

D. Marinov, Traycho Penzov
TRAPEN, Sofia/Bulgarien

Neue Sensoren und Mikroprozessormodule für einen optimalen Füllstand von Sichterkugelmöhlen

Zusammenfassung: Der Aufbau stark belastbarer und effizienter Steuerungssysteme für einen optimalen Füllstand von Sichterkugelmöhlen hängt im Wesentlichen von der schnellen Verfügbarkeit zuverlässiger Informationen über die Mahlbarkeit des aufgegebenen Materials (frisches und Rücklaufgut) und die Dicke der Materialschicht in den einzelnen Mühlenabschnitten ab. Im vorliegenden Artikel werden die erforderlichen und angemessenen Bedingungen für einen optimalen Füllstand von Sichterkugelmöhlen und die Problematik der Schaffung der Bedingungen für die Optimierung beschrieben. Des Weiteren wird ein Überblick über existierende automatische Füllstandssysteme gegeben.

New sensors and microprocessor modules for optimum loading in ball mills operated in closed circuit with separators

Summary: Building up efficient, heavy duty, control systems to achieve optimum loadings in ball mills operated in closed circuit with separators depends heavily on rapid availability of reliable information about the grindability of the input material (fresh and recycled) and the thickness of the layer of material in the individual sections of the mill. This article describes the conditions needed for optimum loading of closed-circuit ball mills and the problems involved in creating the conditions for optimization. There is also a review of existing automatic systems for controlling the loading.

1 Einleitung

Die Sichterkugelmühle ist ein komplexes Aggregat mit einem variablen, nichtlinearen, positiven Feedback. Der Mahlvorgang wird von inneren Umläufen, großen Transportverzögerungen und Zeitkonstanten begleitet. Für den Aufbau eines wirksamen Steuersystems zur Füllstandsoptimierung werden zuverlässige und rechtzeitige Informationen zur Mahlbarkeit des Aufgabeguts sowie auch Informationen zur Dicke der Materialschicht in den einzelnen Mühlenabschnitten benötigt. Im Ergebnis langjähriger Untersuchungen [1, 2] wurden deshalb Sensoren

1 Introduction

A ball mill operated in closed circuit with a separator is a complex unit with variable, non-linear, positive feedback. The grinding process involves internal recirculating systems as well as long transport delays and time constants. Reliable and rapidly available information about the grindability of the input material as well as information about the thickness of the layer of material in the individual sections of the mill are needed to build up an effective control system for optimizing the mill loading. Investigations lasting for many years [1, 2] have therefore

und Mikroprozessormodule entwickelt, und es wurde ein theoretischer Parameter, der Mahlfaktor „FG“, geschaffen. Dieser Faktor ist direkt proportional zur Mahlbarkeit und umgekehrt proportional zum Fluss des Aufgabeguts. Mit Hilfe von FG ist es möglich, wirksame Steuersysteme für einen optimalen Füllstand von Kugelmühlen und anderen Mühlen zu schaffen, wodurch eine beträchtliche Energieeinsparung sowie eine garantierte Qualität des gemahlten Guts erreicht werden. Mit Hilfe der neuen Messtechnik ist es möglich einen optimalen Mühlenfüllstand, eine Steigerung der Mühlenleistung, beträchtliche Energieeinsparungen und eine Verbesserung der Qualität der gemahlten Produkte zu erzielen.

2 Bedingungen für einen optimalen Füllstand von Sichter-Kugelmühlen

In den meisten bekannten Publikationen werden die Kriterien und Bedingungen für einen optimalen Füllstand von Sichter-Kugelmühlen nicht definiert. Aus diesem Grunde soll diese Fragestellung hier einmal im Detail betrachtet werden. Das Mahlen von Material in Mühlen erfolgt nach dem Rosin-Rammler-Gesetz und wird durch Gleichung (1) beschrieben

$$R_o(x) = R_i(x) e^{-(bx/Q_i)^\eta} \quad [1]$$

mit $R_o(x)$ = Siebgröbes (Siebmasche x) des Austragsguts in %;
 $R_i(x)$ = Siebgröbes (Siebmasche x) des Aufgabeguts in %;
 b = Mahlbarkeit des Aufgabeguts;
 x = Siebmaschendurchmesser in mm;
 Q_i = Aufgabegut in t/h;
 η = Index des Mühlentyps.

Für Sichter-Kugelmühlen wird dieses Gesetz wie folgt ausgedrückt (Gleichung 2):

$$R_o(x) = 100e^{bx/(Q_f + Q_g)} \quad [2]$$

Für diese Mühlen gilt: $\eta = 1$; $R_i(x) = 100\%$; $Q_i = Q_f + Q_g$, wobei Q_f das frische Aufgabegut (in t/h) und Q_g das Rücklaufgut (in t/h) beschreibt.

Um die Sichter-Kugelmühle optimal zu füllen, muss der Optimalwert (Opt) des Siebgröbes des Austragsguts unabhängig von der Mahlbarkeitsschwankung „ b “ und vom augenblicklichen Mühlenzustand eingestellt und gehalten werden, d.h.

$$R_o(x) = \text{Opt} \quad [3]$$

Die Gleichung (3) definiert das Kriterium für einen optimalen Füllstand von Sichter-Kugelmühlen. Aus dem abgewandelten Gesetz (s. Gleichung 2) ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die erforderlichen und ausreichenden Bedingungen für die Realisierung von Gleichung (3) durch die Gleichung

$$b/(Q_f + Q_g) = C_{opt} \quad [4]$$

ausgedrückt werden, wobei C_{opt} ein Wert ist, der von dem augenblicklichen Zustand der Mühle (Kugeln, Panzerung usw.) abhängt und den optimalen Wert von $R_o(x)$ sichert.

Die physikalische Erklärung des Zustands eines optimalen Mühlenfüllstands nach Gleichung (4) ist, dass bei einer Änderung der Mahlbarkeit „ b “ des Aufgabeguts der Materialfluss

led to the development of sensors and microprocessor modules and the creation of an artificial parameter, the grinding factor “FG”. This factor is directly proportional to the grindability and inversely proportional to the input material flow. With the aid of the FG it is possible to create effective control systems for optimum loading of ball mills and other mills that increase the mill output and achieve a considerable saving of energy as well as improved quality of the ground material.

2 Conditions for optimum loading of ball mills operated in closed circuit with separators

The criteria and conditions for optimum loading of closed-circuit ball mills are not defined in the majority of known publications. This problem will therefore be examined here in detail. The grinding of material in mills takes place in accordance with the Rosin-Rammler law and can be described by the following Equation (1):

$$R_o(x) = R_i(x) e^{-(bx/Q_i)^\eta} \quad [1]$$

where
 $R_o(x)$ = screen oversize (screen mesh x) of the output material in %,
 $R_i(x)$ = screen oversize (screen mesh x) of the input material in %,
 b = grindability of the input material,
 x = screen mesh diameter in mm,
 Q_i = input material flow rate in t/h,
 η = index for mill type.

For closed-circuit ball mills this law can be expressed as follows (Equation 2):

$$R_o(x) = 100e^{bx/(Q_f + Q_g)} \quad [2]$$

For this mill $\eta = 1$, $R_i(x) = 100\%$, $Q_i = Q_f + Q_g$, where Q_f is the fresh material flow (in t/h) and Q_g is the return material flow (in t/h).

For the closed-circuit ball mill to be optimally loaded the optimum value (Opt) of the screen oversize $R_o(x)$ of the output product must be established and maintained independently of fluctuations in grindability “ b ” and of the instantaneous state of the mill, i. e.

$$R_o(x) = \text{Opt} \quad [3]$$

Equation (3) defines the criterion for optimum loading of closed-circuit ball mills. From the modified law (see Equation 2) it follows that the conditions that are necessary for implementation of Equation (3) are expressed by the equation

$$b/(Q_f + Q_g) = C_{opt} \quad [4]$$

in which C_{opt} is a value that depends on the instantaneous state of the mill (balls, lining, etc.) and ensures the optimum value of $R_o(x)$.

The physical explanation of the state of optimum mill loading in accordance with Equation (4) is that there must be a proportional change in the input material flow ($Q_i = Q_f + Q_g$) if there is a change in the grindability “ b ” of the input material.

des Aufgabeguts ($Q_i = Q_f + Q_g$) proportional geändert werden muss. Auf diese Weise wird die Bedingung aus Gleichung (3) erfüllt, wodurch wiederum die optimalen Bedingungen für den Füllstand von Mühle und Sieb sichergestellt werden.

Nicht vernachlässigt werden darf, dass das Rosin-Rammer-Gesetz die Mahlung in der Mühle insofern idealisiert, dass z.B. angenommen wird, dass sich das Material stetig vom Einlauf zum Auslauf nur in einer Richtung bewegt. In der Praxis ist das wegen des Vorhandenseins innerer Umläufe und Roste nicht der Fall.

3 Probleme beim Aufbau von Systemen für die Füllstandsoptimierung von Siebkugelmühlen

Problem Nr. 1. Um die Bedingung nach Gleichung (4) für einen optimalen Füllstand einer Siebkugelmühle zu erfüllen, sind direkte oder indirekte Messungen in Echtzeit ohne Zeitverlust durchzuführen. Davon ausgenommen sind Q_i und die Mahlbarkeit „b“ des Aufgabeguts.

Die Mahlbarkeit von Materialien wie Klinker, Trass, Schlacke, Gips, Mergel, Kalkstein, Erz, Kohle usw. schwankt zwischen ± 20 und $\pm 50\%$ [2, 3]. Insbesondere wenn Klinker in kurzen Öfen mit Kohlefeuerung gebrannt wird, können auch noch größere Abweichungen beobachtet werden. Sehr groß und nicht vorhersagbar sind die Rücklaufschwankungen, die sich im Vergleich zur Mahlbarkeit von frischem Material zu einem bestimmten Zeitpunkt im Plusbereich und zu einem anderen Zeitpunkt im Minusbereich bewegen können [3].

Dabei ist es ein Nachteil, dass sich die Mahlbarkeit der meisten Materialien (speziell Klinker, Mergel und Kalkstein) durchschnittlich in genau dem Zeitraum ändert, in dem auch das Produkt die Mühle durchläuft, d. h. der Nettoverzug beträgt 6 bis 12 Minuten bei einer Zeitkonstanten von etwa 20 Minuten. Das bedeutet, wenn sich die Mahlbarkeit des Aufgabeguts ändert, ist der Mühlenauslauf nach 6 bis 12 Minuten betroffen. Nach weiteren 60 Minuten ist das volle Ausmaß zu erkennen. Daher kann für eine optimale Aufgabe kein Parameter verwendet werden, der am Mühlenauslauf gemessen und mit der Mahlbarkeit des Aufgabeguts in Bezug gesetzt wird. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ändert sich die Mahlbarkeit des Materials am Einlauf, was mit dem Risiko einer falschen Reaktion des Steuersystems für die Optimierung und ernsthaften Schwankungen verbunden ist.

Problem Nr. 2. Es gibt eine mehrfache, nichtlineare, positive innere Rückkopplung zwischen Q_f und Q_g . Das positive Feedback verändert sich in der Menge und verzögert sich mit der Transportverzögerung und der Zeitkonstanten von Mühle, Becherwerk und Sieb.

Problem Nr. 3. In der Mühle gibt es variable innere Umläufe die den Mahlvorgang stören. In einem bestimmten Moment erscheint an einer bestimmten Stelle Material direkt nebeneinander, das ggf. übermahlen bzw. nicht gemahlen ist [4]. Solche Umläufe müssen identifiziert werden.

Problem Nr. 4. Die meisten Mühlen (besonders die älteren), Sieb und/oder Becherwerke und/oder Transportwege für das fertige Produkt sind nicht richtig dimensioniert, und der optimale Betrieb wird durch die Einschränkung von Q_f gestört, wenn das Material leicht zu mahlen ist [4].

This satisfies the conditions in Equation (3) and in turn ensures the optimum loading conditions for the mill and separator.

It should be mentioned that the Rosin-Rammer law idealizes the grinding in the mill and, for example, considers that the material moves continuously in only one direction from the inlet to the outlet. This is not the case in practice because of the presence of internal recirculation and grids.

3 Problems with implementing systems for optimizing the loading in closed-circuit ball mills

Problem No. 1. In order to fulfil the condition in Equation (4) for optimum loading of a closed-circuit ball mill it is necessary to perform measurements, either directly or indirectly, in real time without any delay. Exceptions are Q_i and the grindability “b” of the input material.

The grindabilities of materials like clinker, trass, slag, gypsum, marl, limestone, ore, coal, etc. vary from ± 20 to $\pm 50\%$ [2, 3]. Even larger deviations can be observed, especially if the clinker is burnt in short coal-fired kilns. The fluctuations in the return flow can be very large and unpredictable, and sometimes may be “+” and other times “-” in relation to grindability of the fresh material [3].

It is a problem that the grindability of most materials (especially clinker, marl and limestone) change on average over a period that is similar to the time that it takes for the product to pass through the mill, i.e. the net lag is 6 to 12 minutes with a time constant of about 20 minutes. This means that if the grindability of the input material changes then the mill outlet is affected after 6 to 12 minutes. The full effect extends for a further 60 minutes. It is therefore not possible to use a parameter for optimum input that is measured at the mill outlet and relates to the grindability of the material at the inlet. It is highly probable that the grindability of the material at the inlet will have changed and this will lead to the risk of incorrect reaction of the control system for optimization and to serious fluctuations.

Problem No. 2. There is a multiple, non-linear, positive internal feedback between Q_f and Q_g . The positive feedback changes in quantity and is delayed by the extent of the transport delay and the time constants of the mill, bucket elevator and separator.

Problem No. 3. In the mill there are variable internal recirculating systems that interrupt the grinding process. At any given moment material that is overground may appear at a certain point next to material that has not been ground [4]. Such recirculating systems have to be identified.

Problem No. 4. The majority of mills (especially the older ones), classifiers and/or bucket elevators and/or transport routes for the finished product are not correctly dimensioned, and if the material is easy to grind the optimum mode of operation is disrupted by restricting Q_f .

Problem No. 5. The mills reach their highest productivity at loadings close to the clogging point, which places very heavy demands on the optimization control system.

Problem No. 6. The mills perform differently during filling and discharging, especially when close to the clogging point,

Problem Nr. 5. Mühlen erreichen die höchste Produktivität, wenn sie bis nahe an den Verstopfungspunkt gefüllt werden, was sehr hohe Anforderungen an das Steuersystem für die Optimierung stellt.

Problem Nr. 6. Die Leistung der Mühlen ist unterschiedlich beim Füllen und beim Austrag, insbesondere nahe am Verstopfungspunkt, was zusätzliche Anforderungen an das Steuersystem für die Optimierung stellt.

Problem Nr. 7. Falls das Produkt übermahlen wird, scheint es, als ob die Mühle aufhört zu laufen (das Produkt läuft nicht). Das kann nicht zugelassen werden.

Problem Nr. 8. Die Verfahreningenieure verfügen nicht über genaue, laufende Informationen über die Zusammensetzung des Füllguts sowie über den Zustand der Panzerung und Roste, was den Mahlvorgang beeinträchtigt und/oder zu Betriebsstörungen führt.

4 Übersicht über die vorhandenen Steuersysteme für den Füllstand von Sichterkgelmühlen

Es gibt unterschiedliche Steuersysteme für den Füllstand von Sichterkgelmühlen. Die folgenden Systeme sind die wichtigsten:

- Systeme mit Sensoren, die die Amplitude oder die Lärmfrequenz des Mühlengehäuses messen;
- Systeme, die den Rückfluss konstant halten ($Q_g = \text{konst.}$);
- Systeme, die den Strom des Aufgabeguts konstant halten ($Q_i = \text{konst.}$);
- Systeme, die das Verhältnis von Rücklauf zu frischem Material konstant halten ($Q_g/Q_f = \text{konst.}$);
- Systeme, die mit einer Kombination von unterschiedlichen Parametern, wie Mühlenlärm, Menge des Aufgabeguts und des Rücklaufs, Becherwerksleistung usw. arbeiten.

All diese Systeme weisen folgende Eigenschaften auf, die auch mit Praxiserfahrungen und Forschungsergebnissen belegt werden können:

Die akustischen Messwandler, die die Amplitude bzw. die Lärmfrequenz messen, liefern nur über die Schichtdicke in der Mühle, aber nicht über die Mahlbarkeit, bis zu einem bestimmten Umfang Informationen, und das mit geringer Empfindlichkeit. Sie vermitteln daher ein stark verzerrtes Bild des Mahlvorgangs. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Informationen von verschiedenen konsekutive und miteinander verbundenen physikalischen Rahmenbedingungen beeinflusst werden. So haben Stöße, Resonanzschwingungen von Mühlenteilen, durch Schwingungen verursachter Lärm sowie die Umwandlung von Lärm in elektrische Signale einen Einfluss. Außerdem entwickeln sich diese Einflussfaktoren in unterschiedlichen Medien, z. B. in der Panzerung, im Mühlengehäuse, in der Luft und im Messteil des Sensors. Ein weiterer Nachteil akustischer Messwandler besteht darin, dass sie auch einen größeren Teil des Lärmhintergrunds von in der Nähe befindlichen Mühlen, Motoren, Getrieben, Pumpen, Becherwerken usw. messen. Aus den o.a. Gründen sind akustische Messwandler nicht für die Optimierung des Mühlenfüllstands geeignet. Informationen von solchen Messwandlern werden meistens eher für die Verhinderung von Verstopfungen mit wechselndem Erfolg eingesetzt.

which imposes additional demands on the optimization control system.

Problem No. 7. If the product is overground it seems as if the mill stops running (the product does not flow). This should not be permitted.

Problem No. 8. The process engineers do not have accurate, current, information available about the composition of the material in the mill or about the state of the lining and grids, and this affects the grinding process and/or leads to stoppages.

4 Survey of existing systems for controlling the loading of closed-circuit ball mills

There are various systems for controlling the loading of closed-circuit ball mills. The following are the most important:

- systems with acoustic sensors that measure the amplitude or frequency of the noise from the mill casing;
- systems that keep the return flow constant ($Q_g = \text{const.}$);
- systems that keep the flow of input material constant ($Q_i = \text{const.}$);
- systems that keep the ratio of return flow to fresh material flow constant ($Q_g/Q_f = \text{const.}$);
- systems that work with a combination of different parameters, such as mill noise, fresh material feed and return flow, bucket elevator power, etc.

All these systems have the following characteristics that are also confirmed by practical experience and research results.

The acoustic transducers that measure the amplitude or noise frequency only provide a certain amount of low-sensitivity information about the thickness of the layer in the mill, but not about the grindability. They therefore give a very distorted picture of the grinding process. This is because the information is affected by various consecutive and interconnected physical phenomena. Impacts, resonance vibrations of mill parts, noise caused by vibrations and the conversion of noise into electric signals all have an effect. Furthermore, these influencing factors develop in different media, e. g. in the lining, in the mill casing, in the air and in the measuring component of the sensor. Another disadvantage of acoustic transducers is that they also measure a great deal of the background noise from adjacent mills, motors, gear units, pumps, elevators, etc. For these reasons acoustic transducers are not suitable for optimizing the mill loading. In most cases the information from such transducers is used with varying success for preventing clogging.

The systems that keep Q_g constant do not optimize the mill loading in accordance with the Rosin-Rammler law (see Equations (3) and (4)). The effect of a change in grindability "b" of the input material Q_i on Q_g is also delayed, which can lead to false reactions (see Problem No. 1). The controllers therefore have to work at action intervals of 30 minutes [4] with very small adjustments of Q_i , causing delays in the control of the mill and/or of the rotational speed of the centrifugal separator. This in turn means that a larger proportion of the fines are returned to the mill or more of the coarse material passes into the fine fraction.

Systems that keep Q_i constant are, like the systems that keep Q_g constant, not suitable for optimizing the mill loading as there

Die Q_g konstant haltenden Systeme optimieren den Mühlenfüllstand nach dem Rosin-Rammler-Gesetz nicht (s. Gleichung (3) und (4)). Außerdem tritt die Wirkung der Änderung der Mahlbarkeit „b“ des Aufgabeguts Q_i auf Q_g mit Verzögerung ein, was zu falschen Reaktionen führen kann (s. Problem Nr. 1). Daher müssen die Regler in Funktionsintervallen von 30 min [4] bei sehr kleinen Einstellgrößen von Q_f arbeiten, wodurch die Mühle ihren Arbeitsablauf nur mit Verzögerung aufnehmen kann und/oder die Drehzahl des Fliehkraftabscheiders negativ beeinflusst wird. Dadurch wird wiederum ein größerer Teil der Feinkornfraktion zur Mühle zurückgeführt bzw. geht ein großer Teil des Grobkorns in die Feinkornfraktion über.

Systeme, die Q_i konstant halten, sind wie die Systeme, die Q_g konstant halten, nicht für die Optimierung des Mühlenfüllstands geeignet, da sie die Mahlbarkeitsänderung „b“ verzögert aufzeichnen und die o. a. Wirkungen verursachen.

Systeme, die Q_g/Q_f konstant halten, optimieren zwar theoretisch den Mühlenfüllstand nach dem Rosin-Rammler-Gesetz [1], sind aber nicht effizient wegen der Verzögerung von Q_g (s. Problem Nr. 1) und der inneren positiven Rückkopplung (s. Problem Nr. 2).

Systeme, die mit einer Kombination unterschiedlicher Parameter arbeiten (oft mit Hilfe eines neuronalen Netzes), werden mit nicht vertretbaren Kompromissen installiert und eignen sich nicht für eine Optimierung des Füllstands.

5 Neue Möglichkeiten für die Optimierung des Füllstands von Sichterkgelmühlen

Seit vielen Jahren wird deshalb angestrebt, einen indirekten Parameter zu schaffen, mit dessen Hilfe eine Korrelation zwischen der Mahlbarkeit des Aufgabeguts und dem Materialstrom Q_i der Mühle hergestellt werden kann. Folgende Ergebnisse konnten bis dato erzielt werden:

- Die Stöße von Mahlkörpern (Kugeln, Stäbe, Kiesel, Rollen usw.) in der Materialschicht verursachen Aufprallimpulse auf das Mühlengehäuse mit unterschiedlichen Formen, Stirnseiten, Amplituden und Häufigkeiten. Es wurde nachgewiesen, dass eine geeignete Kombination dieser oder anderer Merkmale oszillierender Impulse zu Informationen über die Schichtdicke und ihre Mahlbarkeit führen.
- Da die Sensoren für die Geräuschemessung sich als ungeeignet für das Messen oszillierender Impulse und ihrer Merkmale erwiesen (aus Gründen, die unter Pkt. 4 angegeben sind), wurden Spezielsenoren entwickelt.
- Die Resonanzschwingungen unterschiedlicher Teile auf dem Mühlengehäuse, die Geräusche verursachen, wurden durch eine entsprechende Hardware und Software als nicht informationsrelevant ausgeschlossen.
- Es wurde eine spezielle Software entwickelt, mit deren Hilfe ein künstlicher Parameter unter dem Namen Mahlfaktor „FG“ geschaffen wurde, dessen Wert sich direkt proportional zur Mahlbarkeit des Materials und umgekehrt proportional zur Schichtdicke an der Messstelle verhält. Mit anderen Worten, FG ist umgekehrt proportional zum Schichtwiderstand gegenüber den Mahlkörpern, die in das Material eindringen.

is a delay in registering changes in grindability “b”, resulting in the above-mentioned effects.

Systems that keep Q_g/Q_f constant do in fact theoretically optimize the mill loading in accordance with the Rosin-Rammler law [1] but are not efficient because of the time lag of Q_g (see Problem No. 1) and the internal positive feedback (see Problem No. 2).

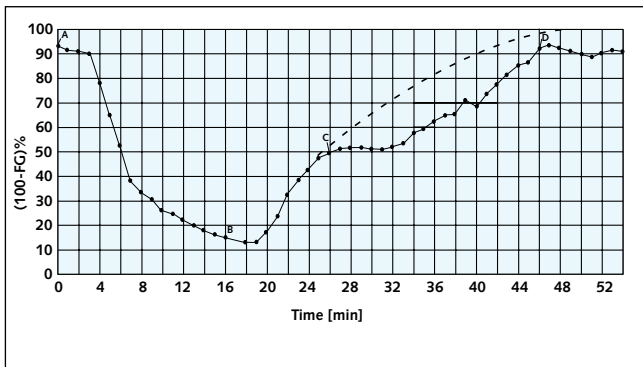
Systems that operate with a combination of different parameters (often with the aid of a neural network) contain compromises that are not sufficiently justifiable and are not suitable for optimizing the loading.

5 New facilities for optimizing the loading of closed-circuit ball mills

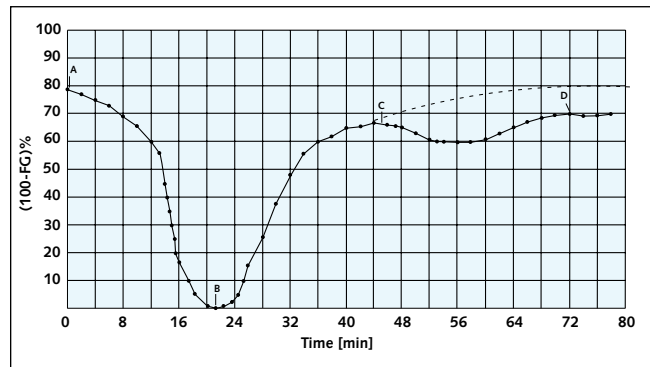
For many years attempts have therefore been made to create an indirect parameter that can be correlated with the grindability of the input material and the input material flow Q_i . The following results have been achieved so far:

- The impacts of grinding media (balls, rods, clypebs, rollers, etc.) in the layer of material cause impact pulses in the mill casing with different forms, fronts, amplitudes and frequencies. It has been shown that a suitable combination of these or other features of the oscillating pulses provide information about the thickness of the layer and its grindability.
- The sensors for noise measurement have proved unsuitable for measuring oscillating pulses and their characteristics (for the reasons given in Section 4), so special sensors have been developed.
- The resonance vibrations of different components on the mill casing that cause noise were eliminated by appropriate hardware and software as the information is not relevant.
- Special software was developed to synthesize an artificial parameter, the grinding factor “FG”, which has a value that is directly proportional to the grindability of the material and inversely proportional to the layer thickness at the point of measurement. In other words, FG is inversely proportional to the resistance of the layer to penetration by the grinding media.
- The layer thickness at the mill inlet correlates with the input material flow $Q_i = Q_f + Q_g$ so the grinding factor FG is directly proportional to b/Q_i .
- Maintaining the target value for FG at the mill inlet proves to be a necessary and adequate condition for optimum loading in accordance with Equations (3) and (4).

The transitional characteristics of two closed-circuit ball mills are given as proof of the statement that FG correlates with b/Q_i . The first mill has two grinding chambers (Fig. 1) and the second has one grinding chamber (Fig. 2). The grinding factors FG are formed on the basis of the signals from the transducers installed at the mill inlets. The figures on the Y-axis show the values of $(100 - FG)$ in %; these are directly proportional to the mill loading and inversely proportional to the grindability of the inlet material.



1 Übergangskennwerte einer Doppelkammermühle
1 Transitional characteristics of a double chamber mill



2 Übergangskennwerte einer Einkammermühle
2 Transitional characteristics of a single chamber mill

- Da die Schichtdicke am Mühleneinlauf mit dem Materialfluss des Aufgabeguts $Q_i = Q_f + Q_g$ korreliert, steht der Mahlfaktor FG in einer direkt proportionalen Beziehung zu b/Q_i .
- Das Beibehalten des Sollwerts von FG am Mühleneinlauf erwies sich als notwendig und als eine adäquate Bedingung für einen optimalen Füllstand nach Gleichungen (3) und (4).

Als Beweis für die Aussage, dass FG mit b/Q_i korreliert, werden die Übergangskennwerte von zwei Sichterkuhmühlen herangezogen. Die erste Mühle hat zwei Mahlkammern (**Bild 1**) und die zweite hat eine Mahlkammer (**Bild 2**). Die Mahlfaktoren FG werden entsprechend der Signale der am Mühleneinlauf installierten Messwandler gebildet. Die Zahlen auf der Y-Achse zeigen die Werte von $(100 - FG)$ in %, die direkt proportional zum Mühlenfüllstand und umgekehrt proportional zur Mahlbarkeit des Aufgabeguts sind.

Die Kennwerte werden bei folgenden Bedingungen ermittelt: In Punkt „A“ wird das frische Material Q_f der gefüllten Mühlen gestoppt und die Mühlen werden entleert; bei Punkt „B“ wird wieder frisches Material Q_f mit dem gleichen Wert wie in Punkt „A“ aufgegeben; zwischen den Punkten „B“ und „C“ wird nur frisches Material aufgegeben (Q_g kommt mit Verzögerung), und die charakteristische Neigung wird nur durch Q_f und seine Mahlbarkeit definiert. Am Punkt „C“ des Mühleneinlaufs beginnt die Aufgabe von Q_g , und die Füllung beginnt sich mit neuen Kennwerten zu bewegen, die anstelle der gestrichelten Kennwerte von Q_f durch $Q_i = Q_f + Q_g$ und deren Mahlbarkeit definiert sind. Es scheint, dass sich die Mühle am Punkt „B“ entleert. Auf den ersten Blick erscheint das paradox, ist jedoch darauf zurückzuführen, dass der Rückfluss eine höhere Mahlbarkeit „b“ besitzt, bei der $(100 - FG)$ dieser zuerst abnimmt, weil er umgekehrt proportional zur Mahlbarkeit „b“ des Aufgabeguts in einer Wechselbeziehung steht.

Aus den Übergangskennwerten geht klar hervor, dass es viel länger dauert die Mühle zu füllen als sie zu leeren, was durch Problem Nr. 6 bestätigt wird.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Untersuchungen wurden in den letzten Jahren Sensoren und Mikroprozessormodule entwickelt, mit deren Hilfe es möglich ist, Steuersysteme für einen optimalen Füllstand von Sichterkuhmühlen und anderen Mühlen wie folgt aufzubauen:

The characteristic values were determined under the following conditions: at Point “A” the fresh material Q_f to the loaded mills was stopped and the mills were emptied; at Point “B” fresh material Q_f is fed in again at the same rate as at Point “A”; between points “B” and “C” only fresh material is introduced (Q_g is delayed) and the characteristic slope is defined only by Q_f and its grindability. The introduction of Q_g at the mill inlet starts at point “C” and the loading begins to adopt new characteristic values defined by $Q_i = Q_f + Q_g$ and the associated grindability instead of the characteristic values of Q_f shown by the broken line. It seems that the mill is discharging at Point “B”. At first sight this phenomenon seems a paradox but it occurs because the return flow has a higher grindability “b” so that $(100 - FG)$ decreases at first because it is inversely proportional to the grindability “b” of the input material.

It is clear from the transitional characteristics that the loading time of the closed-circuit ball mills are higher than the discharge time, which is confirmed by problem no. 6 in Section 3.

Sensors and microprocessor modules have been developed in recent years on the basis of the results of these investigations. With their aid it is possible to construct control systems for optimum loading of closed-circuit ball mills and other mills as follows:

- There are two types of differential sensors, namely SRIP (**Fig. 3**) and SDIP (**Fig. 4**) for selective measurement of the oscillating pulses of rotating and stationary (roller) mills. The sensors are encapsulated oscillators that can transmit signals for up to 200 m through double-core shielded cable without additional amplification. With rotating mills the sensors are mounted on a stand fixed to the foundation and are directed at a distance of 20 to 30 mm from the mill casing towards the point where the grinding media fall. With stationary mills they are attached to the casing.
- The MILLCONT 2 microprocessor module (**Fig. 5**) consists of two independent control loops. Each control loop has an analogue differential amplifier with controlled amplification factor, a digital component with adjustable parameters for the forming the grinding factor FG and a special digital PID controller that can be adjusted to work in different modes for mill “filling” and “emptying”.

The two control loops are freely configurable as they can be operated both with the input signal from the sensors and



3 SRIP Remote-Sensor
3 SRIP remote sensor



4 SDIP Direkt-Sensor
4 SDIP direct sensor

- Es gibt zwei Arten von Differenzialsensoren, nämlich SRIP (**Bild 3**) und SDIP (**Bild 4**), für das selektive Messen der oszillierenden Impulse sich drehender und stationärer (Wälz-)Mühlen. Die Sensoren sind gekapselte Oszillatoren, die Signale über doppeladrig, abgeschirmte Kabel bis zu 200 m ohne zusätzliche Verstärkung übertragen. Bei sich drehenden Mühlen werden die Sensoren auf einem auf dem Fundament befestigten Gestell montiert und sind in einem Abstand von 20 bis 30 mm gegenüber der Stelle, wo die Mahlkörper herunterfallen, auf das Mühlengehäuse gerichtet. Bei den stationären Mühlen sind sie auf dem Gehäuse befestigt.

- Das Mikroprozessormodul mit der Bezeichnung MILLCONT 2 (**Bild 5**) besteht aus zwei unabhängigen Regelkreisen. Jeder Regelkreis besitzt einen analogen Differenzialverstärker mit gesteuertem Verstärkungsfaktor, eine digitale Komponente mit einstellbaren Parametern für den Formfaktor von FG sowie einen speziellen, digitalen PID-Regler, der auf die unterschiedlichen Betriebsarten „Füllen“ und „Austrag“ eingestellt werden kann.

Beide Regelkreise sind frei konfigurierbar, denn sie können sowohl mit dem Eingangssignal von den Sensoren als auch mit einem Einheitssignal aus einer anderen Quelle (Becherwerk, Sieb, Gewichtsmessinstrument für den Rückfluss usw.) betrieben werden.

Das Modul arbeitet mit einem Standardeingangs- und -ausgangsstrom und kann als normaler, inverser oder serieller Kommunikationskanal RS 485 auf MODBUS programmiert werden. Das Modul ist für einen Schalttafeleinbau vorgesehen.

- Das Mikroprozessormodul mit dem Markennamen MILLOAD (**Bild 6**) verarbeitet ein Signal von einem Sensor und formt den FG mit einem Einheitsstromsignal aus. Das Modul eignet sich für Mühlen mit SPS, in die der Regler eingebaut ist, und ist auch für Halter nach der Euronorm geeignet.

with a unified signal from other sources (elevator, separator, return flow weigher, etc.).

The module operates with standard input and output currents and can be programmed as a normal, inverse or serial RS 485 communication channel on MODBUS. The module is designed for panel mounting.

- The MILLOAD microprocessor module (**Fig. 6**) processes a signal from a sensor and forms the FG with a unified current signal output. The module is designed for mills with a PLC in which the controller is incorporated and is also suitable for European standard brackets.

6 Systems for optimizing the loading of closed-circuit ball mills

The following main systems for optimizing the loading of closed-circuit ball mills can be built up using the sensors and modules described in Section 5:

- A single loop system, in which the sensor is mounted at the mill inlet and connected to the MILLCONT 2 module; the controller regulates the fresh material Q_f . It can also be assembled with the MILLOAD module and a PLC. The system fulfils the requirements of the Rosin-Rammer law for optimum loading in accordance with Equations (3) and (4) and solves the problem nos. 1, 2, 3, 5 and 6 listed in Section 3.
- A double-loop system in which one sensor is installed at the inlet and the other at the other end of the mill. The outputs from the sensors are connected to the MILLCONT 2 module. The outputs from the two MILLCONT 2 controllers are combined in a set relationship and a common signal is produced, which regulates the fresh material Q_f . The system can be assembled with two MILLOAD modules as the controllers are located in the PLC.

6 Systeme für die Optimierung des Füllstands von Sichterkugelmühlen

Mit Hilfe der im Abschnitt 5 beschriebenen Sensoren und Module können folgende Hauptsysteme für die Optimierung des Füllstands von Sichterkugelmühlen aufgebaut werden:

- Einschleifiges System, bei dem der Sensor am Mühleneinlauf montiert und mit dem Modul MILLCONT 2 verbunden ist, da der Regler eine Wirkung auf das frische Material Q_f hat. Es kann auch mit dem Modul MILLOAD und einer SPS aufgebaut werden. Das System erfüllt die Anforderungen nach dem Rosin-Rammler-Gesetz für einen optimalen Füllstand (3) und (4) und löst die im Abschnitt 3 aufgeführten Probleme Nr. 1, 2, 3, 5 und 6.

- System mit zwei Regelkreisen, wobei ein Sensor am Einlauf und der andere am anderen Ende der Mühle installiert ist. Die Ausgänge der Sensoren sind mit dem Modul MILLCONT 2 verbunden. Der Output beider Regler von MILLCONT 2 wird in einem festgesetzten Verhältnis zusammengefasst, und es wird ein Einheitssignal gebildet, das das frische Material Q_f beeinflusst. Das System kann mit zwei MILLOAD Modulen aufgebaut werden, da sich die Regler in der SPS befinden.

Dieses System ist hauptsächlich für Mühlen gedacht, bei denen es Probleme mit der Becherwerksleistung und/oder dem Sichter gibt. Die Menge des Austragsguts Q_o der Mühle kann mit Hilfe einer richtig gewählten Einstellung des zweiten Reglers eingeschränkt werden, wenn der eingestellte Wert überschritten wird. Wenn die Einstellung nicht überschritten wird, arbeiten beide Regler im Einwegbetrieb, wodurch die Steuerung der Mühle verbessert wird.

Das System erfüllt die Anforderungen für einen optimalen Füllstand nach den Gleichungen (3) und (4) und löst die Probleme Nr. 1, 2, 3, 5 und 6, wenn der Einstellwert des zweiten Reglers nicht überschritten wird. Problem Nr. 4 wird gelöst, wenn der Einstellwert überschritten wird.

- Hybridsysteme, bei denen neben dem FG noch andere Informationsquellen genutzt werden (Füllung des Becherwerks, Rückfluss Q_g usw.), die im vorliegenden Artikel nicht behandelt werden. Um Problem Nr. 7 zu lösen ist es erforderlich, die Aufgabe von frischem Material Q_f auf < 10 bis 20% einzustellen, da bei einer automatischen Betriebsweise in gesonderten Fällen $Q_f = 0$ erreicht werden kann. In einem solchen Fall würde das Material übermahlen werden. Bei einem Verschleiß der Mahlkörper ist erforderlich, die Einstellungen der Regler zu korrigieren. Das erfolgt, indem die Informationen über die Wanderung des Siebgroben $Ro(x)$ am Mühlenauslauf verwendet werden. Wenn ein bestimmter Grenzwert mit diesen Korrekturen erreicht wird, entscheidet der Verfahrenstechniker, die Mahlkörper neu zu gattieren und/oder neu aufzufüllen. Bei einer scharfen und dauerhaften Änderung des FG ist es möglich, dass es im Innern der Mühle zu Störungen kommt. Durch Verwendung dieser indirekten Informationen wird Problem Nr. 8 gelöst.

Tabelle 1:
Table 1:

Mahlbarkeit Grindability b (%)	Abweichung/Deviation (%)					
	System FG = konst./const.			System $Q_g = konst./const.$		
	Q_f	Q_g/Q_f	$Ro(x)$	Q_f	Q_g/Q_f	$Ro(x)$
+20	+20	0.0	0.0	+16	-14.5	-5.7
-20	-20	0.0	0.0	-17	+21.5	+5.7



5 MILLCONT 2 Mikroprozessormodul
5 MILLCONT 2 microprocessor module

This system is intended mainly for mills where there are problems with the bucket elevator capacity and/or the separator. The quantity of output material Q_o from the mill can be restricted with the aid of a correctly chosen setting of the second regulator if the set value is exceeded. If the setting is not exceeded then both regulators work in the same direction and the control of the mill is improved.

The system fulfils the requirements for optimum loading in accordance with Equations (3) and (4) and solves problem nos. 1, 2, 3, 5 and 6 when the second regulator setting is not exceeded and solves problem no. 4 when the setting is exceeded.

- Hybrid systems that use not only the FG but also other sources of information (bucket elevator loading, return flow Q_g , etc.), which are not dealt with in this article. In order to solve problem no. 7 it is necessary to ensure that the input of fresh material is at least $10-20\%$, as in certain situations Q_f could reach 0 in the automatic mode, and the material would be overground. The settings of the controllers have to be corrected when the grinding media become worn. This is carried out using the information about the drift in screen oversize material $Ro(x)$ at the mill outlet. When these corrections reach a certain limit the process engineer has to decide whether to re-sort and/or re-charge the grinding media. If there is a sharp and permanent change in the FG it is possible that there has been a malfunction inside the mill. Problem no. 8 is solved by using this indirect information.

Digital models were used to carry out a study of a closed-circuit mill with single loop control system in which the grinding factor was kept constant ($FG = const.$) and of a second closed-circuit mill with a system for maintaining a constant return flow ($Q_g = const.$). **Table 1** shows the deviations when the grindability "b" of Q_i is changed in the range $\pm 20\%$ when compared with the normal grindability of Q_i .

From the table it can be seen that the requirements for optimization (3) are satisfied in the system that maintains a constant grinding factor FG, while the system with a constant return flow deviates considerably from these requirements.

Another important result of these investigations is that when an empty mill is started up it fills up and reaches normal operation twice as fast with the first system than with the second system.

Mit Hilfe digitaler Modelle wurde eine Studie zu einer Sichter- mühle mit einschleifigem Regelsystem erarbeitet, wobei der Mahlfaktor konstant gehalten wird ($FG = \text{konst.}$), sowie zu einer zweiten Sichter- mühle, bei der der Rückfluss konstant gehalten wird ($Q_g = \text{konst.}$). **Tabelle 1** zeigt die Abweichungen bei einer geänderten Mahlbarkeit „b“ von Q_i im Bereich von $\pm 20\%$ im Vergleich zum Betrieb mit einer normalen Mahlbarkeit von Q_i .

Aus Tabelle 1 erkennt man, dass die Anforderungen für eine Optimierung (3) bei dem System mit einem konstanten Mahlfaktor FG erfüllt werden, während das System mit einem konstanten Rückfluss beträchtlich von diesen Anforderungen abweicht.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis der Untersuchungen war, dass beim Anfahren einer leeren Mühle diese beim ersten System in einer zweimal kürzeren Zeit als beim zweiten System für den Normalbetrieb gefüllt wird. Das erste System reagiert auch zweimal schneller auf Änderungen der Mahlbarkeit des Aufgabeguts. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Informationen über eine Änderungen der Mahlbarkeit „b“ von dem Aufgaberate Q_i beim zweiten System mit einer wesentlichen Verzögerung eingeht.

7 Schlussfolgerungen

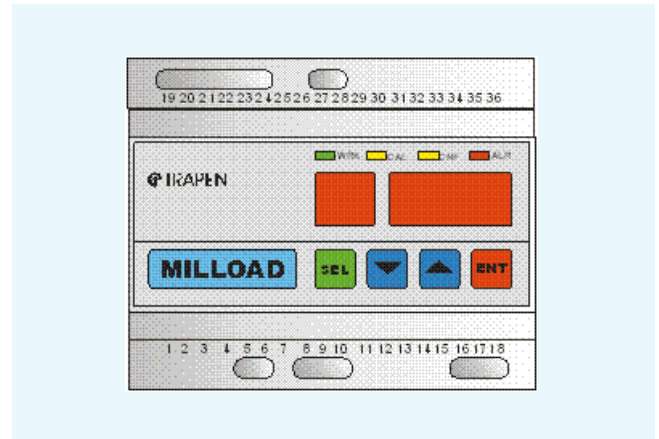
Im Zeitraum von 1993 bis 2004 wurden mehr als 20 Steuersysteme für die Füllstandsoptimierung von nach dem Trocken- oder Nassverfahren arbeitenden Sichter- kugelmühlen zum Mahlen von Zement, Rohstoffen, Erzen, Kohle usw. in der Zement- und Energieindustrie sowie in der Metallurgie in Betrieb genommen. Einige dieser Systeme sind mit älteren Sensoren und Modulen bestückt und sind mehr als 10 Jahre einwandfrei gelaufen. Der Betrieb von Steuersystemen für den optimalen Füllstand von Sichter- kugelmühlen in Anlagen der Firmen ITALCEMENTI, TITAN und HOLCIM führte zu folgenden Erkenntnissen:

- der Mühlen- durchsatz nimmt um 10 bis 30 % zu;
- der spezifische Energieverbrauch wird um etwa den gleichen Prozentsatz gesenkt;
- die Haltbarkeit der Panzerung und Mahlkörper erhöht sich um ca. 15 %;
- die mittlere quadratische Abweichung bei der Mahlfeinheit der Fertigprodukte wird im Vergleich zur manuellen Steuerung des Mahl- vorgangs durchschnittlich um das 1,6fache verringert;
- die durchschnittliche Amortisationszeit der Systeme beträgt weniger als 6 Monate.

Neben diesen guten ökonomischen Ergebnissen führen die Steuersysteme für Sichter- mühlen auf der Basis neuer Sensoren und Module auch zu einer Verbesserung der gesamten Arbeits- organisation.

Literaturverzeichnis/Literature

- [1] Marinov, D.; Penzov, T.; Kostov, S.; Spasov, E.: New sensor system for ball mill control, Mining Magazine, London, Sept. 1991.
- [2] Marinov, D.; Penzov, T.: A microprocessor system MILLCONT for optimization of the throughput of the ore and raw materials mills, 1st Balkan IFAC-Type conference of applied automatic systems, Ohrid, R. Macedonia, 27–29 Sept. 1993.



6 MILLOAD Mikroprozessormodul
6 MILLOAD microprocessor module

The first system also reacts twice as fast to changes in grindability of the input material. This is because in the second system the information about a change in grindability b of the input material Q_i is associated with a considerable delay.

7 Conclusion

During the period from 1993 to 2004 more than 20 control systems for optimizing the loading in closed-circuit ball mills for wet or drying grinding of cement, raw materials, ores, coal, etc. came into operation in the cement and power-generating industries and in the metallurgical industry. Some of these systems are equipped with the older sensors and modules and have run flawlessly for over 10 years. The operation of control systems for achieving optimum loading of closed-circuit ball mills in plants belonging to ITALCEMENTI, TITAN AND HOLCIM have produced the following results:

- The mill throughput increases by 10 to 30 %
- The specific power consumption is reduced by approximately the same percentage
- The durability of the lining and grinding media increases by about 15 %
- The mean square deviations in fineness of the final products are reduced on average by a factor of 1.6 when compared with manual control of the grinding process
- The average pay-back time of the systems is less than six months.

In addition to these good economic results the control systems based on the new sensors and modules for mills operating in closed circuit with separators also improve the overall organization of the work.

- [3] Cottet, Y.: Essai de méthodologie en matière de régulation automatique a l'occasion du problème du broyage, International seminar "Automatic control in lime, cement and connected industries", Brussels, 1968.
- [4] Duda, W.: Cement-Data-Book, Wiesbaden, 1968.
- [5] Bilenco, L.: Relationships at the grinding into ball mills (in Russian), Moscow, 1984.
- [6] Godler, F.; Hagenbach, J.: New acoustic method for measuring the filling ratio of mill feed in tube mills, ZKG INTERNATIONAL, 47 (1994), No. 2, pp. 91–96.
- [7] Morgeneier, K.-D.; Runge, L.; Wächter, M.; Vogel, J.; Seiler, B.: "Neuro-fuzzy control system for a cement mill", ZKG INTERNATIONAL 55 (2002), No. 9, pp. 72–80.