Holger Lieberwirth

Redefining Deposit's Reserves by Advanced Mineral Processing Approaches

The estimation of a deposit's reserves depends on the geological and mineralogical characteristics as well as the market value of the product. It is also influenced by the mining and mineral processing technology applied and the respective costs generated. Ongoing challenges such as decreasing prices, lower grade ores, rising labour and equipment costs call for new approaches. This paper highlights some of those in the processing of ores such as selective comminution or confined particle-bed breakage which might lead to increased recovery and reduced costs. Those advanced mineral processing approaches are based on in-depth knowledge of the comminution behaviour of the ores. Such knowledge is gained through investigation of the minerals using Mineral Liberation Analyser or Quantitative Microstructural Analysis. The option of recovering even low grade ores economically using advanced mineral processing technologies may finally lead to a re-evaluation of the reserves of deposits. The paper is based on the author´s presentation on the 26th Annual General Meeting and Conference SOMP 2015 at 24th June 2015 in Freiberg/Germany.

Neudefinition von Lagerstättenvorräten durch moderne Aufbereitungsmethoden

Die Abschätzung der Vorräte einer Lagerstätte basiert auf den geologischen und mineralogischen Eigenschaften sowie auf dem Marktwert des Produkts. Weitere Einflussfaktoren sind die verwendeten Abbau- und Aufbereitungsverfahren und die damit einhergehenden Kosten. Fortwährende Herausforderungen wie rückläufige Preise, ärmere Erze, steigende Arbeits- und Maschinenkosten erfordern jedoch neue Ansätze. Dieser Beitrag beleuchtet einige dieser neuen Ansätze in der Erzaufbereitung, wie die selektive Zerkleinerung oder die Zerkleinerung im Gutbett, die zu einem höheren Ausbringen und zu Kosteneinsparungen führen könnten. Diese modernen Aufbereitungstechnologien beruhen auf fundierten Kenntnissen des Zerkleinerungsverhaltens der Erze, die durch eine Untersuchung der Minerale mittels eines Mineral Liberation Analyser oder einer Quantitativen Gefügeanalyse gewonnen werden. Die Möglichkeit, auch Armerze mit Hilfe moderner Technologien wirtschaftlich aufzubereiten, kann schließlich zur Neubewertung der Vorräte einer Lagerstätte führen. Der Beitrag beruht auf einem Vortrag des Autors auf der 26. Jahrestagung und Konferenz der Society of Mining Professors (SOMP) am 24. Juni 2015 in Freiberg.

Introduction

"A mineral reserve is the economically mineable part of a measured and/or indicated mineral resource." (1). In consequence, it is mainly determined by

- the specific content of valuable material;
- the cost of mining and processing;
- the market price.

A cut-off grade has to be defined for each deposit. Parts of the deposit with an average content of valuable material above this grade are processed, while those with lower grades are dumped. In certain cases, portions of the low grade materials close to the cut-off grades may be stockpiled if an increase in market prices or a decrease in processing costs, perhaps due to a new technol-

Einleitung

„Der Vorrat eines mineralischen Rohstoffs ist der bauwürdige Teil einer erkundeten und/oder angezeigten Ressource." (1). Folglich wird er vor allem bestimmt durch

- den spezifischen Wertstoffgehalt,
- die Kosten für Abbau und Aufbereitung,
- den Marktpreis.

Für jede Lagerstätte muss eine Bauwürdigkeitsgrenze („cut-off grade") definiert werden. Bereiche der Lagerstätte, deren durchschnittlicher Wertstoffgehalt über dieser Grenze liegt, werden aufbereitet, wohingegen diejenigen mit einem niedrigeren Gehalt verkippt werden. In manchen Fällen können Teile des Materials mit geringem Gehalt, der nah an der Bauwürdigkeitsgrenze

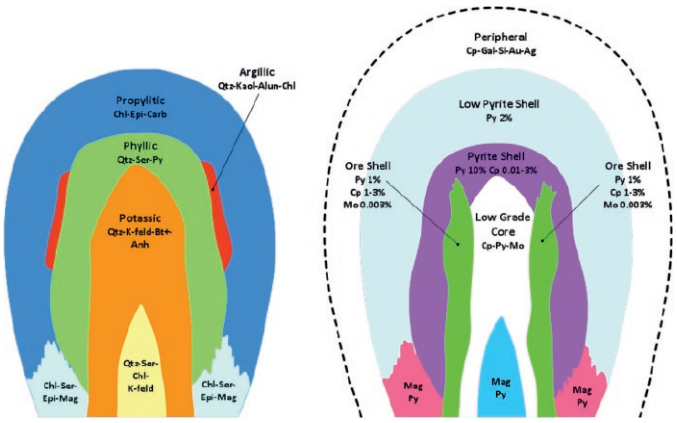

Fig. 1. Distribution of alteration zones and types of mineralization in porphyry copper deposit (2).
Bild 1. Verteilung von Alterationszonen und Mineralisationstypen in einer porphyrischen Kupferlagerstätte (2).

ogy, can be expected in the foreseeable future. While this general approach is similar to all reserves, this article will be mainly focused on metal ores and spars, herein further jointly described as "ores".

Many deposits contain a core zone which is characterized by high concentrations of ores, while the concentration drops towards the boundaries of the deposit (Figure 1). Although these boundary zones may contain lower concentrations of ores, the volumes of these zones may substantially exceed the volumes of the core zones and even the absolute amount of ore in those zones may be substantial.

Schodde describes this trade-off between tonnes and grade analysing 48 copper deposits (3). He found that on average, by adjusting the cut-off grade, it is possible to double or triple the head grade of the ore body, but at the expense of shrinking the ore tonnage by a factor of 10. Analysing the substantial reduction in costs since 1900, he found that about 30 % are attributable to the economies of scale when mining large deposits. 70 % of the cost reductions are attributable to new technologies.

A further cost reduction by the introduction of new and more efficient mining and processing technologies could thus lead not only to a decrease in cut-off grades but also to a redefinition of substantial ore containing portions of the deposits as reserves.

Respectively, the main factor determining the profitability of a mine which can be influenced by the operator is the costs of mining and processing. This paper presents examples of advanced technologies such as selective comminution, confined particle-bed comminution or Quantitative Microstructural Analysis (QMA) on mineral processing.

New technologies on the horizon

Today, most of the high volume metal ores such as copper or iron ore follow similar processing routes, irrespective of their specifics. Figure 2 shows a typical example of such a processing system. These routes contain mainly

- primary crushing;
- AG-/SAG milling;
- ball milling;
- flotation.

liegt, auf Halde gelagert werden, wenn in absehbarer Zeit steigende Marktpreise oder etwa auf Grund neuer Technologien sinkende Aufbereitungskosten zu erwarten sind. Dieses allgemeine Vorgehen gilt zwar für sämtliche Vorräte, der vorliegende Beitrag bezieht sich jedoch vor allem auf Erze und Spate, die im Folgenden gemeinsam als „Erze" bezeichnet werden.

Viele Lagerstätten enthalten eine Kernzone, die durch hohe Erzkonzentrationen gekennzeichnet ist. Die Konzentration nimmt zu den Randbereichen der Lagerstätte hin ab (Bild 1). Obwohl diese Randzonen niedrigere Erzkonzentrationen enthalten können, kann ihr Volumen das der Kernzonen deutlich übersteigen. Sogar die absolute Menge an Erz kann in diesen Bereichen beachtlich sein.

Schodde beschreibt diese Abwägung zwischen Menge und Gehalt in seiner Analyse von 48 Kupferlagerstätten (3). Er stellte fest, dass im Durchschnitt eine Verdoppelung oder Verdreifachung des Erzgehalts im Aufgabegut durch die Anpassung der Bauwürdigkeitsgrenze möglich ist, dies jedoch zulasten einer Verringerung der geförderten Erzmenge um den Faktor 10. Seine Analyse der wesentlichen Kostensenkungsfaktoren seit 1900 zeigt, dass ungefähr 30 % der Einsparungen auf die Skaleneffekte beim Abbau großer Lagerstätten und 70 % auf neue Verfahren zurückzuführen sind.

Weitere Kostensenkungen durch die Einführung neuer und effizienterer Abbau- und Aufbereitungsverfahren könnten daher nicht nur zu einer Absenkung der Bauwürdigkeitsgrenze führen, sondern auch zu einer Neudefinition großer erzführender Bereiche von Lagerstätten als Vorräte.

Dementsprechend sind die vom Betreiber beeinflussbaren Hauptfaktoren zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit eines Bergwerks die Kosten für Gewinnung und Aufbereitung. Dieser Beitrag stellt Beispiele für zukunftsweisende Verfahren wie die selektive Zerkleinerung, die Gutbettzerkleinerung oder die Quantitative Mikrostrukturanalyse (QMA) bei der Erzaufbereitung vor.

Neue Technologien in Sicht

Heutzutage werden die meisten Massenerze wie Kupfer- oder Eisenerz ungeachtet ihrer jeweiligen Spezifika nach ähnlichen Verfahrensfließbildern aufbereitet. Bild 2 zeigt ein Beispiel für ein solches typisches Aufbereitungssystem. Die Verfahrensschritte beinhalten im Wesentlichen:

- Primärzerkleinerung,
- AG-/SAG-Mahlung,
- Kugelmahlung,
- Flotation.

Darüber hinaus findet manchmal eine Sekundär- und Tertiärzerkleinerung für die Grobpartikel statt, oder das Kupferkonzentrat wird – im Anschluss an die Flotation – nochmals feingemahlen, wie in Bild 2 dargestellt.

Betrachtet man die unterschiedlichen Eigenschaften von Erzen, verwundert diese Ähnlichkeit der Verfahrenswege. Es stellt sich die Frage, ob es nicht zumindest für einige Erze effizientere Verfahren gibt, die den Energie- und Wasserverbrauch senken oder das Ausbringen erhöhen oder beides.

Selektive Zerkleinerung

Selektivität tritt als Verhalten von Erzen und Gesteinen in der Na-

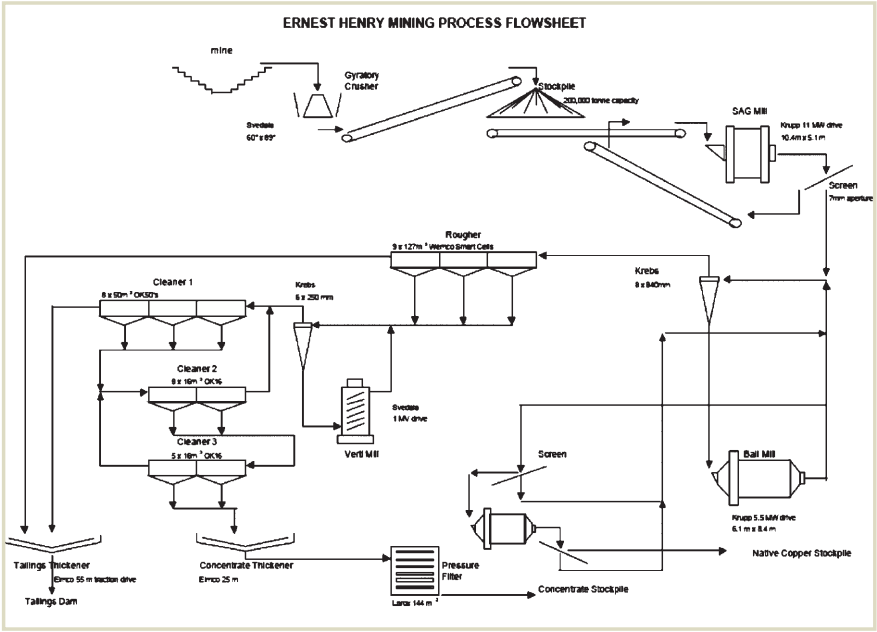

Fig. 2. Typical process flow chart copper ore (Metso).
Bild 2. Typisches Verfahrensfließbild für Kupfererz (Metso)

Sometimes, secondary/tertiary crushing is included for the coarse fractions, or – following flotation – the copper concentrate may be more finely ground as illustrated in Figure 2.

Looking at the different characteristics of ores, this commonality of process routes is somewhat surprising. The question may be raised whether there are more efficient ways, at least for certain ores, reducing energy and water consumption or increasing the recovery or both.

Selective Comminution

Selectivity is a behaviour of ores and rocks which can be observed in nature, when materials are decomposed due to natural weathering. More durable components, such as quartz often survive while other components are dissolved or simply washed away.

It has long been known that various minerals an ore is comprising may respond differently to the same comminution load. Although in some cases processing was adapted to take advantage of these different responses there has never been a systematic approach to optimising processing technologies for specific minerals. This is partly because of limited understanding of the response behaviours and limitations on the available technology.

tur auf, wenn sich Materialien aufgrund von Verwitterung zersetzen. Beständige Komponenten wie Quarz bleiben dabei oftmals erhalten, wohingegen andere Bestandteile aufgelöst oder einfach abgetragen werden.

Seit langem ist bekannt, dass die verschiedenen Minerale eines Erzes unterschiedlich auf die gleiche Zerkleinerungsbeanspruchung reagieren können. Obwohl die Aufbereitung in einigen Fällen angepasst wurde, um diese unterschiedlichen Reaktionen zu nutzen, gab es bislang noch keinen systematischen Ansatz, um die Aufbereitungstechnologie für spezifische Minerale zu optimieren. Dies liegt sowohl am eingeschränkten Verständnis des Reaktionsverhaltens der Minerale als auch an den Grenzen der verfügbaren Verfahren.

Aktuelle Untersuchungen belegen das große Potential selektiver Zerkleinerung in verschiedenen Einsatzbereichen. Das Potential für Selektivität hängt von verschiedenen Merkmalen eines Zerkleinerungssystems ab. Dies sind:

- Merkmale des Aufgabematerials (Festigkeit der verschiedenen Minerale, Verwachsungen, Oberflächenrauheit, Durchsatz, Partikelgrößenverteilung etc.),

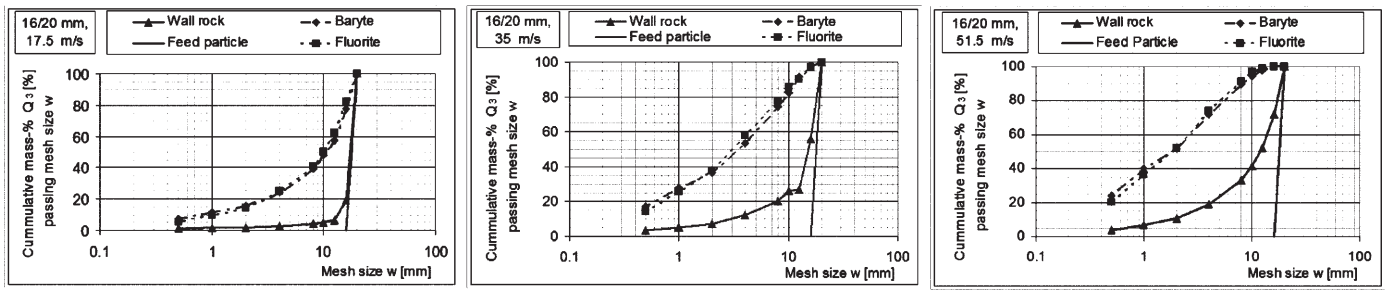

Fig. 3. Cumulative passing distribution of a Fluorite-Barite-ore with feed size 16/20 mm after single-particle comminution at various speeds (left: 17.5 m/s, middle: 35 m/s, right: 51.5 m/s) (4).
Bild 3. Summendurchgangsverteilung eines Fluorit-Baryt-Erzes mit einer Aufgabepartikelgröße 16/20 mm nach Einzelpartikelzerkleinerung bei verschiedenen Geschwindigkeiten (links: 17.5 m/s, Mitte: 35 m/s, rechts: 51.5 m/s) (4).

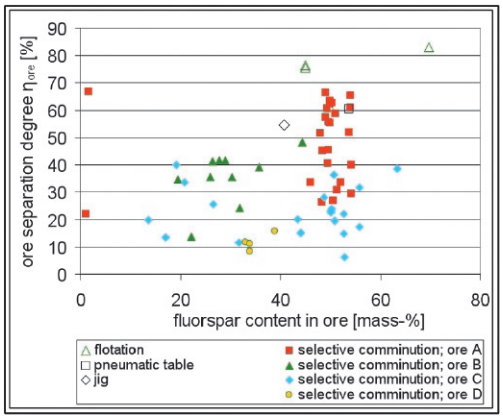

Fig. 4. Comparison of the ore separation degree η_{Ore} for Fluorspar comparing the results of selective comminution with other sorting technologies used for such a material (5).
Bild 4. Vergleich des Erztrennungsgrads η_{Erz} für Fluorit nach einer selektiven Zerkleinerung mit anderen, für dieses Material eingesetzten Sortierverfahren (5).

Resent investigations revealed the significant potential of selective comminution in various fields. The potential for selectivity depends on various characteristics in a comminution system. These influences are:

- feed material characteristics (strength of the various minerals, intergrowth, surface roughness, throughput, particle size distribution etc.);
- product characteristics (particle size distribution, particle shape required, fractures etc.);
- comminution machine characteristics.

Figure 3 shows the influence of just one parameter, the impact speed, on the comminution behaviour of a Fluorite/Barite ore. It is obvious that proportion of the Fluorite and Barite particles to be found in the fine fractions after comminution is relatively high while the majority of the gangue material (mainly gneiss and quartz) remains in the coarse fraction.

It is obvious as well that the difference in comminution behaviour reduces with increasing load speed. While a certain minimum speed has to be reached to crush the material, the speed should not be too high either. At a comminution speed of 17.5 m/s the Fluorite and Barite is already crushed into small pieces the Gneiss and Quartz stays intact. With increasing speed, also the Quartz and Gneiss begin to fracture. The distance between the particle size distribution curves of Fluorite/Barite and the gangue material is reduced. On the other hand, the differences in material behaviour between Fluorite and Barite are rather small. Selectivity between these two ores cannot be observed.

Figure 4 shows that the ore separation degree of the investigated ore reaches into the range of conventional sorting technologies used for Fluorspar ores such as flotation or jigging. Investigations indicated too, however, that the result of selective comminution depends on a number of factors such as ore structure, operating parameters and design of the comminution machine.

The same single particle impact tester was used to investigate selective comminution of a copper porphyry ore (Figure 5). Particles with around 20 mm feed size were tested. With impact

- Produktmerkmale (Partikelgrößenverteilung, gewünschte Partikelform, Anrisse etc.),
- Merkmale der Zerkleinerungsmaschine.

Bild 3 zeigt den Einfluss eines einzigen Parameters, der Prallgeschwindigkeit, auf das Zerkleinerungsverhalten eines Fluorit-Baryt-Erzes. Offensichtlich ist der Anteil der Fluorit- und Barytpartikel im Feinanteil nach der Zerkleinerung relativ hoch, wohingegen die Gangart (vor allem Gneis und Quarz) größtenteils in der Grobfraktion geblieben ist.

Ebenso offensichtlich ist, dass der Unterschied im Zerkleinerungsverhalten mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit geringer wird. Obwohl eine Mindestgeschwindigkeit nötig ist, um das Material aufzubrechen, sollte diese dennoch nicht zu hoch sein. Bei einer Zerkleinerungsgeschwindigkeit von 17,5 m/s zerbrechen Fluorit und Baryt bereits in kleine Teile, während Gneis und Quarz noch intakt bleiben. Mit zunehmender Geschwindigkeit setzt auch das Zerbrechen von Quarz und Gneis ein. Der Abstand zwischen den Partikelgrößenverteilungskurven von Fluorit/Baryt und Gangart nimmt ab. Die Unterschiede im Materialverhalten zwischen Fluorit und Baryt sind dagegen eher gering. Zwischen diesen beiden Erzen kann keine Selektivität festgestellt werden.

Bild 4 zeigt, dass der Trennungsgrad des untersuchten Erzes die Größe desjenigen von konventionellen Sortierverfahren für Fluoriterze, wie der Flotation oder dem Setzen, erreicht. Die Untersuchungen ergaben jedoch auch, dass das Ergebnis selektiver Zerkleinerung von vielen Faktoren, wie etwa dem Erzgefüge, den Betriebsparametern und der Konstruktion der Zerkleinerungsmaschine, abhängt.

Mit der gleichen Einzelpartikel-Schussapparatur wurde die selektive Zerkleinerung eines porphyrischen Kupfererzes untersucht (Bild 5). Partikel mit einer Aufgabegröße um 20 mm wurden bei einer Prallgeschwindigkeit von bis zu 70 m/s getestet. Es wurde deutlich, dass im Grobanteil (+1,25 mm) keine Selektivität festgestellt werden konnte. In den Partikelgrößen unter 1,25 mm gab es jedoch eine signifikante Verschiebung des Kupferanteils hin zu den feineren Fraktionen. Somit könnte unter Zuhilfenahme eines einfachen Klassierschritts ein Vorkonzentrat erzeugt werden. In Betracht käme eine Entfernung der Fraktion knapp unter 1,25 mm, die kaum Kupfer enthält.

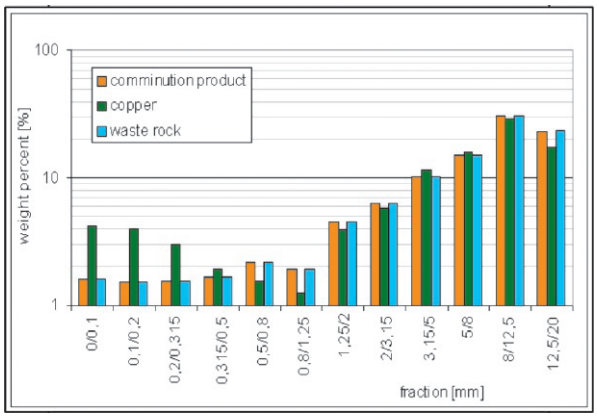

Fig. 5. Selective comminution with a Copper Porphyry (5).
Bild 5. Selektive Zerkleinerung bei einem porpyhrischen Kupfer (5).

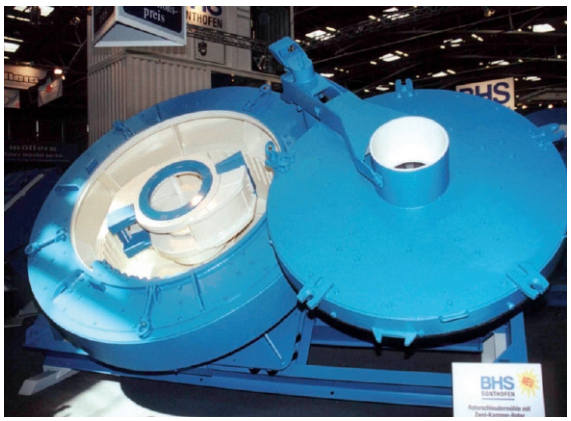

Fig. 6. Vertical shaft impact mill.
Bild 6. Rotorschleuderbrecher. Photo/Foto: BHS

speed up to 70 m/s. It became obvious that in the coarse fraction (+1.25 mm) no selectivity could be observed. In the fractions –1.25 mm, however, there is a significant shift of copper content towards the finer fractions. Thus, by using a simple classifying step a pre-concentrate could be produced.

An elimination of the fraction just below –1.25 mm, hardly containing any copper, might be considered. This material would have to be ground further to the respective particle size required for liberation of the remaining small amounts of copper, consuming more energy than previously required for grinding from blasted product size to –1,25 mm for the same material.

A commercial machine generating single particle impacts in the material is the vertical shaft impact mill (VSM) which is shown in Figure 6.

In special configurations this machine type is widely used in the aggregate industry for the production of crushed sand from rather abrasive aggregates. With certain modifications, it could find wider application in ore mining as well. First ideas for such modifications (Figure 7) were published in (6). Investigations conducted indicate an interesting field for further development of this machine with particular focus on the load characteristics required to achieve selective comminution for particular ores.

Confined particle-bed comminution

Impact loads seem to be particularly beneficial for selective comminution, since the shock waves generated in the ores may be reflected at the grain boundaries and can thus lead to fracturing of the material along those boundaries. This is potentially the

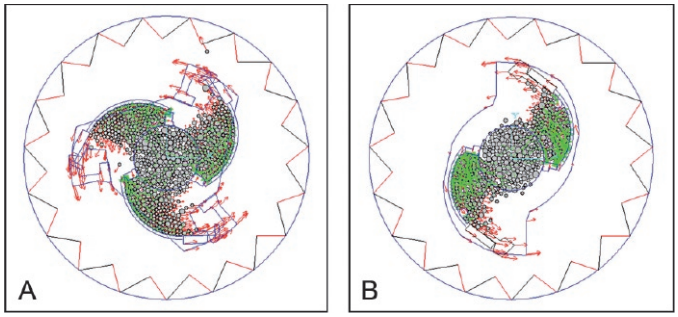

Fig. 7. VSM with three-wing rotor (a), two-wing rotor (b).
Bild 7. VSM mit Dreikammerrotor (a), Zweikammerrotor (b).

Zur Erzeugung einer entsprechenden Einzelpartikel-Prallbeanspruchung im industriellen Maßstab ist ein Rotorschleuderbrecher (Vertical shaft impact mill = VSM) geeignet (Bild 6). In speziellen Ausführungen ist dieser Maschinentyp in der Zuschlagstoffindustrie für die Produktion von Brechsanden aus sehr abrasiven Gesteinen weit verbreitet. Mit einigen Veränderungen könnte er auch im Erzbergbau eine breitere Anwendung finden. Die ersten Anregungen für solche Veränderungen (Bild 7) wurden in (6) veröffentlicht. Durchgeführte Untersuchungen zeigen ein interessantes Feld für die Weiterentwicklung dieser Maschine, mit einem besonderen Fokus auf den Beanspruchungseigenschaften, die für die selektive Zerkleinerung spezieller Erze benötigt werden.

Zerkleinerung im Gutbett

Prallbeanspruchungen scheinen von besonderem Vorteil für die selektive Zerkleinerung zu sein, da die in den Erzen erzeugten Stoßwellen an den Korngrenzen reflektiert werden können, was zu einem Bruch des Materials entlang dieser Grenzen führen kann. Dies ist möglicherweise der Hauptgrund, weshalb die selektive Zerkleinerung bislang vor allem auf Prallbeanspruchungen ausgerichtet war.

Dennoch kann Selektivität auch an anderen Zerkleinerungsmaschinen beobachtet werden. Hierfür muss ein Erz, dessen Minerale die für eine selektive Zerkleinerung geeigneten Eigenschaften aufweisen, in einer Maschine zerkleinert werden, die die entsprechenden Beanspruchungen im Erz mittels geeigneter Prozessparameter erzeugt.

Die Gutbettzerkleinerung wie in Hochdruckwalzenmühlen (HPGR) oder Vertikalrollenmühlen (VRM) bietet ein breites Spektrum an Möglichkeiten für die selektive Zerkleinerung, da die Parameter sehr präzise gesteuert werden können (Bild 8). So ist es möglich, dass ein Teil der Minerale eines Erzes zerbricht, während andere Minerale unbeschädigt bleiben (7). Auf diese Weise kann durch eine einfache anschließende Klassierstufe ein Vorkonzentrat erzeugt werden.

Im Vergleich zum konventionellen SAG-/Kugelmahlverfahren ermöglicht die Gutbettzerkleinerung hohe Energieeinsparungen. Betrachtet man lediglich den Zerkleinerungsprozess im offenen Kreislauf, können diese Einsparungen bei Nutzung einer Walzenmühle bis zu 50 % ausmachen. In Kombination mit einem Sichter im geschlossenen Kreislauf können die Einsparungen immer noch 10–25 % betragen (8). Der genaue Einsparwert hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren wie der Festigkeit des Erzes, der Rezirkulationsrate des Mahlguts (9) und den Prozessparametern der verglichenen Mühlen ab. Eine Kombination aus Walzenmühle und Rührwerksmühle oder der Einsatz von Walzenmühlen zur Fertigmahlung könnten ebenfalls interessante Optionen darstellen.

Trockenzerkleinerung

Ein anderer Aspekt beim Einsatz der Gutbettzerkleinerung ist die Trockenaufbereitung von Erzen. Hier sollten nicht nur die offensichtlichen Einsparungen bei Wasserverbrauch und -aufbereitung betrachtet werden. Auch auf die mögliche Steigerung des Ausbringens muss hingewiesen werden.

Das gesteigerte Ausbringen von Kupfer in Haufenlaugungsverfahren durch das Mahlen in Walzenmühlen wurde von Baum

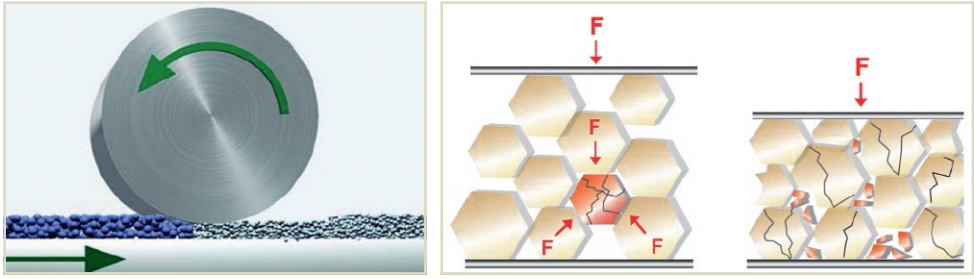

Fig. 8. Confined particle-bed comminution.
Bild 8. Gutbettzerkleinerung.
Source/Quelle: Loesche

main reason why selective comminution was so far concentrated mainly on impact loads.

Nevertheless, selectivity can be observed with other comminution machines too, if an ore comprising minerals with characteristics suitable for selective comminution is comminuted on a machine inducing the appropriate loads on the ore using suitable process parameters.

Confined particle-bed comminution as in high pressure grinding roller mills (HPGR) or vertical roller mills (VRM) offers a wide range of options for selective comminution since the parameters can be rather precisely controlled (Figure 8) allowing for a certain portion of the minerals an ore is comprising to fracture while the other minerals stay intact (7). This way, by a simple consecutive classification step, a pre-concentrate can be generated.

Compared with the conventional SAG-/ball mill process, confined particle-bed comminution offers substantial energy savings. Just considering the comminution process in open circuit operation, these savings may reach up to 50 % using HPGR. In combination of the mill with an air classifier in a closed circuit, the savings may still reach 10–25 % (8). The exact savings value depends on a variety of influences such as ore strength, recycling rate of mill product (9) and the process parameters of the mills compared. A combination of HPGR with stirred media mills or the application of HPGR for finish grinding could also be an interesting option.

Dry comminution

Another aspect of the application of confined particle-bed comminution is the dry processing of the ores. Not only should the obvious savings in water consumption and water processing costs be considered. It is also important to mention the potential increase in recovery.

While increased recovery of copper in heap leaching processes by HPGR grinding was shown by Baum in 1996, the application of VRM for ore grinding was introduced more recently. Reichert showed that increased recovery of iron and tungsten was achieved by grinding the respective ores by VRM instead of ball milling before flotation (10). When comparing the liberation ration of magnetite ores from Mertainen and Kiruna, Sweden, processed on the conventional ball mill circuits with identical material ground at a VRM it could be established that the liberation ratio was improved by more than 1% (Figure 9). With Scheelite from Mittersill, Austria, the liberation ratio even improved by 4 %.

In-depth ore analysis by Quantitative Microstructural Analysis

An in-depth ore analysis is the basis for the development of new processing technologies or the application of the right one for a

schon 1996 aufgezeigt. Der Einsatz von Wälzmühlen zum Erzmahlen wurde dagegen erst vor kurzem eingeführt. Reichert zeigte, dass durch das Mahlen der jeweiligen Erze in Wälzmühlen statt in Kugelmühlen vor der Flotation ein höheres Ausbringen von Eisen und Wolfram erzielt wurde (10). Verglichen mit dem Aufschlussgrad von Magnetiterzen aus Mertainen und Kiruna, Schweden, die im konventionellen Kugelmühlenkreislauf aufbereitet wurden, konnte durch eine Vermahlung des gleichen Materials in Wälzmühlen eine Verbesserung des Aufschlussgrads um mehr als 1 % festgestellt werden (Bild 9). Bei Scheelit aus Mittersill, Österreich, verbesserte sich der Aufschlussgrad sogar um 4 %.

Fundierte Erzanalyse mittels Quantitativer Gefügeanalyse

Eine fundierte Erzanalyse ist die Grundlage für die Entwicklung neuer oder die Auswahl des für ein bestimmtes Erz passenden Aufbereitungsverfahrens. Neue Verfahren ermöglichen, „das Erz zu lesen“, seine Zusammensetzung zu verstehen und daraus die geeigneten Verfahren zur effizientesten Aufbereitung abzuleiten.

Mineral Liberation Analyser (MLA), Qemscan und Tomographie sind nur einige Beispiele für Verfahren, die in den letzten Jahren nicht nur in die Labore von Forschungsinstituten, sondern auch von großen Bergbauunternehmen Einzug gehalten haben.

Die meisten dieser Methoden sind gut entwickelt und erprobt. Die Kosten für die Geräte wie für die Tests selbst sind allerdings für mittlere und kleine Rohstoffunternehmen und Forschungsinstitute nach wie vor recht hoch.

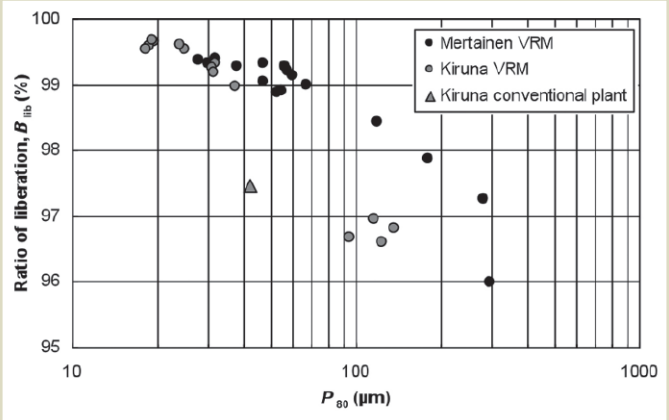

Fig. 9. Measured ratio of liberation over measured P_{80} of each examined grinding product (10).
Bild 9. Gemessener Aufschlussgrad je gemessene P_{80} für jedes untersuchte Mahlprodukt (10).

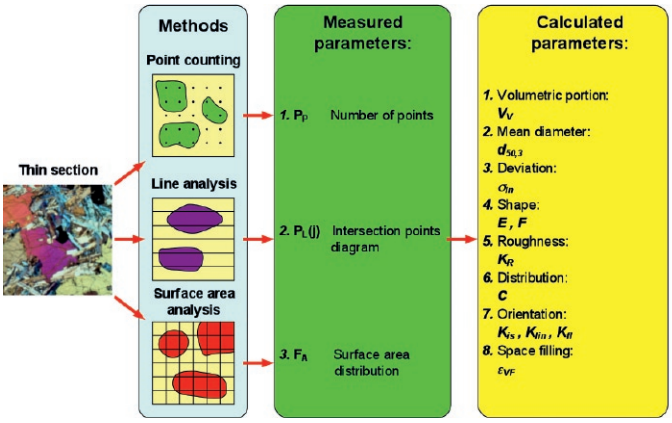

Fig. 10. Quantitative Microstructural Analysis (QMA).
Bild 10. Quantitative Gefügeanalyse (QGA).

particular ore. New technologies are available to "read the ore", to understand its composition and derive the right technologies to process it the most efficient way.

The Mineral Liberation Analyser (MLA), Quemscan, tomography to name just a few technologies which found their ways into the laboratories not only of research institutions, but also large mining companies during the last years.

Most of these methods are well elaborated and proven. Nevertheless, the cost of the equipment and the tests themselves are still rather high for medium and small size resource companies and research institutions.

Quantitative Microstructural Analysis (QMA) could be an alternative for the analysis of structures large enough for optical microscopes. QMA is based on methods applied in geological sciences. Different to the verbal descriptions commonly used there, however, the QMA derives quantitative figures describing the characteristics of rocks and ores in a way suitable for judgment on mineral processing (Figure 10). Thus, it helps to find the most efficient mineral processing technology, among those a technology for selective comminution for instance.

A sample, if possible collected from the deposit with recorded in-situ orientation, is cut at three orthogonal sides. Either thin slices or polished sections are prepared depending on the purpose of the investigation. The three surfaces are analysed and a virtual 3D-model of the ore is composed (Figure 11).

This process is usually combined with an analysis of compressive and tensile strength of the material using a point-load tester. The hardness of the various phases of the mineral is determined with a Vickers tester. The latter also allows conclusions with regard to the toughness of the material, particular important for many comminution processes.

The 3D-model derived (Figure 12) allows conclusions on the behaviour of the ore or the rock under certain load conditions. With the combination of the equivalent quartz content and the toughness expectations with regard to the abrasivity of the material can be given and conclusions for wear systems comprising comminution machine and material can be drawn.

Conclusions

The portion of a resource defined as a reserve in a deposit is determined by the cut-off grade. The operator determines a cut-off

Eine Alternative für die Untersuchung von Gefügen, die groß genug für Lichtmikroskope sind, könnte die Quantitative Mikrostrukturanalyse (QMA) sein. Sie beruht auf Methoden der Geowissenschaften. Im Gegensatz zu den dort geläufigen verbalen Beschreibungen liefert die QMA quantitative Angaben zur Beschreibung von Gesteins- und Erzeigenschaften, die sich zur Beurteilung der Aufbereitung eignen (Bild 10). So unterstützen sie bei der Suche nach dem effizientesten Aufbereitungsverfahren, darunter etwa auch Verfahren für die selektive Zerkleinerung.

Die Probe sollte möglichst mit einem Vermerk über die Raumlage aus der Lagerstätte entnommen werden. Je nach Untersuchungszweck werden aus drei orthogonalen Seitenflächen Dünnschliffe oder polierte Anschliffe präpariert. Die drei Schliffe werden analysiert und ein virtuelles 3D-Modell des Erzes erstellt (Bild 11).

Dieses Verfahren wird üblicherweise mit einer Analyse der Druck- und Zugfestigkeit des Materials durch ein Punktlastprüfgerät verbunden. Die Härte der verschiedenen Mineralphasen wird mit einem Vickers-Prüfgerät bestimmt. Letzteres erlaubt auch Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Zähigkeit des Materials, die für viele Zerkleinerungsverfahren besonders wichtig ist.

Das abgeleitete 3D-Modell ermöglicht Schlüsse auf das Verhalten von Erz oder Gestein unter bestimmten Beanspruchungsbedingungen. In Verbindung mit dem äquivalenten Quarzgehalt und der Zähigkeit können Prognosen im Hinblick auf die Abrasivität des Materials formuliert werden. Ebenso lassen sich Schlussfolgerungen für das Verschleißsystem, bestehend aus Zerkleinerungsmaschine und Material, ziehen.

Schlussfolgerungen

Die Bauwürdigkeitsgrenze legt fest, welcher Teil einer Ressource als Vorrat in einer Lagerstätte definiert wird. Der Betreiber bestimmt eine Bauwürdigkeitsgrenze auf Grund der Merkmale der Lagerstätte und wirtschaftlicher sowie technischer Parameter. Letztere können durch innovative Verfahren beeinflusst werden. Moderne Verfahren wie die selektive Zerkleinerung oder die Gutbettzerkleinerung in der Erzaufbereitung sind in Sicht. Sie zielen auf Energieeffizienz, erhöhtes Ausbringen, bessere Nutzung von Ressourcen, Prozessstabilität, Sicherheit und Umweltschutz.

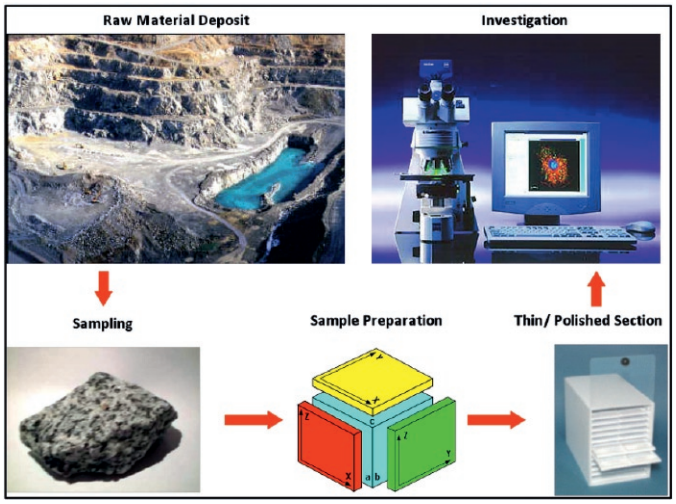

Fig. 11. Sample processing for QMA.
Bild 11. Probenaufbereitung für die QMA.

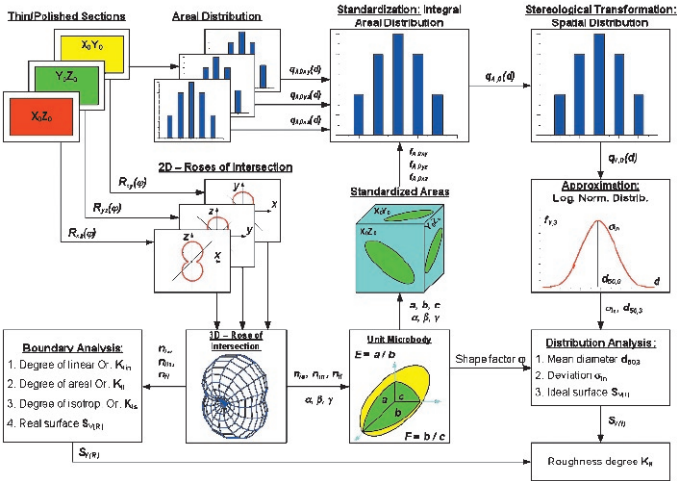

Fig. 12. Determination of mineral characteristics using QMA.
Bild 12. Bestimmung der Mineraleigenschaften mittels QGA.

grade by the deposit characteristics, economic as well as technological parameters. The latter can be influenced by innovative processes. Advanced technologies, such as selective comminution or confined particle-bed comminution are on the horizon focusing on energy efficiency, increased recovery, improved use of resources, process stability, safety and protection of environment.

Modern tools for mineral analysis such as MLA or QMA allow a better understanding of the characteristics of a mineral and its behaviour in comminution processes. A careful selection of the right mineral processing route and its permanent monitoring based on such better understanding of the minerals behaviour allows a more efficient processing and, hence, a lowering of economically viable cut-off grades resulting in increased reserves.

Moderne Instrumente zur Mineralanalyse wie die MLA oder die QMA ermöglichen ein besseres Verständnis der Eigenschaften eines Minerals und seines Verhaltens in Zerkleinerungsprozessen. Durch die sorgfältige Wahl des richtigen Aufbereitungsprozesses und seine fortlaufende Überwachung dank dieser besseren Kenntnis des Verhaltens der Minerale wird eine effizientere Aufarbeitung möglich. Diese wiederum führt zu einer Absenkung der wirtschaftlich tragfähigen Bauwürdigkeitsgrenzen und somit zu einer Erhöhung der Vorräte.

References / Quellenverzeichnis

(1) CIM Standing Committee on Reserve Definitions (2014): CIM DEFINITION STANDARDS - For Mineral Resources and Mineral Reserves. Prepared by the CIM Standing Committee on Reserve Definitions. Adopted by CIM Council on May 10, 2014.

(2) Lowell, J. D., Guilbert, J. M.: Lateral and vertical alteration-mineralisation zoning in porphyry ore deposits. Economic Geology, 65, pp 373 – 408.

(3) Schodde, R. (2010): The key drivers behind resource growth: an analysis of the copper industry over the last 100 years. SME. 2010 MEMS Conference Mineral and Metal Markets over the Long Term, Phoenix. 2010, Mar 03.

(4) Hesse, M., Lieberwirth, H. (2014a): Selektive Zerkleinerung zur Fluorit/Baryt-Anreicherung bei der Aufbereitung von Bergbauhalden. Chemie Ingenieur Technik, 86(6), S. 797 – 805.

(5) Hesse, M., Lieberwirth, H. (2014b): Selective comminution for preconcentration in mineral processing. National Minieral Resources University. Conference of Young Scientists, St. Petersburg. April 2014.

(6) Al-Khasawneh, Y. (2009): Beitrag zur Ermittlung von Zielgrößen für die Auslegung und den Betrieb von Rotorschleuderbrechern mit der Diskret-Äquivalent-Element-Methode (DEEM) (Dissertation). Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg.

(7) Abouzeid, A.-Z. M., Fuerstenau, D. W. (2009): Grinding of mineral mixtures in high-pressure grinding rolls. International Journal of Mineral Processing, 93, pp 59 – 63.

(8) Michaelis, H. v. (2009): How energy efficient is HPGR? The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. World Gold Conference, Golden, Colorado, USA.

(9) Villanueva, A., Banini, G., Hollow, J., Butar-Butar, R., Mosher, J. (2011): Effects of HPGR introduction on grinding performance at PT Freeport Indonesia's concentrator. SME. SAG Conference, Vancouver. 2011, Nov 25.

(10) Reichert, M., Gerold, C., Fredriksson, A., Adolfsson, G., Lieberwirth, H. (2015): Research of iron ore grinding in a vertical-roller-mill. Minerals Engineering, 73, pp 109 – 115.

Author / Autor

Prof. Dr.-Ing. Holger Lieberwirth, Institute of Mineral Processing Machines, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg/Germany