

Dipl.-Ing. Paul Meissner – Montanuniversitaet Leoben, chair of Mineral Processing, Austria – post-graduate assistant since 2010

Dipl.-Ing. Thomas Plochberger – CEMTEC Cement and Mining Technology, Enns, Austria – Head of Research & Development since 2011

Dipl.-Ing. Dr. mont. Andreas Böhm – Montanuniversitaet Leoben, chair of Mineral Processing, Austria, assistant professor

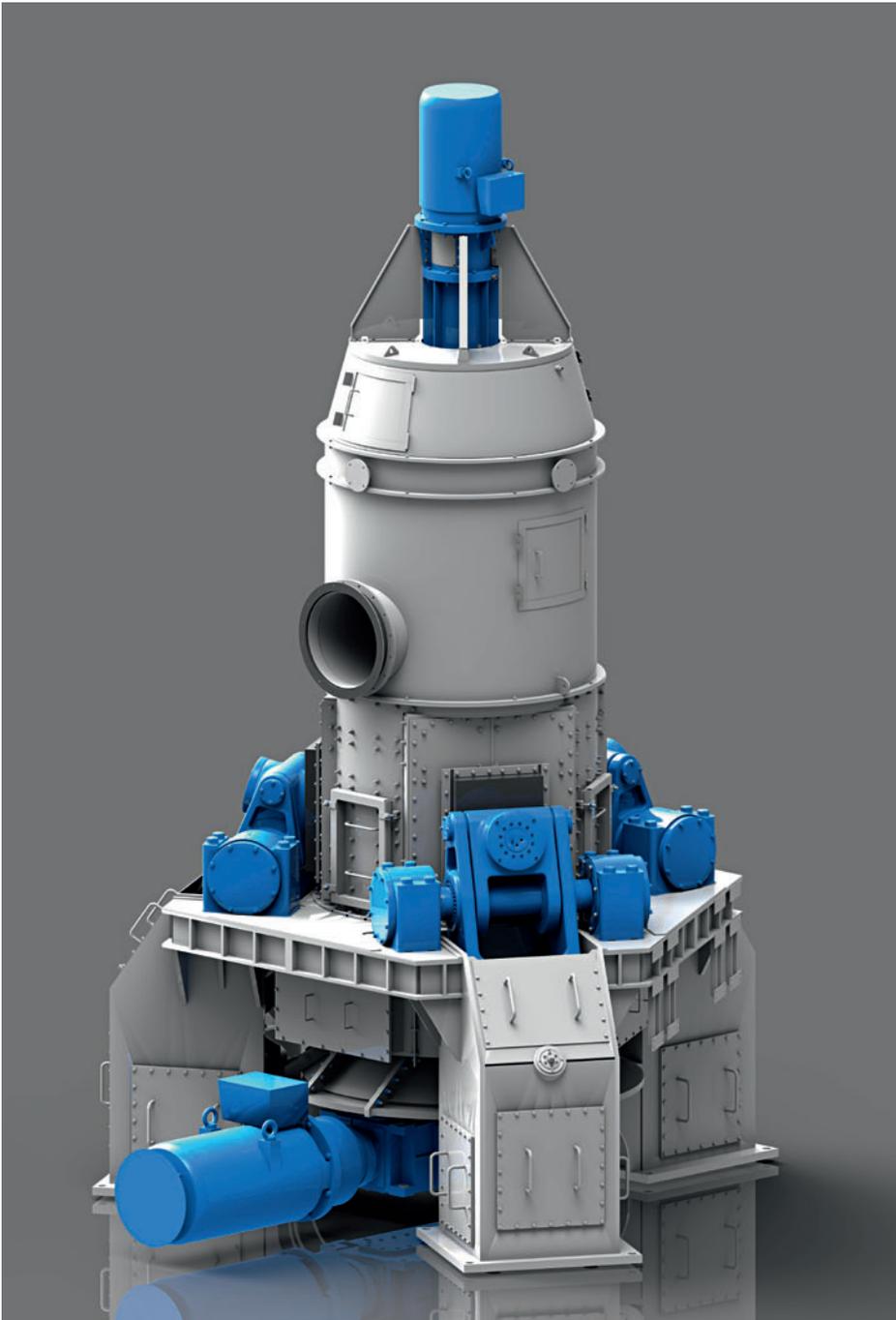
Besser Mahlen • Improved Grinding

Forschungs- und Entwicklungskompetenz der Fa. CEMTEC am Beispiel der Vertikalmühle

Zusammenfassung: Die Herstellung von Mineralprodukten mit definierter zumeist sehr feiner Kornverteilungen bei geringstmöglichem Energieverbrauch, die zudem wichtige Eigenschaften in modernen Werkstoffen übernehmen („Funktionsminerale“), spielt eine immer wichtigere Rolle am europäischen Markt. Der Einsatz von Wälzmühlen stellt hier eine zukunftsweisende Technik dar. Die notwendigen Mahlparameter müssen hierfür zumeist in umfangreichen Versuchsplänen erarbeitet werden, um die gewünschten Spezifikationen bei wettbewerbsfähigen Bedingungen zu erreichen. Moderne statistische Versuchsplanung und –auswertung hilft diesen Prozess abzukürzen und damit wirtschaftlicher zu machen. In diesem Spannungsfeld versucht die Firma CEMTEC, in Kooperation mit der Montanuniversität Leoben, effiziente Prozesstechnik zu entwickeln.

CEMTEC’s Research & Development capabilities, focusing on the example of the vertical mill

Summary: The production of mineral products, which perform highly important functions in modern materials (“functional minerals”), of defined and usually extremely fine particle size distributions at minimized energy consumption, is playing an increasingly important role on the European market. In this field, the use of roller mills is a forward-looking technology. The necessary grinding parameters for these mills generally have to be determined with extensive test plans, in order to attain the required specifications under competitive conditions. Modern design of experiments and test evaluation assist in shortening this process, thus making it more cost-effective. Within this conflicting field, CEMTEC is working in co-operation with the Montanuniversitaet Leoben, to develop efficient process technology.



Vertikalrollenmühle VRM-12M • Vertical roller mill VRM-12M

1 Einleitung

Die Firma CEMTEC ist seit mehr als 20 Jahren in der Mineralrohstoffindustrie als Lieferant von Mahlaggregaten und Gesamtanlagen tätig. Die vor allem für den europäischen Markt wichtige Füllstoffindustrie wurde bisher vor allem mit Kugelmühlen- und Sichterntechnologie bedient. Die Vorteile der Wälzmahlung wie geringerer Platzbedarf, vergleichsweise höhere Aufgabedispersität sowie ein reduzierter spezifischer Energieverbrauch, waren im Jahr 2008 der Anlass das Produktportfolio um Vertikalrollenmühlen zu erweitern. Eine Abgrenzung zu bestehender Wälzmahltechnik wurde durch ein neuartiges Antriebskonzept sowie mit der Fokussierung auf die Füllstoffindustrie, bzw. den Feinstmahlbereich erreicht.

1 Introduction

CEMTEC has been a supplier of grinding equipment and integrated plants in the mineral resources sector for more than twenty years. The fillers and extenders industry, which is important especially for the European market, has so far been supplied predominantly with ball mill and classifier technology. In 2008, the benefits of roller grinding, including a smaller installation footprint, comparatively high feed dispersity and reduced specific energy consumption, provided the incentive for the company to expand its product range to include vertical roller mills. An innovative drive concept and a focus on the fillers industry, and ultra-fine grinding, were the key factors in the development of the mills, setting them

Da die Anforderungen an die Feinheit mineralischer Füller stetig steigen, besteht ein großer Bedarf an eingehendem Verständnis der zerkleinerungswirksamen Vorgänge in Mahlaggregaten, um die geforderten Spezifikationen zu erreichen.

2 Wälzmahlung im Focus

Die apparative Bemessung und die Abschätzung der notwendigen Antriebsleistung von Wälzmühlen durch Erfahrungswerte sind seit mehr als 45 Jahren, in der einschlägigen Literatur verfügbar. Die Bandbreite der fortgeschrittenen Modelle durch Übertragungsfunktionen für Parameter, die auf speziellen Laborwälzmühlen erarbeitet werden müssen, reicht von Potenzfunktionen [1] bis hin zu komplexen Zusammenhängen auf Basis der Ähnlichkeitstheorie [2]. Gemeinsam ist ihnen eine starke Abhängigkeit von den Details der Bauform der jeweiligen Mühle. Moderne hochfunktionale Füllstoffprodukte erfordern aufgrund der hohen Dispersität ein immer besseres Verständnis der wesentlich einflussnehmenden Maschinenparameter für den Energieeintrag im Wechselspiel mit der Klassierung. Die Kenntnis dieser Parameter zusammen mit der Rohgutcharakteristik oder Mahlbarkeit erlauben eine Produktsimulation durch ein Modell.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, den Einfluss des Rohgutes durch Mahlbarkeitsversuche zu ermitteln. Dabei wird im Wesentlichen zwischen Labor- und semiindustriellen Technikkumsversuchen unterschieden. Der Bedarf an Material für semiindustrielle Versuche auf Vertikalmühlen ist meist deutlich größer als die zur Verfügung stehende Menge an Versuchsmaterial. Bei Kugelmühlen ist dieses Problem nicht beherrschend, da hier durch die Verwendung von standardisierten Labortests [3] Aussagen mit deutlich weniger Probenmaterial möglich sind. Die Verwendung der Mahlbarkeitsprüfung nach BOND zur Ableitung des gutspezifischen Energieverbrauches für Wälzmühlen ist wegen der unterschiedlichen Beanspru-

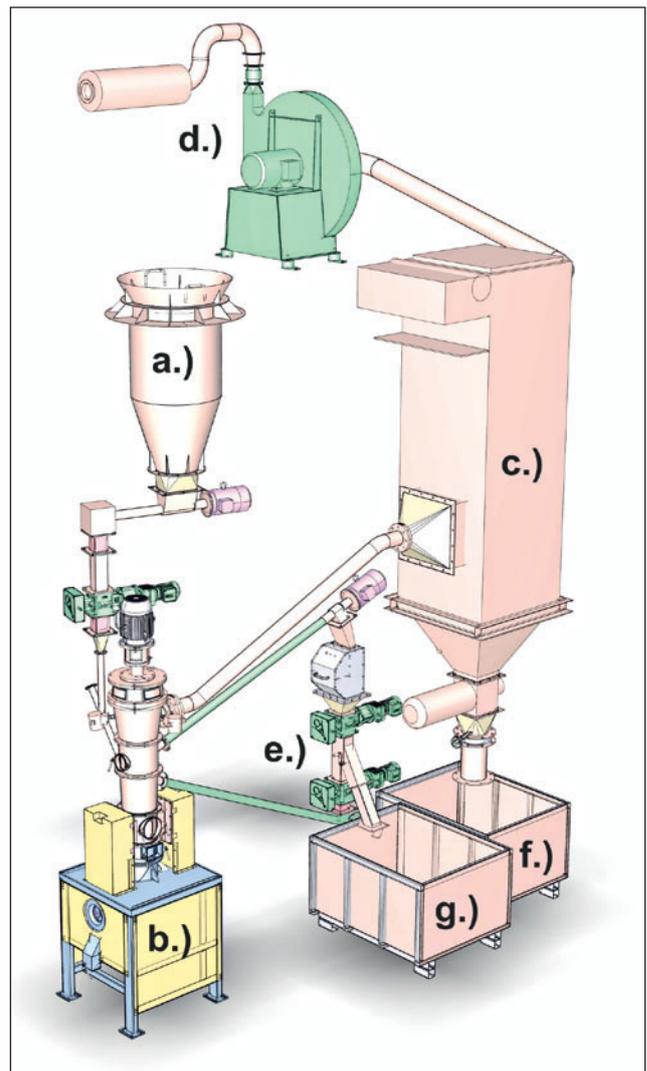
apart from conventional roller grinding technology. As the requirements for the fineness of mineral fillers are constantly rising, there is huge need for in-depth understanding of the comminution-relevant processes occurring in grinding machines, in order to meet the required specifications.

2 Focus on roller grinding

Descriptions of the dimensioning and the estimation of the necessary drive power for roller mills based on empirical values have been contained in relevant literature for more than 45 years. The bandwidth of the advanced models based on transfer functions for parameters, which have to be acquired using special laboratory roller mills, range from power functions [1] up to and including complex concepts taking the similarity theory as their basis [2]. Common to all of them, however, is a great dependence on the details of the design and geometry of the mill. Modern, highly functional filler products necessitate an ever better understanding of the essential machine parameters influencing the energy input in interplay with classification. Knowledge of these parameters, combined with knowledge of the feed-material characteristics and its grindability, permit product simulation on the basis of a model.



1 Anlage während der Montage • The system during installation



2 Anlagenüberblick in Funktionsgruppen • Overview of the system, divided into functional groups

chungsart und der oftmals unzureichenden Verallgemeinerbarkeit abseits der geprüften Körnung unsicher. Bei Mahlung mittels Kugelmühle wird ein schlagend-drückender Kräfteinfluss vorausgesetzt, bei der Wälzmahlung dominiert der drückend-reibende Kräfteinfluss. Der Ansatz von ZEISEL trifft diese spezifische Belastungsart durch die Verwendung eines Kugel-Ringmahlwerks besser, weist jedoch vorab Einschränkungen in der Aufgabekörnung und der Probenmenge auf.

Die Erfassung der Einflüsse von Maschinenparametern von Mahlwerk (Anpressdruck, Tellergeschwindigkeit, etc.) im Wechselwirkung mit dem Sichter (Drehzahl, Luftmenge, etc..) kann nur durch systematische Versuche erfolgen. Die neue Labormühle sucht die Vorteile eines Mahlbarkeitsprüfstandes zur bestmöglichen Nachahmung der Wälzbelastung mit Energieaufnahme über Drehmomentenmesswelle im Antriebsstrang mit einem Sichter im kleinstmöglichen Maßstab zu kombinieren. Dies erlaubt einerseits den Kombinationsbetrieb von Sichter und Mahlwerk, andererseits den Einzelbetrieb der Aggregate sowie die insitu Beprobung zur Bilanzierung des Systems aus den 3 Teilprozessen Mahlung, Aufstromklassierung und Sichtung. Dies soll das Verständnis des Zusammenhangs zwischen Bruchcharakteristik des Materials und Klassiereinfluss vertiefen.

Ein auf diesen Grundlagen aufbauendes Modell, für Mühlen unterschiedlicher Baugrößen, liefert jenes Up-Scaling Know-How, um ein für den Kunden optimales Aggregat auszulegen und dieses an die Wünsche und Erfordernisse der Einsatzumgebung anzupassen.

3 Die Labormahlanlage VRM200

Die Technikumswälzmühle VRM200 wurde im Spannungsfeld aus wirtschaftlichen Interessen, d.h. einer besseren Betreuung von Kunden und der exakteren Auslegung von Aggregaten, bzw. dem Streben nach Technologievorsprung auf dem Gebiet der Wälzmahlung, über das bisher veröffentlichte Maß hinaus, entwickelt. Als wissenschaftlicher Partner wurde die Montanuniversität Leoben/Austria gewonnen. Die Mühle wurde mit einem Tellerdurchmesser von 200 mm geplant. Diese Tellergröße ermöglicht Versuche mit vergleichsweise geringen Materialmengen aber auch bereits nennenswerten Massedurchsätze (bis 250 kg/h) bei entsprechenden Feinheiten und bewegt sich so im Übergangsbereich von reiner Labormahlung zur semiindustriellen Mahlung. Damit bildet die Mühle eine Brücke zwischen der Mahlbarkeitsprüfung nach ZEISEL und der ebenfalls vorhandenen semiindustriellen Wälzmühle VRM600, welche hauptsächlich für Lohnmahlkampagnen eingesetzt wird [4].

Es wurden zwei bau- und funktionsgleiche Anlagen gebaut. Eine Anlage für das Versuchstechnikum der Fa. CEMTEC in Enns und eine Anlage für das Labortechnikum der Montanuniversität Leoben am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung. Beide Anlagen sind im Spätsommer 2011 in Betrieb gegangen (**Bild 1**).

Die Beschreibung der Mühle in Baugruppen ist in **Bild 2** ersichtlich. Die Materialaufgabe erfolgt über eine gravimetrische Dosiereinrichtung (a.) mit Austragsschnecke. Mittels einer Zellenradschleuse erfolgt die Aufgabe in die Mühle (b.)

auf den Mahlteller. Die Systemluft strömt durch den Luftkanal über den Düsenring in den Mahlraum und fördert das Material zum dynamischen Sichter. Das Feingut (f.) wird anschließend über einen Schlauchfilter (c.) abgeschieden. Der Systemventilator sitzt saugend reingasseitig (d.) nach dem Filter. Eine entscheidende Neuentwicklung besteht im System des externen Grießumlaufes (e.), womit vom Querstromsichter abgewiesenes Grobgut (g.) durch eine Förderschnecke dem Mahlraum entnommen werden kann. Dabei besteht die Möglichkeit, dieses Produkt auszuschleusen oder in den Mahlraum zurückzuführen. Die Beprobung des Umlaufes bietet die Möglichkeit, den internen Umlauf der Mühle zugänglich zu machen und besser zu verstehen. Bei Rohgut mit unterschiedlichen beteiligten Mineralphasen (wie z.B. Talk – Pyrit) kann durch eine Ausschleusung bzw. einen Sortierschritt eine Produktanreicherung über selektive Zerkleinerung erfolgen.

Die Mühle wurde als Fremdkraft-Wälzmühle mit ebenem Teller und zwei konischen Walzen ausgeführt (Bild 3). Die Konstruktion erlaubt einen Austausch von Mahlteller, Düsenring und der Walzen ohne wesentliche Umbauarbeiten. Die Aufgabe erfolgt zentral über den Grießekonus des Sichters auf den Teller. Der Grießeaustrag wurde so konstruiert, dass ohne größere Umbauarbeiten sowohl mit als auch ohne externen Umlauf Versuche durchführbar sind.

Der spezifische Mahldruck ist variabel von 100 kN/m^2 bis 1000 kN/m^2 regelbar. Die Hydraulikanlage ist mit 2 Gasdruckspeichern ausgestattet. Ein Überblick über die geometrischen Abmessungen ist in Tabelle 1 gegeben.

3.1 Messtechnische Parametrierung – Steuerung/Regelung

Die messtechnische Parametrierung der Anlage wurde so gestaltet, dass ein umfassendes Profil der Mühle bei ver-



3 Blick in den Mahlraum • View into the grinding chamber

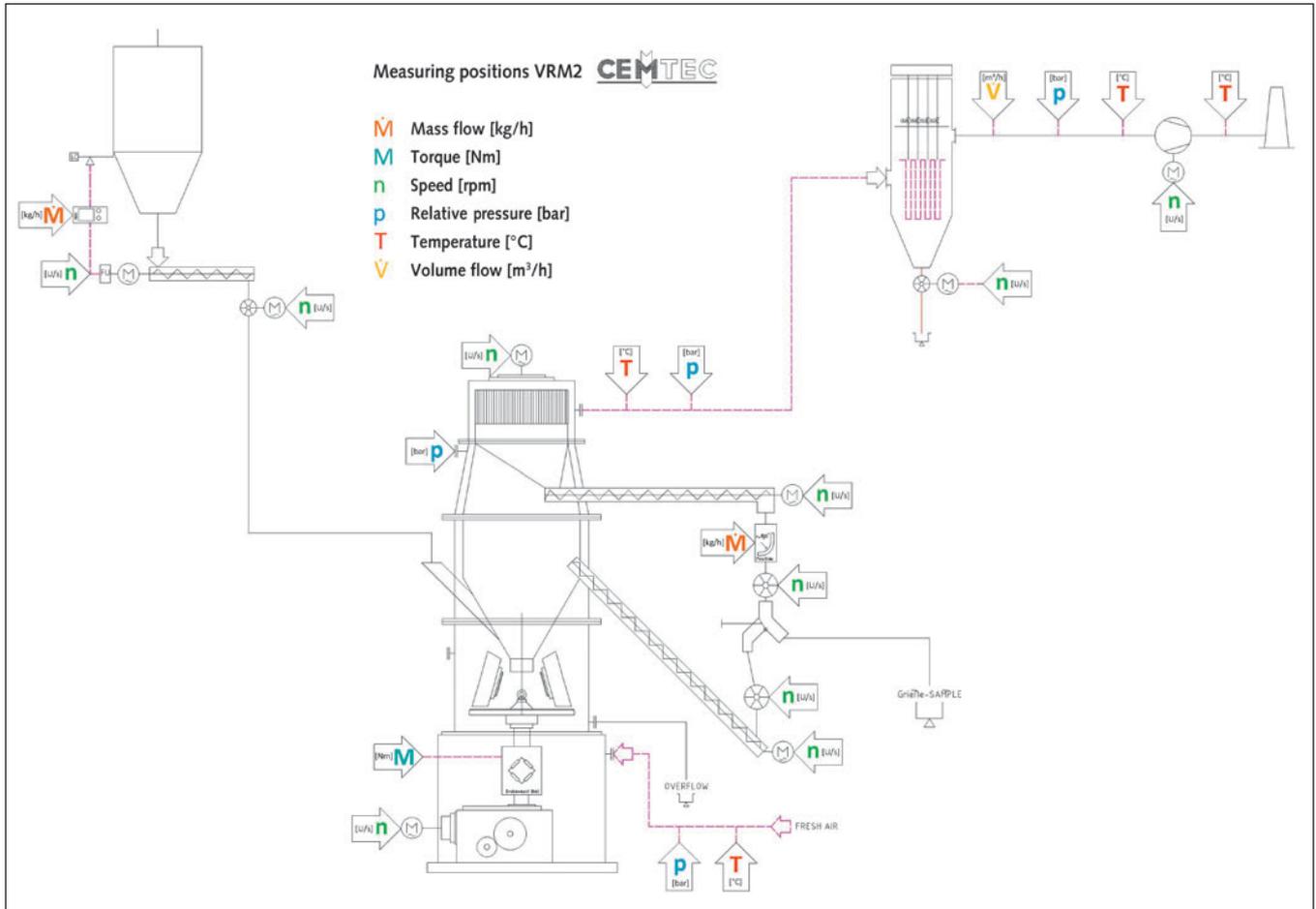
A number of methods is available for determining the influence of the feed material by means of grindability tests. It is essentially necessary to differentiate between laboratory tests and technology-centre tests performed on a semi-industrial scale. The material required for semi-industrial tests with vertical mills generally significantly exceeds the amount of test material available. This problem is not insurmountable in the case of ball mills, since it is possible to obtain information using significantly less test material by means of standardised laboratory tests [3]. The application of the BOND grindability test for the derivation of product-specific energy consumption for roller mills has only little rationality, owing to the different type of loading and the frequently inadequate generalised applicability for particle sizes other than those actually tested. An impact-compressive force effect is presupposed in grinding in ball mills, whereas a compressive-frictional force effect dominates in roller grinding. ZEISEL's approach, thanks to the use of a ball-ring mill, matches this specific type of load better, but does have limitations with regard to the feed size and sample quantity.

The influences of the machine parameters of both the grinding mechanism (grinding pressure, grinding table speed, etc.) and the classifier (speed, air flow rate, etc.) can be determined only by means of systematic tests. The new laboratory mill endeavours to combine, on the smallest possible scale, the advantages of a grindability test facility for best possible simulation of roller load, with energy take-up via a torque measurement shaft in the drive train, with those of a classifier. This permits combined operation of the classifier and grinding unit, on the one hand, and individual operation of the machines and in-situ sampling for assessment of the system from the three sub-processes of grinding, upflow classification and air classification, on the other hand. This is intended to deepen understanding of the correlation between the fracture behaviour of the material and the influence of classification.

A model set up based on these principles, for mills of different sizes, provides up-scaling know-how, enabling the design

Tabelle 1: Geometrische Kenndaten der VRM2
Table 1: Geometric characteristic data for the VRM2

Hauptabmessungen der VRM2 Principal dimensions, VRM2		
Mittlerer Wälzkreisdurchmesser Mean roller circle diameter	D_{TW}	156 mm
Tellerdurchmesser Grinding plate diameter	D_T	200 mm
Mittlerer Mahlwalzendurchmesser Mean grinding roller diameter	D_{wm}	133 mm
Anzahl der Mahlwalzen Number of grinding rollers	m, z	2
Staurandhöhe/Orifice height	h	variabel
Mahlspaltweite/Grinding-gap width	s	0–15 mm
Mahlwalzenneigung Grinding roller inclination	α	15°
Neigung der Mahlbahn Inclination of grinding track	γ	0°



4 Anlagenfließbild vereinfacht mit Sensorik • System flow sheet, simplified sensor system

schiedenen Betriebszuständen aufgezeichnet werden kann. Zur Erstellung eines Druck- und Temperaturprofils wurden 5 Relativdrucksensoren und 4 Temperatursensoren verbaut (Bild 4). Die mechanisch eingebrachte Leistung auf den Mahlteller wird mittels Drehmomentenmesswelle gemessen. Die Erfassung sämtlicher Betriebsdaten erfolgt automatisch, in maschinenlesbarer Form, auf einer Speicherkarte. Die Steuerung der Anlage erfolgt über ein Panel mit Touchbedienung und ermöglicht so eine einfache Bedienung bei gleichzeitig hoher Flexibilität für den Anwender. Bei Verwendung des externen Umlaufes wird der Massestrom durch eine mechanisch entkoppelte Prallwaage direkt im Grießumlauf gemessen.

Der Systemventilator und die Aufgabevorrichtung können einerseits durch die Vorgabe einer Fixdrehzahl aber auch vollautomatisch mittels PID-Regler gesteuert werden. Die Systemluft lässt sich so auf einen konstanten Volumenstrom hin regeln bzw. die Aufgabe auf einen Massestrom oder auf einen zu erreichenden Druckabfall über die Mühle.

3.2. Querstromdrehkorbsichter

Die Mühle wurde mit dem Querstromdrehkorbsichter CT-M0014V aus eigener Entwicklung kombiniert. Der Sichter hat einen Sichtraddurchmesser von 160 mm. Der Sichterantrieb ist zwischen 600 min⁻¹ bis 4000 min⁻¹ regelbar und ermöglicht so Trennschnitte von 280 µm bis 25 µm Top-Cut.

of the optimum machine for the customer, and its adaption to the needs and requirements of the service environment.

3 The VRM200 laboratory grinding unit

The VRM200 technology-centre roller mill was developed against a background of divergent economic interests, namely improvement of customer support and more precise design of machines, and the targeting of a technological lead in the field of roller grinding of a degree greater than that previously published. The Montanuniversitaet Leoben/Austria was enlisted as a scientific co-operation partner. The mill was planned with a grinding table diameter of 200 mm. This table size permits tests with comparatively small quantities of material but with nonetheless significant throughput rates by mass (up to 250 kg/h) for corresponding finenesses, and can thus be positioned in the transition zone between purely laboratory grinding and semi-industrial grinding. This mill therefore constitutes a “bridge” between ZEISEL’s grindability test and the already existing VRM600 semi-industrial roller mill, which is used primarily for contract-grinding campaigns [4].

Two systems of identical construction and function were built, one for CEMTEC’s technology test centre in Enns, and one for the laboratory technology centre, at the Chair of Mineral Processing of the Montanuniversitaet Leoben. Both systems started operation in the late summer of 2011 (Fig. 1).

3.3 Betriebsarten der Mühle

Drei mögliche Betriebsarten sind mit der Anlage realisierbar: der Betrieb ohne Umlauf, mit Umlauf (mit Rückführung oder Teil/Vollentnahme des Grießmaterials) und als Kollergang ohne Sichtaggregat. Die Vorgabe war, die Mühle so zu bauen, dass all diese Betriebsarten ohne umfassende Umbauten an der Mühle durchführbar sind.

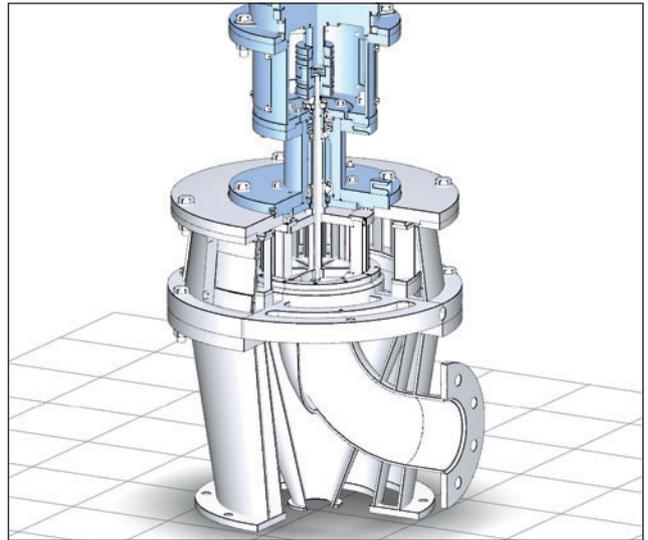
Die Mühle ist im Betriebsmodus ohne externen Grießumlauf mit der Funktionsweise einer industriellen Vertikalmühle identisch. Einzig der längere Aufstrombereich, bedingt durch den Grießumlauf, ist hervorzuheben. Im Betriebsmodus mit Grießumlauf ist eine Erfassung des Massestroms und der Grießdispersität möglich. Die Beprobung der Grieße ist über einen By-pass möglich, die eine komplette Umleitung des Grießstroms zwecks repräsentativer Probenahme erlaubt. Als Kollergang ist die Mühle ohne Verwendung der Systemluft konzipiert. Der Luftkanal unter dem Teller wurde so gebaut, dass ein „Abfluss“ des Materials durch den Düsenring gewährleistet ist. Die Aufgabe erfolgt in diesem Modus auch über die zentrale Aufgabe. Die Anlage wurde innerhalb eines Jahres geplant, gebaut und in Betrieb genommen. Alle Engineering-Leistungen wurden intern erbracht.

4. Anwendung statistischer Versuchsplanung

Die erste Abschätzung des Versuchsaufwandes, zur Beantwortung verschiedener Fragestellungen zum Verhalten der Vertikalmühle, über Möglichkeiten zum Up-Scaling und zur Bewertung der Gewichtung von Einflussparametern, ergab eine Anzahl von über 200 notwendigen Einzelversuchen. Eine Literaturstudie bestätigte diesen Versuchsaufwand. In [5] wird ein Verfahren mittels standardisierter Laborversuche beschrieben. Durch einen Standardlaborversuch mit einer Referenzmühle wird eine Aussage über die Mühlenleistung, den möglichen Durchsatz und anderer spezifische Mühlenparameter generiert und über Übertragungsfunktionen auf die Betriebsmühle umgelegt. Die sichere Verwendung dieses Ansatzes ist aber nur unter Kenntnis einer Vielzahl von Versuchsergebnissen aus Betriebsmühlen realisierbar.

Die Verwendung einer Simulation auf Basis eines CFD Softwarepakets wurde als ökonomischer Ansatz erwogen. Trotz enormer Fortschritte wurde diese Technik als alleiniges Planungsinstrument für neue Anlagen als zu riskant und zu unverlässlich verworfen, obwohl der rechnerische Nachweis bestehender Anlagen [6; 7] sehr gut gelingt. Fragen über den inneren Massestrom, die Wirkung der Zerkleinerung und die von Einbauten entziehen sich jedoch einer Beantwortung. Anwendungen auf beschränkte Teilbereiche der Gesamtanlage [8] sind jedoch sehr aufschlussreich.

Daher wurde auf eine Kombination von klassischen Versuchsreihen und statistischem Versuchsplan zurückgegriffen. Dieser soll bei verringertem Versuchsaufwand eine Aussage über den Einfluss der verschiedenen Parameter und eventuell vorhandene Wechselwirkungen geben. Ein solcher Versuchsplan kann als teilfaktorieller Screeningplan ausgeführt werden. Bei diesem Versuchsplan werden die Versuchsparameter in verschiedenen Kombinationen getestet, die Parametervariationen sind je Parameter auf zwei Niveaus fixiert. Die Niveaus sind so gewählt, dass die Werte der Parameter bei minimalen



5 Querstromdrehkorbsichter CTM0014V • CTM0014V cross-flow rotary-cage classifier

Fig. 2 shows a description of the mill in modules. Material feed is effected with a gravimetric metering system (a.) with a discharge screw. The material is fed by means of a rotary valve onto the grinding table of the mill (b.). System air flows via the air duct and the nozzle ring into the grinding chamber and conveys the material to the dynamic classifier. The fines (f.) are then separated with a bag filter (c.). The system fan operates in suction and is located on the clean-gas side (d.) downstream of the filter. A decisive new development is the external grit bypass system (e.), by means of which coarse particles (g.) rejected by the cross-flow classifier can be removed from the grinding chamber via a screw conveyor. This makes it possible to either route this product out, or to return it to the grinding chamber. Sampling from the circuit makes it possible to access and better understand the mill's internal circulation. For feed materials containing different mineral phases (e.g. talc/pyrites), discharge and/or a sorting stage permits product concentration by means of selective comminution.

The mill was designed and constructed as an attrition mill with a flat grinding table and two tapered rollers (Fig. 3). The design permits changing of the grinding table, nozzle ring and rollers without significant conversion work. The feed material is fed centrally onto the grinding table via the grit funnel of the classifier. The grit discharge system was designed in such a way that tests can be performed either with or without an external circuit without major conversion work.

The specific grinding pressure can be varied from 100 kN/m² to 1000 kN/m². The hydraulic system is equipped with two gas pressure accumulators. Table 1 provides an overview of the mill's geometrical dimensions.

3.1 Setting measurement parameters; control/regulation

The measurement parameters of this mill were set to enable the recording of a comprehensive profile of the mill in various operating states. Five relative-pressure sensors and four

und maximalen Prozesswerten liegen (Tabelle 2). Im Unterschied zum klassischen Versuchsplan, bei welchem immer nur ein Parameter alleine verändert wird, um den Einfluss zu studieren, verändert man beim statistischen Screeningplan immer mehrere Parameter auf einmal. Die wichtigsten Einflussparameter wurden auf Basis des bereits vorhandenen Prozesswissens isoliert. Im Zuge dieses Vorgangs wurden Kriterien definiert, welche erfüllt werden müssen, damit der Versuch als gültig angesehen werden kann. Diese wurden folgendermaßen definiert:

- Ausgeglichene Massebilanz
- Konstanter Druckabfall über die Mühle
- Konstante Produktdispersität
- Gleichmäßiger Systemluftstrom

Auf Basis dieser 4 Vorgaben kann ein Versuch als stabil gewertet werden. Zeitlich gilt hier ein Beobachtungsraum von 60 Minuten nach Erreichen aller 4 Vorgaben. Die Konstanz des Massestroms und der Produktdispersität wird durch Probenahme nach dem Filter überprüft.

Es wurden 5 Maschinenparameter (Tabelle 2) in die engere Wahl genommen. Die äußeren Einflussparameter Materialart, Feuchte und Aufgabekörnung wurden differenziert betrachtet. Alle in diesem Artikel beschriebenen Versuche wurden mit Marmor bei definierter Körnung durchgeführt (Tabelle 2). Andere Parameter wurden vorab vernachlässigt, um den Versuchsaufwand zu begrenzen.

Ein statistischer Plan setzt die Durchführbarkeit aller geplanten Versuche voraus. Kann ein Versuch aus prozesstechnischen Gründen nicht gefahren werden, so kann nur unwesentlich vom vorgegebenen Niveau abgewichen werden. Bei zu großer Abweichung ist die Aussagekraft des Planes nicht mehr gegeben. Unter Vorgabe der Stabilitätskriterien, sind einige Kombinationen des Screeningplans nicht durchführbar. So kann eine hohe Sichtdrehzahl von 4000 min⁻¹ nicht

Tabelle 2: Beschreibung der Einflussfaktoren für DoE- und klassischen-Versuchsplan
 Table 2: Description of influencing factors for DoE and classical test schedule

Maschinenparameter/Machine parameters			
	Einheit/ Unit	Min. Level/ Min. level	Max. Level/ Max. level
Tellerdrehzahl Grinding table speed	min ⁻¹ /rpm	80	120
Walzenanpressdruck Roller contact pressure	kN/m ²	500	850
Aufgabemenge Feed rate	kg/h	10	250
Systemluftmenge System-air flow rate	Bm ³ /h	680	950
Sichtdrehzahl Classifier speed	min ⁻¹ /rpm	600	4000
Äußere Parameter/External parameters			
Material/Material	Calcit/Calcite	ρ=2.72g/cm ³	
Körnung/Particle size	6.3/0mm		

temperature sensors were incorporated to permit the plotting of a pressure and temperature profile (Fig. 4). The mechanical power applied to the grinding table is measured by means of a torque measurement shaft. All operating data are recorded automatically, in machine-readable form, and stored on a memory card. The machine is controlled by means of a panel featuring touch-screen control, thus permitting easy operation combined with great flexibility for the user. Where the external circuit is used, the mass flow is measured directly in the grit recirculation by means of a mechanically isolated impact weigher.

The system fan and the feed system can be controlled, on the one hand, by selecting a fixed speed, and also fully automatically, by means of a PID controller. System air rate can thus be adjusted to a constant volumetric flow, or feed adjusted to a mass flow or a target pressure drop across the mill.

3.2 Cross-flow rotary-cage classifier

The mill was combined with the CTM0014V cross-flow rotary-cage classifier developed in house (Fig. 5). The classifier has a classifier wheel diameter of 160 mm. The classifier drive can be regulated from 600 rpm to 4000 rpm, thus permitting cut-points from 280 µm to 25 µm top-cut with limestone at a materials' density of 2,72 g/cm³.

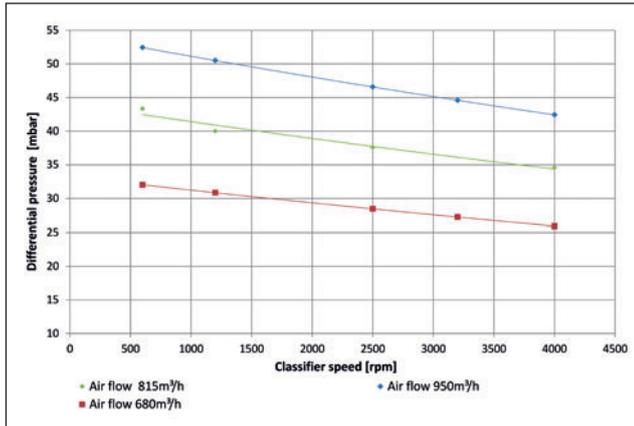
3.3 Modes of mill operation

Three modes of operation can be selected with this machine: operation without recirculation, with recirculation (with return or with partial/total removal of the grit material) and as an edge mill with no classifying element. The requirement was the construction of the mill in such a way that all these modes of operation could be implemented without major conversion work to the mill.

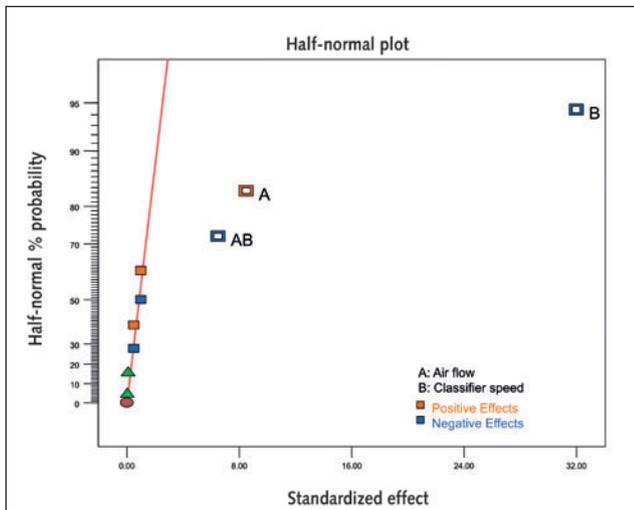
In the mode of operation without external grit recirculation, the mill operates identically to an industrial vertical mill. Only the longer up-flow zone resulting from grit recirculation should be emphasized. Mass flow and grit dispersity can be registered in the mode of operation with grit recirculation. The grit can be sampled via a bypass, which permits complete diversion of the flow of grit for the purpose of obtaining representative samples. For its edge mill mode of operation, the mill is designed without the use of system air. The air duct under the grinding table was designed and constructed in such a way that descent of the material through the nozzle ring is assured. In this mode of operation, material input is also accomplished via the central feed system. This facility was designed, constructed and commissioned within a twelve-month period; all engineering work was performed internally.

4. Application of the design of experiments

An initial estimation of the amount of testing necessary, aimed at answering various questions concerning the behaviour of the vertical mill, concerning possibilities for up-scaling and evaluation of the weighting of influencing parameters, indicated the necessity for more than two hundred individual tests. A study of the relevant technical literature confirmed this level of testing. Reference [5] describes a procedure with standardized laboratory tests. A standard



6 Kennlinien für die Regelung mithilfe des Druckballs über dem Mahlraum • Characteristic curves for control using the pressure drop across the grinding chamber



7 Half Normal Plot für $k_{50\%}$ [Abszisse: Effektbeträge – Ordinate: kumulierte Häufigkeit] • Half-normal plot for $k_{50\%}$ [Abszissa: effect amounts – Ordinates: cumulative frequency]

mit einer hohen Aufgabe von 250 kg/h kombiniert werden. Umgekehrt sind Einstellungen von 600 min⁻¹ und 20 kg/h Aufgabe ökonomisch sinnlos.

Als Ausweg bieten sich hier zwei Möglichkeiten. Einerseits die Verwendung eines D-Optimalen Screeningplanes, wo durch Vorgabe von Randbedingungen problematische Faktorkombinationen ausgeblendet werden. Zur Formulierung dieser Randbedingungen ist eine Vielzahl an Versuchen notwendig. Daher wurde diese Möglichkeit einstweilen verworfen.

Andererseits wird im industriellen Umfeld die Materialaufgabe über den mahlraumseitigen Druckabfall (Luftreinlass-Sichtereinlauf) geregelt.

Vorversuche zeigten eine Linearisierung des Druckabfalls über die Mühle für verschiedene Einstellwerte der Sichterzahl bei maximalem Mühlendurchsatz. Bild 6 stellt den linearisierenden Verlauf des Druckabfalls über den Mahlraum bei maximalem Aufgabemassstrom, festgelegter Sichtluftmenge und variiertes Sichterzahl dar. Um zu verwendbaren Regelpunkten des Mahlraum-Druckabfalls

laboratory test using a reference mill is thus performed in order to generate information on the necessary mill power, the potential throughput, and other specific mill parameters. This approach can only be applied safely given knowledge of a large number of results obtained from tests performed with working mills.

The use of a simulation based on a CFD software package was considered as an economic concept but, despite the enormous recent advances in this technology, was ultimately rejected as being too risky and too unreliable, although it has been used very successfully for the verification of existing systems [6, 7]. It is also difficult to find answers to many questions concerning the internal mass flow and the effectiveness of comminution and of internal components. Application to restricted sub-sectors of the overall system [8], however, is very useful in terms of high informational value.

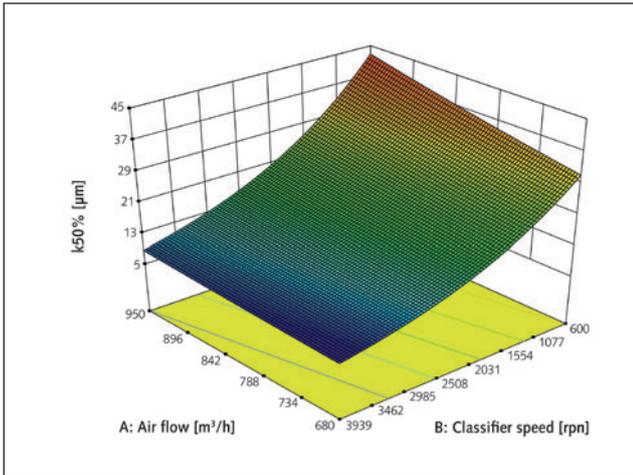
Therefore a combination of classical test series and design of experiments was used. This is intended to provide information on the influence exerted by the various parameters and on any interactions that are present. Such a test plan can take the form of a fractional factorial screening schedule. In this test plan, the test parameters are tested in various combinations, and the parameter variations are fixed at two levels for each parameter. The levels are selected in such a way that the values for the parameters coincide with minimum and maximum process values (Table 2). Unlike classical test plans, in which only one single parameter is changed at one time, in order to study its influence, multiple parameters are always changed at once in a DoE test plant. The most important influencing parameters were isolated on the basis of the process knowledge already available. Criteria which must be fulfilled if the test is to be regarded as valid were defined as follows during this process:

- Stable mass balance
- Constant pressure drop across the mill
- Constant product dispersity
- Homogeneous system-air flow

A test can be considered stable on the basis of these four criteria. An observation period of 60 minutes from the attainment of all four criteria applies here for the time factor. The constancy of the mass flow and of product dispersity is checked by means of sampling downstream of the filter.

Five machine parameters (Table 2) were shortlisted. The external influencing parameters of material type, moisture and feed particle size were examined in different tests. All the tests described in this article were performed using marble of a defined particle-size range (Table 2). Other parameters were initially excluded, in order to restrict the necessary amount of testing.

Statistical design of experiments presupposes the feasibility of all scheduled tests. Only insignificant deviation from the specified level is possible if, for process-engineering reasons, one test cannot be performed. Greater deviation would result in loss of the informational value of the plan. Some combinations of the screening schedule cannot be implemented, owing to specification of stability criteria. A high classifier



8 Effektauswertung für die Einflüsse Sichtdrehzahl und Sichtluftmenge auf den $k_{50\%}$ • Effect evaluation for the influencing factors of classifier speed and classifying air flow rate on the $k_{50\%}$

bei maximalem Durchsatz und geänderter Sichtluftmengen zu gelangen, wurden die Kennlinien anhand der entsprechenden Leerlaufdruckverluste verschoben. Die Druckabfallskennlinie in Bild 6 für 815 m³/h wurde versuchstechnisch ermittelt, die Kennlinien für 950 m³/h und 680 m³/h wurden wie oben beschrieben durch Verschiebung ermittelt. Teilpunkte wurden durch Testversuche bestätigt.

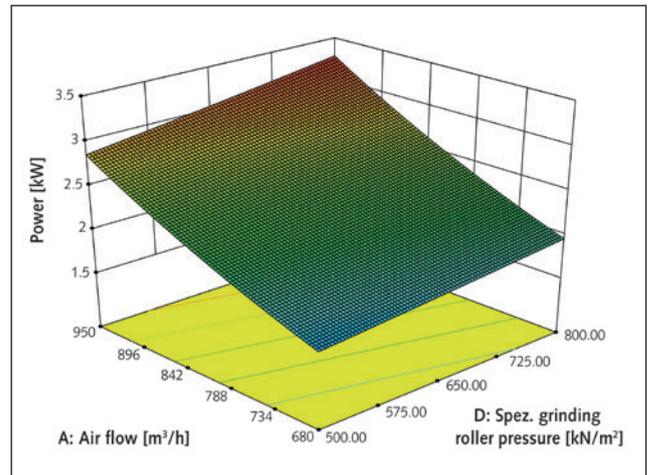
Durch die Verwendung des Druckabfalles als Regelparameter für den Aufgabemassestrom mussten nur 4 Faktoren als Einflussgrößen analysiert werden. Zur Verwendung kam ein Versuchsplan mit 8 Versuchen und 3 Centerpoints. Da dieser Plan einen ersten Schritt darstellen sollte, wurde auf Replikate verzichtet und die Vermischung von Effekten akzeptiert.

Die Versuchsplanung auf Basis der Druckabfälle hat zu keiner „unmöglichen“ Versuchskombination geführt. Alle 11 Versuche waren durchführbar und erfüllten die Anforderungen an die Stabilitätsbedingungen. Ein anschließender Abbruchstest hat gezeigt, dass die Stabilitätsbedingungen bei erhöhter Aufgabe, wie oben beschrieben, nicht oder nur mehr kurz einhaltbar waren.

Tabelle 3: Ausgesuchte Parameter und deren Einfluss
Table 3: Selected parameters and their influence

	$k_{50\%}$ [mm]	$\frac{(k_{75\%}-k_{25\%})}{k_{50\%}}$ [1]	Spez. Energie/ Spec. Energy [kWh/t]
[A] Sichtluftmenge/Classifying air flow rate	↑	↑	↑
[B] Sichterdrehzahl/Classifier speed	↑↑	↓↓	↑
[D] Walzenanpressdruck/Grinding roller pressure	○	↑	↓
[AB] Sichtluftmenge*Sichterdrehzahl/Air flow*Classifier speed	↑	○	○

*rot = negativ/grün = positiv, **↑ = signifikanter Effekt/O = nicht signifikanter Effekt
*red = negativ/green = positive, **↑ = significant effect/O = none significant effect



9 Effektauswertung für die Einflüsse Walzenanpressdruck und Sichtluftmenge auf den Gesamt-Energieverbrauch • Effect evaluation for the influencing factors of roller grinding pressure and classifying air flow on total energy consumption

speed of 4 000 rpm cannot, for example, be combined with a high feed rate of 250 kg/h. Settings of 600 rpm and 20 kg/h feed rate, on the other hand, are economically irrational.

Two options are available here to escape this dilemma. The use, on the one hand, of a D-optimal screening plan, by means of which problematical factor combinations can be merged out based on the specification of boundary conditions. A large number of tests is necessary to permit formulation of such boundary conditions. This option was therefore at least temporarily rejected. In an industrial environment, on the other hand, material feed is regulated by the pressure drop on the grinding-chamber side (air inlet to classifier inlet) (Fig. 6).

Preliminary tests showed a linearization of the pressure drop over the mill at different classifier speed settings with maximum mill throughput rates. Fig. 6 shows the linearizing curve of the pressure drop across the grinding chamber at maximum feed rate, defined classifying air volume and varied classifier speed. To reach usable regulating points for the grinding chamber pressure drop at maximum

Die Effektbewertung und Auswahl wurde auf Basis der ANOVA (analysis of variance bzw. Varianzanalyse) und graphischer Verfahren wie dem Half-Normal-Plot durchgeführt. In der ANOVA [9] muss für die Gültigkeiten eines Effektes eine Irrtumswahrscheinlichkeit von maximal (p-value) 5 % bezüglich der Alternativhypothese (Effekt vorhanden – aber nicht erkannt) eingehalten werden. Das Bestimmtheitsmaß R^2 sollte über 0,7 liegen. Die Auswertung am Beispiel der Korngröße bei 50 % Siebdurchgang ($k_{50\%}$) mittels Half-Normal-Plots ist in **Bild 7** ersichtlich. Alle Faktoren, die auf der Geraden liegen, sind nicht signifikant; jene die abseits liegen, sind potenziell signifikante Einflussfaktoren, welche mittels ANOVA weiter mittels geeigneter Software überprüft werden.

Insgesamt wurden über 20 Responses bzw. Ergebnisgrößen, wie die Produktfeinheit, die Oberfläche oder der Anlagenenergieverbrauch, untersucht und bewertet. In **Bild 8** und **Bild 9** sind zwei dieser Auswertungen anhand eines 3D-Plots der Einflüsse in Form einer Vorhersage logarithmisch aufgetragen dargestellt. Allerdings ist bei der Verwendung bzw. Interpretation solcher Plots, die zu erwartende Abweichung des Gesamtsystems von der logarithmischen Näherung zu berücksichtigen. Der Screeningplan gilt definitionsgemäß nur für ein lineares System welches aber in diesem Fall logarithmisch angepasst wurde. Die Qualität der Vorhersage steht und fällt mit der tatsächlichen Eignung der Annahme einer logarithmischen Anpassung.

Tabelle 3 fasst die wesentlichen Prozessparameter und deren Einfluss auf Produktdispersität und spez. Energieverbrauch qualitativ zusammen. Die bisherigen Ergebnisse in **Tabelle 3** unterstützen weitgehend die bereits aus der Literatur bekannten Zusammenhänge. Um weiterführende Kenntnisse über die Mühle, insbesondere über die inneren Produktumläufe zu gewinnen, werden nun analytisch die Mühlenteilebereiche untersucht.

Literatur/Literature

- [1] K. Höfl, „Untersuchungen über Zerkleinerung in Wälzmühlen.“ Bergakademie Freiberg, 1969
- [2] L. Rauer and L. Kolberg, „Beiträge zur Wälzzerkleinerung.“ Freiburger Forschungshäfte, vol. 554, 1976
- [3] A. Böhm and H. Flachberger, „Überblick über die Methoden der Mahlbarkeitsprüfung.“ BHM, vol. 6, pp. 223–232, 2006
- [4] F. Hofmann and J. Gleißenberg, „Maßgeschneiderte Lösungen für den Erfolg unserer kunden.“ Aufbereitungstechnik, vol. 9, pp. 17–24, 2009
- [5] K. Schönert and O. Junge, „Auslegung von Walzenschüsselmühlen auf der Basis von Mahlgutuntersuchungen.“ Aufbereitungstechnik, vol. 43, pp. 44–50, 2002
- [6] K. S. Bhambare, Z. Ma, and P. Lu, “CFD modeling of MPS coal mill with moisture evaporation,” Fuel Processing Technology, vol. 91, no. 5, pp. 566–571, May 2010
- [7] R. Vuthaluru, O. Kruger, M. Abhishek, V. K. Pareek, and H. B. Vuthaluru, “Investigation of wear pattern in a complex coal pulveriser using CFD modelling,” Fuel Processing Technology, vol. 87, no. 8, pp. 687–694, Aug. 2006
- [8] A. Schmeiman, „Mahlbettsimulation von Wälzmühlen.“ Universität Klausthal, 2001
- [9] D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons Ltd, 2009, p. 680

throughput and changed classifying air volumes, the characteristic curves were shifted based on the corresponding no-load pressure losses. The pressure drop curve in **Fig. 6** for $815 \text{ m}^3/\text{h}$ was determined empirically, the curves for $950 \text{ m}^3/\text{h}$ and $680 \text{ m}^3/\text{h}$ were determined by shifting the curves as described above. Sub-points were determined with tests.

With the use of the pressure drop as control parameter for the feed rate, only four factors had to be analysed as influencing variables. A test plan comprising eight tests and three centre-points was used. As this plan was intended as a first step, replications were not performed and a mixing of effects accepted.

Test planning on the basis of the pressure drops led to no “impossible” test combinations. All eleven tests could be performed and fulfilled the requirements for the stability conditions. A subsequent abort test demonstrated that, with increased feed, as described above, it was possible to meet the stability conditions either only briefly or not at all.

Effect evaluation and selection were performed on the basis of the analysis of variance (ANOVA) and graphical procedures, such as the half-normal plot. In the ANOVA analysis [9], it is necessary to adhere to an error probability of a maximum (p-value) of 5 % in respect of the alternative hypothesis (effect present – but not identified) in order to attain the validities of an effect. The coefficient of determination R^2 should be above 0.7. Evaluation based on the example of particle size at 50 % screen undersize ($k_{50\%}$) by means of the half-normal plot method is shown in **Fig. 7**. All factors located on the straight lines are not significant; all those not located on the straight lines are potentially significant influencing factors which are further validated by means of ANOVA with appropriate software.

A total of more than twenty responses, such as product fineness, surface area and system energy consumption were investigated and evaluated. Two of these evaluations are plotted logarithmically on the basis of a 3D plot of the influencing factors in the form of a prediction in **Fig. 8** and **Fig. 9**. By definition the screening plan only applies to a linear system, which, however, in this case was logarithmically adjusted. The quality of the prediction stands and falls with the actual suitability of the assumption of a logarithmic adjustment.

Table 3 qualitatively summarises the essential process parameters and their influence on product dispersity and specific energy consumption. The results obtained up to now and shown in **Table 3** largely support the correlations already known from the relevant literature. To obtain further knowledge of the mill and of internal product circuits, in particular, subsections of the mill are now studied analytically.