

Untersuchungen zur Mahlung von Rohstoffen, Abfällen und Zwischenprodukten in einer kleintechnischen Anlage

L. Wienke, S. Lander, U. Stark, A. Müller, Weimar/Germany

ZUSAMMENFASSUNG

Mit der kleintechnischen Kreislaufmahlanlage an der Bauhaus-Universität Weimar können mineralische Rohstoffe, Abfälle und Zwischenprodukte auf x_{80} Feinheiten zwischen 3 und 100 μm zerkleinert werden. Aus den an der Anlage ermittelten Daten, wie Massedurchsätze und den Korngrößenverteilungen der erzeugten Produkte sowie Energiebedarf, lassen sich vergleichende Aussagen zur Mahlbarkeit machen, die mit den ebenfalls ermittelten Bond'schen Arbeitsindizes korrelieren. Die Modellierung der Funktionsweise der Mahlanlage ist mittels der Software PMP-Compact anhand von Versuchsdaten möglich und erlaubt bei bekannten Materialien beispielsweise eine Vorausberechnung von zu erwartenden Durchsätzen bei bestimmten Zielkorngrößen einschließlich der dazu erforderlichen Apparatereinstellungen.

SUMMARY

Mineral raw materials, waste and intermediate products can be crushed to finenesses x_{80} between 3 and 100 μm in the experimental closed-circuit grinding plant at Bauhaus University in Weimar. Based on the data determined in this plant, such as throughput and particle size distribution of the products as well as power requirement, comparisons can be drawn as regards the grindability correlating with the working indices also determined according to Bond. Based on test data, it is possible to simulate the mode of operation of the grinding plant by means of the software PMP-Compact and, with known materials, to precalculate, among other things, throughputs to be expected with certain desired particle sizes including the required adjustment of equipment.

RÉSUMÉ

Avec l'installation de broyage en circuit fermé, à échelle réduite, de la Bauhaus-Universität Weimar peuvent être fragmentés des matières premières minérales, des déchets et des produits intermédiaires à des finesses x_{80} entre 3 et 100 microns. A partir des données recueillies dans l'installation, comme débits massiques et les distributions granulométriques des produits fabriqués ainsi que le besoin d'énergie, peuvent être tirées des conclusions comparatives sur la broyabilité, qui corrélerent avec l'indice de travail Bond déterminé lui aussi. La modélisation du mode de fonctionnement de l'installation de broyage est possible, à l'aide du programme PMP-Compact, à partir des données d'essai et permet, par exemple, pour des matières connues, le calcul prévisionnel des débits à attendre pour des granulométries visées, y compris les réglages des appareils nécessaires à ces résultats.

RESUMEN

En la instalación de molienda en circuito cerrado a escala reducida de la Universidad Bauhaus de Weimar puede triturarse materias primas minerales, residuos diversos y productos intermedios en finuras x_{80} comprendidas entre 3 y 100 μm . De los datos que proporciona la instalación, tales como la granulometría y la distribución de tamaño de grano del producto final, así como el consumo de energía, se concluyen afirmaciones comparativas sobre la molidabilidad, que están correlacionadas con los índices de trabajo Bond. Mediante el Software PMP-Compact y los datos de los ensayos, es posible la modelización de la forma de operación de la instalación de molienda y permite, en caso de materiales conocidos, una predicción, por ejemplo, de la capacidad esperada para una determinada granulometría y del necesario ajuste de los equipos.

1. Einleitung

Die Dispersität ist eines der wichtigsten physikalischen Merkmale von Feststoffen. Sie kann mit Zustandsgrößen wie Korngröße, Kornform, Dichte, Konzentration sowie Zusammensetzung der dispersen Phase bzw. des umgebenden Mediums beschrieben werden. Innerhalb dieser Größen nimmt die Korngröße und deren Verteilung eine Schlüsselstellung ein. Einerseits werden wichtige Eigenschaften wie die Reaktivität, die Packungsdichte, der Aufschlussgrad und die Homogenität von Stoffgemischen von diesem Parameter beeinflusst. Andererseits lässt sich am ehesten die Korngröße gezielt verändern, um bestimmte Feststoffeigenschaften zu erreichen.

1. Introduction

Dispersity is one of the most important physical features of solids. It can be described by properties of state, such as particle size, grain shape, density, concentration as well as the composition of the disperse phase or the circumambient medium of which the particle size and its distribution rank highest. On the one hand, essential properties, such as the reactivity, packing density, degree of decomposition and homogeneity of mixtures of materials are influenced by this parameter. On the other hand, it is the particle size which can most easily be changed in a carefully controlled way to achieve certain solid properties.

(Translation by Mr. H.-J. Puhl)

Investigations into grinding of raw materials, waste and intermediate products in a pilot plant

Recherches concernant le broyage de matières premières, déchets et produits intermédiaires dans une installation technique à échelle réduite

Investigaciones en la molienda de materias primas, de residuos y productos intermedios en una instalación a escala reducida

Seit den Anfängen der Aufbereitung wird der beschriebene Sachverhalt vielfach genutzt. Dabei stand zunächst die Zerkleinerung von Rohstoffen und Zwischenprodukten im Vordergrund. Heute sind als weitere Stoffgruppe Abfälle hinzugekommen. Die Tendenz geht dahin, dass die Aufmahlung sich zu immer feineren Produkten hin verschiebt, wenn beispielsweise die Reaktivität der entscheidende Qualitätsparameter ist. Für die Herstellung von Feinststoffen ist die Frage nach der Größe des Energieeintrags in die Mahlung von großer Bedeutung, da sich letztendlich immer die Frage stellt, ob der Aufwand den erzielten Nutzen rechtfertigt.

Diese Aspekte stehen im Mittelpunkt der folgenden Ausführungen, in denen über die Mahlung von Kalkstein, Zementklinker, Hüttensand, Altbeton und Ziegelbruch in einer Kreislaufmahlanlage berichtet wird. Zielstellung der durchgeführten Mahlversuche waren dabei die Ermittlung der erforderlichen spezifischen Zerkleinerungsenergie in Abhängigkeit von der erreichten Produktfeinheit und die verfahrenstechnische Modellierung der Anlage. In der Regel schlossen sich an diese kleintechnischen Versuche stoffliche Untersuchungen an, um Aussagen über die Veränderungen der Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der erreichten Dispersität machen zu können. Erst die Verknüpfung zwischen dem notwendigen Zerkleinerungsaufwand einerseits und den resultierenden Produkteigenschaften andererseits, gestattet schlüssige Aussagen darüber, ob die durch eine Feinmahlung erreichten Vorteile den erhöhten Energieaufwand rechtfertigen.

2. Verwendete Versuchsanlage

Im Aufbereitungstechnikum der Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung an der Bauhaus-Universität Weimar wird seit 1997 eine kleintechnische Kreislaufmahlanlage betrieben. Mit dieser Anlage ist es möglich, unterschiedlichste mineralische Stoffe praxisnah zu Mehlen variabler Feinheit zu mahlen. Im Rahmen von Forschungsprojekten und studentischen Arbeiten wurde diese Anlage zur experimentellen Bestimmung der Mahlbarkeit von Rohstoffen und Zwischenprodukten der Steinerden-Industrie sowie von Recyclingmaterialien genutzt. Gleichzeitig dient die Anlage zur Herstellung von Probenmaterial für baustofftechnische Versuche. **Bild 1** zeigt das Herzstück der Anlage – die Kugelmühle Super Orion 100/70 S.O mit einem Durchmesser von 820 mm, einer Länge von 700 mm, Drehzahl 32 U/min – und die Entnahmestutzen für das Mühlenausgangsmaterial (1), das Grobgut (2), das Feingut (3) und den Staub (4).

Das Fließschema der Mahlanlage ist im **Bild 2** dargestellt. Das Aufgabegut – hier ist aus technologischen Gründen eine Größtkornbegrenzung von 4 mm gegeben – wird aus einem Vorlagebehälter direkt in die Kugelmühle dosiert. Das Mahlgut durchläuft die Mahltrommel und wird dabei durch die Bewegung der Mahlkörper (Cylpebe) zerkleinert, bevor es über Schlitze in die weiterführende Förderrinne austreten kann. Über ein Becherwerk wird es dann dem Siebter zugeführt. Der Siebter ist ein Kanalradsiebter 100 ATP mit horizontal gelagertem Siebtrah. Über die Drehzahl des Sieberrades, die zwischen 1150 und 11500 U/min stufenlos regelbar ist, können Trennkorngrößen von 4 bis 100 µm und Massedurchsätze von 2 bis 50 kg/h erzielt werden. Während das Siebtergrobgut durch die Schwerkraft in die Mühle zurückläuft, wird das Feingut pneumatisch zur Vorabscheidung in den Zyklon transportiert. Der Feinstaub gelangt über Rohrleitungen in den Schlauchfilter und wird dort vom Luftstrom getrennt. Feingut und Filterstaub können jeweils unterhalb des Gerätes über Zellenrad-schleusen abgegriffen werden. Feinste Produktkorngrößen, die mit dem Zyklon nicht mehr abgeschieden werden können, fallen in der Filteranlage an.

Since the beginning of preparation technology use has been made of these generally known facts in many cases. At first the comminution of raw materials and intermediate products was in the limelight. Today another group of materials has been added – waste. The tendency is spreading to grind finer and finer products if, for example, the reactivity is the decisive quality parameter. The question of the power requirement for grinding is of great importance for the production of very fine materials because, in the end, it is always a question of the input-output relation.

These aspects will be described hereinafter focussing on the grinding of limestone, cement clinker, granulated blastfurnace slag, used concrete and broken bricks in a closed-circuit grinding plant. It was the aim of the grinding tests to determine the required specific size reduction energy depending on the product fineness achieved and to simulate the plant from the process engineering point of view. Usually material investigations followed these tests in the pilot plant in order to acquire knowledge of the changes of the material properties depending on the dispersity reached. Only linking up the necessary comminution expenditure, on the one hand, with the resulting product properties, on the other hand, allows logical conclusions to be drawn as to whether the advantages achieved by fine grinding justify the increased power consumption.

2. The pilot plant

Since 1997 an experimental closed-circuit grinding plant is operated in the preparation pilot plant of the chair of Building Materials Preparation and Recycling at the Bauhaus University in Weimar. With this plant it is possible, in a practice oriented way, to grind the most different mineral materials to meals of variable fineness. Within the framework of research and student projects this plant was used for the experimental determination of the grindability of raw materials and intermediate products of the rock and associated products industry as well as of recycling materials. At the same time this plant is used to make materials for building materials tests. **Fig. 1** shows the heart of the plant – the ball mill Super Orion 100/70 S.O with a diameter of 820 mm, a length of 700 mm, speed 32 rpm – and the discharge connections for the mill product (1), the tailings (2), the fines (3) and the dust (4).

Fig. 2 shows the flow sheet of the grinding plant. The feed – for technological reasons the maximum grain size is limited to 4 mm – is directly proportioned from a storage bin into the ball mill. The mill feed passes through the grinding drum and is ground due to the movement of

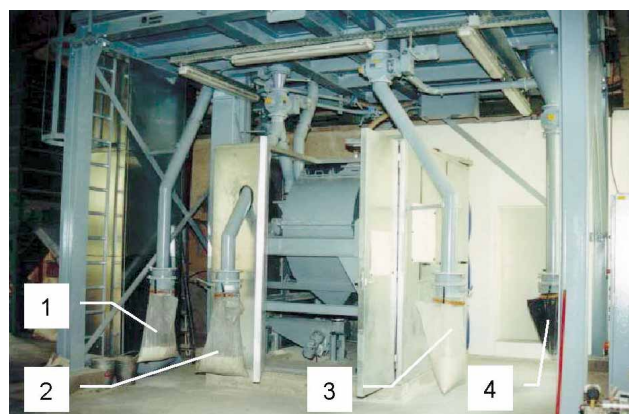


BILD 1: Ansicht der Kreislaufmahlanlage im Aufbereitungstechnikum
FIGURE 1: View of a closed-circuit grinding plant in the preparation pilot plant

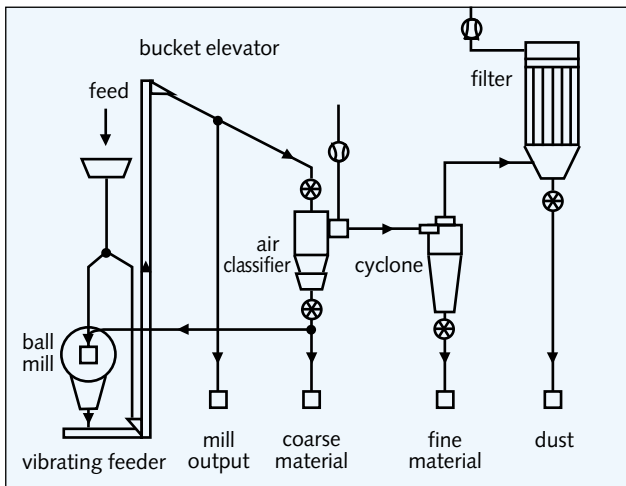


BILD 2: Fließschema der Kreislaufmahlanlage
FIGURE 2: Flow sheet of the closed-circuit grinding plant

Becherwerk	bucket elevator
Aufgabe	feed
Filter	filter
Sichter	air classifier
Zyklon	cyclone
Kugelmühle	ball mill
Schwingförderrohr	vibrating feeder
Mühlenausgang	mill output
Grobgut	coarse material
Feingut	fine material
Staub	dust

Der Aufbau der Versuchsanlage gestattet neben der beschriebenen Kreislaufmahlung optional auch andere Betriebsweisen, wie:

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

Die Mahlanlage ist so ausgestattet, dass der Durchsatz durch das Gesamtsystem kontinuierlich und die Durchsätze durch die Einzelaggregate intermittierend ermittelt werden können. Um die Granulometrie der unterschiedlichen Materialströme des Systems zu untersuchen, werden Proben gezogen und deren Korngrößenverteilungen mit dem Lasergranulometer COULTER LS 230 ermittelt. Zudem sind Aussagen zum Energieeintrag der jeweiligen Mahlung durch die integrierte Messtechnik möglich. Zusammen mit den aufgenommenen Durchsätzen lässt sich somit der spezifische Energieaufwand ermitteln. Werden diese Werte fortlaufend für abgestufte Produktfeinheiten erfasst, indem die Sichterraddrehzahl entsprechend variiert wird, ergibt sich die „Mahlkurve“ für das untersuchte Material. Diese gibt Aufschluss über das Zerkleinerungsverhalten bzw. über die Mahlbarkeit der unterschiedlichen Materialien.

Des Weiteren können Messdaten, die zu den unterschiedlichen Materialströmen vorliegen, für eine Beschreibung und Bewertung der einzelnen Apparate der Anlage genutzt werden. Mit allen diesen Daten kann ein verfahrenstechnisches Modell der Gesamtanlage entwickelt werden, das Simulationen einzelner Betriebszustände der Anlage erlaubt.

3. Untersuchungsergebnisse zur Mahlbarkeit von Rohstoffen, Abfällen und Zwischenprodukten

Mit der Kreislaufmahlanlage wurden unterschiedliche Materialien zerkleinert. Die dabei verfolgten Zielstellungen reichten von der Erzeugung von Produkten mit definierter Mahlfineinheit über die Erarbeitung neuer Verwertungskon-

the grinding media (Cylpebs) before it can be discharged via slots into the following vibrating trough conveyor. Then the material is fed to the classifier via a bucket elevator. The classifier is a channel wheel separator 100 ATP with horizontally supported separating wheel. Cut sizes from 4 to 100 µm and throughputs of 2 to 50 kg/h can be obtained via the speed control of the separating wheel which is steplessly adjustable between 1150 and 11 500 rpm. While the tailings are returned to the mill due to gravity, the fines are pneumatically transported into the cyclone for preliminary separation. The very fine dust is passed through pipelines to the fabric bag filter installation where it is separated from the air flow. Both fines and filter dust can be discharged below the installation via rotary air locks. Very fine product particles which cannot be separated by the cyclone go to the filter installation.

In addition to the closed-circuit grinding described, the design of the pilot plant also allows the options of other modes of operation, such as

- pure open-circuit grinding without following separation,
- batch grinding with a mill feed volume of approx. 0.048 m³,
- classification of finely dispersed material up to cut sizes of 4 µm.

The grinding plant has been equipped in such a way that the throughput of the whole system can be determined continuously and that of the individual units intermittently. So as to investigate the granulometry of the different material flows of the system, samples are taken and their particle size distribution is determined by the laser granulometer COULTER LS 230. Furthermore, it is possible to determine the power consumption of the corresponding grinding process thanks to the in-process measurement system. Thus, together with the throughput values recorded, the specific energy consumption can be determined. If these values are continuously recorded for graded product finenesses by correspondingly varying the speed of the separating wheel, the result will be the “grindability curve” of the material tested. This curve informs about the comminution behaviour or the grindability of the different materials. In addition, measured data existing for the individual material flows can be used for a description and evaluation of the individual devices of the plant. Based on all these data, a process engineering model of the overall plant can be developed allowing simulation of the individual operating conditions of the plant.

3. Results of investigations into the grindability of raw materials, waste and intermediate products

Different materials were crushed in the closed-circuit grinding plant. The goals in mind included the manufacture of products with a defined fineness, the preparation of new recycling concepts for waste based on

TABELLE 1: Untersuchte Materialien

TABLE 1: Materials tested

Rohstoffe Raw materials	Sekundärrohstoffe und Abfälle Waste materials	Zwischenprodukte Intermediate products
Kalkstein Limestone	Hüttensand Granulated blastfurnace slag	Zementklinker – aus 4 Zementwerken Cement clinker from 4 cement factories
	Altbeton – von 2 Recyclingunternehmen Used concrete from 2 recycling firms	
	Ziegelbruch Broken bricks	

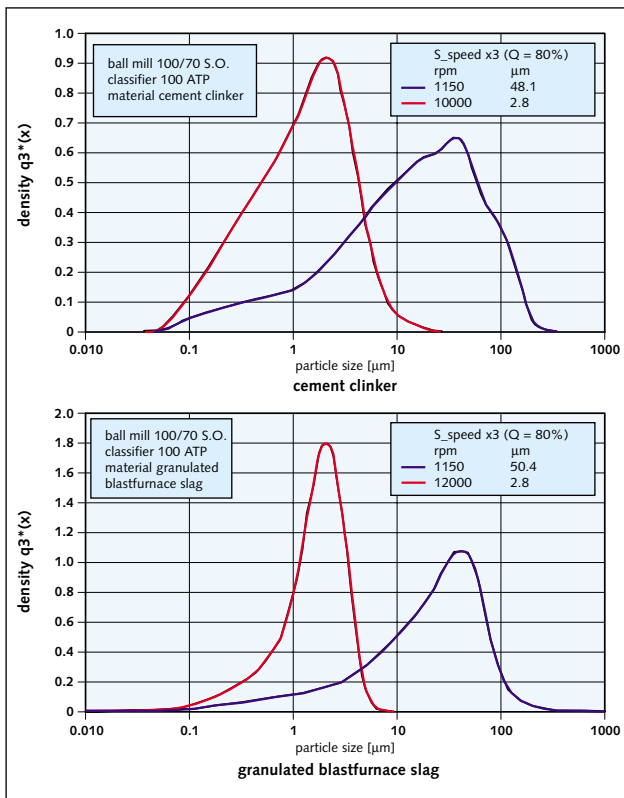


BILD 3: Verteilungsdichtefunktionen von gemahlenem Zementklinker und Hüttensand

FIGURE 3: Distribution density functions of ground cement clinker and granulated blastfurnace slag

zepte für Abfälle durch eine Feinmahlung bis hin zur Beurteilung der Mahlbarkeitseigenschaften der Stoffe. In die Rubrik der Abfallmahlungen fielen auch die Untersuchungen zur Mahlbarkeit der Sandfraktionen von Beton- und Mauerwerksabbruch, um alternative Verwertungswege für diese Fraktionen aufzuzeigen.

Einen Überblick über die untersuchten Materialien gibt **Tabelle 1**. Mit jedem dieser Materialien wurden Versuchsmahlungen bei verschiedenen Einstellungen der Mahlanlage durchgeführt, so dass für die Auswertung mindestens fünf Datensätze über den gesamten Durchsatzbereich der Anlage zur Verfügung standen. Nur beim Kalkstein lagen lediglich drei teilweise unvollständige Datensätze für die Auswertung vor.

3.1 Verteilungsdichtefunktionen der Zerkleinerungsprodukte

Erste Aussagen über das Zerkleinerungsverhalten können aus den Korngrößenverteilungen der Produkte abgeleitet werden. Besonders deutlich werden Materialunterschiede anhand der Verteilungsdichtefunktionen, die im **Bild 3** für gemahlenen Zementklinker und Hüttensandmehl jeweils für zwei vergleichbare Betriebszustände dargestellt sind. Anhand dieser Betriebszustände ist gleichzeitig der Arbeitsbereich der Kreislaufmahlanlage in Bezug auf die erreichbaren Produktfeinheiten erkennbar.

Charakterisiert man die Verteilungsfunktionen – wie bei der Beschreibung von Zerkleinerungsprozessen üblich – mit der mittleren Korngröße oder mit der Korngröße bei 80 % Durchgang (x_{80}), stellt man fest, dass dieser Wert für die beiden Materialien etwa gleich groß ist. Der x_{80} -Wert, aufgenommen mit der kleinsten Sicherterraddrehzahl von 1150 U/min, liegt beim Zementklinkermehl bei 48,1 µm und beim Hüttensandmehl bei 50,4 µm. Sie gehen auf 2,8 µm für beide Mehle zurück, wenn der Sieb mit seiner maximalen Drehzahl betrieben wird. Unterschiede sind jedoch in

fine grinding up to the evaluation of the grindability properties of the materials. For instance, waste grinding comprised the investigations into the grindability of the sand fractions of demolished concrete and brickwork to show alternative ways to utilize these fractions.

Table 1 shows a survey of the materials tested. Grinding tests were carried out with each of these materials with different settings of the grinding plant so that there were at least five data records for evaluation covering the whole throughput range of the plant. However, for limestone, there were only three partially incomplete data records for evaluation.

3.1 Distribution density functions of the crushed products

First results concerning the comminution behaviour can be derived from the particle size distribution of the products. In particular, the material differences become clear in the light of the distribution density functions shown in **Fig. 3** for ground cement clinker and ground granulated blastfurnace slag with two comparable operating conditions each. Based on these operating conditions, the operating range of the closed-circuit grinding plant, as far as the possible product fineness is concerned, can also be seen.

If the distribution functions are characterized by the average grain size or the grain size with 80 % passage (x_{80}) – as is normal for the description of comminution processes – it can be found that this value is more or less the same for both materials. The value x_{80} recorded with the minimum speed of the separating wheel, i.e. 1150 rpm, amounts to 48.1 µm for ground cement clinker and to 50.4 µm for ground granulated blastfurnace slag. These values are reduced to 2.8 µm for both ground materials if the classifier is operated with its maximum speed. However, there are differences in the width of distribution. The ground cement clinker has wider distributions, in particular the portion of fines is higher. This allows the conclusion to be drawn that cement clinker has a better grindability than granulated blastfurnace slag.

3.2 Plant throughput and grindability

The connection between the plant throughput and the product fineness x_{80} reveals further aspects of the comminution behaviour. The throughput of produced fines

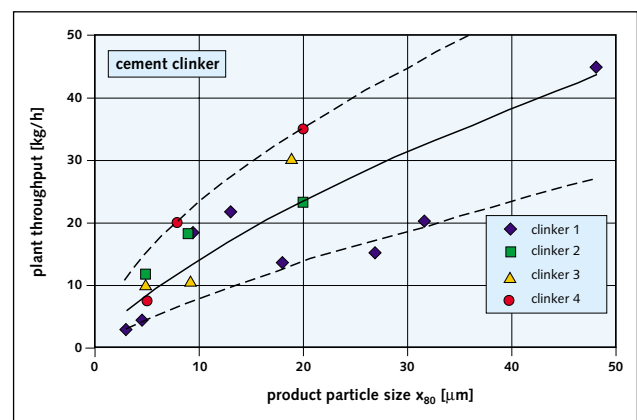


BILD 4: Anlagendurchsatz als Funktion der Produktkorngröße für die Zementklinkermahlung

FIGURE 4: Plant throughput as function of the product particle size for cement clinker grinding

Zementklinker	cement clinker
Anlagendurchsatz	plant throughput
Klinker	clinker
Produktkorngröße	product particle size

der Breite der Verteilungen zu erkennen. Das Zementklinkermehl besitzt breitere Verteilungen, insbesondere ist der Anteil im Feinkornbereich höher. Das lässt auf eine bessere Mahlbarkeit von Zementklinker im Vergleich zu Hüttensand schließen.

3.2 Anlagendurchsatz und Mahlbarkeit

Weitere Aussagen zum Zerkleinerungsverhalten liefert der Zusammenhang zwischen dem Anlagendurchsatz und der Produktfeinheit x_{80} . Als Anlagendurchsatz kann der Durchsatz an produziertem Feingut angenommen werden, da der Staubanteil vernachlässigbar klein ist. In **Bild 4** sind die Ergebnisse der Mahlung von vier verschiedenen Klinkern dargestellt. Danach nimmt der Durchsatz von ca. 45 kg/h auf 5 kg/h ab, wenn der x_{80} -Wert des erzeugten Klinkermehles von 48 auf 4 μm abnimmt. Zwischen den Zementklinkern lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen, so dass für alle Klinker eine Trendlinie mit einer entsprechenden Schwankungsbreite der Ergebnisse angegeben werden kann.

In **Bild 5** sind die experimentell ermittelten Daten des Anlagendurchsatzes in Abhängigkeit von der Materialart über der Produktfeinheit x_{80} aufgetragen, um Unterschiede im Zerkleinerungsverhalten der untersuchten Stoffe abzuleiten. Mit Ausnahme von Kalkstein lassen sich die Abhängigkeiten in erster Näherung als Potenzfunktionen mit Potenzen nahe 1,0 beschreiben. Die Bestimmtheitsmaße der Trendlinien liegen im oberen Bereich eines statistisch gesicherten Zusammenhangs ($0,98 > R^2 > 0,76$). Von Kalkstein liegen nur drei gesicherte Werte vor, die bestenfalls einen linearen Trend erlauben. Der Verlauf dieser Trendlinie passt jedoch sehr gut in das Gesamtbild.

Dass bei gleicher Produktfeinheit der Anlagendurchsatz in der Reihenfolge der Stoffe – Hüttensand < Altbeton < Zementklinker < Kalkstein < Ziegelbruch – steigt, ist aus **Bild 5** deutlich erkennbar. Das bedeutet, dass sich die Mahlbarkeit in der gleichen Reihenfolge der untersuchten Stoffe verbessert hat.

Die Ergebnisse der kleintechnischen Mahlung stimmen mit den aus der Literatur bekannten, auf dem Zeisel-Test oder anderen Untersuchungen basierenden Aussagen zur Mahlbarkeit von Hüttensand, Zementklinker und Kalkstein [1–5] überein. Auch aus den verfügbaren Werten zum Arbeitsindex nach Bond – der sich nach [6] für die

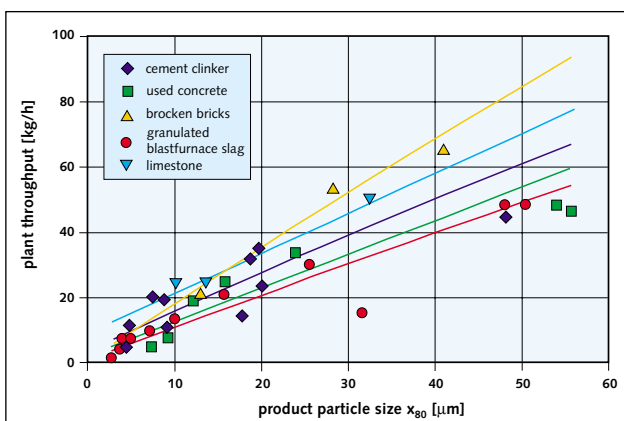


BILD 5: Zusammenhang zwischen Anlagendurchsatz und Produktkorngröße für die Mahlungen der unterschiedlichen Materialien

FIGURE 5: Connection between the plant throughput and product particle size for grinding of different materials

Anlagendurchsatz	plant throughput
Hüttensand	granulated blastfurnace slag
Altbeton	used concrete
Zementklinker	cement clinker
Kalkstein	limestone
Ziegelbruch	broken bricks
Produktkorngröße	product particle size

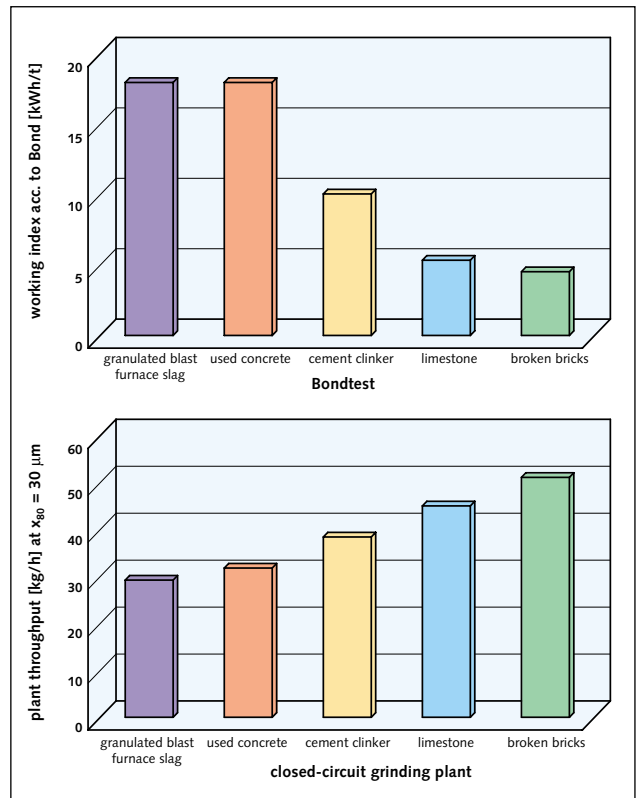


BILD 6: Vergleichende Darstellungen zur Mahlbarkeit der Stoffgruppen aus Tabelle 1

FIGURE 6: Comparison of grindability of material groups in Table 1

Bondtest	Bond test
Kreislaufmahlanlage	closed-circuit grinding plant

can be assumed as plant throughput since the portion of dust is negligible. **Fig. 4** shows the results of four different types of clinker ground. The throughput is decreased from approx. 45 kg/h to 5 kg/h if x_{80} of the clinker meal produced is decreased from 48 to 4 μm . There are no significant differences between the various types of cement clinker so that one trend line with a corresponding fluctuation range of the results applies to all types of clinker.

Fig. 5 shows the experimentally determined data of the plant throughput depending on the type of material plotted above the product fineness x_{80} to derive differences concerning the comminution behaviour of the materials tested. Except limestone, dependencies to the first approximation can be described as power functions with powers near 1.0. The values of definiteness of the trend lines are in the upper range of a statistically ensured relation ($0.98 > R^2 > 0.76$). For limestone there are only three safe values permitting a linear trend at best. However, the course of this trend line fits very well into the overall picture.

Fig. 5 clearly shows that the plant throughput is increased in the order of the material – granulated blastfurnace slag < used concrete < cement clinker < limestone < broken bricks with the same product fineness. It means that the grindability has improved in the order of the materials tested.

The results of experimental grinding coincide with statements found in the literature or based on the Zeisel test or other kinds of investigations concerning the grindability of granulated blastfurnace slag, cement clinker and limestone [1–5]. The available values of the working index according to Bond – which proved to be an applicable value to characterize grinding in ball mills according to [6] – point to the same order [7,8].

Charakterisierung der Mahlung in Kugelmöhlen als brauchbare Größe erwiesen hat – lässt auf die gleiche Reihenfolge schließen [7,8].

Um diese Konformität auch für die bisher nicht untersuchten Stoffgruppen Altbeton und Ziegelbruch zu überprüfen, mussten ergänzende Untersuchungen im Labormaßstab durchgeführt werden. Diese wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit auf alle in Tabelle 1 genannten Untersuchungsmaterialien ausgedehnt. Die Experimente wurden in Anlehnung an den Bondtest mit einer Laborkugelmühle mit einem Durchmesser von 260 mm, einer Länge von 370 mm, einem n/n_{crit} -Verhältnis von 0,81 und einem Sieb der Maschenweite 200 μm so durchgeführt, dass eine „umlauende Last“ von 250 % (Umlaufzahl $\div 3,5$ oder 350 %) realisiert wurde. **Bild 6a** zeigt die Messergebnisse der Bondtests. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Kreislaufmahlanlage in **Bild 6b** liefert tendenziell gleiche Aussagen zum Mahlverhalten. Um die Darstellung zu verbessern, wurden die stoffspezifischen Anlagendurchsätze für eine einheitliche Produkt Korngröße x_{80} von 30 μm aus den Trendkurven interpoliert. Kleinere Werte des Arbeitsindex nach Bond und größere Anlagendurchsätze bei gleicher Produktfeinheit sind gleichbedeutend mit einer besseren Mahlbarkeit.

3.3 Spezifischer Energiebedarf

Neben dem Anlagendurchsatz ist für den Anlagenbetreiber der Energiebedarf einer Mahlung von besonderem Interesse. Dazu wurde der Energiebedarf der Mühle gemessen und auf den Anlagendurchsatz bezogen. Die Abhängigkeit dieser spezifischen Mahlenergie von der Produkt Korngröße – eingangs als „Mahlkurve“ bezeichnet – wird in **Bild 7** für die fünf untersuchten Stoffgruppen dargestellt.

Unabhängig von der Stoffart steigt die benötigte Mahlenergie mit abnehmender Produkt Korngröße hyperbolisch an. Im Produkt Korngrößenbereich 20 $\mu\text{m} < x_{80} < 60 \mu\text{m}$ ist der Anstieg mit ca. 2 kWh/t pro Abnahme der Korngröße um 1 μm gering. Dagegen hat eine um 1 μm feinere Aufmahlung im Bereich 4 $\mu\text{m} < x_{80} < 10 \mu\text{m}$ im Mittel einen Anstieg der Mahlenergie um ca. 50 kWh/t zur Folge.

Der Mahlenergiebedarf je nach Stoffart ist in **Bild 8** dargestellt. In Analogie zu Bild 6 wurde die spezifische Mahlenergie für Produkt Korngrößen x_{80} von 10, 20 und 30 μm aus den Trendkurven berechnet.

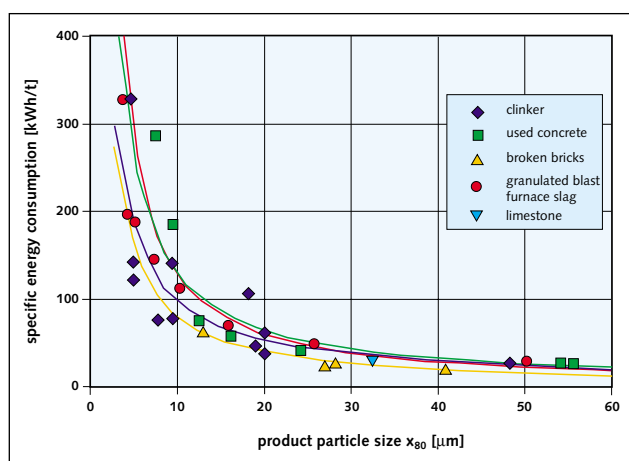


BILD 7: Spezifischer Energiebedarf als Funktion der Produkt Korngröße
FIGURE 7: Specific power requirement as function of the product particle size

spez. Energieverbrauch	specific power requirement
Klinker	clinker
Kalkstein	limestone
Ziegel	bricks
Altbeton	used concrete
HÜS	granulated blastfurnace slag
Produkt Korngröße	product particle size

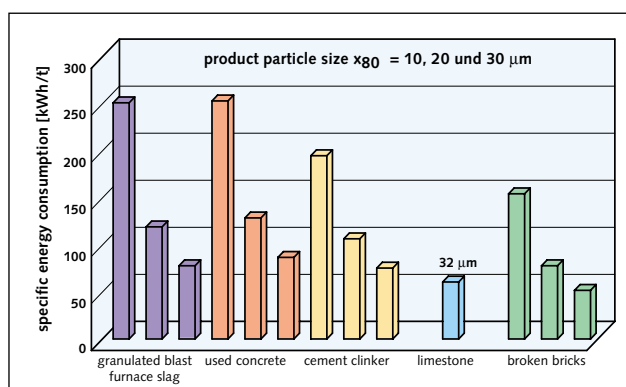


BILD 8: Spezifischer Energiebedarf für ausgewählte Produkt Korngrößen

FIGURE 8: Specific power requirement of selected product particle sizes

spezifischer Energieverbrauch	specific power requirement
Produkt Korngröße	product particle size
und	and
Hüttensand	granulated blastfurnace slag
Altbeton	used concrete
Zementklinker	cement clinker
Kalkstein	limestone
Ziegelbruch	broken bricks

Supplementary tests had to be carried out on a laboratory scale to check this conformity also for the material groups of used concrete and broken bricks not tested so far. For reasons of comparability these tests were extended to all the materials mentioned in Table 1. The experiments were carried out, following the Bond test, with a laboratory ball mill with a diameter of 260 mm and a length of 370 mm, an n/n_{crit} ratio of 0.81 and a sieve with an aperture width of 200 μm , in such a way that a “circulating load” of 250 % (recycle ratio $\div 3.5$ or 350 %) was achieved. **Fig. 6a** shows the measured results of the Bond tests. Compared with the results of the closed-circuit grinding mill in **Fig. 6b**, there is the same tendency as regards the grinding behaviour. To improve the representation, the specific material throughputs of the plant had been interpolated from the trend curves for a uniform product particle size x_{80} of 30 μm . Smaller values of the working index according to Bond and larger plant throughputs, with the same product fineness, are equivalent to an improved grindability.

3.3 Specific power requirement

Next to the plant throughput, the power requirement for grinding is essential for the plant operator. Therefore, the power consumption of the mill was measured and related to the plant throughput. The dependence of this specific grinding energy on the product particle size – above called “grindability curve” – is shown in **Fig. 7** for the five material groups tested.

Irrespective of the type of material, the required grinding power is increased hyperbolically with decreasing product particle size. In the particle-size range of 20 $\mu\text{m} < x_{80} < 60 \mu\text{m}$, the increase amounting to approx. 2 kWh/t per decreased grain size by 1 μm is low. By contrast, grinding finer by 1 μm in the range of 4 $\mu\text{m} < x_{80} < 10 \mu\text{m}$ results in an increase of the grinding power of approx. 50 kWh/t on average.

Fig. 8 shows the power requirement for grinding depending on the type of material. Analogous to Fig. 6, the specific grinding power for product particle sizes x_{80} of 10, 20 and 30 μm was calculated on the basis of the trend curves.

Granulated blastfurnace slag and used concrete have approximately the same grinding behaviour. The specific power consumption for cement clinker is slightly lower.

Hüttensand und Altbeton zeigen annähernd gleiches Mahlverhalten. Der spezifische Energieverbrauch für Zementklinker liegt geringfügig niedriger. Für Kalkstein existiert nur ein Messpunkt zum Energieverbrauch bei einer Produkt Korngröße von 32 µm. Ziegelbruch hat von den hier untersuchten Materialien den geringsten Energiebedarf. Dem Diagramm zufolge entspricht der Energiebedarf für die Mahlung des Ziegelbruchs auf $x_{80} = 20 \mu\text{m}$ in erster Näherung dem der Mahlung des Zementklinkers auf $x_{80} = 30 \mu\text{m}$.

Die in der Kreislaufmahlanlage ermittelten spezifischen Mahlenergien liegen aufgrund des geringen Anlagen-durchsatzes naturgemäß oberhalb der für technische Anlagen typischen Werte. Die Aussagen zum Einfluss der Stoffart und der Produktkorngröße bleiben aber trotz dieses Sachverhaltes gültig.

4. Untersuchungsergebnisse zur verfahrenstechnischen Beschreibung von Mühle und Sichter

Ausgangspunkt der verfahrenstechnischen Modellierung der Kreislaufmahlanlage ist die getrennte Beschreibung zunächst von Mühle und Sichter anhand der Partikelgrößenverteilungen des zu- und abgeführten Materials, des Durchsatzes sowie anlagenspezifischer Kennlinien. Darauf aufbauend kann die Bilanzierung der Einzelaggregate erfolgen und ein Prozessmodell der Gesamtanlage entwickelt werden. Dieses berücksichtigt den umlaufenden Materialstrom zwischen den einzelnen Aggregaten. Durch die Einbeziehung von spezieller Software [9] bleibt der Aufwand für eine solche Modellierung überschaubar.

Die Parameter, die für die getrennte Bewertung der Hauptaggregate verwendet wurden, sind in **Tabelle 2** definiert. Durch diese Größen wird der Zerkleinerungseffekt der Mühle bzw. der Klassiereffekt des Sichters wie folgt dargestellt:

- Die in der Mühle erreichte Partikelgrößenreduktion wird punktuell durch das Zerkleinerungsverhältnis bewertet, welches als Quotient der x_{80} -Werte des Zustroms und des Abstroms der Mühle definiert ist. Eine differenziertere Beschreibung der erreichten Zerkleinerungseffekte für den gesamten Partikelgrößenbereich ist mit Hilfe des Kornanreicherungsverhältnisses (particle concentration rate pcr) [9, 10] möglich. Dieses ist als Quotient der normierten Partikelgrößenverteilungsdichten des Abstroms und des Zustroms definiert. Die normierten Klasseneinteilungen werden als Quotient der betrachteten Korngröße und einer Bezugskorngröße gebildet. Als Bezugskorngröße wird die Korngröße gewählt, für die die Summenverteilung $Q(x)$ einen Bezugswert Q^* annimmt. Vorzugsweise wird der x_{80} -Wert verwendet. Eine Anreicherung von Partikeln in den einzelnen Korngrößenklassen stellen Werte größer 1,0 dar, während Werte kleiner 1,0 einer Abreicherung entsprechen.

- Die Beurteilung des Trennerfolgs durch den Sichter erfolgt durch den Trenngrad. Analog zum Kornanreicherungsverhältnis ist der Trenngrad als Quotient aus zwei Partikelgrößenverteilungsdichten definiert. Zusätzlich geht hier die Aufteilung des Zustroms in Grobgut und Feingut ein.

Mit den in Tabelle 2 dargestellten Messwerten, die bei der Zerkleinerung von Zementklinker gemessen wurden, wird beispielsweise ein Zerkleinerungsverhältnis der Mühle von 3,4 errechnet. Die Trennkorngröße des Sichters, liegt für das gleiche Beispiel bei einem Wert von 4,3 µm.

Aus den Analyseergebnissen der durchgeführten Mahlungen ist bekannt, dass das Zerkleinerungsverhältnis mit steigendem Mühldurchsatz abnimmt. Für diese Abhängigkeit kann auf der Basis der gemessenen Mühldurchsätze und der dazugehörigen Zerkleinerungsverhältnisse ein Potenzproduktansatz ermittelt werden, der die Mühlenkennlinie

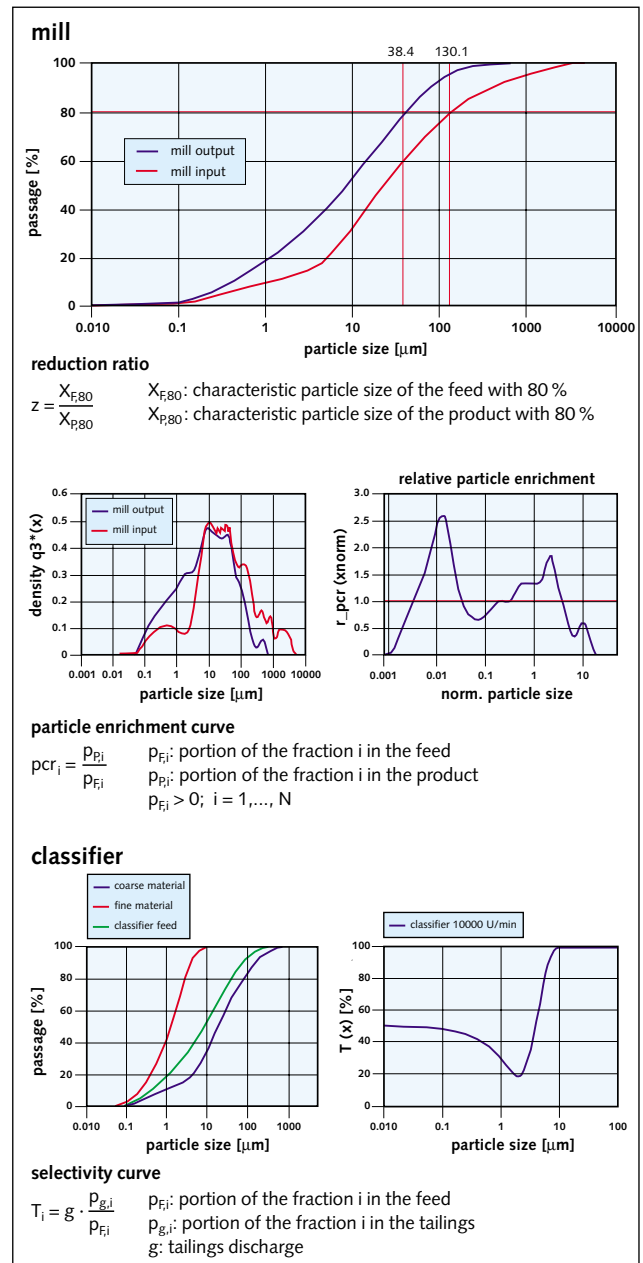


TABELLE 2: Kenngrößen zur Beurteilung des Mahl- und Sichtvorganges am Beispiel der Mahlung von Zementklinker

TABELLE 2: Indices to evaluate the grinding and separating process demonstrated by the example of cement clinker grinding

Mühle	mill
Zerkleinerungsverhältnis	reduction ratio
charakteristische Partikelgröße des Zustroms bei 80 %	characteristic particle size of the feed with 80 %
charakteristische Partikelgröße des Produkts bei 80 %	characteristic particle size of the product with 80 %
Kornanreicherungskurve	particle enrichment curve
Anteil der Fraktion i im Zustrom	portion of the fraction i in the feed
Anteil der Fraktion i im Produkt	portion of the fraction i in the product
Sichter	classifier
Trenngradkurve	selectivity curve
Anteil der Fraktion i im Zustrom	portion of the fraction i in the feed
Anteil der Fraktion i im Grobgut	portion of the fraction i in the tailings
Grobgutausbringen	tailings discharge

There is only one measuring point for limestone power consumption shown for a product particle size of 32 µm. Broken bricks have the lowest power requirement of the materials tested. According to the diagram, the power requirement for grinding broken bricks down to $x_{80} = 20 \mu\text{m}$ corresponds to that of cement clinker grinding down to $x_{80} = 30 \mu\text{m}$ to the first approximation.

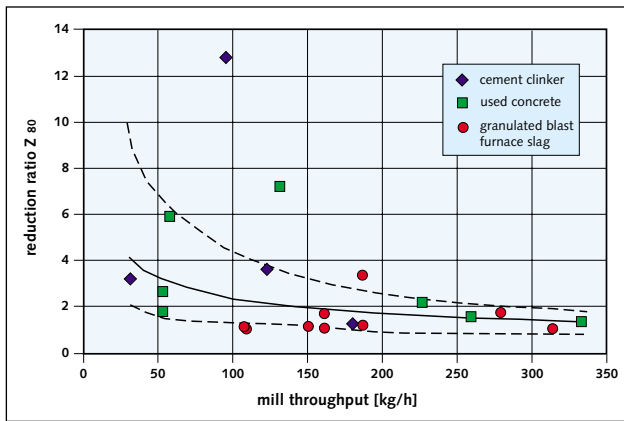


BILD 9: Zerkleinerungsverhältnis in Abhängigkeit vom Mühlen-durchsatz für Hüttensand, Zementklinker und Altbeton

FIGURE 9: Reduction ratio depending on the mill throughput for granulated blastfurnace slag, cement clinker and used concrete

Zerkleinerungsverhältnis	reduction ratio
Hüttensand	granulated blastfurnace slag
Zementklinker	cement clinker
Altbeton	used concrete
Mühlendurchsatz	mill throughput

darstellt (Bild 9). Im Unterschied zu den Betrachtungen unter Punkt 3 ist für diese Kennlinie der Mühlen-durchsatz die entscheidende Einflussgröße. Dieser liegt aufgrund der Ausbildung von Kreisläufen beträchtlich über dem Anlagendurchsatz.

Für das Betriebsverhalten des Sichters folgt aus der Analyse der experimentellen Daten der Zusammenhang zwischen der Trennkorngröße und der Sichterraddrehzahl (Bild 10). Diese Sichter-kennlinie weist ein wesentlich höheres Bestimmtheitsmaß als die Mühlenkennlinie auf. Die Dichteunterschiede der untersuchten Materialien, die bis zu 0,7 g/cm³ betragen, wirken sich kaum auf die Trennkorngröße aus.

5. Modellierung der Gesamtanlage

Die Gesamtanlage kann auf der Basis von Stoffbilanzen der Einzelaggregate, die jeweils sowohl die Gesamt- als auch die Fraktionsmassenströme berücksichtigen müssen, und deren Verknüpfung modelliert werden. So wird durch die gewählte Sichterraddrehzahl die obere Korngröße des den Sichter passierenden Feinguts beim Zusammenwirken von Mühle und Sichter im Kreislaufbetrieb festgelegt. Gleichzeitig ergibt sich daraus die Menge des zwischen Sichter und

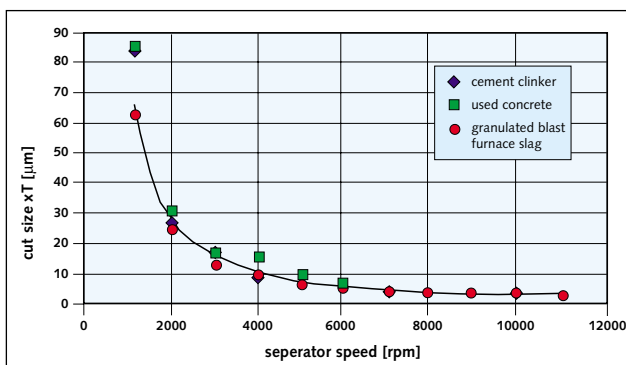


BILD 10: Trennkorngröße in Abhängigkeit von der Sichterraddrehzahl

FIGURE 10: Cut size depending on the speed of the separating wheel

Trennkorngröße	cut size
Sichterdrehzahl	separator speed
Zementklinker	cement clinker
Hüttensand	granulated blastfurnace slag
Altbeton	used concrete

Due to the low plant throughput, the amounts of the specific power requirement for grinding determined in the closed-circuit grinding plant are naturally larger than typical values of industrial plants. Nevertheless, the comments on the influence of the type of material and the product particle size remain valid.

4. Test results to describe the process technology of mill and separator

The separate description of mill and separator based on the particle size distribution of the fed and discharged materials, the throughput and plant-specific characteristics is the starting point to simulate the process of the closed-circuit grinding plant. Based on this, the individual units can be balanced and a process model of the overall plant can be developed, taking into account the circulating material flow between the individual units. The expenditure for such a model is calculable due to the incorporation of a special software [9].

The parameters used for the separate evaluation of the main units have been defined in Table 2. Based on these parameters, the comminution effect of the mill or the separating effect of the classifier can be described as follows:

- The particle size reduction achieved in the mill is evaluated selectively by the reduction ratio defined as quotient of the x_{80} values of the mill feed and discharge. A detailed description of the comminution effects achieved in whole range of particle sizes is possible by means of the particle concentration rate (pcr) [9, 10] which is defined as quotient of the standardized particle size distribution densities of the outgoing and incoming flow. The standardized classifications are formed as quotient of the particle size considered and a reference particle size. That particle size is chosen as reference particle size which assumes a reference value Q^* for the sum distribution $Q(x)$. Predominantly the value x_{80} is used. All values > 1.0 represent an enrichment of particles in the individual size classes while values < 1.0 represent a depletion.
- The selectivity is used to evaluate the success of separation by the classifier. Analogous to the particle concentration rate, the selectivity is defined as quotient of two particle size distribution densities. Additionally the incoming flow is divided into tailings and fines.

The values shown in Table 2 and measured during the comminution of cement clinker are used, for instance, to calculate a reduction ratio of the mill of 3.4. With the same example, the cut size of the separator amounts to a value of 4.3 µm.

It is known from the analysis results of the grinding operations carried out that the reduction ratio will decrease with increasing mill throughput. For this dependence a power statement for the product can be determined on the basis of the mill throughputs measured and the reduction ratios incidental thereto, representing the mill performance curve (Fig. 9). As opposed to the considerations under item 3, the decisive factor for this curve is the mill throughput which is considerably higher than the plant throughput due to the formation of circuits.

The operational behaviour of the classifier is shown in Fig. 10 as the connection between the cut size and the speed of the separating wheel based on the analysis of the experimental data. This classifier characteristic has an essentially higher degree of definiteness than the mill curve. The differences in density of the materials tested, amounting up to 0.7 g/cm³, hardly affect the cut size.

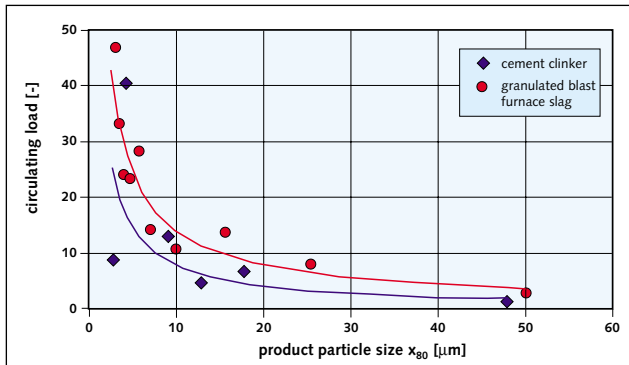


BILD 11: Umlaufende Last (= Durchsatz des Sichtergrobguts, bezogen auf den Anlagendurchsatz) und Produktkorngröße für Zementklinker und Hüttensand

FIGURE 11: Circulating load (= throughput of the tailings related to the plant throughput) and product particle size for cement clinker and granulated blastfurnace slag

Umlauflast	circulating load
Hüttensand	granulated blastfurnace slag
Zementklinker	cement clinker
Produktkorngröße	product particle size

Mühle zirkulierenden Massestroms (**Bild 11**). Weil die Mühle mit näherungsweise konstantem Füllungsgrad betrieben wird, bestimmt dieser die Aufgabemenge, die der Gesamtanlage von außen zugeführt wird. Niedrige Produktfeinheit bedeutet, dass der zirkulierende Massestrom gering und der Anlagendurchsatz hoch ist. Hohe Produktfeinheit hat einen hohen zirkulierenden Massestrom und einen geringen Anlagendurchsatz zur Folge.

In den **Bildern 12** und **13** sind am Beispiel der bereits dem Bild 3 zugrunde liegenden Mahlung von Zementklinker, zwei Betriebszustände der Kreislaufmahlanlage dargestellt, die den Arbeitsbereich der Anlage in Bezug auf Durchsatz und Produktfeinheit veranschaulichen. Im Betriebszustand A wird bei einer Sichterraddrehzahl von 1150 U/min ein vergleichsweise grobes Produkt mit $x_{80} = 48,1 \mu\text{m}$ hergestellt. Der Anlagendurchsatz liegt bei 45 kg/h. Die Umlaufzahl, die als Verhältnis von Mühlendurchsatz zu Anlagendurchsatz definiert ist, beträgt 1,93. Im Betriebszustand B wird bei nahezu maximaler Sichterraddrehzahl von 10000 U/min ein sehr feines Produkt mit $x_{80} = 2,8 \mu\text{m}$ erzeugt. Der Anlagendurchsatz geht auf 2,7 kg/h zurück, wobei sich die Umlaufzahl auf 9,9 erhöht.

Mit Hilfe der experimentell ermittelten Datensätze aus verschiedenen Betriebszuständen lassen sich stoffspezifische Prozessmodelle der Kreislaufmahlanlage erstellen, die eine Vorausberechnung beliebiger Anlageneinstellungen für die untersuchten Stoffe erlauben. Beispielsweise kann für eine gewünschte Feinheit eines bestimmten Produktes die Sichterraddrehzahl als Einstellparameter und die daraus resultierenden Masseströme ermittelt werden. Im umgekehrten Fall kann die Korngrößenverteilung des Produktes und der Anlagendurchsatz berechnet werden, wenn die Sichterraddrehzahl vorgegeben wird.

Die Ergebnisse der Simulation, die mit dem Prozessmodell erreicht werden, stimmen sehr gut mit den experimentell ermittelten Daten überein (**Bild 14**). Die Partikelgrößenverteilungen der realen Mahlprodukte (Schwarz und Grün) sind darin den simulierten Produkten (Blau und Rot) gegenübergestellt. Allerdings zeigt sich, dass die simulierte Verteilung in einigen Abschnitten keinen stetigen Verlauf aufweist und nicht durchgehend mit der realen Verteilung übereinstimmt. 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.

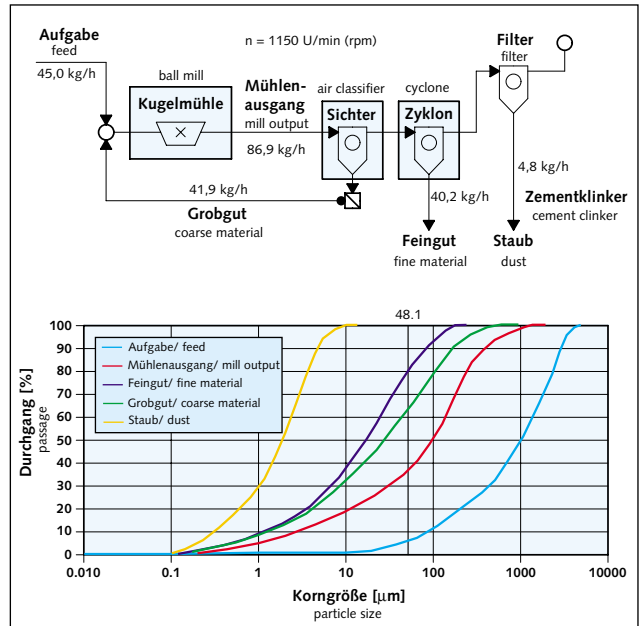


BILD 12: Betriebszustand A, Produktkorngröße $x_{80} = 48,1 \mu\text{m}$, $x_m = 15,5 \mu\text{m}$

FIGURE 12: Operating condition A, product particle size $x_{80} = 48,1 \mu\text{m}$, $x_m = 15,5 \mu\text{m}$

5. Modelling of the overall plant

The overall plant can be modelled on the basis of the material balances of the individual units and their connections, with the need to take into account both the total and the fraction mass flows. Thus, the speed of the separating wheel chosen determines the maximum particle size of the fines passing the classifier during the closed-circuit operation of mill and classifier, simultaneously resulting in the amount of the mass flow circulating between classifier and mill (**Fig. 11**). As the mill is operated with a nearly constant loading percentage, the latter determines the feed rate to the plant from outside. A low product fineness means that the circulating

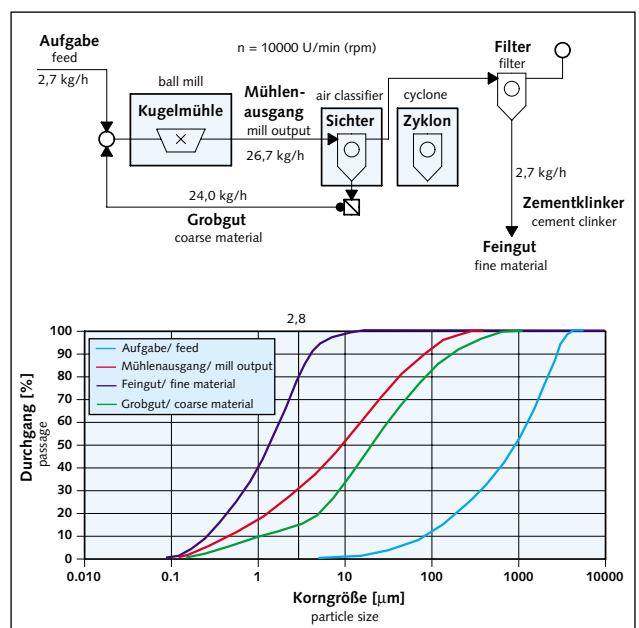


BILD 13: Betriebszustand B, Produktkorngröße $x_{80} = 2,8 \mu\text{m}$, $x_m = 1,3 \mu\text{m}$

FIGURE 13: Operating condition B, product particle size $x_{80} = 2,8 \mu\text{m}$, $x_m = 1,3 \mu\text{m}$

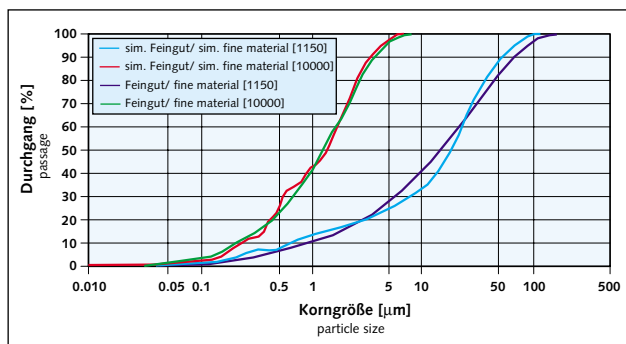


BILD 14: Partikelgrößenverteilungen von realer und simulierter Mahlung

FIGURE 14: Particle size distributions of real and simulated grinding

6. Schlussbemerkung

Das hier beschriebene Prozessmodell kann derzeit noch nicht auf Materialien mit unbekanntem Mahlbarkeits-eigenschaften angewendet werden. Deshalb haben Untersuchungen zur Mahlbarkeit nach wie vor ihre Berechtigung.

Literaturverzeichnis/Literature

- [1] Verein Deutscher Zementwerke e.V. LZ Tätigkeitsbericht, 1984–1987.
- [2] Brunelot, R.: Utilisation du laitier de haut fourneau et de la scorie LD, Rapport Final, CECA-CEE-CEEA, Bruxelles, 1988.
- [3] Schiller, B.: Mahlbarkeit der Hauptbestandteile des Zementes und ihr Einfluss auf den Energieaufwand beim Mahlen und die Zerkleinerungseigenschaften. Dissertation RWTH Aachen, 1992.
- [4] Lohnherr, L., Menzel, K.: Betriebserfahrungen bei der Herstellung von Zementen mit der Rollenmühle. ZKG INTERNATIONAL, 52 (1999), No. 3, pp. 136–146.
- [5] Marchal, G.: Le Broyage de Laitier. Ciments, Bêtons, Plâtres, Chaux (2000), Mars-Avril, pp. 20–31.
- [6] Schubert, H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Band I. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1989.
- [7] Wills, B.A.: Mineral Processing Technology. Pergamon Press, New York, 1992.
- [8] Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik 2. Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- [9] GRAINsoft: PMP-Compact – Die Software für die mechanische Verfahrenstechnik, Benutzerhandbuch GRAINsoft GmbH Freiberg, 1998.
- [10] 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), pp. 118–132.

mass flow is low and the plant throughput is high. A high product fineness results in a high circulating mass flow and a low plant throughput.

Figs. 12 and 13 show two operating conditions of the closed-circuit grinding plant during cement clinker grinding, which was already the basis for Fig. 3, to demonstrate the operating range of the plant with respect to throughput and product fineness. A relatively coarse product with $x_{80} = 48.1 \mu\text{m}$ is made with a speed of the separating wheel of 1150 rpm during the operating condition A. The plant throughput amounts to 45 kg/h. The recycle ratio, defined as the relationship between mill throughput and plant throughput, amounts to 1.93. A very fine product with $x_{80} = 2.8 \mu\text{m}$ is made during the operating condition B with the nearly maximum speed of the separating wheel of 10000 rpm. The plant throughput is decreased to 2.7 kg/h and the recycle ratio is increased to 9.9.

Based on the experimentally determined data records of various operating conditions, material-specific process models of the closed-circuit grinding plant can be created making it possible to precalculate arbitrary plant settings for the materials tested. For example, the speed of the separating wheel, as setting parameter, and the resulting mass flows can be determined for a desired fineness of a certain product. The other way round, the particle size distribution of the product and the plant throughput can be calculated if the speed of the separating wheel is given.

The results of the simulation achieved with the process model very well tally with the experimentally determined data (**Fig. 14**). The particle size distributions of the real products (black and green) are compared with the simulated products (blue and red). However, it turned out that the simulated distribution is not steady in some sections and does not completely tally with the real distribution. The conformity can be improved by a further development of the algorithms on which the process model is based, on the one hand. On the other hand, the quality of the experimental data available for the verification of the process model also influences the quality of the simulation.

6. Final comment

It is not yet possible to apply the process described to materials with unknown grindability properties. Therefore, it is still justified to carry out investigations into the grindability.