



Sonderdruck aus
Reprint from

58. Volume (2005) · No. 11 · pp. 36–47

Zement Kalk Gips Cement Lime Gypsum

**Mahlung fester Brennstoffe mit
MPS-Walzenschüsselmühlen**

**Grinding of solid fuels using
MPS vertical roller mills**

Burkhard Kraft, York Reichardt
Gebr. Pfeiffer AG, Kaiserslautern/Germany

Mahlung fester Brennstoffe mit MPS-Walzenschüsselmühlen

Zusammenfassung: Vertikalmühlen haben sich in den letzten Jahren bei der Errichtung von Neuanlagen in allen Bereichen der Brennstoffherstellung als effektives Zerkleinerungsaggregat zur Mahlung, Trocknung und Sichtung fester Brennstoffe gegenüber Kugelmühlen durchgesetzt. Um den wachsenden Marktanforderungen nach Flexibilität hinsichtlich Mahltrocknung verschiedenster Brennstoffqualitäten gerecht zu werden, erfolgte bei der Gebr. Pfeiffer AG eine konsequente Weiterentwicklung der MPS-Kohlemühlen nach verfahrenstechnischen und konstruktiven Gesichtspunkten. Im folgenden Artikel werden Konstruktion und Auslegung der MPS-Kohlemühlen erläutert. Außerdem sind Betriebsergebnisse von Kohle-Mahlanlagen aus der Zement-, Kraftwerks- und Stahlindustrie dargestellt.

Grinding of solid fuels using MPS vertical roller mills

Summary: In recent years, vertical roller mills have become established as an efficient and effective comminution system for grinding, drying and separation of solid fuels in the construction of new plants for all sectors of fuel preparation, gaining ground over ball mills. Against this background, Gebr. Pfeiffer AG have pursued consistent development and refinement of MPS coal mills on process-engineering and design criteria, with orientation around the growing market demands for flexibility in combined grinding and drying of the most diverse range of fuel grades. The following article describes the layout and design of MPS coal mills. Coal grinding plant operating results from the cement, power generation and steel industries are also examined.

Broyage de combustibles solides par broyeurs verticaux MPS

Résumé: Par rapport aux broyeurs à boulets, les broyeurs verticaux se sont imposés au cours des dernières années pour les installations nouvelles dans tous les domaines de production de combustibles, comme unités de fragmentation efficaces de broyage, de séchage et de classement dimensionnel des combustibles solides. Pour répondre aux exigences de flexibilité croissantes du marché en matière de broyage-séchage des diverses qualités de combustible, la société Gebr. Pfeiffer AG a poursuivi de manière conséquente le développement des broyeurs à charbon MPS du point de vue technologique et construction. La construction et la conception des broyeurs à charbon MPS sont exposés dans cet article. Y sont, d'autre part aussi, présentés les résultats d'exploitation d'ateliers de broyage de charbon de l'industrie du ciment, de centrales thermiques et de l'industrie de l'acier.

Molienda de combustibles sólidos con molinos de rodillos MPS

Resumen: Los molinos verticales se han impuesto durante los últimos años frente a los molinos de bolas en la construcción de nuevas plantas en todas las operaciones relativas a la preparación de combustibles sólidos. Son éstos efectivos equipos de trituración en la molienda, secado y separación. La compañía Gebr. Pfeiffer AG impulsó el avance consecuente de los molinos de carbón MPS en lo referente al proceso y la construcción como respuesta a los requerimientos del mercado en lo relacionado con la flexibilidad en el secado y la molienda de muy diversas calidades de combustibles. El siguiente artículo describe aspectos constructivos y de diseño de los molinos MPS. Además se presentan experiencias en la operación de instalaciones de molienda de carbón en la industria del cemento, centrales eléctricas e industria del acero.

1 Einleitung

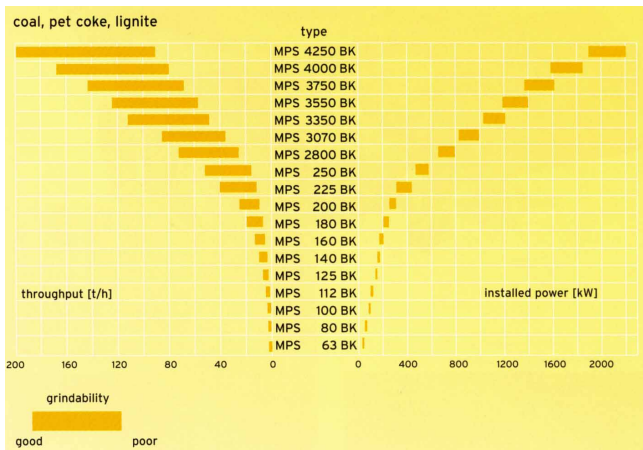
Die Gebr. Pfeiffer AG hat gemeinsam mit ihrem Lizenznehmer Babcock-Hitachi Europe GmbH weltweit über 2000 MPS-Walzenschüsselmühlen für die Vermahlung verschiedenster Brennstoffe verkauft [1–3]. Einsatzgebiete sind direkte und indirekte Einblas- bzw. Zentralmahlanlagen in der Zement-, Kraftwerks- und Stahlindustrie. In Abhängigkeit vom Brennstoff können Durchsatzraten von 5–200 t/h bei Zielfeinheiten zwischen 1 % R 0,063 mm und 25 % R 0,090 mm realisiert werden (**Bild 1**).

Wesentliche Vorteile dieser Mahlanlagen sind geringer spezifischer Arbeitsbedarf, hohe Trocknungskapazität, gutes Teillastverhalten mit einem Regelbereich zwischen 30–100 %, hohe

1 Introduction

Around the world, Gebr. Pfeiffer AG, jointly with licensee Babcock-Hitachi Europe GmbH, has sold more than 2000 MPS vertical roller mills for grinding of the most diverse range of fuels [1–3]. The relevant applications are direct and indirect injectiontype grinding facilities and central grinding plants in the cement, power generation and steel industries. Throughput rates of 5 to 200 t/h can be achieved, depending on the fuel involved, with residue on finenesses ranging between 1 % R 0.063 mm and 25 % R 0.090 mm (**Fig. 1**).

Essential benefits offered by such grinding plants include lower specific energy demand, high drying capacities, good part-load performance, with a control range between 30 and 100 %,



1 Baureihe MPS-Kohlemühlen
1 MPS series coal grinding mills

Verfügbarkeit, einfache Regelung sowie Flexibilität für wechselnde Brennstoffqualitäten in einer sehr kompakten Bauform. Vertikalmühlen für die Kohlemahlung in der Zementindustrie besitzen mittlerweile einen Marktanteil von 86 % [4].

Aus Wirtschaftlichkeitsgründen, d. h. vor allem durch Verteuerung der fossilen Brennstoffe und allgemeinen Kostendruck, erfolgte in den letzten Jahren die zunehmende Nutzung von Sekundärbrennstoffen. Neben Anthrazit, Stein- und Braunkohlen werden von den Betreibern in steigendem Maße Petrolkoks und getrockneter Klärschlamm verwendet, die erhebliche Unterschiede hinsichtlich Mahlbarkeit, Feuchte und Produktfeinheit aufweisen. Die Kundenvorgabe nach gleichzeitigem Einsatz verschiedenster Brennstoffe mit wechselnder Zusammensetzung in einer Mahlanlage stellt höchste Anforderungen an die konstruktive und verfahrenstechnische Dimensionierung der Kohlemühlen.

2 Konstruktion

Die Gebr. Pfeiffer AG liefert neben MPS-Kohlemühlen als Einzelmaschinen auch komplette Kohle-Mahl- und Trocknungsanlagen. Sowohl Mühle als auch Gesamtanlage können im Druck- und Unterdruckbereich sowie im Luft- oder Inertgasbetrieb eingesetzt werden. Die Anlagenschaltungen umfassen Zentralmahlanlagen mit Zwischenlagerung des gemahlten Kohlenstaubes in Silos (v. a. für Befüllung von Drehrohröfen in Zementwerken und Hochöfen in Stahlwerken) und Einblasanlagen mit direkter Einblasung in das Feuerungssystem (v. a. für Kraftwerke).

Bestimmend für die Konstruktion aller Anlagenkomponenten ist das Entzündungs- und Explosionsverhalten der Rohkohlen und Kohlenstäube. Als Zündquellen sind hauptsächlich Schwelbrände durch Kohlenstaubablagerungen, Funken aus Heißgas-erzeugern und elektrischer Entladung, Heißgasstrahlen und heißgelaufene Maschinenteile zu nennen. Die Hauptgefährdung tritt in der Regel bei An- und Abfahrvorgängen sowie instabilen Betriebszuständen auf. Zum Schutz der gesamten Kohlemahlanlage sind aktive und passive Sicherheitsmaßnahmen notwendig. Aktive Maßnahmen sind der Betrieb in sauerstoff-reduzierter Atmosphäre und die Vermeidung von Zündquellen. Sicherste Betriebsweise ist die Begrenzung des Sauerstoffgehaltes in allen Anlagenteilen auf < 12 % durch Nutzung sauer-

high availability, simple control and the flexibility necessary to accommodate fluctuating fuel qualities, all in an extremely compact unit. Vertical mills for grinding of coal in the cement industry have now achieved an 86 % market share [4].

For reasons of cost efficiency, i. e., particularly as a result of the increasing costs of fossil fuels and cost pressure in general, the use of secondary fuels has accelerated in recent years. In addition to anthracite, hard coals, and lignites, operators are now increasingly using petroleum coke and dried treatment plant sludge – fuels which exhibit significant differences in terms of grindability, moisture and product fineness. Customers' requirements for simultaneous use of the most diverse range of fuels with fluctuating compositions in a single grinding plant make maximum demands on the design and process-engineering dimensioning of coal grinding mills.

2 Design

In addition to stand-alone MPS coal grinding mills, Gebr. Pfeiffer AG also supplies complete coal grinding and drying installations. Both the mill and the overall system can be operated under pressure or partial vacuum, and under air or inert gas atmospheres. System configurations include central grinding plants with temporary storage of the pulverized coal product in silos (for firing, inter alia, of rotary kilns in cement plants, and of blast furnaces in iron and steel plants), and also installations featuring direct injection into the combustion system (also see power generating plants).

The definitive factor in the design of all system components is the ignition and explosion behaviour of raw and pulverized coals. Smouldering fires resulting from accumulations of coal dust, sparks from hot-gas generators and electrical discharge, currents of hot gas and hot machine components may be mentioned as potential ignition sources. The greatest hazard generally occurs during startup and shutdown phases, and during periods of unstable operation. Both active and passive safety precautions are necessary to protect the entire coal grinding system. Active provisions include operation under an oxygen-reduced atmosphere, and the avoidance of ignition sources. The safest mode of operation includes limitation of oxygen content in all system sections to < 12 % using low-oxygen hot gases (e. g. waste-gases from rotary kilns) and minimization of all false-air sources via appropriate design measures. Passive precautions take the form of a pressure-proof design incorporating explosion vents and extinguisher systems involving the injection of nitrogen or carbon dioxide.

The basic health and safety requirements necessary for the avoidance of hazards for persons and machinery are fulfilled in accordance with Directive 94/9/EC of the European Parliament and the Council of the European Union, dated March 23, 1994 (ATEX).

2.1 Mill

The Pfeiffer MPS vertical roller mill consists essentially of a motor and planetary bevel gear drive train, the grinding bowl, three fixed grinding rollers, including a pressure frame, a nozzle ring, the mill housing and the separator (Fig. 2).

The design principle of the separator, nozzle ring and housing remains the same throughout all machine series. Size varies as

stoffarmer Heißgase (z.B. Drehofenabgase) sowie die Minimierung aller Falschluffquellen durch entsprechende konstruktive Maßnahmen. Die passiven Vorkehrungen beinhalten eine druckstoßfeste Ausführung mit Entlastungsflächen und Löscheinrichtungen mit Stickstoff- oder Kohlenstoffdioxid-Eindüsung.

Die grundlegenden Anforderungen des Sicherheits- und Gesundheitsschutzes zur Vermeidung von Gefährdungen der Menschen und Maschinen werden gemäß Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlamentes und Rates vom 23.03.1994 (ATEX) erfüllt.

2.1 Mühle

Die Pfeiffer MPS-Walzenschüsselmühle besteht im Wesentlichen aus Antrieb mit Motor und Kegelrad-Planetengetriebe, Mahlschüssel, drei ortsfesten Mahlwalzen inklusive Druckrahmen, Düsenring, Mühlengehäuse und Sichter (**Bild 2**).

Das Konstruktionsprinzip von Sichter, Düsenring und Gehäuse bleibt über alle Baureihen gleich. Die Größe muss jedoch in Abhängigkeit vom Luftvolumenstrom, vor allem beim Einsatz feuchter Braunkohlen angepasst werden. Der Sichter ist als trennscharfer SLS-Hochleistungssichter der dritten Generation ausgeführt [5]. Dadurch werden hohe Produktfeinheiten und definierte Korngrößenverteilungen des Kohlenstaubes erreicht, die zur Verbesserung des Ausbrandverhaltens sowie Verringerung der NO_x -Emissionen bei der nachgeschalteten Verbrennung führen. Dieser Sichter wird prinzipiell für alle Brennstoffarten eingesetzt. Ein Stirnrad- bzw. Kegelstirnradgetriebe in Verbindung mit Elektromotor und Frequenzumrichter ermöglicht die stufenlose Drehzahlregelung des Sichtertrades und damit Feinheitseinstellung des Produktes.

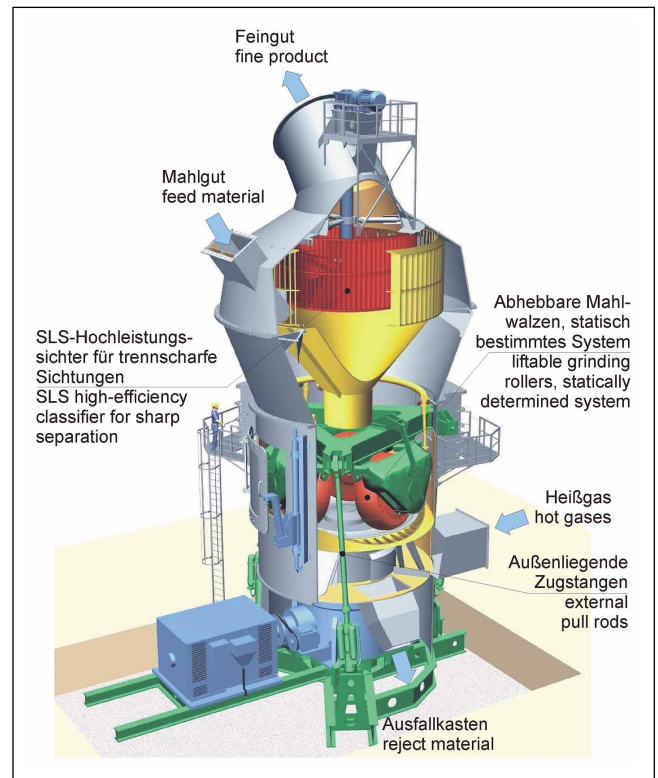
Das hydropneumatische Spannsystem erlaubt eine stufenlose Verstellung der Walzenkraft zur Anpassung verschiedenster Betriebszustände. In Kombination mit einer Luftmengenveränderung ergibt sich ein Regelbereich der Mahlanlage von 30–100 %. Diese Teillastfahrweise kann durch Lastunterschiede bei Einblasmühen in Kraftwerken, Vermahlung wechselnder Brennstoffqualitäten bzw. bessere Mahlbarkeit als in der Auslegung berücksichtigt, notwendig sein.

Signifikantester konstruktiver Unterschied der MPS-Mühle für feste Brennstoffe im Vergleich zur Nicht-Kohlemahlung ist die Druckstoßfestigkeit. Vor Erreichen des Auslegungsdruckes bei einer Explosion kann in Kombination mit sich öffnenden Druckentlastungseinrichtungen eine Verformung, aber keine Zerstörung der Maschine erfolgen. Druckstoßfest ausgelegt sind neben Mühlen- und Sichtergehäuse auch das Aufgabeaggregat sowie die Kompensatoren.

Im Mahl- und Sichterraum sind zur Vermeidung von Kohlenstaubablagerungen als Quelle für Selbstentzündungen nur senkrechte oder geneigte Flächen vorhanden. Zusätzlich an der sich drehenden Mahlschüssel befestigte Räumler verhindern Ablagerungen von Ausfallgut und Fremdkörpern im Heißgasraum unterhalb des Düsenringes. Die Aufnahme erfolgt durch einen luftdicht mit der Mühle verbundenen Ausfallkasten.

2.2 Gesamtanlage

Das Verfahrensschema einer nach EG-Richtlinie 94/9/EG (ATEX) mit allen notwendigen Sicherheitseinrichtungen aus-



2 MPS-Kohlemühle mit SLS-Hochleistungssichter
2 MPS coal grinding mill with SLS high-efficiency separator

a function of volumetric air flow, particularly where moist lignites are processed, however. The separator takes the form of a third generation SLS high-efficiency separator [5]. This permits achievement of high product finenesses and defined pulverized-coal particle-size distributions, which improve burnout performance and reduce NO_x emissions in the downstream combustion system. This separator is used, in principle, for all fuel types. A spur wheel or straight bevel gearing system combined with an electric motor and frequency converter permits stepless control of separator wheel speed, and thus adjustment of product fineness.

The hydropneumatic clamp-down system allows stepless adjustment of roller force for adaptation to the most diverse spectrum of operating states. Combination with adjustable air flow produces a grinding plant control range of 30 to 100 %. Such part-load operation may become necessary as a result of variations in load in injection-type grinding mills installed in power generating plants, crushing of fluctuating fuel qualities and, indeed, grindability superior to that envisaged in the design.

The most significant design difference in the MPS mill for solid fuels compared to models intended for grinding of non-coal products is its pressure-shock safety. In case of explosion, this design, in combination with pressure-relief systems which open in an emergency, permit deformation – but not destruction – of the machine before design pressure is reached. Not only the mill housing and separator housing, but also the feed unit and expansion joints are designed pressure-shock safe.

The grinding and separating chambers feature only vertical or sloping surfaces, in order to avoid accumulations of coal dust as a source of spontaneous combustion problems. In addition,

geführten Mahltrocknungsanlage für Broceni JSC, Lettland zeigt **Bild 3**. Die garantierte Leistung der MPS 160 BK beträgt 12 t/h Steinkohle.

Aus dem Rohkohlesilo (A) wird das Mühlenaufgabematerial über einen drehzahlgeregelten Trogkettenförderer (B), ausgerüstet mit einem Notentleerungsschieber, dosiert abgezogen. Nachgeschaltet ist eine druckstoßfeste und flammendurchschlagsichere Zellenradschleuse (C). Um Anbackungen und Materialablagerungen (Glimmnester) zu verhindern, ist diese als Zwangsrüumschleuse konstruiert.

Nach Trocknung, Zerkleinerung und Klassierung in der Mühle (D) wird das aus dem Sichter (E) ausgetragene Fertigprodukt in einem Schlauchfilter (F) abgeschieden, über Schneckenförderer und Zellenradschleuse aus dem Filter abgezogen und pneumatisch zum Kohlenstaubsilo (G) transportiert. Filter und Feinstaubsilos sind druckstoßfest ausgeführt. Dem Schlauchfilter ist das Mühlengebläse (H) nachgeschaltet. Die Einstellung des erforderlichen Gasvolumenstromes erfolgt durch Drehzahlveränderung des Gebläsemotors mit Hilfe eines Frequenzumrichters. Der Unterdruck vor Mühle wird mittels Umluftklappe (I) und Kaminklappe (J) geregelt. Zum Ausgleich temperaturbedingter Längenänderungen der Rohrleitungen sind Kompensatoren eingebaut. Die Gewebe der Kompensatoren sind ebenfalls druckstoßfest.

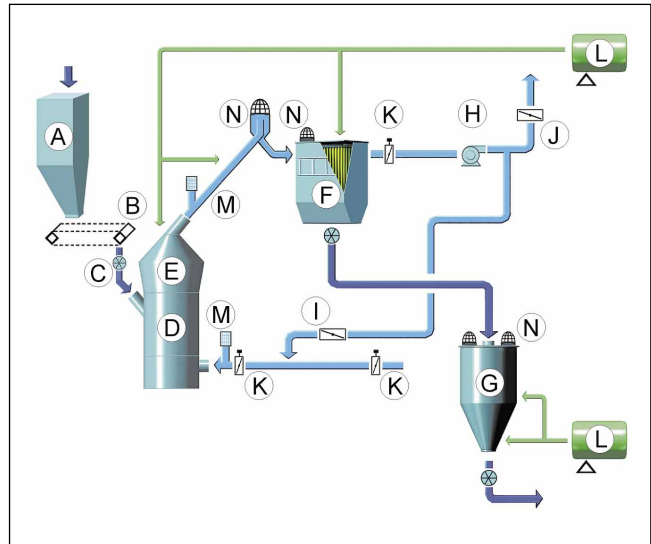
Zur Überwachung der Mahlanlage erfolgt hinter dem Filter eine CO-/O₂-/Staubmessung sowie im Feinkohlesilo eine CO-/Temperaturerfassung. Die aufgenommenen Meßwerte sind in die elektrische Verriegelung und Steuerung integriert. Bei Erreichen der voreingestellten Grenzwerte für Kohlenmonoxid- und Sauerstoffkonzentration wird zunächst alarmiert, das Überschreiten führt zum Auslösen der entsprechenden Sicherheitsaggregate wie Schnellschlussklappen (K) in den Gaswegen vor/nach Mühle und CO₂-Inertisierung (L) von Mühle, Filter und Silo. Damit ist eine zuverlässige Verhütung von Staubexplosionen und Erstickung von Schmel- bzw. Glimmbränden möglich. Die Staubkonzentration nach Filter gibt Aufschluss über den Zustand der Filterschläuche. Defekte führen zu Anstieg und Bildung zündfähiger Gemische in der Rohrleitung, so dass die Mühle abgestellt werden muss.

Falls trotzdem eine Explosion in der Mahlanlage auftritt, reagieren vor Mühle und nach Sichter Druckentlastungseinheiten mit Berstscheibe (M). Zusätzlich werden Druckentlastungsklappen (N) an Filter, Feingutsilo und Explosionsschlot der Rohrleitung ausgelöst.

3 Auslegung

3.1 MPS-Testmühle

Die sicherste und umfassendste Grundlage für die Auslegung von MPS-Kohlemühlen sind Technikums-Mahlversuche mit einem projektrelevanten Brennstoff. Dazu dient eine halbtechnische Pilotanlage MPS 40 B mit vergleichbaren verfahrenstechnischen und konstruktiven Parametern wie die Betriebsmühle [6]. Damit ist eine zuverlässige Übertragbarkeit auf die großtechnische Ausführung gewährleistet. In Abhängigkeit von den materialspezifischen Eigenschaften der verschiedenen Brennstoffsorten wie Mahlbarkeit, Feuchte und Feinheit erfolgt eine Anpassung der technologischen Bedingungen der Testmühle. Als Ergebnis werden Durchsatzrate, Mühlenarbeitsbe-



3 Verfahrensschema Kohlemahlanlage Broceni JSC/Lettland
3 Process diagram for the Broceni JSC/Latvia, coal grinding installation

scrapers fixed to the rotating grinding bowl prevent accumulation of oversize material and foreign bodies in the hot-gas chamber beneath the nozzle ring. Accommodation is accomplished by means of oversize catch boxes which are connected airtight to the mill.

2.2 Overall grinding plant

Figure 3 shows the process diagram for a grinding and drying system equipped in accordance with EC Directive 94/9/EC (ATEX) with all the necessary safety devices and systems, was supplied to Broceni JSC/Latvia. The MPS 160 BK has a guaranteed throughput of 12 t/h hard coal.

From the raw coal silo (A), the mill feed material is metered out via a speed-regulated armoured trough-type conveyor (B) equipped with an emergency discharge valve. A pressure-shock and flameproof cellular wheel sluice (C) is located downstream. This takes the form of a forced clearance sluice, in order to avoid material caking and deposition (danger of burning embers).

After drying, comminution and classifying in the mill (D), the finished product extracted from the separator (E) is removed in a bag filter (F), withdrawn from the filter via screw conveyers and a cellular wheel sluice, and conveyed pneumatically to the pulverized coal silo (G). The filter and fine coal silo are of pressure-shock-safe type. The mill blower (H) is installed downstream of the bag filter. Adjustment of the necessary volumetric flow of gas is accomplished by means of adjustment of blower motor speed using a frequency converter. The “underpressure” (partial vacuum) upstream the mill is regulated by means of a recirculating-air damper (I) and a stack damper (J). Expansion joints are installed to absorb temperature-induced expansion and contraction in the piping. The expansion joint fabric elements are also pressure-shock safe.

A CO-/O₂-/dust measurement is taken downstream the filter for monitoring of the grinding plant, while CO and temperature are monitored in the fine coal silo. The measured data acquired is fed into the electrical control and interlock system. A preliminary alarm is given when preset limits for carbon monoxide and oxygen concentration are reached, while ex-

darf und Verschleiß der Mahlteile bestimmt. **Tabelle 1** zeigt, dass sowohl zwischen den einzelnen Brennstoffqualitäten als auch innerhalb eines Brennstoffes wesentliche Unterschiede in den Materialeigenschaften und spezifischen Mühlenleistungsdaten bestehen.

Anschließend werden analog zum Vorgehen im Nicht-Kohlebereich diese Kenngrößen inklusive Schüsseldrehzahl, spezifische Walzenpressung und Düsenringluftmenge direkt von der Testmühle auf die Betriebsanlage übertragen.

Tabelle 1: Testwerte Pilotanlage MPS 40 B mit verschiedenen Brennstoffen

Table 1: Test data, MPS 40 B pilot plant, for various fuels

		Anthrazit <i>Anthracite</i>	Steinkohle <i>Pit coal</i>	Braunkohle <i>Lignite</i>	Petrolkoks <i>Petcoke</i>
Hardgrove-Index <i>Hardgrove-Index</i>	–	26–63	39–74	31–95	29–82
Asche (wf) <i>Ash (wf)</i>	%	2–16	5–46	13–28	0,5–5
Flüchtige Anteile (waf) <i>Volatiles (waf)</i>	%	0,5–12	21–52	36–57	0,5–14
Rohkohlefeuchte <i>Raw coal moisture</i>	%	3–10	2–10	25–45	3–10
Fertiggutfeinheit <i>Fineness finished product</i>	%R 90 m	2–5	10–15	10–30	0,5–5
Durchsatz <i>Throughput</i>	kg/h	140–310	230–570	140–310	150–530
Spez. Arbeitsbedarf Mühle <i>Spec. power consumption mill</i>	kWh/t	10–36	6–12	8–19	7 - 17
Spez. Verschleiß (Ni-Hard IV) <i>Spec. wear (Ni-Hard IV)</i>	g/t	25–86	1–53	10–167	1–15

Während die Auslegung der Mahlanlagen für Anthrazit, Steinkohle und Petrolkoks in der Regel durch die Zerkleinerung bestimmt ist, sind Braunkohlen aufgrund hoher Aufgabefeuchten bis maximal 45 % häufig trockenungstechnisch dominiert. Die Erhöhung der Luftmenge bzw. Temperatur vor der Mühle führt oft zu einer deutlichen Reduzierung des spezifischen Arbeitsbedarfes am Mühlenmotor. Folgerichtig werden in den Auslegungsversuchen der Luftvolumenstrom sowie unter Beachtung der erhöhten Zündfähigkeit das Temperaturniveau am Mühleneintritt angepasst. Diese Tatsache besitzt unmittelbaren Einfluss auf die Dimensionierung des Mühlengehäuses, Düsenringes und Sichters.

Im Einzelfall kann als Ergebnis der Testmahlungen auch festgestellt werden, dass die Vertikalmühle nicht das wirtschaftlich geeignete Zerkleinerungsaggregat ist. Der zunehmende Kostendruck auf die Betreiber führt zur verstärkten Nutzung minderwertiger Kohlen mit erheblichen Verunreinigungen in Form von Pyriten und Quarzen. Mit den daraus resultierenden hohen Verschleißwerten an den Mahlteilen von bis zu 200 g/t (Ni-hard IV) wäre trotz besonderer Verschleißschutzmaßnahmen wie Auftragsschweißung kein wirtschaftlicher Betrieb möglich.

Ein weiterer Sonderfall, der den Einsatz einer Walzenschüssel-mühle ausschließt, ist die Vermahlung von Petrolkoks mit feinsten Aufgabekörnung. Das betrifft vor allem Fluid Coke mit einem Siebrückstand von teilweise < 5 Masseprozent bei 1 mm. Die feine Mühlenaufgabe in Kombination mit geringer Auf-

ceeding of these results in tripping of the corresponding safety systems, such as the quickclose dampers (K) in the gas paths upstream and downstream the mill, and CO₂ inertization (L) of the mill, filter and silo. This permits reliable prevention of dust explosions and the smothering of smouldering fires and embers. The dust concentration downstream the filter supplies information on the condition of the filter bags. Faults result in an increase in dust content and the formation of ignitable mixtures in the pipeline, signifying that the mill must be stopped.

If an explosion should nonetheless occur in the grinding plant, pressurerelease units with rupture disks (M) react upstream the mill and downstream the separator. In addition, pressure-relief dampers (N) on the filter, fine-product silo and explosion stack in the pipeline are also tripped.

3 Rating

3.1 MPS test mill

The most dependable and comprehensive basis for layout and design of MPS coal grinding mills is provided by pilot-scale grinding tests of a project-relevant fuel. A semi-commercial-scale MPS 40 B pilot plant with process-engineering and design parameters comparable to those of the operational mill [6] was used for this purpose. This assures reliable transferability of results to the commercial-scale version. The test mill's technological conditions are adjusted as a function of the material-specific properties of the various fuel types, such as grindability, moisture content and fineness. The results are used to define throughput rate, mill energy requirement and grinding component wear. **Table 1** illustrates that significant differences exist in material properties and specific mill performance data, both between the individual fuel grades and within a single fuel. These characteristics variables, including bowl speed, specific roller pressure and nozzle-ring air flow are then, analogously to the procedure in the non-coal sector, transferred directly from the test mill to the operational plant.

The layout and design of grinding systems for anthracite, hard coal and petroleum coke are generally determined by the comminution function, whereas the drying technology tends to dominate in the case of lignites, as a result of their high feed moisture contents, of up to 45 %. An increase in air flow or temperature upstream of the mill in many cases results in a significant reduction in the mill motor's specific energy demand. Logically enough, volumetric air flow and – with due attention to the resultant enhanced combustibility – temperature level at the mill inlet are adjusted in the design and layout tests. This fact has an immediate influence on the dimensioning of the mill housing, nozzle ring and separator.

In individual cases, test grinding may also ascertain that the vertical roller mill is not the most economically suitable comminution unit. Increasing cost-pressure exerted on operators is resulting in accelerating utilization of inferior coals containing significant levels of impurities in the form of pyrites and quartzes. Given the high resultant wear figures for the grinding components, of up to 200 g/t (Ni-hard IV), cost-efficient operation would not be possible, despite anti-wear provisions such as hard-face welding.

A further special case which excludes the use of a vertical roller mill is the grinding of petroleum coke of exceptionally



4 Kohlemühle MPS 250 BK bei La Cemento Nacional/Ecuador
4 MPS 250 BK coal grinding mill at La Cemento Nacional/Ecuador

gabefeuchte und hoher Fertiggutfeinheit führt zu instabilem Mühlenbetrieb.

3.2 Hardgrove-Verfahren

Eine Alternative zu den Auslegungsversuchen mit der MPS-Testmühle stellt das bekannte Mahlbarkeitsprüfverfahren nach Hardgrove dar [7]. Ausgehend von einer empirisch ermittelten Grundmahlleistung für eine Standardkohle mit Hardgrove-index HGI = 80, Fertiggutfeinheit R 0,090 mm = 16 % und Rohkohlefeuchte $\varphi = 4\%$ erfolgt die Modifikation der Mahlleistung über Korrekturfaktoren für Mahlbarkeit, Feinheit und Feuchte der getesteten Kohle. Der daraus errechnete Versuchsmühlendurchsatz wird analog zum Testwert der Pilotanlage MPS 40 B bei der Dimensionierung der Betriebsmühle berücksichtigt.

Die Mahlbarkeitsprüfung nach Hardgrove besitzt jedoch im Vergleich zum Auslegungsversuch mit der Technikumsanlage einige Nachteile. Wesentliches Defizit ist das Fehlen von Aussagen zum spezifischen Mahlteilverschleiß, so dass die Standzeitvorhersagen für die Betriebsmühle nur auf Annahmen beruhen. Ein weiteres Problem besteht in der geringen Probenmenge, die höchste Anforderungen an die Probenahme durch den Kunden zur Bereitstellung eines repräsentativen Musters stellt.

fine feed particle size. This applies, in particular, to fluid coke, with a sieve residue of $< 5\%$ by mass at 1 mm in some cases. The fine mill feed, combined with low feed moisture content and high finished-product fineness results in unstable mill operation.

3.2 Hardgrove procedure

The well-known Hardgrove grindability test procedure provides an alternative to design and layout experiments using the MPS test mill [7]. Starting from an empirically determined basic grinding rating for a standard coal of Hardgrove Index HGI = 80, finished-product fineness R 0.090 mm = 16 % and raw coal moisture $\varphi = 4\%$, grinding rating is modified by means of correction factors for grindability, fineness and moisture of the coal being tested. The resultant test mill throughput is taken into account analogously to the test value for the MPS 40 B pilot plant in dimensioning of the full-scale mill.

Hardgrove-based grindability testing has a number of disadvantages compared to layout and design experimentation using the pilot-scale plant. Its principal deficit is the lack of information on specific grinding-component wear, with the result that service-life predictions for the full-scale mill can be based only on assumptions. A further problem is found in the small sample quantity, which makes maximum demands on sampling performed by the client, in order to provide a representative specimen.

Despite the drawbacks discussed above, Hardgrove-based layout and design has now become a reliable procedure for dimensioning of MPS mills. Gebr. Pfeiffer AG's decades of experience in the field of coal grinding has produced a dependable correlation between Hardgrove factors and mills throughput. This method is used both for hard coals and for petroleum coke. In the case of lignites, grinding tests in the MPS test mill remain indispensable for precise design.

In both design procedures – the MPS grinding test and Hardgrove testing – the relevant mill performance data determined is normally transferred 1:1, with a safety deduction of 7.5 % in the design and guarantee yield.

4 Operation

4.1 Hard coal

Hard coals are notable for the considerable variations in their ash and volatiles contents, which have a direct influence on grindability and wear. With moisture contents of between 2 and 10 % in such coals, the process is generally dominated by comminution, and less by drying. The finished-product fineness specifications are 10 to 15 % R 0.090 mm.

Such a grinding installation, comprising an MPS 250 BK and SLS 1800 BK high-efficiency separator, has been commissioned at the La Cemento Nacional cement plant in Ecuador (**Fig. 4**). The system, taking the form of a central grinding installation with imported inert gases (rotary-kiln waste-gases) has been in successful operation since 2002. The mill drive train power rating is 510 kW. With a coal grindability of 50 HGI, 50 t/h pulverized coal of 11 % R 0.090 mm is produced. Following conversion of the fuel to petroleum coke with a Hardgrove Index of 55 HGI, the mill now has a finished-product output rate of 40 t/h at approx. 7 % R 0.090 mm.

Trotz der genannten Nachteile ist die Hardgrove-Auslegung mittlerweile ein zuverlässiges Verfahren bei der Dimensionierung von MPS-Mühlen. Aufgrund jahrzehntelanger Erfahrungen der Gebr. Pfeiffer AG im Bereich Kohlemahlung existiert eine gesicherte Korrelation zwischen Hardgrovefaktoren und Mühlenlebensdauer. Anwendung findet diese Methode sowohl für Steinkohlen als auch Petrolkoks. Bei Braunkohlen sind Mahlversuche in der MPS-Testmühle für eine exakte Auslegung nach wie vor unerlässlich.

Einheitlich für beide Auslegungsverfahren – MPS-Mahltest und Hardgrove-Prüfung – werden die ermittelten relevanten Mühlenleistungsdaten in der Auslegung und Garantieabgabe normalerweise 1:1 mit einem Sicherheitsabschlag von 7,5 % übertragen.

4 Betrieb

4.1 Steinkohle

Steinkohlen sind gekennzeichnet durch erhebliche Unterschiede im Gehalt an Asche und flüchtigen Bestandteilen, die sich unmittelbar auf Mahlbarkeit und Verschleiß auswirken. Bei Feuchten zwischen 2 und 10 % ist der Prozess in der Regel durch die Zerkleinerung und weniger durch die Trocknung bestimmt. Die geforderten Fertiggutfeinheiten betragen 10–15 % R 0,090 mm.

Die Inbetriebnahme einer derartigen Mahlanlage mit MPS 250 BK und Hochleistungssichter SLS 1800 BK erfolgte im Zementwerk La Cemento Nacional in Ecuador (**Bild 4**). Die als Zentralmahlanlage mit Fremd-Inertgasen (Drehofenabgase) ausgeführte Anlage ist seit 2002 erfolgreich in Betrieb. Die installierte Leistung des Mühlenantriebes beträgt 510 kW. Bei einer Mahlbarkeit von 50 HGI werden 50 t/h Kohlenstaub mit 11 % R 0,090 mm erzeugt. Nach Umstellung des Brennstoffes auf Petrolkoks mit einem Hardgroveindex von 55 HGI besitzt die Mühle mittlerweile eine Fertiggutrate von 40 t/h bei ca. 7 % R 0,090 mm.

Die bisher größte Pfeiffer-Kohlemühle im Stahlwerksbereich ist die MPS 2900 K mit einem äußeren Mahlschüsseldurchmesser von 3650 mm. Eine bzw. zwei Mühlen dieses Typs wurden 1996 für SIDEX/Rumänien und CSN/Brasilien als Kernstücke von inertisierten Zentralmahlanlagen mit Filterabscheidung und Silo zur Kohlenstaubversorgung von Hochöfen geliefert. Die Anlagen können wahlweise mit Fremd-Inertgasen (Cowper- bzw. Gichtgase aus Verhüttung) oder Eigeninertisierung durch Umluftfahrweise in Kombination mit Wassereindüsung gefahren werden. Die Durchsatzleistung beträgt je Mühle 75 t/h bei einer Mahlfeinheit von 20 % R 0,090 mm. Durch automatische Anpassung von Luftvolumenstrom und Walzenkraft mittels Prozessleitsystem werden problemlos 45 % Teillast realisiert. Die An- und Abfahrvorgänge erfolgen mit angehobenen Mahlwalzen.

MPS-Walzenschüsselmühlen für Kraftwerksanlagen werden von der Babcock-Hitachi Europe GmbH in Lizenz der Gebr. Pfeiffer AG gefertigt [2]. Bis Juni 2007 ist bei der Mid America Energy Company/USA die Errichtung eines neuen 790 MW-Kraftwerkblockes mit insgesamt sechs Mühlen des Typs MPS 255 (äußerer Mahlbahndurchmesser 3200 mm) vorgesehen. Bei einer garantierten Durchsatzrate von 109 t/h für Steinkohle mit 50 HGI wird jede Mühle sechs Brenner des Kessels mit

The largest Pfeiffer coal grinding mill constructed up to now for the iron and steel sector is the MPS 2900 K, with an outer grinding bowl diameter of 3650 mm. One and two, respectively, mills of this type were supplied in 1996 to SIDEX/Romania and CSN/Brazil, to form the centerpieces of inertized central grinding plants with filter separation and silos for supply of pulverized coal to blast furnaces. These installations can be operated optionally either with imported inert gases (hot blast stove and blast furnace top gases from metallurgical production) or with intrinsic inertization by means of air recirculation combined with injection of water. Throughput is 75 t/h per mill, with a fineness of grind of 20 % R 0.090 mm. Automatic adjustment of volumetric air flow and roller force by the process control system permits troublefree achievement of 45 % part-load operation. Start-up and shut-down sequences are run with the grinding rollers raised.

MPS vertical roller mills for power generating plants are manufactured by Babcock-Hitachi Europe GmbH under license from Gebr. Pfeiffer AG [2]. Construction of a new 790 MW power generating plant unit incorporating a total of six Type MPS 255 mills (outer grinding track diameter 3200 mm) is now planned at Mid America Energy Company, USA, for completion by June, 2007. With a guaranteed throughput rate of 109 t/h for 50 HGI hard coal, each mill will supply six boiler burners with pulverized coal at a fineness of 30 % R 0,075 mm. Installed motor power is 920 kW mill.

4.2 Lignite

High volatile constituent contents of $\geq 45\%$ (waf), which give rise to an elevated fire and explosion hazard and necessitate strict safety precautions, are characteristic of lignites. Feed moisture contents of up to approx. 45 % may also occur. This water is fixed to the coal in the form of “coarse” moisture (mine moisture and precipitation, etc.) and “hygroscopic” moisture (adsorbed by the surface). The “coarse” moisture escapes as a result of evaporation during storage in air, whereas the “hygroscopic” portion is expelled only at temperatures $\geq 100^\circ\text{C}$. The fineness of grind of the pulverized coal is generally 15 to 25 % R 0.090 mm.

In 2004, a central grinding plant featuring an MPS 180 BK for a throughput of 15 t/h supplied on a semi-turnkey basis went on stream at the Fabrika Cementa Lukavac cement plant/Bosnia-Herzegovina. **Figure 5** shows a 3D view of the MPS mill, including the relevant safety equipment. This installation is used primarily for grinding of two different lignites, with volatiles contents of around 50 % (waf) and feed moisture contents of between 13 and 19 %. The speed of the mill motor is varied by a frequency converter to accommodate fluctuating coal qualities and moisture contents. The rotary kiln's pulverized coal supply is assured for 98 % of annual operating time.

4.3 Petroleum coke

Petroleum cokes in many cases exhibit significant differences in grindability, chemical composition, and particle size distribution. They are normally sub-classified into three grades, namely sponge coke, shot coke and fluid coke (**Fig. 6**). Due to these fuels' low volatiles contents, significantly higher finished product finenesses compared to hard coal and lignites of 1 to 5 % R 0.090 mm, must be achieved in order to attain optimum burnout performance.

Kohlenstaub der Feinheit 30 % R 0,075 mm versorgen. Die installierte Motorleistung beträgt 920 kW/Mühle.

4.2 Braunkohle

Charakteristisch für Braunkohlen sind hohe Anteile an flüchtigen Bestandteilen mit $\geq 45\%$ (waf), die eine erhöhte Brand- und Explosionsgefährdung verursachen und strenge Sicherheitsmaßnahmen erfordern. Außerdem können Aufgabefeuchten bis ca. 45 % vorhanden sein. Dieses Wasser ist als „grobe“ Feuchtigkeit (Grubenfeuchte, Niederschläge etc.) sowie „hygroskopische“ Feuchte (von der Oberfläche adsorbiert) an die Kohle gebunden. Während die „grobe“ Feuchtigkeit bei Luftlagerung durch Verdunstung entweicht, wird der „hygroskopische“ Anteil erst bei Temperaturen $\geq 100\text{ }^\circ\text{C}$ ausgetrieben. Die Mahlfineinheiten des Kohlenstaubes betragen normalerweise 15–25 % R 0,090 mm.

Im Jahr 2004 erfolgte im Zementwerk Fabrika Cementa Lukavac/Bosnien-Herzegowina die Inbetriebsetzung einer semi-turnkey gelieferten Zentralmahlanlage mit MPS 180 BK für einen Durchsatz von 15 t/h. Eine 3-D-Darstellung der MPS-Mühle inklusive der relevanten Sicherheitstechnik ist in **Bild 5** enthalten. In der Anlage werden vorrangig zwei verschiedene Braunkohlen mit Gehalten an flüchtigen Bestandteilen von ca. 50 % (waf) und Aufgabefeuchten zwischen 13 und 19 % vermahlen. Bei wechselnden Kohlequalitäten und Feuchten wird mittels Frequenzumrichter die Drehzahl des Mühlenmotors variiert. Die Kohlenstaubversorgung des Drehrohrofens ist zu 98 % der Jahresbetriebszeit sichergestellt.

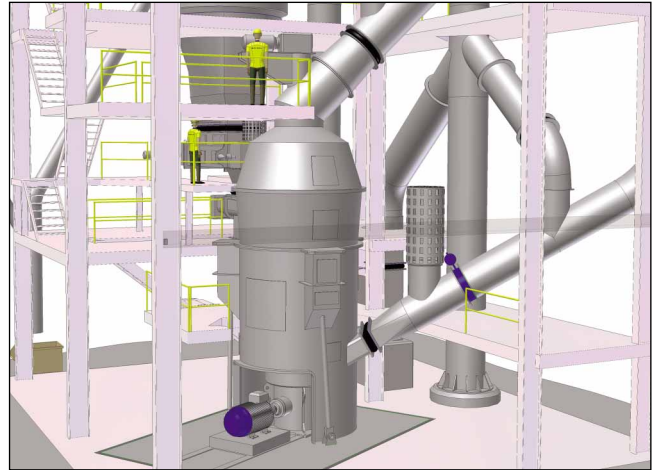
4.3 Petrolkoks

Petrolkokse weisen teilweise deutliche Unterschiede hinsichtlich Mahlbarkeit, chemischer Zusammensetzung und Körnung auf. Üblicherweise existiert mit sponge coke, shot coke und fluid coke eine Unterteilung in drei Qualitäten (**Bild 6**). Aufgrund des geringen Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen müssen zum Erreichen eines optimalen Ausbrandverhaltens im Vergleich zu Stein- und Braunkohlen wesentlich höhere Fertigtugfeinheiten mit 1–5 % R 0,090 mm realisiert werden.

Duna Drava Cement/Ungarn erteilte 2003 den Auftrag über die Lieferung von zwei semi-turnkey Mahlanlagen für die Zementwerke in Vac und Beremend. Beide Anlagen sind gemäß Richtlinie 94/9/EG (ATEX) ausgeführt. Die Garantieleistung der MPS 180 BK für Petrolkoks betrug 12 t/h bei einer Mahlbarkeit von 40 HGI und einer Fertigtugfeinheit von 5 % R 0,090 mm. Außerdem wurde für Steinkohle mit 50 HGI und 12 % R 0,090 mm eine Durchsatzrate von 19 t/h zugesagt. Die Mühlen sind mit einem Hochleistungssichter SLS 1400 BK ausgerüstet. Die hohe Trennschärfe spiegelt sich in den geringen inneren Materialumläufen und der steilen Korngrößenverteilung des Kohlenstaubes wider. **Bild 7** zeigt die erzeugte Körnungslinie für Steinkohle. Zum Vergleich sind außerdem Feinheitsverläufe für Petrolkoks und Braunkohle aus anderen Mahlanlagen dargestellt. Die Leistungsfahrten mit Steinkohle und Mischungen aus Steinkohle und Petrolkoks sind inzwischen erfolgreich abgeschlossen. Abnahmeversuche mit Petrolkoks werden vom Kunden in eigener Regie durchgeführt.

4.4 Anthrazit

Anthrazit besitzt aufgrund des hohen Inkohlungsgrades einen geringen Anteil an flüchtigen Bestandteilen mit $\leq 8\%$ (waf). Für den Mühlenbetrieb gelten vergleichbare Kriterien wie bei der Petrolkoksvermahlung.



5 3-D-Bild Kohlemahlanlage mit MPS 180 BK
5 3D image of coal grinding system incorporating an MPS 180 BK

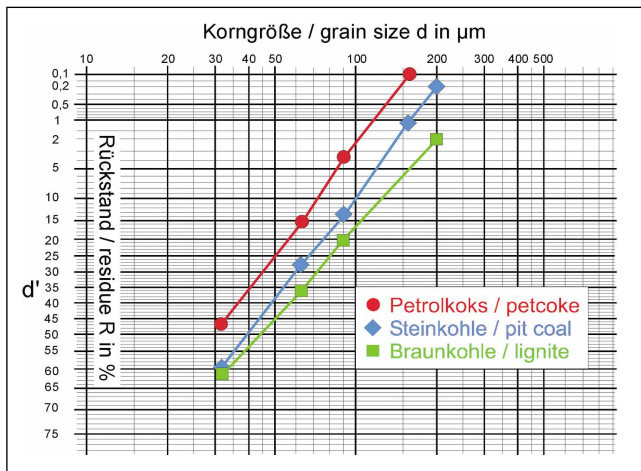
In 2003, Duna Drava Cement, of Hungary awarded a contract for supply of two semi-turnkey grinding facilities for cement plants at Vac and Beremend. Both installations are constructed in conformity with Directive 94/9/EC (ATEX). The guarantee output of the MPS 180 BK for petroleum coke was 12 t/h at a grindability of 40 HGI and a finished-product fineness of 5 % R 0.090 mm. In addition, a throughput rate of 19 t/h was agreed for 50 HGI hard coal and 12 % R 0.090 mm. The mills are equipped with an SLS 1400 BK high-efficiency separator. Its high selectivity is reflected in low internal levels of material recirculation and the steep particle-size distribution of the pulverized coal. **Figure 7** shows the particle curve generated for hard coal. Plots of fineness for petroleum coke and lignite from other grinding plants are also shown for the purpose of comparison. Performance trials with hard coal and mixtures of hard coal and petroleum coke have now been successfully completed. Acceptance trials using petroleum coke were performed independently by the customer.

4.4 Anthracite

Due to its high level of coalification, anthracite has a low volatiles content, of $\leq 8\%$ (waf). Criteria similar to those for grinding of petroleum coke apply for mill operation.

sponge coke		shot coke		fluid coke	
R 4.0 mm:	60.5 %	R 0.5 mm:	95.5 %	R 0.09 mm:	96.6 %
R 8.0 mm:	42.5 %	R 1.0 mm:	92.2 %	R 0.2 mm:	57.2 %
R 16.0 mm:	23.0 %	R 2.0 mm:	79.0 %	R 0.5 mm:	17.5 %
R 31.5 mm:	8.6 %	R 5.0 mm:	13.7 %	R 5.0 mm:	6.0 %
Schüttdichte bulk density:	0.70 kg/dm ³	Schüttdichte bulk density:	0.80 kg/dm ³	Schüttdichte bulk density:	0.69 kg/dm ³
Feuchte humidity:	8.8 %	Feuchte humidity:	2.5 %	Feuchte humidity:	8.1 %
HGI:	82	HGI:	42	HGI:	36

6 Übersicht verschiedener Petrolkoksqualitäten
6 Overview of various petroleum coke grades



7 Korngrößenverteilungen von MPS-Fertigprodukten
7 Particle-size distributions of finished MPS products

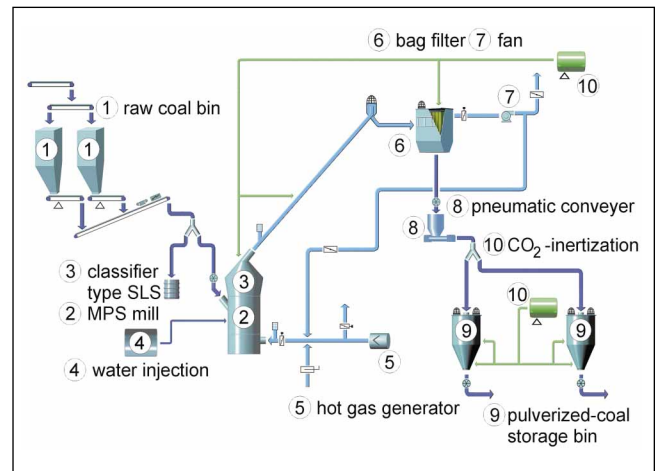
Bild 8 enthält das Verfahrensschema einer Kohlemahlanlage mit MPS 3550 BK und Sichter SLS 3150 BK, die für Podilsky Cement/Ukraine momentan in der Abwicklung ist. Ausgerüstet mit einem erdgasbetriebenen Heißgaserzeuger wird die Anlage unter nicht-inerten Bedingungen arbeiten und die Brennstoffversorgung der vier bestehenden Nassdrehöfen sichern. Die Leistungsgarantien betragen für Anthrazit mit 35 HGI 40 t/h bei 1,5 % R 0,090 mm Kohlenstaubfeinheit sowie für die Mischung mit 35 % Anthrazit und 65 % bituminöser Steinkohle 67 t/h bei 9,5 % R 0,090 mm Fertiggutfeinheit. Der Mühlenantrieb ist mit einer Leistungsaufnahme von 1100 kW und der SLS-Hochleistungssichter für eine Luftmenge von 230 000 m³/h dimensioniert. Die Inbetriebnahme ist im Sommer 2006 vorgesehen.

5 Schlussbetrachtung

In den letzten Jahren erfolgte bei der Gebr. Pfeiffer AG eine konsequente Weiterentwicklung der MPS-Kohlemühlen nach verfahrenstechnischen und konstruktiven Gesichtspunkten, um den wachsenden Marktanforderungen nach Flexibilität hinsichtlich Mahltrocknung unterschiedlichster Brennstoffqualitäten gerecht zu werden. Walzenschüsselmühlen für Anthrazit, Steinkohle, Braunkohle und Petrolkoks werden auf der Grundlage von MPS-Mahltest oder Hardgrove-Verfahren sicher ausgelegt und sind in allen Bereichen der Brennstaubereitung wirtschaftlich und betriebssicher im Einsatz.

Literaturverzeichnis/Literature

- [1] Bissot, R.; Lukas, K.-P.; Staron, P.; Blatton, J.; Häfner, H.-W.; Schubert, P.: Umstellung des Klinkerbrennofens auf Kohlefeuerung im slowakischen Zementwerk Rohoznik, ZKG INTERNATIONAL 51 (1998), No. 7, pp. 354–364
- [2] Tigges, K.D.; Bischoff, W.; Steinhage, T.: Walzenschüsselmühlen als Komponenten moderner Feuerungstechnik, VGB Kraftwerkstechnik 78 (1998), Heft 11
- [3] Kühne, K.: Neue 6400 t/d – Zementanlage am Yangtze River, ZKG INTERNATIONAL 54 (2001), No. 10, pp. 540–549



8 Verfahrensschema Kohlemahlanlage Podilsky Cement/Ukraine
8 Process diagram of the Podilsky Cement/Ukraine, coal grinding system

Figure 8 shows the process diagram for a coal grinding plant incorporating an MPS 3550 BK and an SLS 3150 BK separator currently being constructed for Podilsky Cement/Ukraine. Equipped with a natural-gas-fired hot-gas generator, this installation operates under non-inert conditions and assures supplies of fuel for the four existing wet-type rotary kilns. The performance guarantees for anthracite of 35 HGI are 40 t/h at 1.5 % R 0.090 mm pulverized coal fineness and 67 t/h at 9.5 % R 0.090 mm finished-product fineness, for a blend containing 35 % anthracite and 65 % bituminous hard coal. The mill drive train has a power take-up of 1100 kW, while the high-efficiency SLS separator is dimensioned for an air flow of 230 000 m³/h. Commissioning is planned for the summer of 2006.

5 Conclusion

In recent years, Gebr. Pfeiffer AG has pursued consistent development and refinement of its MPS coal grinding mills on process-engineering and design criteria, in order to meet growing market demands for flexibility in simultaneous grinding and drying of the most diverse range of fuel grades. Vertical roller mills for anthracite, hard coal, lignite and petroleum coke are reliably designed on the basis of MPS grinding tests or the Hardgrove method and are in cost-efficient and reliable use in all sectors of particulate fuel production.

- [4] Harder, J.: Moderne Mahltechnik in der Zementindustrie, ZKG INTERNATIONAL 56 (2003), No. 3, pp. 31–42
- [5] Jung, O.; Kraft, B.: Hochleistungssichter für MPS-Walzenschüsselmühlen, ZKG INTERNATIONAL 58 (2005), No. 6, pp. 55–60
- [6] Reichardt, Y.: Mahlung, Sichtung, Trocknung – was aufwändige Technikumsversuche bei Anlageninvestitionen nutzen, ZKG INTERNATIONAL 54 (2001), No. 1, pp. 38–43
- [7] Hardgrove, R. M.; Fullerton, P.A.: Grindability of coal, Trans. ASME 54 (1932), pp. 37–46

