

Dieses Dokument stammt von:

<http://www.epromod.de/>

**Ihr Partner für Visualisierungen in der Architektur,
im Maschinenbau und der Verfahrenstechnik.**



2D / 3D Visualisierung und Animation für

- e-Learning, Schulung, interaktive Software
- Präsentationsfilme, Exposés, Printmedien, Messeauftritt
- Internetauftritte, Präsentationssoftware, Kundengespräche
- Marketing geplanter Bauten, Qualitätssicherung
- Digitale Handbücher bzw. Bedienungsanleitungen

Auf der nächsten Seite finden Sie das angeforderte Dokument.

1 Einführung

In einer der letzten Ausgaben dieser Zeitschrift wurde über Möglichkeiten und Methoden von Computersimulationen in der Aufbereitungstechnik berichtet [1]. Quasi zur Veranschaulichung dieser Ausführungen sollen im folgenden Modelle zur Darstellung von Abläufen in Aufbereitungsapparaten beschrieben werden. Dabei werden zwei Modelltypen vorgestellt, die ganz unterschiedliche Zielstellungen verfolgen.

Als erstes wird auf die Visualisierung eingegangen, die per Animation die Abläufe in Aufbereitungsapparaten vereinfacht und auf das wesentliche konzentriert nachbildet. Diese als e-processing [2] bezeichneten Visualisierungen werden als eine Variante der phänomenologischen Modelle angesehen. Sie können in der verfahrenstechnischen Ausbildung an die Stelle der bisher verwendeten Beschreibungen, Schema-skizzen und fotografischen Darstellungen treten. Ähnliche Modelle werden von WA-DE [3] für die Ausbildung im Bergbau beschrieben. In Abhängigkeit von der Anzahl der dargestellten Dimensionen wird zwischen Visualisierungen, die zwei Dimensionen und die Zeit einbeziehen, oder vierdimensionalen Visualisierungen unterschieden.

Der zweite Modelltyp ist in die Gruppe der empirischen Modelle einzuordnen. Diese Modelle geben die Zusammenhänge zwischen den Durchsätzen im bzw. durch ein System, den Anlagenparametern sowie den Materialeigenschaften und deren Verteilung wieder. Somit ist es möglich, auf Grundlage einer experimentell für verschiedene Betriebszustände ermittelten Datenbasis, Vorausberechnungen zu beliebigen Anlageneinstellungen für den untersuchten Stoff vorzunehmen. Im Idealfall kann so mit nur wenigen Vorversuchen die optimale Einstellung für die gewünschten Produktparameter gefunden werden.

2 Modelle zur anschaulichen Darstellung von Aufbereitungsprozessen

Bei der visuellen Modellierung geht es um die durch Animationen veranschaulichte Darstellung von Funktionsweisen und Abläufen in Materialverarbeitungsmaschinen und –verfahren auf dem Computer. Damit werden moderne, auf elektronischen Medien beruhende Lehrmittel für die Aus- und Weiterbildung bereitgestellt. Gegenüber Schemaskizzen, Fotos und Videos, die gegenwärtig für die Darstellung der Funktionsweisen von Maschinen verwendet werden, wird dadurch ein wesentlicher Fortschritt hinsichtlich der Anschaulichkeit und Verständlichkeit erreicht. Die visuelle Modellierung (e-processing) bietet außerdem den Vorteil, den Informationsgehalt von Darstellungen auf dem Sektor der Verfahrenstechnik essentiell zu verbessern. Die Softwaremodule zu technischen Prozessen, die in Vorlesungen, für Vorträge oder Präsentationen ebenso wie als Anlage in Fachbüchern Verwendung finden können, verkörpern eine völlig neue Qualität bei der Prozessdarstellung. Sie beschränken sich nicht auf die Wiederholung vorhandener Texte und Bilder auf den neuen Medien, sondern nutzen die Möglichkeiten dieser Medien zu bewegten, animierten Prozessdarstellungen.

Im ersten Beispiel (Bild 1) soll ein Animationsmodell für die Zerkleinerung im Backenbrecher behandelt werden. Ausgehend von einer Darstellung, welche die wichtigsten Bauteile des Brechers zeigt und einer Analyse der Bewegungsabläufe des Materials und der Anlagenteile wird eine Bildfolge erstellt, die den Zerkleinerungsvorgang anschaulich macht. Gerade die Funktion des Kniehebelsystems ist schwer anhand eines einzelnen Bildes zu erklären, durch die Animation hingegen ist die Kraftübertragung zwischen den einzelnen Bauteilen gut zu veranschaulichen.

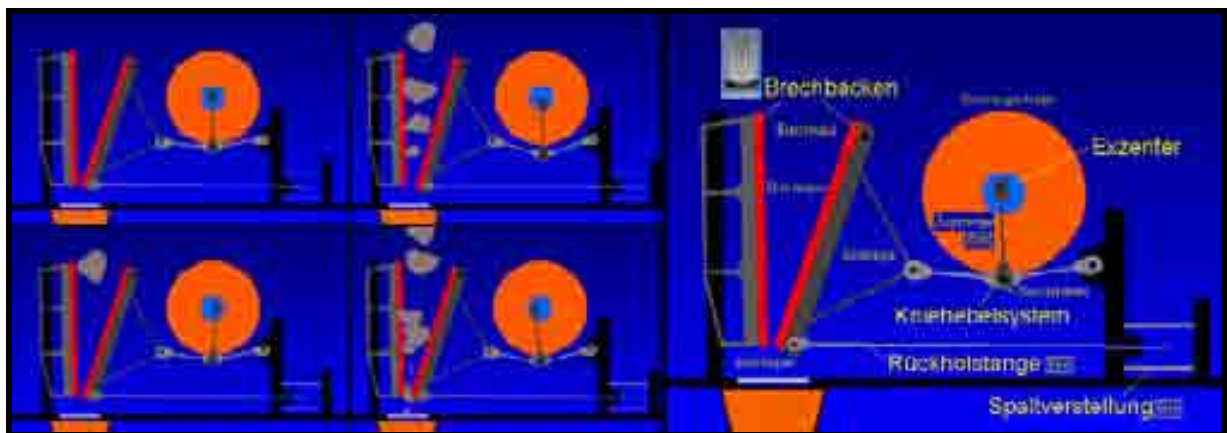


Bild 1: Darstellungen aus der Backenbrecheranimation (links) sowie Bauteilbeschreibung (rechts)

Ein weiteres Beispiel für e-processing ist die Darstellung der Klassierung in einem Sichter (Bild 2). Da hier komplexe Bewegungsabläufe stattfinden, die in verschiedenen Bereichen des Sichters ablaufen, wurden zwei Animationen zur Darstellung der Funktionsweise erstellt.

Die erste Animationsebene wurde vertikal durch den Sichter gelegt, so daß die vertikalen Bewegungen der Partikel verfolgt werden können. Die zweite Animationsebene

verläuft horizontal durch den Sichter und zeigt das Partikelverhalten am Sichtrad. Hier ist z.B. zu erkennen, wie große, massereiche Teilchen durch die Rotationskraft nach außen gedrückt bzw. am Sichtrad abgewiesen werden und wie kleine Partikel mit dem Luftstrom durch das Sichtrad in das Innere gelangen.

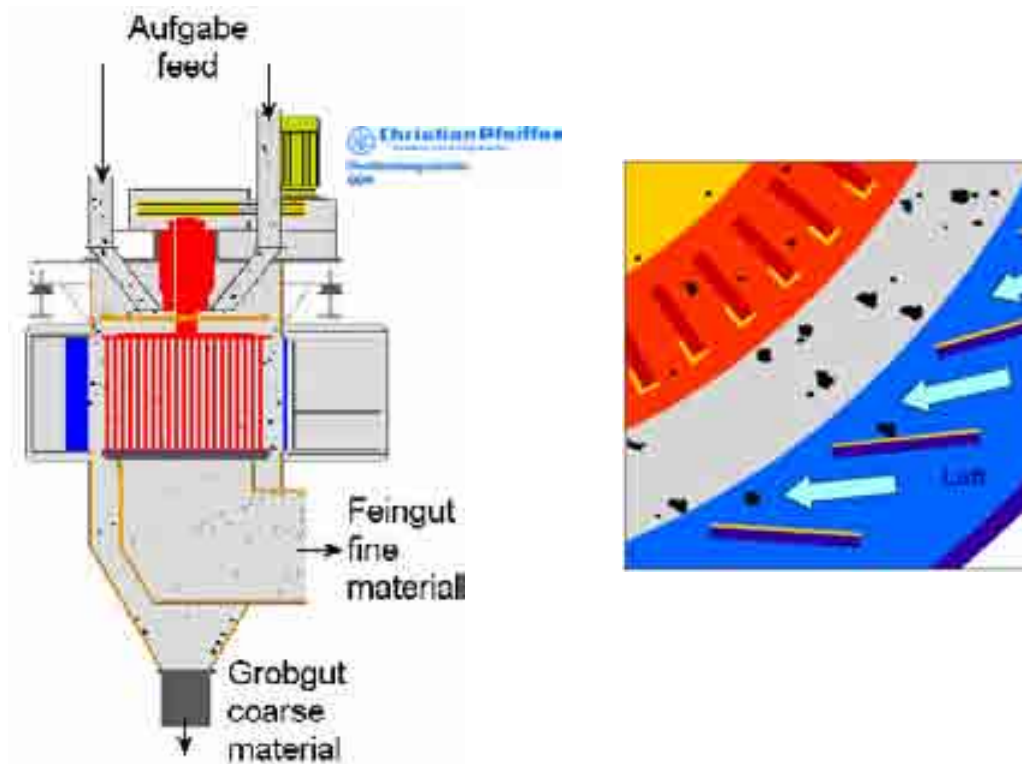


Bild 2: Darstellungen aus der Sichteranimation: vertikale und horizontale Animationsebenen

Ebenso wie bei der Brecheranimation wird auf räumliche Darstellungen verzichtet, um eine gute Übersichtlichkeit zu bewahren. Die Zeit wird als Dimension in die Animation des Sichters einbezogen, natürlich muß besonders bei diesem Parameter erheblich von den tatsächlichen Verhältnissen abgewichen werden.

3 Empirische Modelle am Beispiel einer Kreislaufmahanlage

Aufbau der Versuchseinrichtung

Das empirische Modell, das hier vorgestellt wird, bezieht sich auf eine kleintechnische Mahlanlage, die im Technikum der Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung an der Bauhaus-Universität Weimar betrieben wird. Die Hauptaggregate der Anlage sind die Kugelmühle Super Orion 100/70 (eff. Durchm.: 820 mm, eff. Länge: 700 mm, Drehzahl 32 U/min) und der Kanalradsichter vom Typ 100 ATP mit horizontal gelagerter Sichtradachse. Über die Drehzahl des Sicherterrades, die zwischen 1.150 und 11.500 U/min stufenlos regelbar ist, können Trennkorngrößen von 4 bis 100 μm und Durchsätze von 2 bis 70 kg/h erzielt werden. Die Anlage ist außerdem mit einem Zyklon zur Feingutabscheidung und einem Staubfilter ausgerüstet.

Die Mühle und der Sichter sind über Fördereinrichtungen miteinander verbunden wie im Bild 3 schematisch dargestellt. Dadurch kann ein Materialkreislauf realisiert werden, bei dem das Sichtergrobgut in die Mühle zurückgeführt und das eigentliche Produkt vom Zyklon abgeschieden wird. Daneben sind auch

- Durchlaufmahlungen ohne nachfolgenden Sichtvorgang
- Klassierungen von feindispersen Materialien bis zu Trennkorngrößen von 4 µm
- Chargenmahlungen mit einem Mahlgutvolumen von ca. 0,048 m³ möglich.

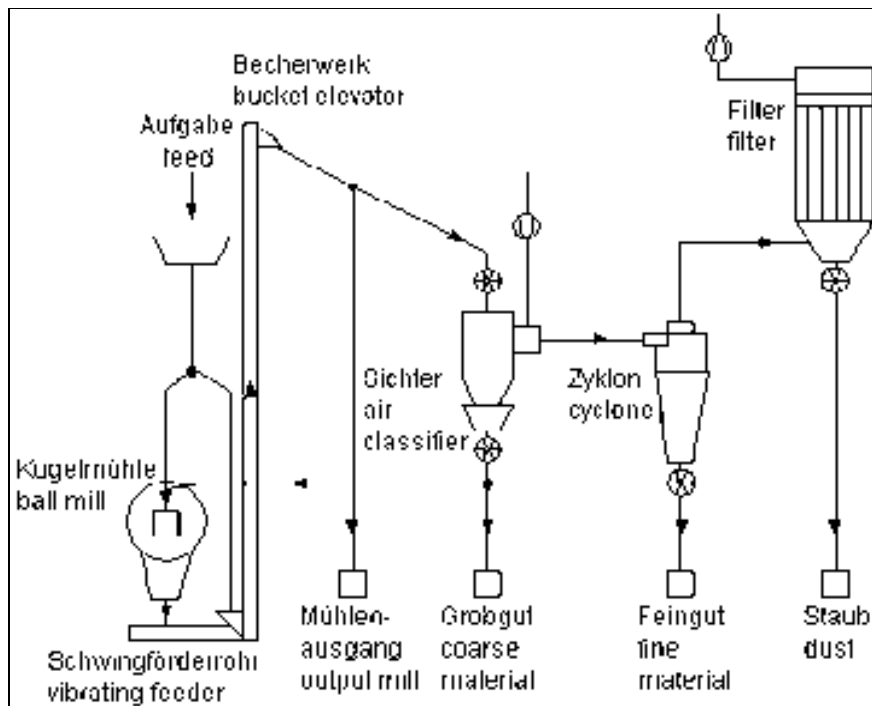


Bild 3: Fließschema der Kreislaufmahlanlage

Bilanzierung der Einzelaggregate

Ausgangspunkt der verfahrenstechnischen Modellierung der Kreislaufmahlanlage ist die zunächst getrennte Bilanzierung der Einzelaggregate anhand der ein- und austretenden Massenströme sowie deren Partikelgrößenverteilungen. Die dafür notwendigen Untersuchungen wurden mit unterschiedlichen Materialien bei systematisch variiertem Sichterumlaufzahl vorgenommen [4]. Hier wird nur auf die Untersuchungen mit Zementklinker und Hüttsand eingegangen. Die Auswertung erfolgte mit Hilfe spezieller Software [5], wodurch der Aufwand für die Bilanzierung überschaubar bleibt.

In den Bildern 4 und 5 sind zwei den Arbeitsbereich der Anlage charakterisierende Zustände dargestellt, die zusammen mit weiteren, dazwischen liegenden Einstellungen die Grundlage der Bilanzierung bilden. Für die Mühle ergibt sich daraus folgende Bilanz:

$$\dot{m}_{\text{Aufgabe}} + \dot{m}_{\text{Grobgut}} = \dot{m}_{\text{Eingang}} = \dot{m}_{\text{Ausgang}}$$

Für die Fraktionen gilt

$$p_{\text{Aufgabe}, i} \cdot \dot{m}_{\text{Aufgabe}} + p_{\text{Grobgut}, i} \cdot \dot{m}_{\text{Grobgut}} = p_{\text{Eingang}, i} \cdot \dot{m}_{\text{Eingang}} = p_{\text{Ausgang}, i} \cdot \dot{m}_{\text{Ausgang}}$$

mit

$p_{\text{Eingang}, i}$: Anteil der Fraktion i im Mühleneingang

$p_{\text{Ausgang}, i}$: Anteil der Fraktion i im Mühlenausgang

Für den Siebter lauten die Gesamtbilanz bzw. die Fraktionsbilanzen

$$\dot{m}_{\text{Ausgang}} = \dot{m}_{\text{Grobgut}} + \dot{m}_{\text{Feingut}} + \dot{m}_{\text{Staub}}$$

$$p_{\text{Ausgang}, i} \cdot \dot{m}_{\text{Ausgang}} = p_{\text{Grobgut}, i} \cdot \dot{m}_{\text{Grobgut}} + p_{\text{Feingut}, i} \cdot \dot{m}_{\text{Feingut}} + p_{\text{Staub}, i} \cdot \dot{m}_{\text{Staub}}$$

mit den entsprechenden Fraktionsanteilen. Bei sehr hohen Sieberraddrehzahlen ist eine effektive Abscheidung im Zyklon nicht mehr möglich. Die Produktabscheidung erfolgt dann direkt im Staubfilter.

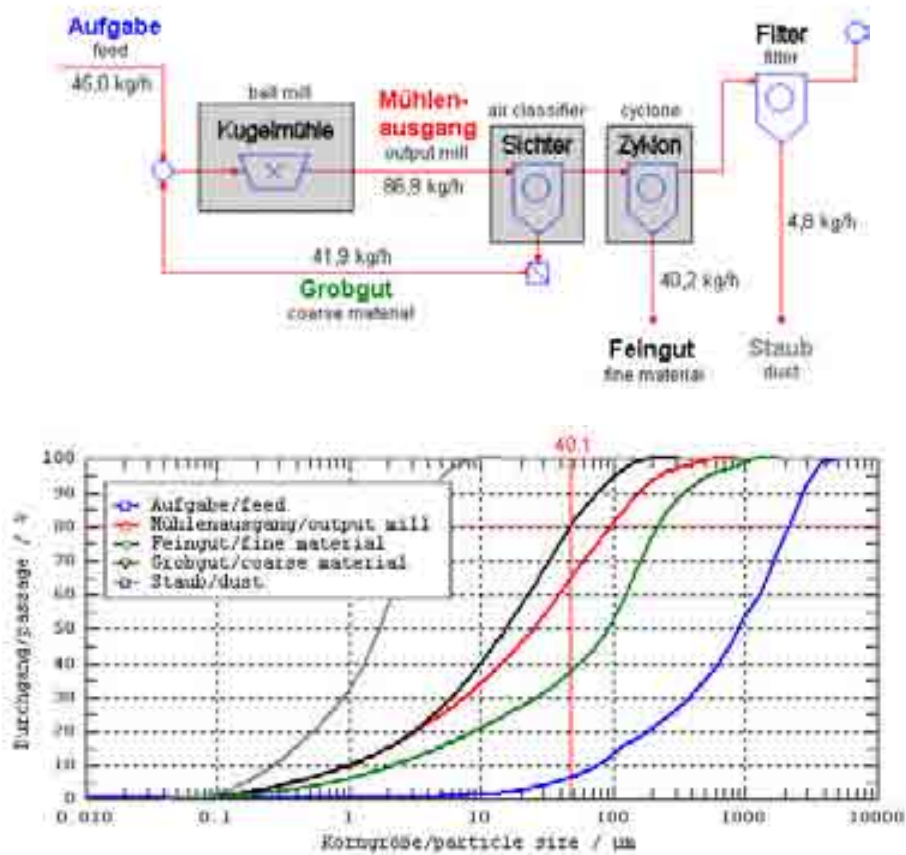


Bild 4: Betriebszustand A, Sieberraddrehzahl $n = 1150$ U/min
Produktkorngröße $x_{80} = 48,1 \mu\text{m}$, $x_m = 15,5 \mu\text{m}$

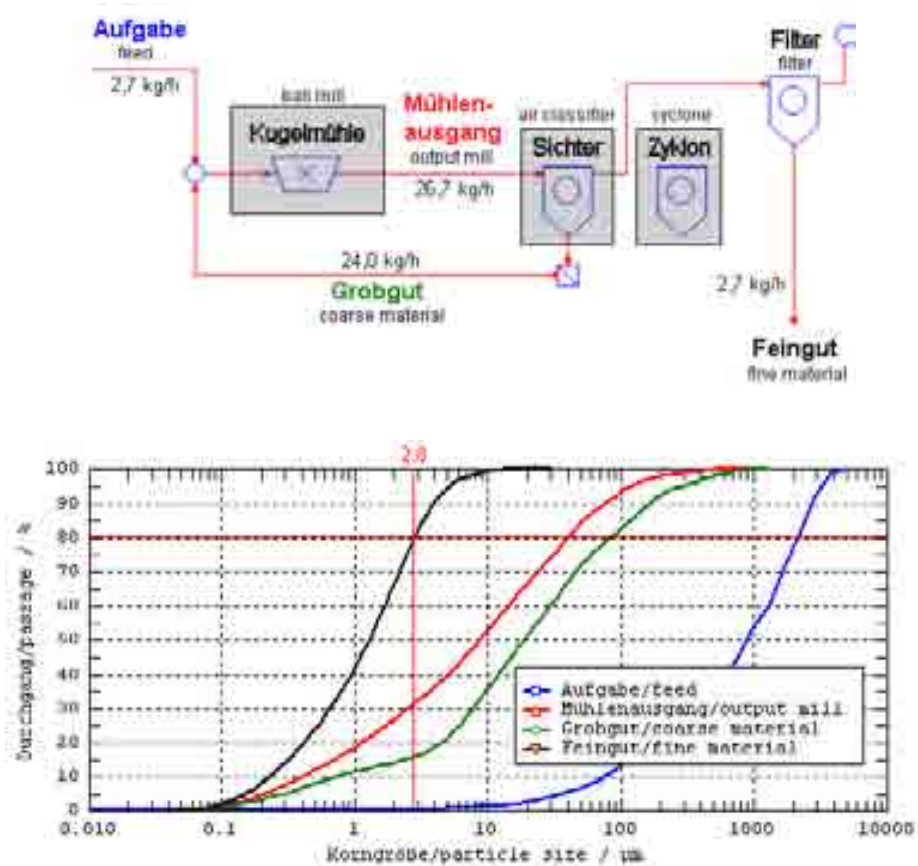


Bild 5: Betriebszustand B, Sichterraddrehzahl $n = 10000 \text{ U/min}$
 Produktkorngröße $x_{80} = 2,8 \text{ }\mu\text{m}$, $x_m = 1,3 \text{ }\mu\text{m}$

Verfahrenstechnische Charakterisierung der Einzelaggregate

Die Zerkleinerungswirkung der Mühle kann durch das Zerkleinerungsverhältnis dargestellt werden

$$Z_{80} = x_{\text{Eingang},80} / x_{\text{Ausgang},80}$$

mit

x_{80} : Partikelgröße bei 80 % Durchgang .

Aus den Analysen der durchgeführten Mahlungen ergibt sich, dass mit steigendem Mühlendurchsatz das Zerkleinerungsverhältnis abnimmt (Bild 6). Außerdem besteht eine Abhängigkeit von der Materialart. So ergeben sich für den Hüttensand geringfügig geringere Zerkleinerungsverhältnisse im Vergleich zu Zementklinker, was auf die bekanntermaßen schlechtere Mahlbarkeit dieses Materials zurückzuführen ist [6,7,8]. Allerdings stehen diesen geringen Unterschieden relativ große Messwertstreuungen gegenüber, so dass für beide Materialien eine gemeinsame Mühlenkennlinie ermittelt wird.

Eine differenziertere Beschreibung der erreichten Zerkleinerungseffekte für den gesamten Partikelgrößenbereich ist mit Hilfe des von [9] vorgeschlagenen Kornanreicherungsverhältnisses (particle concentration rate pcr) möglich, das als Quotient der normierten Partikelgrößenverteilungsdichten des Abstroms und des Zustroms definiert ist. Die normierten Klasseneinteilungen werden als Quotient der betrachteten Korngröße und einer Bezugskorngröße gebildet. Als Bezugskorngröße wird hier die

Korngröße x_{80} gewählt. Eine Anreicherung von Partikeln in den einzelnen Kornklassen stellen alle Werte größer 1 dar, während Werte kleiner 1 einer Abreicherung entsprechen.

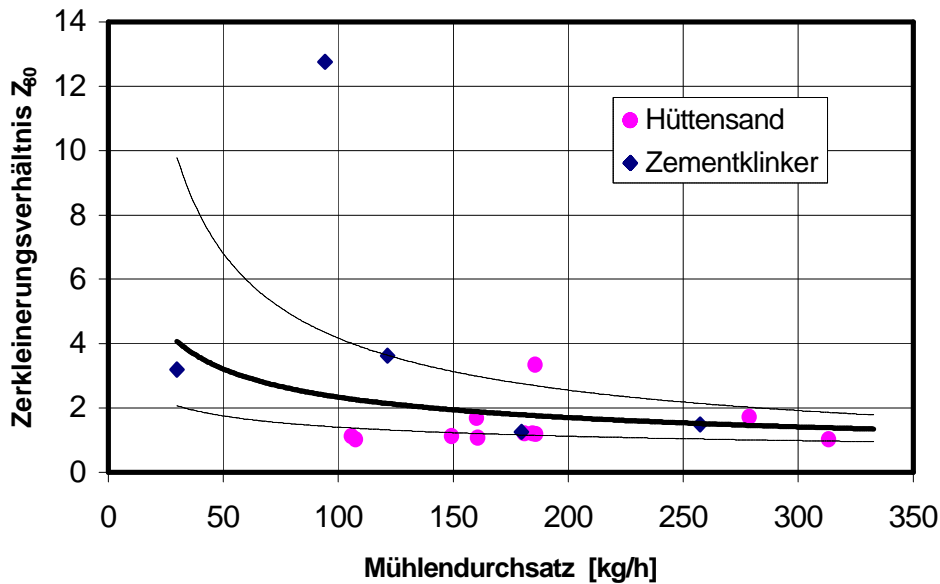


Bild 6: Zerkleinerungsverhältnis in Abhängigkeit vom Mühlenumsatz ($\dot{m}_{\text{Aufgabe}} + \dot{m}_{\text{Grobgut}}$) für Hüttensand und Zementklinker

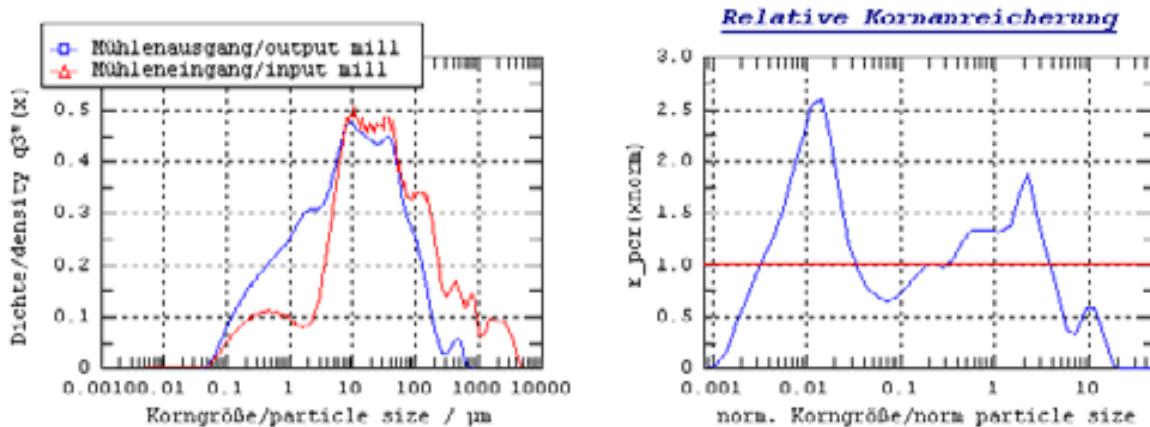


Bild 7: Verteilungsdichtefunktionen von Müleneingang und Mülenausgang und daraus berechnete Kornanreicherungsfunktion

Die Beurteilung des mit dem Sichter erreichten Trennerfolgs kann mittels des Trenngrads vorgenommen werden. Analog zum Kornanreicherungsverhältnis ergibt sich der Trenngrad als Quotient aus zwei Partikelgrößenverteilungsdichten. Zusätzlich geht hier die Aufteilung des Eingangs in Grobgut und Feingut ein:

$$T_i = g \frac{\rho_{\text{Grogut}, i}}{\rho_{\text{Mühlenausgang}, i}} = \frac{\dot{m}_{\text{Grogut}}}{\dot{m}_{\text{Mühlenausgang}}} \cdot \frac{\rho_{\text{Grogut}, i}}{\rho_{\text{Mühlenausgang}, i}}$$

Für das Betriebsverhalten des Sichters folgt aus der Analyse der experimentell ermittelten Trenngradkurven $T = f(x)$ der Zusammenhang zwischen der Trennkorngröße x_T

und der Sicherterraddrehzahl (Bild 8). Die Sichter kennlinie weist ein wesentlich höheres Bestimmtheitsmaß als die Mühlenkennlinie auf. Die Dichteunterschiede der untersuchten Materialien, die bis zu $0,3 \text{ g/cm}^3$ betragen, wirken sich kaum auf die Trennkorngröße aus.

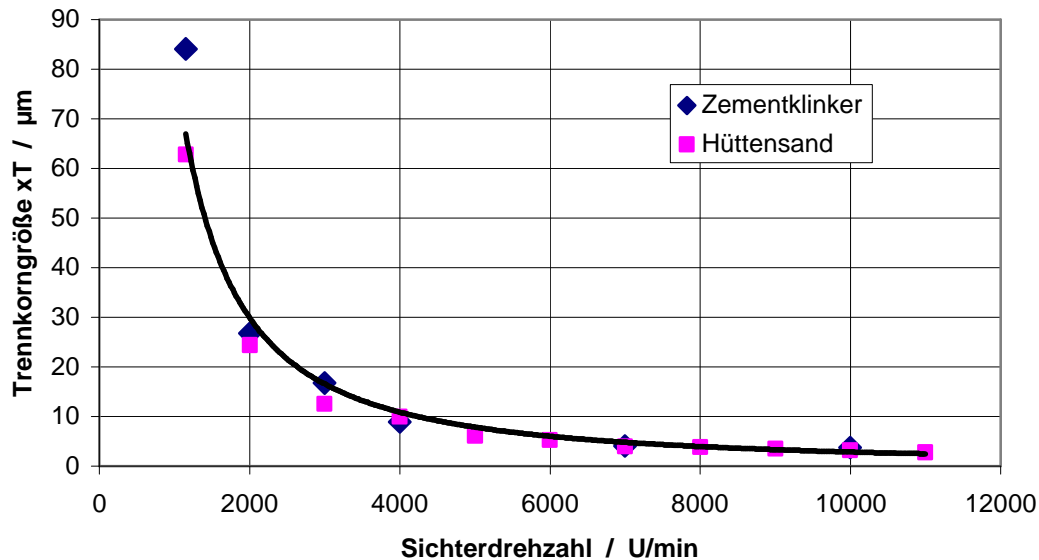


Bild 8: Trennkorngröße in Abhängigkeit von der Sicherterraddrehzahl

Modellierung der Gesamtanlage

Aufbauend auf der Bilanzierung der Einzelaggregate und der Ermittlung der Apparatkennlinien können stoffspezifische Prozessmodelle der Gesamtanlage entwickelt werden, welche den zwischen den Apparaten umlaufenden Materialstrom berücksichtigen. Diese Prozessmodelle erlauben eine Vorausberechnung beliebiger Anlageneinstellungen für die untersuchten Stoffe. So können beispielsweise für eine gewünschte Feinheit eines bestimmten Produktes die Sicherterraddrehzahl als Einstellparameter und die sich ergebenden Massenströme ermittelt werden. Umgekehrt kann auch die Korngrößenverteilung des Produktes und der Anlagendurchsatz berechnet werden, wenn die Sicherterraddrehzahl vorgegeben wird.

Einen ersten Eindruck zur Güte der Simulation, die mit dem hier vorgestellten Prozessmodell erreicht wird, ergibt sich aus Bild 9, auf dem die Partikelgrößenverteilungen der realen Mahlprodukte (Linien schwarz bzw. grün) denen der simulierten Produkte (Linien rot bzw. blau) gegenübergestellt sind. Wie zu erkennen ist, liegt eine weitestgehende Übereinstimmung vor. Allerdings zeigt sich, dass die simulierten Verteilungen in einigen Abschnitten keinen stetigen Verlauf aufweisen und nicht durchgehend mit der realen Verteilung übereinstimmen. Eine Verbesserung der Übereinstimmung lässt sich einerseits durch die Weiterentwicklung der dem Prozessmodell zugrunde liegenden Algorithmen erreichen. Andererseits beeinflusst auch die Qualität der für die Verifizierung des Prozessmodells zur Verfügung stehenden experimentellen Daten die Güte der Simulation. Hier sind insbesondere in Bezug auf die Mühlenkennlinie Verbesserungen erforderlich.

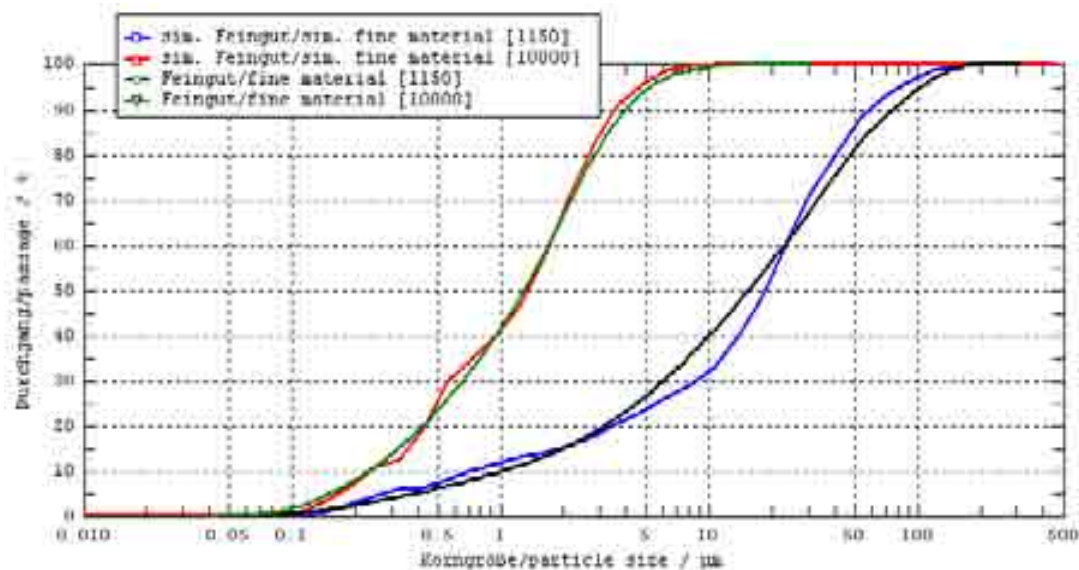


Bild 9: Partikelgrößenverteilungen von realer und simulierter Mahlung

Das hier beschriebene Prozessmodell kann derzeit nur auf Materialien mit bekannten Mahlbarkeitseigenschaften angewendet werden. Deshalb haben Untersuchungen zur Mahlbarkeit nach wie vor ihre Berechtigung.

4 Zusammenfassung

Es werden zwei Arten von Modellen vorgestellt, mit denen Aufbereitungsvorgänge nachgebildet werden können. Als erstes wird auf die Visualisierung eingegangen, die darauf abzielt, die Abläufe in Aufbereitungsapparaten vereinfacht, auf das wesentliche konzentriert, aber richtig verstanden in Animationen nachzubilden. Der zweite Modelltyp ist in die Gruppe der empirischen Modelle einzuordnen. Diese Modelle geben die Zusammenhänge zwischen den Durchsätzen durch ein System, den Anlagenparametern sowie den Materialeigenschaften und deren Verteilung wieder. Am Beispiel der Mahlung von Zementklinker und Hüttensand in einer kleintechnischen Kreislaufmahlanlage wird die Vorgehensweise bei der Erstellung solcher Modelle und die Möglichkeiten der Prozesssimulation mit diesen Modellen diskutiert.

Literatur

- [1] GSCHAIDER, H.J: EDV-Simulation stationärer Betriebszustände in der Mineralaufbereitung. Schüttgut 8 (2002), H.2, S.124-127.
- [2] WIENKE, L.: e-processing - Computeranimation der Arbeitsweise von Backen- und Prallbrecher. Bauhaus-Universität Weimar Studienarbeit, 1999.
- [3] WADE, L.: 4-Dimensional computer visualisation as an aid in mining education. Computer Applications in the minerals Industries. Xie, Wang & Jiang (eds) 2001 Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 1740.

- [4] WIENKE, L.; LANDER, S.; STARK, U.; MÜLLER, A.: Untersuchungen zur Mahlung von Rohstoffen, Abfällen und Zwischenprodukten in einer kleintechnischen Anlage, eingereicht bei ZKG INTERNATIONAL.
- [5] GRAINsoft: PMP-Compact - Die Software für die mechanische Verfahrenstechnik. Benutzerhandbuch GRAINsoft GmbH Freiberg, 1998.
- [6] SCHILLER, B.: Mahlbarkeit der Hauptbestandteile des Zementes und ihr Einfluss auf den Energieaufwand beim Mahlen und die Zerkleinerungseigenschaften. Dissertation RWTH Aachen, 1992.
- [7] LOHNHERR, L.; MENZEL, K.: Betriebserfahrungen bei der Herstellung von Zementen mit der Rollenmühle. ZKG INTERNATIONAL, 52 (1999), Nr. 3, S. 136-146.
- [8] MARCHAL, G.: Le Broyage de Laitier. Ciments, Bètons, Plâtres, Chaux (2000), Mars-Avril, S. 20-31.
- [9] ESPIG, D.; REINSCH, V.: Die Kornanreicherungskurve – ein wertvolles Hilfsmittel für die Partikeltechnologie, in „Partikeltechnologie“ Vorträge und Poster zum 49. Berg- und Hüttenmännischen Tag 1998 in Freiberg. Freiburger Forschungshefte A 841 (1998), S. 118-132.

Autoren

Dipl.-Ing. Lars Wienke schloss 2000 den Studiengang Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar ab und ist seitdem am dortigen Lehrstuhl Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Im Rahmen seiner Forschungstätigkeit beschäftigt er sich hauptsächlich mit der mathematischen Modellierung von Anlagen und der Sortierung von Roh- und Reststoffen.

Prof. Dr.- Ing. habil. Anette Mueller studierte Baustoffingenieurwesen an der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar (jetzt Bauhaus-Universität) und begann ihre Berufslaufbahn 1974 im Zementanlagenbau Dessau. Ihre Promotion (1974) und ihre Habilitation (1987) waren den Gebieten der Verfahrenstechnik bzw. der Zementchemie angesiedelt. Seit 1995 leitet sie den Lehrstuhl für Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung an der Bauhaus-Universität in Weimar. Ihre Forschungsinteressen liegen auf den Gebieten des Recyclings von Bauabfällen, der Produktentwicklung aus Bauabfällen, den Aufbereitungstechnologien für mineralische Baustoffe.

Dipl.-Ing. Stefan Lander schloss 1997 den Studiengang Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar ab und ist seitdem am dortigen Lehrstuhl Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Im Rahmen seiner Forschungstätigkeit beschäftigt er sich hauptsächlich mit Fragen der Zerkleinerung und Klassierung von Roh- und Reststoffen. Er hat die ingenieurtechnische Betreuung des Aufbereitungstechnikums inne.

Dr.-Ing. Ursula Stark studierte Baustoffingenieurwesen an der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar (jetzt Bauhaus-Universität) und promovierte 1980 am Lehrstuhl Maschinenwesen / Strömungsmechanik auf dem Gebiet der Baustoffver-

fahrenstechnik. Sie arbeitet als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung und leitet seit 1995 das dortige Korngrößenlabor. Die Forschungsschwerpunkte und Aufgabeninteressen liegen auf den Gebieten Partikelmessetechnik und Recycling im Bauwesen.