

Forschungsthema: “Modellierung von Aufbereitungsprozessen“

0 Einleitung

Bei der Aufbereitung von Rohstoffen ist es wichtig, auf Wirtschaftlichkeit und Produktivität zu achten. Um hier optimale Ergebnisse bei der Auswahl der eingesetzten Anlagen und der Einstellung der Anlagenparameter zu erreichen, ist es sinnvoll sich bestimmter Hilfsmittel zu bedienen. Solche Hilfsmittel sind u.a. die Modellierung und Visualisierung von Aufbereitungsprozessen. Auf beide soll im folgenden eingegangen werden.

Als Beispiel für die mathematische Modellierung wurde versucht, ein Modell für die Kugelmahl-Sicht-Anlage zu erstellen, welche sich im Aufbereitungstechnikum der Professur „Aufbereitung und Wiederverwertung von Baustoffen“ befindet. Als Hilfsmittel fungiert hier das Softwareprodukt PMP–Compact der Firma GRAINSOFT.

Gerade bei der Kugelmahl-Sicht-Anlage ist es wichtig, ein Mahlprodukt mit bestimmten granulometrischen Parametern und geringem versuchstechnischem Aufwand zu erreichen, da Fehlversuche im Vorfeld oft sehr teuer und zeitaufwendig sind.

Durch die Modellierung der Anlage kann es erreicht werden, dass am Computer verschiedenste Testdurchläufe realitätsnah durchgeführt werden, um damit Anlagenparameter zu errechnen, die zu dem gewünschten Produkt führen. Dadurch soll die Anzahl aufwendiger praktischer Versuche auf ein Minimum begrenzt werden.

Die Nachbildung von Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen mit Hilfe von mathematischen Modellen setzt voraus, dass die theoretischen Grundlagen für die in den Arbeitsräumen ablaufenden Prozesse ebenso bekannt sind, wie die Größe der Bereiche, in denen die Modelle Gültigkeit besitzen. Ziel der mathematischen Modellierung ist es, mit Hilfe bekannter theoretischer Grundlagen einen qualitativen Zusammenhang der bestimmenden Größen mit einem oder mehreren Gleichungssystemen zu schaffen. Die damit erhaltenen Gleichungen bzw. Gleichungssysteme sind wichtige Voraussetzungen für die Auslegung von Maschinen und Anlagen, verfahrenstechnische Prozessführung sowie Optimierung und Automatisierung von Prozessen. Deshalb müssen Prozess-, Maschinen- und Anlagenmodellierung stets als Einheit betrachtet werden, auch wenn für den Prozess, die Maschine oder Anlage verschiedentlich unterschiedliche Zielstellungen verfolgt werden. [1,2]

Bei der visuellen Modellierung geht es um die durch Animationen veranschaulichte Darstellung von Funktionsweisen und Abläufen in Materialverarbeitungsanlagen 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 entwickelt und in Vorlesungen oder für Vorträge ebenso wie als Anlage in Fachbüchern Verwendung finden können, stellen eine völlig neue Qualität bei der Prozessdarstellung dar. 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.

Für Anlagenhersteller besteht mit e-processing darüber hinaus die Möglichkeit, dass die Funktionsweise einer Anlage schnell und unkompliziert präsentiert und dargestellt werden kann.

Die Hauptidee von e-processing ist die Animation. Hierdurch können komplexe und schwer nachvollziehbare technische Prozesse mit Hilfe von bewegten Bildern anschaulich dargestellt werden. E-processing bringt in didaktischer Hinsicht wesentliche Vorteile gegenüber der Anwendung von Videos, da bei der Animation schematisiert wird und nur wesentliche Elemente zur Verdeutlichung der Funktionsweise dargestellt werden. Zusätzlich können notwendige Informationen bereitgestellt werden, wie z.B. Bauteilbeschreibungen, Eigenschaften, Beispiele etc.

Prinzipiell kann e-processing in allen Bereichen der Ausbildung eingesetzt werden und besonders dort, wo schwer nachvollziehbare technische Abläufe und Verfahren erklärt werden müssen. Erste Module sind unter

<http://www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/e-processing/e-processing.htm> einsehbar.

1. Modellierung der Kreislaufmahlung mit PMP-Compact

1.1. Datenerfassung

Um eine Simulation mit der Software PMP-Compact realisieren zu können, müssen zunächst die Parameter der Mahlanlage für jeweils einen bestimmten Stoff ermittelt werden. Dazu ist es notwendig, dass die Anlage mit möglichst vielen verschiedenen Einstellungen gefahren wird, um die Mühle, den Sichter und den Zyklon verfahrenstechnisch charakterisieren zu können.

Benötigt werden Angaben zu folgenden Parametern:

- Leistungsaufnahme der Mühle
- Durchsätze: Mühle, Grobgut, Fertiggut, Staub
- Partikelgrößenverteilung der Stoffströme

Das Datenmaterial, was für die nachfolgend beschriebene Modellierung verwendet wurde geht auf Mahlversuche mit Altbeton zurück, der auf 6 unterschiedliche Feinheitsstufen zerkleinert wurde. Weiterhin werden Daten aus Mahlungen anderer Materialien verwendet, um die Wirkung der unterschiedlichen Stoffeigenschaften auf die Simulation zu untersuchen [3].

Da keine Proben vom Aufgabegut der Mühle oder vom Sichterfeingut genommen werden konnten, die Partikelgrößenverteilungen dieser Stoffströme für die Erstellung der einzelnen Modelle jedoch erforderlich sind, müssen diese Verteilungen rechnerisch ermittelt werden. Dies wurde ebenfalls durch das Programm PMP-Compact realisiert, wobei mehrere Partikelgrößenverteilungen unter Berücksichtigung der Masseströme vereinigt werden.

1.2. Analyse und Erstellung der Modelle

Zur Modellierung wurde die Software PMP-Compact verwendet. Das Mitgelieferte Modul PMP Mill+Class dient als leistungsfähiges Werkzeug für die optimale Analyse und Einbindung des Datenmaterials.

Die Grundlage der Modellierung ist zunächst die Analyse der Einzelaggregate Mühle, Sichter und Zyklon. In diesem ersten Schritt werden aus den vorliegenden Messdaten Abhängigkeiten ermittelt, die den in dem jeweiligen Aggregaten erreichten Aufberei-

tungseffekt als Funktion von Betriebsparametern wie Durchsatz oder Sichterdrehzahl angeben. Im zweiten Schritt erfolgt eine Verknüpfung der Einzelaggregate über die zwischen ihnen zirkulierenden Stoffströme. Die Grundlage der Verknüpfung ist das Fließbild, hier werden die einzelnen Modelle eingefügt und ergeben zusammen die vorhandene Anlage. In Abbildung 1 ist das Fließbild der Kugelmahl-Sicht-Anlage abgebildet, welche für die Testmahlungen verwendet wurde.

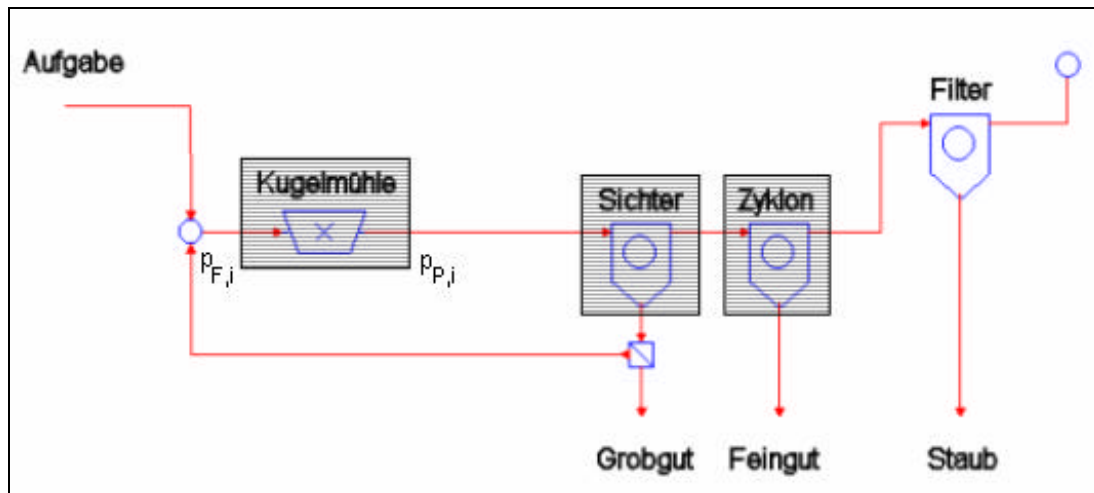


Abb. 1: Fließbild der Kugelmahlsichtanlage [5]

Innerhalb der hinterlegten Bereiche gelten die jeweiligen Rechenmodelle, welche den Mahl- bzw. Sichterdurchgang simulieren. Um die Parameter dieser Modelle exakt bestimmen zu können ist eine Analyse der einzelnen Stoffströme erforderlich. Aus den einzelnen Modellen lässt sich dann ein Gesamtmodell erstellen, das eine Beziehung zwischen dem Produktdurchsatz, der Granulometrie des Produkts und den Stellgrößen der Anlage liefert.

1.3. Erstellung des Mühlenmodells

Bei der Lösung verschiedener Probleme der Partikeltechnologie, insbesondere bei der Bilanzierung, Bewertung und Simulation von Prozess-Stufen und verfahrenstechnischen Systemen besteht ein wichtiger methodischer Schritt darin, eine Relation zwischen zwei Partikelgrößenverteilungen herzustellen. Als praktikabel und vorteilhaft erweist es sich, diese Relation in Form eines Quotienten von zwei entsprechenden, gegebenenfalls normierten Partikelgrößenverteilungsdichten anzugeben. Bei einer Zerkleinerung ist mit einer solchen Vorgehensweise eine differenzierte Beschreibung der erreichten Effekte für den gesamten Partikelgrößenbereich möglich. Aus Aufwandsgründen erfolgt allerdings in einer Vielzahl von Fällen eine Bewertung des Zerkleinerungserfolgs durch ein Zerkleinerungsverhältnis, das die eine Partikelgrößenabnahme nur für eine charakteristische Korngröße angibt. [4]

Analog zur üblichen Charakterisierung des Trennerfolges eines Sortierprozesses durch das Anreicherungsverhältnis wird bei Einteilung des Korngrößenbereichs in n Kornklassen das auf die Kornklasse i bezogene Kornanreicherungsverhältnis pcr_i (particle concentration ratio) als Quotient der Kornfraktionen eines ausgewählten Abstroms $p_{P,i}$ und des Zustroms $p_{F,i}$ für einen beliebigen Prozess der Partikeltechnologie definiert:

$$pcr_i = \frac{p_{P,i}}{p_{F,i}} \quad p_{F,i} > 0; \quad i = 1, \dots, N$$

Damit ist das Kornanreicherungsverhältnis für $p_{Fi} > 0$ definiert und besitzt einen Wertebereich von $[0, \infty]$. Folgende Fälle können unterschieden werden:

$pcr_i = 1$: Die Masseanteile von Partikeln der Kornklasse i im Aufgabegut und im Produkt sind gleich. Dabei muss es sich im Allgemeinen nicht physisch um die gleichen Partikel von Aufgabegut und Produkt handeln. Falls also ein bestimmter Masseanteil die Kornklasse i verlassen hat, muss der gleiche Masseanteil durch Partikel, die der gleichen Kornklasse i zuzuordnen sind, ersetzt worden sein.

$pcr_i > 1$: Die Kornklasse i wurde mit Partikeln angereichert; die Masseanteile von Partikeln der Kornklasse i im Produkt sind höher als im Aufgabegut.

$pcr_i < 1$: Es haben mehr Partikel die Kornklasse i verlassen als hinzugekommen sind. In diesem Fall liegt eine Abreicherung vor.

$pcr_i = 0$: Im ausgewählten Abstrom gibt es keine Partikel mehr, die zu dieser Kornklasse gehören; der Zustrom enthält einen Masseanteil $p_{F,i} > 0$.

$pcr_i \rightarrow \infty$: Der Zustrom enthält einen verschwindend geringen Masseanteil an Partikeln der Kornklasse i , während im Abstrom ein Masseanteil $p_{P,i} > 0$ an Partikeln der Kornklasse i enthalten ist.

Im Falle des hier betrachteten Mühlenmodells ist die Kornanreicherungskurve der Quotient aus den (massebezogenen) Verteilungsdichten des die Mühle verlassenden Materialstroms $p_{P,i}$ und des entsprechenden Zustromes $p_{F,i}$. Dieser Sachverhalt soll mit Abb. 2 und Abb. 3 veranschaulicht werden. Abb. 2 enthält die massebezogenen Verteilungsdichten $q_F(x)$ und $q_P(x)$, Abb. 3 die resultierende Kornanreicherungskurve $pcr(x)$. [6]

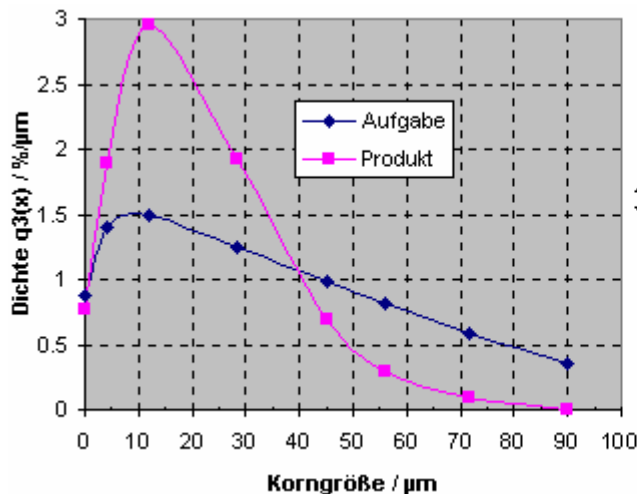


Abb. 2: Verteilungsdichten von Zu- und Abstrom

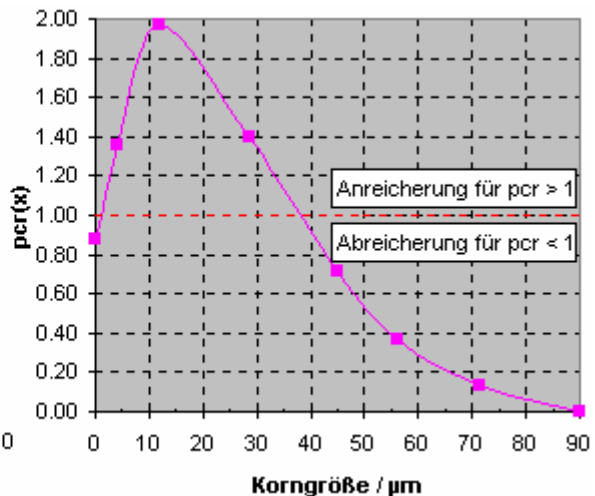


Abb. 3: Kornanreicherungskurve

Es konnte festgestellt werden, dass die Kornanreicherungskurven für verschiedene Durchsätze und Austragsspaltweiten der Mühle annähernd konstant sind. Damit ergibt sich nun die Möglichkeit, eine stoffspezifische Kornanreicherungskurve der Mühle durch Mittlung der einzelnen Werte zu berechnen.

Von ebenso großer Bedeutung ist das Zerkleinerungsverhältnis, welches bei der oben beschriebenen Mühlenanalyse parallel mitberechnet wird. Die Auswertung ergibt, dass sich das Zerkleinerungsverhältnis verringert, wenn sich der Durchsatz erhöht (Tab. 1). Dadurch liegt für jeden Durchsatz ein bestimmtes Zerkleinerungsverhältnis vor.

Um die Abhängigkeit des Zerkleinerungsverhältnisses vom Durchsatz in das Modell zu integrieren, wird ein Potenzproduktansatz aus den vorhandenen Wertepaaren ermittelt.

Mühlendurchsatz p_F in kg/h	62,7	54,9	34,4	19,7	16,4
Zerkleinerungsverhältnis as_{rr}	4,96	5,50	7,88	12,11	13,94

Tabelle 1: Mühlendurchsätze und dazugehörige Zerkleinerungsverhältnisse für eine Austragsspaltweite von $s=0,5$ cm

Mit Hilfe dieser Werte stellt das Programm den folgenden Potenzproduktsatz auf:

$$as_{rr} = 120,17 \cdot D^{-0,77}$$

Durchsatz $D=p_F=p_P$

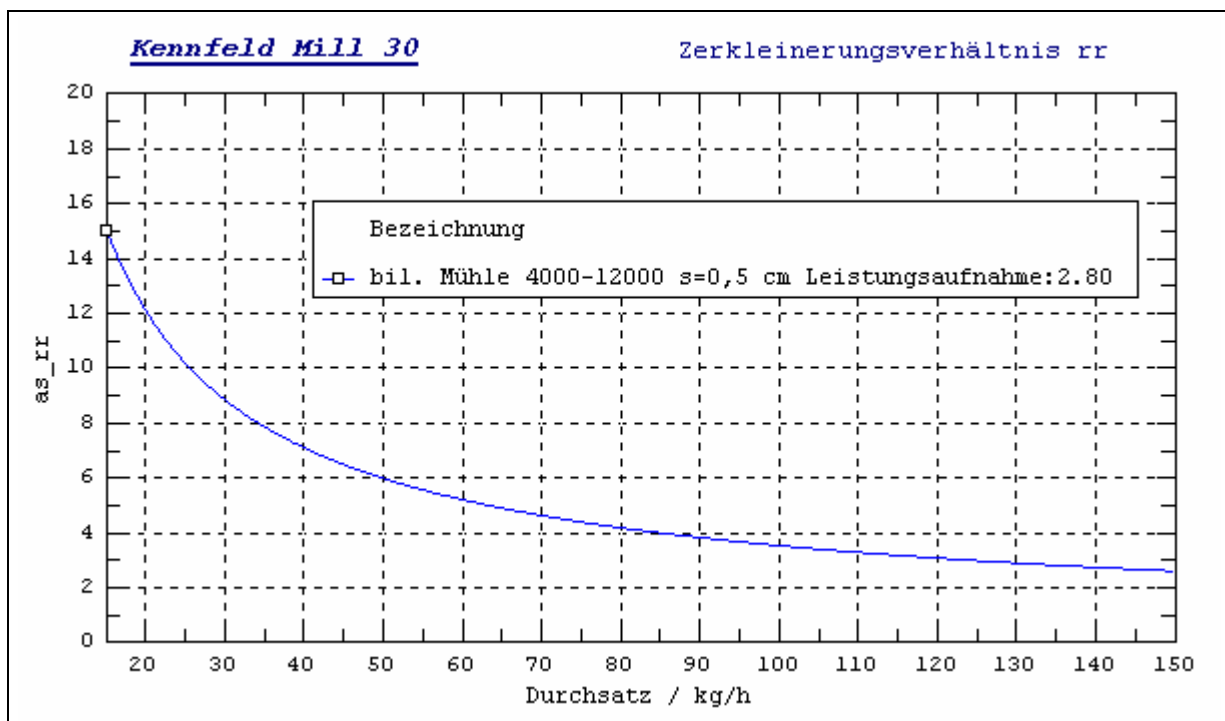


Abb. 4: Potenzproduktfunktion zwischen Zerkleinerungsverhältnis und Mühlendurchsatz

In der späteren verknüpfenden Simulation ergibt sich aus dieser Funktion und dem vorliegenden Durchsatz das dazugehörige Zerkleinerungsverhältnis.

Ein weiterer bedeutsamer Parameter der Mühle ist die Austragsspaltweite, welche die Verweilzeit in der Mühle regelt. Wenn sie verändert wird, hat dies sehr starke Auswirkungen auf das Zerkleinerungsverhältnis. Da das Modell so angelegt ist, dass kein weiterer Potenzproduktansatz hinzugefügt werden kann, und da die Spaltweite nur drei Werte annehmen kann, werden drei verschiedene Mühlenmodelle erstellt, wobei jedes Modell für eine bestimmte Spaltweite gilt.

Jedes dieser Modelle stellt die spaltweitenabhängige Beziehung zwischen Zerkleinerungsverhältnis und Durchsatz dar und kann später in die Simulation einbezogen werden.

1.4. Erstellung des Klassiermodells

Da in der Kugelmahl-Sicht-Anlage ein Sichter und ein Zyklon integriert sind, werden in der Simulation zwei Klassiermodelle benötigt.

Klassierprozesse werden in PMP-Compact durch Trenngrade oder standardisierte Trenngrade charakterisiert, die Basisdaten der Klassierobjekte darstellen. Verknüpft damit sind verschiedene Kenngrößen zur Charakterisierung des Klassiervorgangs und der Klassierergergebnisse sowie allgemeine Angaben.

Um nun ein Modell des Sichters erstellen zu können, wird wie bei der Erstellung des Mühlenmodells vorgegangen. Im Programm wird die Analyse für Klassierprozesse gestartet und die Messwerte für die Partikelgrößenverteilung und die Stoffströme der Sichteraufgabe und der Produkte eingegeben. Als Ergebnis erhält man die Trenngrade, die in Abhängigkeit von der Partikelgröße erreicht werden. Die mathematische Formulierung durch die modifizierte Plitt-Funktion und deren Parameter sieht wie folgt aus:

$$T(x) = T_0 + (1 - T_0) \cdot \left[1 - \exp\left(-\ln 2 \cdot \left|\frac{x - x_0}{xT - x_0}\right|^{\text{delta}}\right)\right] \quad \text{Modifizierte Plitt-Funktion}$$

- T_0 (plitt) Teilungsmenge (unklassierter Anteil, toter Fluss, Bypass)
- xT (plitt) Trennkorngröße
- x_0 (plitt) Scheitelpunktskorngröße der Plitt - Funktion
- delta (plitt) Steigungsexponent der Plitt - Funktion

Um am Beispiel der Altbetonmahlung zu zeigen, wie eine solche Analyse aussieht, wurden in Abb. 5 die Verteilungssummenkurven des Aufgabeguts und der Produkte des Sichters und in Abb. 6 die analysierte Plitt-Funktion abgebildet. Hierbei handelt es sich um eine Sichterzahl von 5000 U/min.

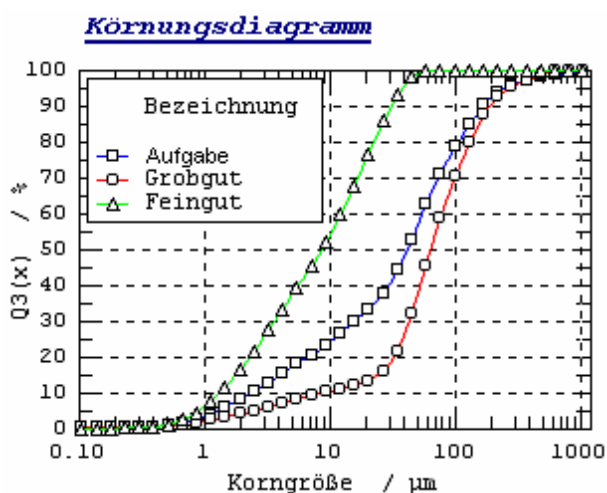


Abb. 5: Partikelgrößenverteilung der Sichteraufgabe und der Produkte

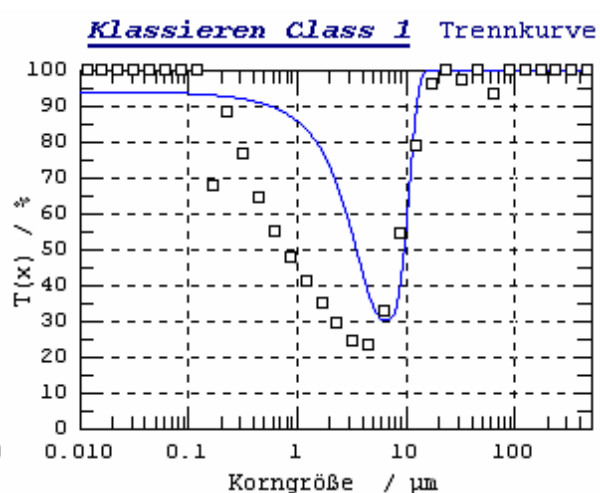


Abb. 6: Trennkurve des Sichters

Da diese Funktion typisch für einen bestimmten Durchsatz und eine entsprechende Sichterzahl ist, müssen dem Klassierobjekt diese Werte zugewiesen werden. Der

Durchsatz wird automatisch durch das Programm in das Analyseobjekt eingetragen, der Wert dafür wird aus den Ausgangsobjekten berechnet. Für die Sichterzahl bedient man sich wieder der Kenngrößenzuordnung, welche schon bei der Erstellung des Mühlenmodells verwendet wurde. Hierbei wird dem Objekt die Kenngröße SICHTERDREHZAHL zugewiesen und die entsprechende Drehzahl eingetragen.

Um in der späteren Simulation beliebige Sichterzahlen eingeben zu können, muss aus mehreren Datensätzen ein standardisiertes Klassierobjekt berechnet werden. Für diese Berechnung ist es vorteilhaft, wenn eine ganze Reihe von Einstellungen des Klassierers analysiert werden, die eine konstante Abstufung der Sichterzahl aufweisen. Dieser Vorgang benötigt mindestens drei Klassierobjekte, je höher aber die Anzahl ist, um so größer ist die Genauigkeit des standardisierten Klassierobjektes.

Die Zusammenfassung der Abhängigkeit zwischen Sichterdurchsatz, Sichterzahl, Trennkorngröße und Teilungsmenge erfolgt wiederum durch einen Potenzproduktansatz. Dabei sind die Sichterzahl und der Durchsatz Einflussgrößen im Potenzproduktansatz, wobei Teilungsmenge und Trennkorngröße Ergebnisgrößen sind.

In Abb. 7 ist die Abhängigkeit der Trennkorngröße von der Sichterzahl am Beispiel der Altbetonmahlung durch einen Potenzproduktansatz dargestellt.

Bei der Erstellung des Zyklonmodells ist die Vorgehensweise identisch der Erstellung des Sichtermodells, wobei in diesem Fall natürlich keine Einflussgröße „Drehzahl“ existiert.

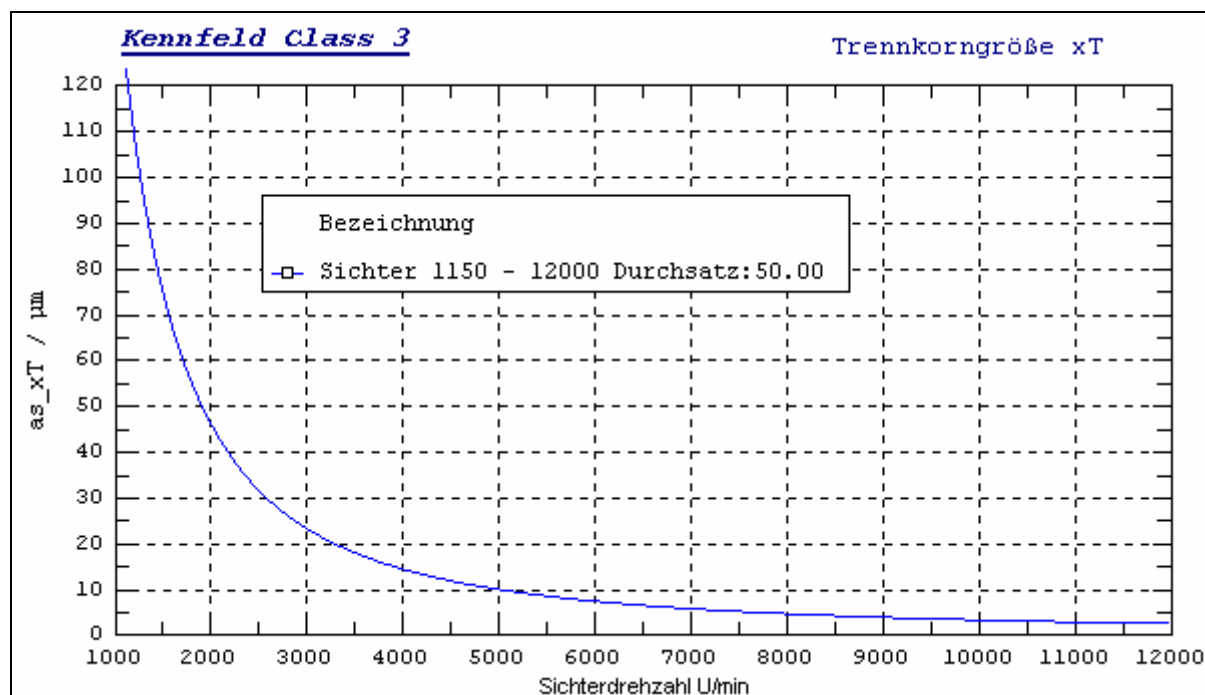


Abb. 7: Abhängigkeit der Trennkorngröße von der Sichterzahl

1.5. Testsimulationen und Anwendung des Modells

Um beurteilen zu können, ob die verknüpften Modelle den realen Mahlprozess simulieren können, sollte zur Kontrolle ein Vergleich, zwischen den Messdaten der realen Anlage und den aus der Simulation folgenden Daten, durchgeführt werden.

Da sich die Simulation beziehend auf die Massenströme eigenständig prüft, kann davon ausgegangen werden, dass die Bedingung

$$\text{Massestrom Aufgabe} = \text{Massestrom Produkt}$$

erfüllt ist, wenn ein stationärer Zustand angezeigt wurde. Ob die Massenströme im System mit denen aus der realen Mahlung übereinstimmen wird überprüft, indem die simulierten Massenströme aus dem Programm heraus abgerufen und verglichen werden.

Eine weitere Kontrollmöglichkeit ergibt sich durch den Vergleich der Partikelgrößenverteilungen des simulierten Mahlproduktes mit der des realen Produktes. Im günstigsten Fall sollten diese Verteilungen identisch sein. In Abb. 8 ist die Partikelgrößenverteilung des simulierten Mahlproduktes und des realen Produktes bei einer Sichterzahl von 5000 U/min abgebildet.

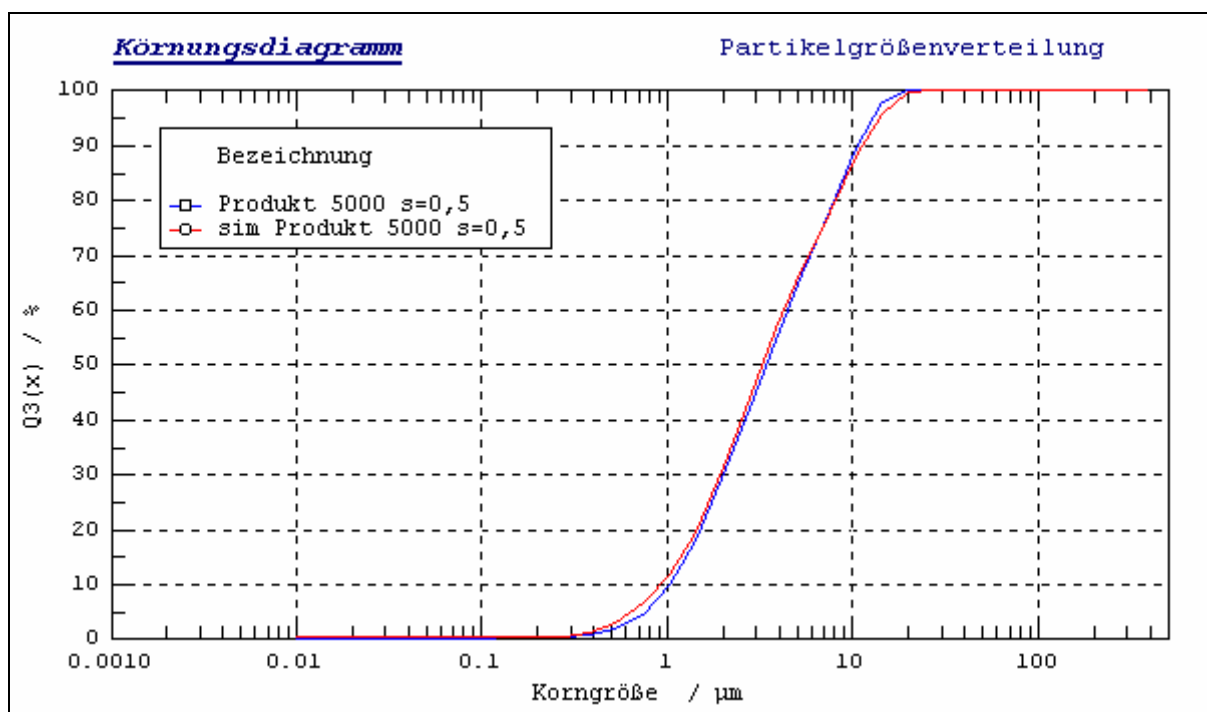


Abb. 8: Vergleich der Partikelgrößenverteilung

Daraus ist gut zu erkennen, dass ein sehr gutes Simulationsergebnis vorliegt, denn die Verteilungssummenfunktionen der realen und simulierten Mahlung sind fast identisch. Weiterhin können ebenso die Grobgut- und Umlaufmassenströme durch den Vergleich der Partikelgrößenverteilung kontrolliert werden.

Um durch Simulation die Auswirkungen von Einstellungen wie der Sichterzahl oder Spaltweite voraussagen, sollten bestimmte Vorüberlegungen durchgeführt werden. Zum einen stellt sich die Frage, welche Partikelgrößenverteilung bzw. welche obere Korngröße angestrebt wird. Zum anderen muss vorgegeben werden mit welchem Durchsatz die Anlage betrieben werden soll.

In der folgenden Abbildung sind im Abstand von 1000 U/min die Partikelgrößenverteilungen aller Simulationsprodukte mit den dazugehörigen Sichterzahlen dargestellt, welche mit dem Modell ALTBETON simuliert wurden.

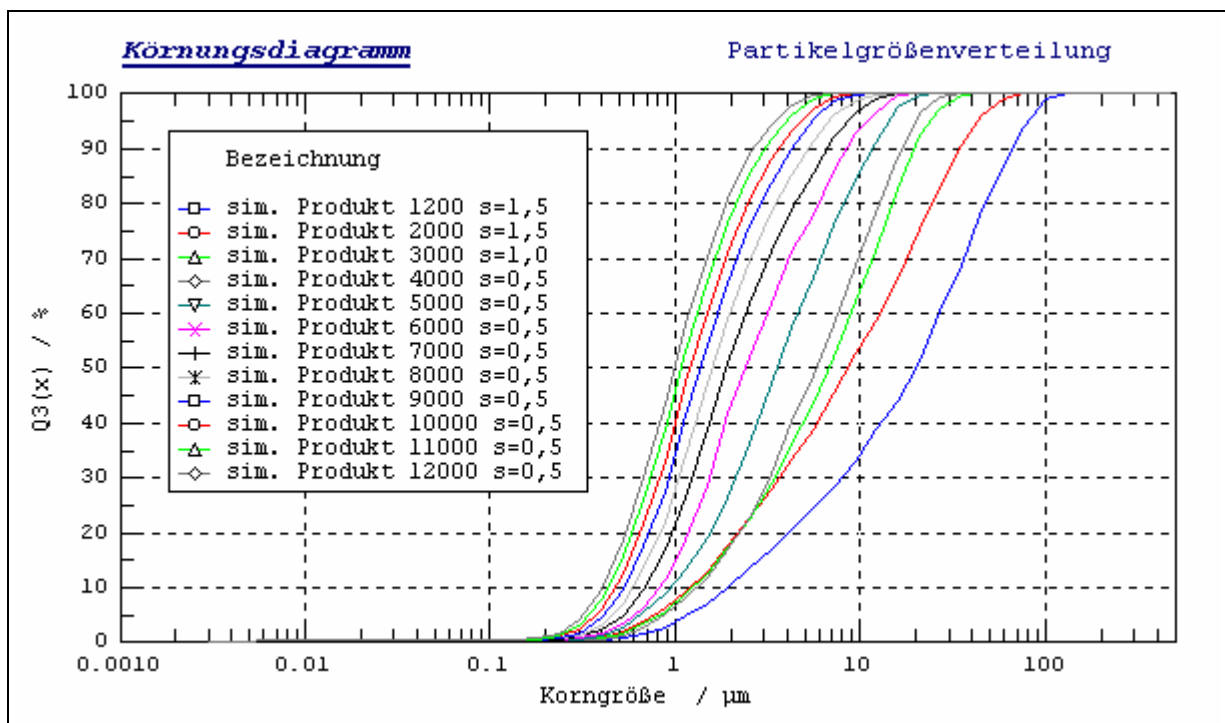


Abb. 9: Komplettes Simulationsspektrum des Modells ALTBETON

Der Abbildung kann entnommen werden, dass mit steigender Sichterzahl die Feinheit der Produkte zunimmt. Allerdings ist diese Zunahme bei hohen Sichterzahlen sehr gering. Dieses Simulationsergebnis stimmt mit den Erfahrungen aus realen Mahlungen überein.

2. Zusammenfassung

Unter Hinzuziehung der Software PMP-Compact konnte demonstriert werden, wie die einzelnen Modellobjekte des Mahlkreislaufes unter Verwendung der ermittelten Messdaten erstellt werden können und damit eine Simulation der Gesamtanlage möglich ist. Nach dem Vergleich der Partikelgrößenverteilungen der real durchgeführten und der simulierten Mahlung zeigte sich, dass eine gute Übereinstimmung erreicht wird. Weiterhin konnten zusätzliche widerspruchsfreie Durchläufe simuliert werden, welche aus Zeitgründen in der Praxis nicht durchführbar waren. Die Ergebnisse dieser Simulationen fügten sich in das Schema der Versuchsmahlungen ausgezeichnet ein, worin sich einer der wichtigsten Vorteile der Modellierung zeigt - die Zeiteinsparung.

Da durch die Simulation der spezifische Energieverbrauch berechnet wird, ist es möglich durch Variation des Anlagedurchsatzes, der Sichterzahl und der Mühlenspaltheite einen Kreislaufprozess zu entwickeln, welcher mit einer optimalen Energieeffizienz arbeitet. Daraus ergibt sich ein zweiter Vorteil der Modellierung, der darin besteht, dass die aufzuwendende Energie für eine zu erreichende Produktfeinheit mit Hilfe vorausberechneter Anlageneinstellungen auf das nötigste reduziert werden kann.

Die bisher vorgestellten Modelle sind stoffabhängig. Die Entwicklung eines stoffunabhängigen Modells erscheint für den Sichtvorgang möglich, da sich die Sichteigenschaften aus der Dichte des zu sichtenden Materials sehr gut ableiten lassen.

Für den Mahlvorgang ist dies problematisch, da das Zerkleinerungsverhalten eines Stoffes eine komplexe, nicht explizit angebbare Größe ist, so dass das Zerkleinerungsverhältnis und die Kornanreicherungskurve nur schwer ohne Versuchsdurchläufe bestimmbar sind.

Die hier vorgestellte Modellierung stellt eine auf Messwerten basierende Beschreibung von Mahl- und Sichtprozessen dar, die bezüglich der erreichbaren Präzision und der Übereinstimmung mit den in der Realität ablaufenden Vorgängen brauchbare Ergebnisse liefert, auch wenn gegenwärtig in den Prozessräumen von Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen Mikro- und Makroprozesse noch nicht mit befriedigender Genauigkeit beschrieben werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] HÖFFL, K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1985
- [2] SCHUBERT, H.: Aufbereitung fester mineralischer Stoffe, Band I; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1987
- [3] Heimann, D.: Untersuchungen zum Mahlverhalten von Altbeton; Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar 2000
- [4] BREY, A.: Mahlbarkeit von Feststoffen; Praktikum „Mechanische Verfahrenstechnik“; Bauhaus-Universität Weimar 1988
- [5] GRAINSOFT: PMP-Compact Die Software für die mechanische Verfahrenstechnik; Benutzerhandbuch; GRAINsoft GmbH 1998
- [6] ESPIG, D., REINSCH, V.: Die Kornanreicherungskurve – Ein wertvolles Hilfsmittel für die Partikeltechnologie; Freib. Forsch. – H. A841 1998, S. 118 - 122