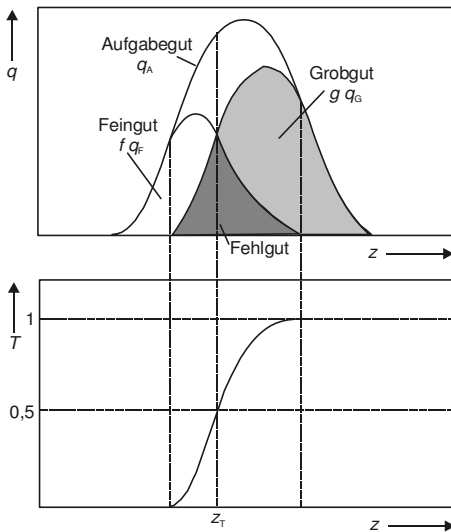


Bild 8.2: Verteilungsdiagramm (oben) und Trenngradkurve (unten)

Beim Wert z_T schneiden sich die Verteilungsdichten des Grob- und Feinguts genau bei 50 % der Aufgabegutkurve, daher wird auch die Bezeichnung z_{50} verwendet. Man bezeichnet diesen Wert des Feinheitsmerkmals als **Median-Trenngrenze** oder **präparative Trenngrenze**. Ist das Feinheitsmerkmal ein Teilchendurchmesser, so ergibt sich der bekannte Ausdruck **Trennkorndurchmesser** d_T oder auch d_{50} .

Im Überschneidungsbereich zwischen Grob- und Feingutkurve findet man das **Fehlgut** oder **Fehlkorn**. Fehlkorn auf der Grobgutseite (links der Trenngrenze) wird auch als **Unterkorn** (feines Fehlkorn), Fehlkorn im Feingut als **Überkorn** (grobes Fehlkorn) bezeichnet. Alles übrige Gut innerhalb der Teilmengen nennt man **Normalgut** bzw. **Normalkorn**. Andere Trenngrenzendefinitionen, z. B. die **analytische Trenngrenze**, benutzen die Gleichheit der Fehlkornausträge im Fein- und Grobgut als Kriterium.

Für jeden Punkt auf der z -Achse des Verteilungsdiagramms lässt sich ein **Trenngrad** (auch **Teilungszahl**) bestimmen, der aussagt, welcher Anteil der betrachteten Fraktion (genauer: der unendlich kleinen Fraktion im Punkt z) des Aufgabeguts in das Grobgut gelangt:

$$T(z) = \frac{g \cdot q_G(z)}{q_A(z)} \tag{8.2}$$

Der Verlauf des Trenngrads in Abhängigkeit vom Feinheitsmerkmal z stellt eine S-förmige Kurve dar (vgl. Bild 8.2 unten); sein Wertebereich deckt sich naturgemäß mit dem Überschneidungsbereich der Verteilungsdichtekurven von Grob- und Feingut. Am Schnittpunkt der Verteilungsdichtekurven, also bei z_{50} , beträgt $T(z)$ genau 0,5.

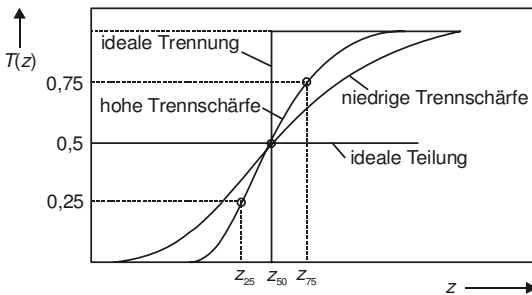


Bild 8.3: Definition der Trennschärfe bei verschiedenen Trennvorgängen

Die Steigung der Trenngradkurve insgesamt ist ein Maß für die Trennschärfe β des Klassierers (vgl. Bild 8.3). Bei idealer Trennung entartet $T(z)$ zu einer senkrechten Linie bei z_{50} , bei idealer Teilung zu einer waagerechten Linie z. B. bei $T = 0,5$. Prinzipiell kann man ein beliebiges Steigungsmaß zur Charakterisierung der Kurvensteigung verwenden. Als sinnvoll erwiesen hat sich z. B. die Definition:

$$\beta = \frac{z_{25}}{z_{75}} \quad (8.3)$$

Nach dieser Definition rangiert β zwischen 0 und 1 und wird $\beta = 1$ bei idealer Trennung.

Ein Trennungsmaß, das ebenfalls die Fehlkornausträge in Fein- und Grobgut berücksichtigt und in der Praxis verbreitet ist, ist das **Feinausbringen** K (nach der gleichen Definition in der Siebtechnik als **Siebgrütegrad** η gebräuchlich):

$$K = \frac{\text{Normalaustrag(Feinkorn} < z_{50}) \text{ im Feingut}}{\text{Feinkorn} < z_{50} \text{ im Aufgabegut}} \quad (8.4)$$

In der **Fest-Flüssig-** oder **Fest-Gas-Trenntechnik** verwendet man oft abweichende Bezeichnungen für die hier vorgestellten Größen. So wird in der Fest-Flüssig-Trenntechnik je nach Verfahren eine **Klarflüssigkeit** oder **Überlauf**, ein **Filtrat** oder **Zentrifugat** als gereinigte Flüssigphase abgeschieden. Das Mengenverhältnis der abgetrennten dispersen Phase zu ihrer Menge im Aufgabegut wird als **Abscheidegrad** bezeichnet; der verbliebene Flüssigkeitsanteil in der abgetrennten Feststoffmenge als **Restfeuchte**.

In der **Entstaubungstechnik** spricht man von **Rohgas** und **Reingas** und definiert den **Gesamtabscheidegrad** oder **Gesamtenstauungsgrad** analog zum oben definierten Grobgutanteil g . Der Trenngrad nach Gl. (8.2) und Bild 8.2 unten wird in der Entstaubungstechnik als **Fraktionsentstaubungsgrad** bzw. **Stufenentstaubungsgrad** bezeichnet.

8.2 Klassieren

8.2.1 Siebklassierung

Bei der kontinuierlichen Siebung wird ein Körnerkollektiv durch Vergleich mit den Maschenquerschnitten einer Siebfläche in **Siebüberlauf** (Grobfraktion) und **Siebunterlauf** (Feinfraktion) getrennt. Im Gegensatz zur diskontinuierlichen Analysensiebung (vgl. Abschn. 5.3) bewegt sich

der Massenstrom des Siebguts kontinuierlich in einer begrenzten Verweilzeit über die Siebfläche.

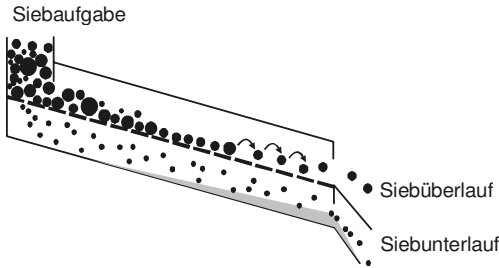


Bild 8.4: Prinzip der kontinuierlichen Produktionssiebung

Im Vergleich zu den Strömungsklassierverfahren verwendet man die **Produktionssiebung** für eher größere und damit schwerere Partikeln, da Massenkräfte für den Siebmechanismus sehr wichtig sind. Aber auch feinere Partikeln können vorteilhaft gesiebt werden, wenn nämlich die Möglichkeit von Überkorn im Feingut ausgeschlossen werden soll (klassisches Beispiel ist die Herstellung von Schleifmittelkörnungen).

Tabelle 8.1: Einteilung der Siebungen nach der Aufgabenstellung [32]

Bezeichnung	Einsatzzweck	Maschenweite
Schutzsiebung	Schutz der nachgeschalteten Maschinen/Apparate gegen Überkorn	$w \geq x_{\max}$
Entstaubungssiebung	Entstaubung des Produktes zur Reinigung, Verbesserung der Transport- und Lagerfähigkeit	$w < x_{\min}$
Klassiersiebung	Aufteilung des Guts in Korngrößenklassen	$x_{\min} < w < x_{\max}$
Sortiersiebung	Aufteilung des Guts nach Sorten, falls diese sich nach Korngröße oder Form unterscheiden	$x_{\text{Sorte1}} < w < x_{\text{Sorte2}}$

w Maschenweite, x Korngröße

In der Nähe der Siebaufgabe bewegt sich das Gut meist in dickerer Schicht (einer sog. **Siebgutmatte**) abwärts. Hier muss die Schicht durch Bewegung möglichst stark aufgelockert werden, damit die feinen Parti-

keln rasch zur Siebfläche gelangen können und die Schichtdicke sich verringert. Im hinteren, stromabwärts gelegenen Teil der Siebfläche sollte die Siebgutmatte in **Einzelkornbewegung** übergehen.

Entscheidend für den Sieberfolg einer **Klassiersiebung** ist, dass insbesondere die **grenzkornnahen Partikeln** ($x \approx w$) möglichst oft in verschiedenen Lagen mit den Siebmaschen verglichen werden. Dies wird durch die Einzelkornbewegung im letzten Teil der Siebfläche stark begünstigt. Man wähle also die Breite der **Siebfläche** prinzipiell so, dass alle Körner des gewünschten Überlaufmassenstroms am Ende der Siebfläche zu jedem Zeitpunkt nebeneinander Platz haben. Die Länge der Siebfläche richtet sich nach der **Auftreffhäufigkeit** und der **Durchtrittswahrscheinlichkeit** der grenzkornnahen Partikeln. Obwohl diese Größen, zumindest für kugelförmiges Korn, theoretisch leicht bestimmbar sind [32], sind zur korrekten Bestimmung der Sieblänge meist Technikumsversuche mit dem Original-Siebgut erforderlich.

Als zusätzliche Parameter können **Siebneigung**, **Maschenform**, **Schwingungsfrequenz** und **Amplitude** produktspezifisch gewählt werden. Bei einem Wurfsieb lässt sich die Zahl der möglichen Vergleiche durch eine optimale Abstimmung dieser Werte so maximieren, dass die Wurfbahn jeder Partikel pro Hub im Idealfall gerade bis zur nächsten Maschenreihe reicht. In der Praxis ist jedoch die zur Partikelablösung notwendige Beschleunigung kaum vorzuberechnen, da Klemm- und Haftkräfte eine große Rolle spielen.

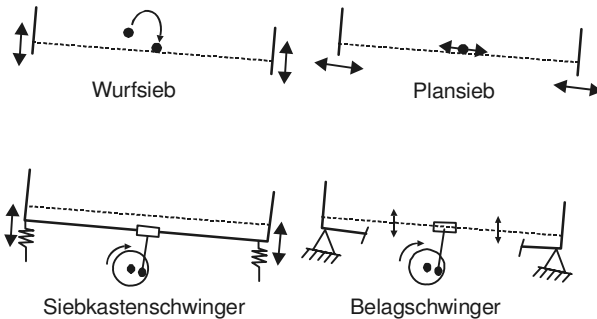
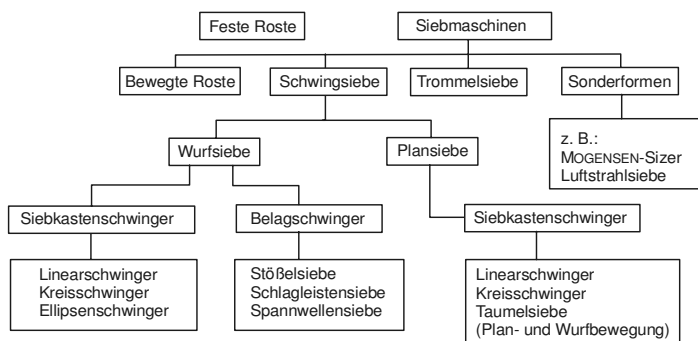


Bild 8.5: Prinzipielle Ausführungen von Produktionssieben

Einen Überblick über mögliche Bauformen von Produktionssieben gibt Tabelle 8.2. **Feste Siebroste** sind nur für einfache Siebaufgaben (Schutz- oder Entstaubungssiebungen) geeignet. **Plansiebe** benötigen zur Parti-

kelbewegung geringere Beschleunigungen als **Wurfsiebe** und sieben schonender, allerdings wird das Siebgut weniger stark aufgelockert und durchmischt. Mit **Siebkastenschwingern** als Wurfsiebe lassen sich große Amplituden und damit eine starke Auflockerungswirkung erreichen. Dabei wirken an jeder Stelle der Siebfläche gleiche Kräfte auf die Partikeln; mangelnde Bewegung in den Flächenrandbereichen wird so vermieden. Dagegen wird bei **Belagschwingern** weitaus weniger Masse bewegt, wodurch die Siebkonstruktion, die Fundamentierung und auch evtl. betroffene Gebäudebereiche in der Regel kostengünstiger ausgeführt werden können. Belagschwinger nutzen außerdem zusätzliche Sekundärschwingungen des Siebbelags aus, was zu verbesserter Siebwirkung und Selbstreinigung bei feinen Partikeln (50–500 μm) führt.

Tabelle 8.2: Bauformen von Produktionssieben



8.2.2 Windsichten

Die kontinuierliche Windsichtung erfolgt meist mit Hilfe von Luft, in Ausnahmefällen in Stickstoff (zur Erzielung einer inerten Umgebung). Die zu trennenden Partikeln werden im Luftstrom zwei konkurrierenden Kräften ausgesetzt: der Strömungskraft (Widerstandskraft) in Richtung der Luftströmung sowie einer Massenkraft (Schwerkraft oder Zentrifugalkraft) in Quer- oder Gegenrichtung. Entsprechend dem eingestellten Verhältnis dieser beiden Kräfte stellt sich eine bestimmte Trenngrenze ein: Feinere Partikeln folgen der Luftströmung; gröbere Partikeln folgen der Massenkraft. Kennt man die Sinkgeschwindigkeit der Partikeln in Luft im jeweiligen Kraftfeld, so lässt sich die Trenngrenze mit guter Genauigkeit vorausberechnen. Für sehr feine Partikeln (bis zu einer

maximalen REYNOLDS-Zahl von 1) gilt in guter Näherung die STOKES-Gleichung

$$d_T = \sqrt{\frac{18 \eta_L w}{a (\rho_P - \rho_L)}} \quad (8.5)$$

mit: d_T Trennkorndurchmesser; w mittlere Luftgeschwindigkeit an der Produktaufgabe; a Beschleunigung im Schwerkraftfeld ($a = g$) oder Zentrifugalfeld ($a = r\omega^2$); ρ_P , ρ_L , η_L Dichten und Viskosität von Partikeln und Luft.

Für gröbere Partikeln wird d_T nach Gl. (8.5) falsch bestimmt, hier ist mit der allgemeinen Gleichung für die Sinkgeschwindigkeit (vgl. Abschn. 5.5) zu rechnen.

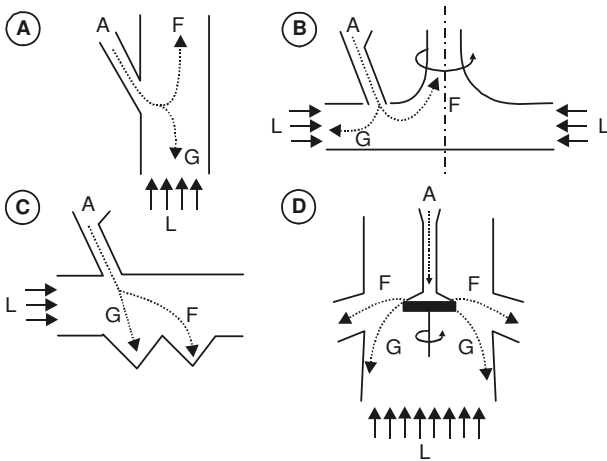


Bild 8.6: Funktionsprinzipien von Windsichtern: (A) Schwerkraft-Gegenstromsichter (akkumulierend), (B) Fliehkraft-Gegenstromsichter (akkumulierend), (C) Schwerkraft-Querstromsichter (auffächernd); (D) Fliehkraft-Querstromsichter (auffächernd) mit A Aufgabegut, G Grobput, F Feingut und L Luft

Die meisten der technisch relevanten Sichter arbeiten nach dem Gegenstromprinzip. **Schwerkraft-Gegenstromsichter (Aufstromsichter)** eignen sich für leichte Klassieraufgaben an größeren Partikeln. **Fliehkraft-Gegenstromsichter** können auch bei feinen Trenngrenzen gute Trennschärfen erreichen. Bekanntes Beispiel ist der **Spiralwindsichter** der Fa. ALPINE [33] mit Trennkorndurchmessern bis herunter zu $2 \mu\text{m}$ und Durchsätzen bis 6 t/h (bei höheren d_T !).

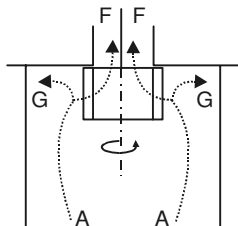


Bild 8.7: Prinzip des Abweiseradsichters

Sehr häufig werden Sichter als Aufsatzgeräte für Mühlen verwendet oder zusammen mit der Mahleinrichtung als **Sichtermühle** ausgeführt. Das Feingut wird dabei ausgetragen und das Grobgut erneut der Mahleinrichtung zugeführt. Aufsatzsichter für Mühlen sowie Sichter für sehr hohe Durchsätze feiner Partikeln arbeiten oft nach dem Prinzip des **Abweiseradsichters** (Bild 8.7).

8.2.3 Nassstromklassierer

Stromklassierung in flüssiger Phase ist in der **Aufbereitungstechnik** (Verarbeitung von Bergbauprodukten) verbreitet. Die Trennprinzipien sind ähnlich denen des Windsichtens. Nasse **Schwerkraftklassierung** findet mit **Horizontalstromklassierern** (auffächernd) oder **Aufstromklassierern** (akkumulierend) statt. Horizontalstromklassierer werden meist durch mechanische Förderorgane (Rechen, Schrauben, Kratzer) ergänzt, die das auf den (geneigten) Boden abgesunkene Grobgut kontinuierlich aus der Flüssigkeit befördern.

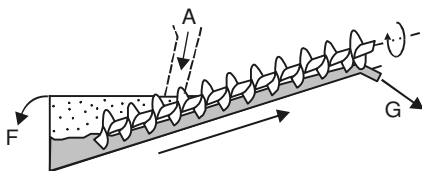


Bild 8.8: Schema eines Schraubenklassierers

Wesentlich kleinere Trennflächen bzw. bei gleicher Trennfläche wesentlich kleinere Trennkorngrößen erreicht man mit **Zentrifugalklassierern** wie dem **Hydrozyklon** (der sich auch als Fest-Flüssig-Abscheider einsetzen lässt).

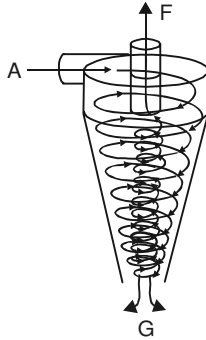


Bild 8.9: Schema des Hydrozyklons

8.3 Sortieren

Großtechnische Sortierverfahren (Trennung von Partikelkollektiven nach Partikeleigenschaften) sind im Wesentlichen auf zwei Industriebereiche konzentriert: die Aufbereitungstechnik (Gewinnung von Wertmineralien aus dem bergmännischen Abbau) und die **Recyclingindustrie** (Rückgewinnung sortenreiner Sekundärrohstoffe aus Abfallprodukten). In beiden Produktionszweigen wird das Rohmaterial zunächst zerkleinert, um die Wertstoffe auszulösen (Aufbereitungstechnik: **Aufschluss**, meist durch Prallzerkleinerungsmaschinen, Recycling: **Schreddern**, eine Art Schneidzerkleinerung). Die zerkleinerten Stoffgemische werden anschließend nach spezifischen Unterscheidungsmerkmalen (Dichte, Farbe, Form, Magnetisierbarkeit etc.) sortiert. Tabelle 8.3 gibt einen Überblick über gebräuchliche Verfahren. Als Prinzipbeispiel für einen modernen Sortierapparat sei der in Bild 8.10 dargestellte optoelektronische Sortierer (MikroSort[®], Fa. MOGENSEN) beschrieben. Über eine Schwingförderrinne wird ein dünner Produktvorhang des Aufgabematerials erzeugt. Hoch auflösende Kameras erfassen die fallenden Partikel; eine Auswertelektronik erkennt Abweichungen in Helligkeit, Transparenz, Farbe, Form oder Größe bei mehreren 1000 Partikeln/s. Im Anschluss an die bildanalytische Erfassung durchfallen die Teilchen eine Düsenleiste, innerhalb der die „erkannten“ Partikeln an der vorausberechneten Stelle durch einen Luftstoß gezielt aussortiert werden. Nach Angaben des Herstellers sind Aufgabemassenströme bis zu 200 t/h bei Korngrößen von 3–250 mm sortierbar.

Tabelle 8.3: Überblick über gebräuchliche Sortierverfahren

Bezeichnung	Prinzip	Anwendungsbereich
Optoelektronische Sortierung	Erkennung optischer Abweichungen durch Bildanalyse oder IR-Spektroskopie	Recycling (Kunststoffe, Buntmetalle)
Röntgenographische Sortierung	Erkennung von Dichte- oder Strukturabweichungen durch Röntgenographie	Recycling (Kunststoffe)
Magnetscheidung	Abscheidung magnetisierbarer Teile in Magnetfeldern	Aufbereitung von Eisenerzen, Abscheidung eisenhaltiger Verunreinigungen
Elektrische Sortierung	Aufladung und Abscheidung im elektrischen Feld	Sortierung von Schwermineralien, Erzen, Abfällen
Setzmaschinen	Schwerkraft-Dichtesortierung durch Umlagerung im pulsierenden Wasserstrom	Aufbereitung von Kohle, Mineralien, Erzen
Schwertrübetrennung	Dichtesortierung durch Sedimentation in Flüssigkeiten mit angepasster Dichte	Aufbereitung von Kohle, Mineralien, Erzen
Flotation	Beeinflussung der Oberflächeneigenschaften (Hydrophobierung), Anlagerung von Luftbläschen, Aufschwimmen und Abstreifen	Aufbereitung feinkörniger Stoffgemische
Windsichten	Schwerkraft-Dichtesortierung im Luftstrom	Recycling von Abfällen, Kabelschrott

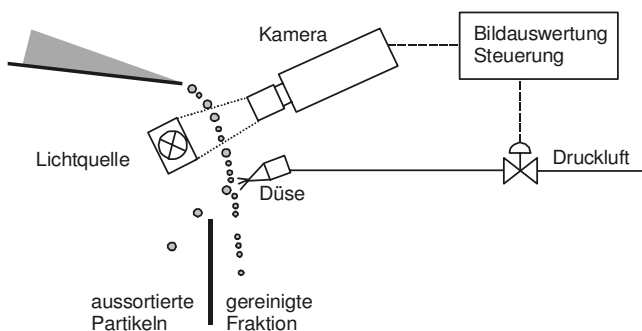


Bild 8.10: Prinzip des optoelektronischen Sortierers MikroSort®