

Hochauflösende on-line Partikelgrößenanalyse von hoch konzentrierten Erzschlamm

High resolution on-line particle size analysis on highly concentrated ore slurries

Analyse granulométrique haute résolution en ligne de boues de minerais de haute concentration

Análisis en línea del tamaño de grano de lodos minerales de alta concentración

Dipl.-Ing. Axel Pankewitz und Dipl.-Ing. Christian Behrens, Clausthal-Zellerfeld (D)*

Zusammenfassung Die Partikelgrößenverteilung gemahlener Materialien ist von entscheidender Bedeutung für nachgeschaltete Prozesse wie Flotation, Abscheidung, Trocknung usw. Um einerseits die Wirksamkeit des Verfahrens und andererseits die Qualität des Endprodukts zu optimieren, ist eine frühe Steuerung der Mahl- bzw. Klassierungsstufe wichtig. Das mit Ultraschall arbeitende Partikelgrößenanalysegerät OPUS ist in der Lage, eine on-line Partikelgrößenverteilung festzustellen sowie eine Messung des Feststoffgehalts mineralischer Schlämme wie z. B. Eisenerz, Kupfererz, Flussspat bzw. Quarzsand und Tonerde direkt in einer rauen Prozessumgebung durchzuführen. Das Gerät kann eine Partikelgrößenverteilung von 31 Größenklassen feststellen und kann für Teilchen aus dem Nanometerbereich bis zu einigen Millimetern eingesetzt werden. Zwischen den 31 Messstellen sind beliebige Interpolationen möglich. Die normalen Rückstandswerte stimmen ausgezeichnet mit den Methoden der off-line Partikelgrößenanalyse wie z. B. Siebanalysen oder Laserbeugung überein. OPUS ist eine robuste in-line Sonde aus rostfreiem Stahl. Die angewendete Technik ist unabhängig von Fließdynamik, Verunreinigung, optischen Eigenschaften, Schwingungen, Drücken oder Wechseln im Feststoffgehalt des jeweiligen Produkts. Über eine Reihe von Schnittstellen sind alle Daten des Geräts auf dem PC der Anlage oder in der Anlage der Prozesssteuerung verfügbar.

Summary The particle size distribution of ground minerals is of decisive importance for downstream processes like flotation, separation, drying or others. In order to optimize the process efficiency on one hand and the final product quality on the other hand an early control of the grinding or classification stage is essential. The ultrasound based particle size analyser OPUS is capable of performing on-line particle size distribution (PSD) and solid content measurement of mineral slurries such as iron ore, copper ore, fluorspar, or quartz sand and alumina directly in heavy and rough process environment. The instrument provides a PSD of 31 size classes and can be applied for particles from nanometer range up to several millimetres. Arbitrary interpolations in between the 31 measured points are available. Typical residue values show an excellent agreement to off-line particle size analysis methods such as e.g. sieve analyses or laser diffraction. OPUS is designed as rugged in-line probe made from stainless steel. The applied technique is independent of product flow dynamics, contamination, optical properties, vibrations, pressures or changes in solid concentrations. The instrument provides all data on the system's PC or on the process control system by a variety of interfaces.

Résumé La distribution granulométrique des matériaux broyés revêt une importance décisive pour les opérations de traitement consécutives, telles que flottation, séparation, séchage etc. En vue d'optimiser, d'une part, l'efficacité du procédé et, d'autre part, la qualité du produit final, il importe donc de définir tôt les phases de broyage ou de classification. L'appareil d'analyse granulométrique à ultrasons OPUS permet de déterminer en ligne la distribution granulométrique et de mesurer la teneur en solides des boues minérales, de minerai de fer, minerai de cuivre, fluorine ou sable siliceux et alumine, par exemple, et ce directement dans un environnement de processus sévère. L'appareil peut déterminer la distribution granulométrique de 31 fractions granulométriques et il peut être utilisé pour des particules de l'ordre nanométriques jusqu'à quelques millimètres. Des interpolations quelconques sont possibles entre les 31 points de mesure. Les valeurs normales de refus présentent une excellente concordance avec les méthodes de l'analyse granulométrique hors ligne, telles que les analyses sur tamis ou par diffraction laser. OPUS est une sonde robuste du type in-line en acier inoxydable. La technique appliquée est indépendante de la dynamique d'écoulement, des teneurs en impuretés, des propriétés optiques, vibrations, pressions ou variations de la teneur en solides du produit respectif. Par une série d'interfaces, toutes les données de l'appareil sont disponibles sur le PC de l'installation ou dans l'installation de contrôle-commande du procédé.

Resumen La distribución del tamaño del grano de materiales triturados es de importancia decisiva para los procesos intercalados posteriormente tales como la flotación, la precipitación, el secado, etc. A fin de optimizar por un lado la eficacia del proceso y por otro lado la calidad del producto final es importante llevar a cabo un control temprano de la etapa de trituración y de clasificación. El dispositivo de análisis de tamaño del grano, OPUS, que opera mediante ultrasonidos es capaz de constatar en línea la distribución del tamaño del grano así como de realizar una medición del contenido de material sólido de lodos minerales como p.ej. el mineral de hierro, mineral de cobre, espato flúor así como arena de cuarzo y óxido de aluminio directamente en un entorno de procesos bajo condiciones duras. El dispositivo es capaz de constatar una distribución del tamaño del grano de 31 categorías de magnitud y puede emplearse para partículas en el ámbito de nanómetros hasta algunos milímetros. Entre los 31 puntos de medición es posible realizar diferentes interpretaciones. Los valores normales de residuos coinciden perfectamente con los métodos del análisis del tamaño del grano offline como por ejemplo los análisis de cribado o difracción por láser. OPUS es una robusta sonda inline compuesta por acero inoxidable. La técnica aplicada es independiente de la dinámica de flujo, las impurezas, las características ópticas, las oscilaciones, la presión o los cambios del contenido de materias sólidas en el producto correspondiente. A través de una serie de interfaces todos los datos del dispositivo están disponibles en el PC de la instalación o en la misma instalación del control de procesos.

*) Sympatec GmbH, Clausthal-Zellerfeld (D)

1. Einleitung

Für die nachgeschaltete Aufbereitung von Erzschlämmen ist die Partikelgrößenverteilung nach der Mahl- und Zyklonstufe von entscheidender Bedeutung. Schlämme mit übermäßig viel groben Teilchen können kaum mechanisch aufgeschwemmt werden oder sie benötigen viel und teure Lösungsmittel für einen chemischen Aufschluss. Normalerweise erfordert auch der anschließende Schritt der Flotation eine spezifische Partikelgrößenverteilung für einen reibungslosen Betrieb. Um Grobpartikel zu vermeiden wird entweder die Mahldauer verlängert oder die Aufgabemenge wird verringert, was einen höheren Energieverbrauch und kleinere Durchsätze zur Folge hat. Andererseits beeinträchtigen zu feine Schlämme ihren Transport und erhöhen den Aufwand für das Trocknen.

Ein wirksamer Verfahrensablauf kann durch die Steuerung der Partikelgrößenverteilung nach der Mühle erreicht werden, wodurch eine ideale Verteilung ermöglicht wird.

Off-line Methoden sind aufgrund der Zeitverzögerung, die aufgrund der Probenahme und Analysenzeiten zu Stande kommt, nicht geeignet, die erforderlichen Informationen in Echtzeit für die Prozesssteuerung zur Verfügung zu stellen. Andererseits basieren on-line Geräte meistens auf optischen und bestimmten mechanischen Verfahren, die prinzipiell nur in hochgradig verdünnten Suspensionen anwendbar sind und demzufolge eine extensive Probenahme und einen hohen Verdünnungsaufwand erfordern, was die Genauigkeit der Ergebnisse beeinträchtigen kann. Die Verdünnung von breiten Partikelgrößenverteilungen führt in der Regel zu einer nicht repräsentativen Probe und stellt folglich nicht die wirkliche Partikelgrößenverteilung im Produktstrom dar. Außerdem sind optische Geräte sehr empfindlich gegenüber Verunreinigungen der Sensorik.

Anstelle von Licht (elektromagnetischen Wellen) arbeitet die Ultraschallextinktion (USE) mit Schallwellen und überwindet damit die Grenzen optischer Geräte. Die USE hängt nur von den akustischen Eigenschaften des zu analysierenden Produkts ab. Diese akustischen Eigenschaften können leicht in Vorversuchen im Labor oder sogar an Ort und Stelle während der Installation bestimmt werden. Solange die Dichte zwischen den Suspensionsmedien und den Feststoffteilchen unterschiedlich ist, kann die USE angewendet werden.

Die USE arbeitet in völlig trüben Medien mit Konzentrationen von bis zu 70 Vol.-% und gestattet die Konstruktion robuster Sensoren für den rauen Einsatz im industriellen Prozessumfeld.

Im nachstehenden Artikel werden das auf Ultraschallextinktion basierende OPUS-System und seine erfolgreiche on-line Anwendung für trübe Suspensionen und Schlämme, wie sie z. B. in der Aufbreitung von Eisenerz, Flussspat, Kupfer, Tonerde oder Quarzsand vorliegen, beschrieben.

2. Ultraschallextinktion mit OPUS

Die Grundlagen für OPUS (On-line Partikelgrößenanalyse mittels Ultraschall-Spektroskopie) wurden 1988 an der Universität Karlsruhe gelegt. Anfang der 1990er-Jahre entwickelte die Sympatec GmbH das OPUS-System als robuste Prozessmesssonde.

2.1 Prinzip

Bild 1 stellt das Prinzip zur Bestimmung der frequenzabhängigen Ultraschallextinktion (USE) schematisch dar.

Ein elektrischer Hochfrequenzgenerator wird an einen piezoelektrischen Ultraschall-Messumformer angeschlossen. Die erzeugten Ultraschallwellen werden in die Suspension eingeleitet und treten mit den Teilchen der Suspension in Wechselwirkung. Nachdem die Ultraschallwellen die Messzone durchlaufen haben, werden sie von einem Ultraschalldetektor empfangen und wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die Extinktion der Ultraschallwellen wird aus dem Verhältnis der Signalamplituden auf dem Generator zu denen auf der Seite des Detektors berechnet.

1. Introduction

For the down stream processing of ore slurries the particle size distribution behind the milling and cyclone stage is of decisive importance. Slurries with excessively coarse particle sizes hardly can be pulped mechanically or require extensive and expensive solvents for chemical pulping. Usually, the subsequent flotation step requires a specific particle size distribution for smooth operation, too. In order to avoid over size particles, an extended grinding time or lower feed rates are applied which require higher energy consumption and smaller throughputs. On the other hand, slurries which are too fine affect the handling of the pulps and extend the effort for drying.

An efficient process operation can be obtained by controlling the particle size distribution behind the mill and allows the design of ideal distributions.

Off-line methods are not suitable for providing the required size information due to the time lag needed to perform the analyses. On-line instruments on the other side are mostly based on optical and certain mechanical methods, which by principle only can operate in highly diluted suspensions and thus demand an extensive sampling and dilution effort that might affect the accuracy of the results. Dilution of broadly distributed particle sizes leads to a non representative sample and thus do not represent the real PSD in the product flow. Further, optical instruments are very susceptible to contamination of the optics.

Ultrasonic extinction (USE) applies sound waves instead of light and therefore overcomes the limitations of optical instruments since USE is only depend on the acoustic properties of the product to be analysed. The acoustic properties can be determined easily in lab pre-installation trials or even on site during the installation. As long as the density contrast between the suspension media and the solid particles shows a difference USE can be applied.

USE operates in totally opaque media with concentrations up to 70 % vol. and allows robust instruments designs particularly made for tough industrial environments.

The following article describes the Ultrasonic Extinction based OPUS sensor and its successful on-line application for opaque pulp slurries such as iron ore, flour spar, copper, alumina or quartz sand.

2. Ultrasonic extinction – OPUS

The fundamentals for OPUS (On-line Particle size analyses using Ultrasonic Spectroscopy) were founded in 1988 at the University of Karlsruhe. In the early 1990th Sympatec GmbH developed the OPUS sensor in a robust and industrial design.

2.1 Principle

The design of an instrument for the determination of frequency dependent Ultrasonic Extinction (USE) is schematically presented in **Fig. 1**.

An electrical high frequency generator is connected to a piezoelectric ultrasonic transducer. The generated ultrasonic waves are coupled into the suspension and interact with the suspended particles. After passing the measuring zone the ultrasonic waves are received by an ultrasonic detector and converted into an electrical signal. The extinction of the ultrasonic waves is calculated from the ratio of the signal amplitudes on the generator and detector side.

The Ultrasonic Extinction of a suspension of mono-disperse particles can be described by the Lambert-Beer law according to Riebel [1].

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} = \Delta l \cdot C_{pf} \cdot K(f_i, x) \quad (1)$$

The Extinction $-\ln(I/I_0)$ at a given frequency f_i is linear dependent on the thickness of the suspension layer Δl , the projection area-concentration C_{pf} and the extinction coefficient K .

Die Ultraschallextinktion einer Suspension monodisperser Teilchen kann nach Riebel [1] durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben werden.

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} = \Delta l \cdot C_{PF} \cdot K(f_i, x) \quad (1)$$

Die Extinktion $-\ln(I/I_0)$ bei einer gegebenen Frequenz f_i hängt linear von der Stärke der Suspensionsschicht Δl , der Konzentration der Partikelprojektionsflächen C_{PF} und dem Extinktionskoeffizienten K ab.

In einem polydispersen System überlagern sich die Extinktionen aller Teilchen:

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} = \Delta l \cdot C_{PF} \cdot \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} K(f_i, x) \cdot q_2(x) dx \quad (2)$$

Das Integral in Gleichung 2 kann durch eine Summe als erste Näherung ersetzt werden. Die Konzentration Partikelprojektionsflächen kann durch die Partikelvolumenkonzentration und das 1. Moment der $q_2(x_j)$ -Verteilung ersetzt werden:

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} \cong \Delta l \cdot 1.5 \cdot c_V \cdot \frac{1}{M_{1,2}} \sum_j K(f_i, x_j) \cdot q_2(x_j) \Delta x \quad (3)$$

Wenn nun Extinktionsmessungen bei verschiedenen Frequenzen durchgeführt werden, führt das zu einem linearen Gleichungssystem:

$$\begin{pmatrix} m(f_1) \\ \vdots \\ m(f_j) \end{pmatrix} = \Delta l \cdot 1.5 \cdot \frac{1}{M_{1,2}} \cdot C_V \cdot \begin{pmatrix} K_{1,1} & \dots & K_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{j,1} & \dots & K_{j,j} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_{2,1} \Delta x_1 \\ \vdots \\ q_{2,j} \Delta x_j \end{pmatrix} \quad (4)$$

Dieses Gleichungssystem ist numerisch instabil und wird durch geeignete Algorithmen gelöst werden.

2.2 Die OPUS-Sonde

Um eine Partikelgrößenverteilung mit 31 Klassen zu erhalten, werden die Dämpfungen bei 31 Frequenzen als eine Messung innerhalb von 60 Sekunden (typ.) durchgeführt. Das führt zu einem Dämpfungsspektrum, das exemplarisch in **Bild 2** dargestellt wird. Mit der Kenntnis der akustischen Eigenschaften, die durch die in **Bild 3** exemplarisch für Eisenerz gezeigte Extinktionsfunktion beschrieben werden, werden die Partikelgrößenverteilung und die Feststoffkonzentration aus dem effektiven Signal ΔD berechnet. Der gesamte Messbereich von OPUS erstreckt sich von 0,01 bis 3000 μm . Der angewendete Messbereich kann je nach Produktanforderungen eingestellt werden. Er sollte jedoch einen Faktor von 1000 zwischen minimaler und maximaler Partikelgröße nicht übersteigen (z. B. 1–1000 μm für Erze).

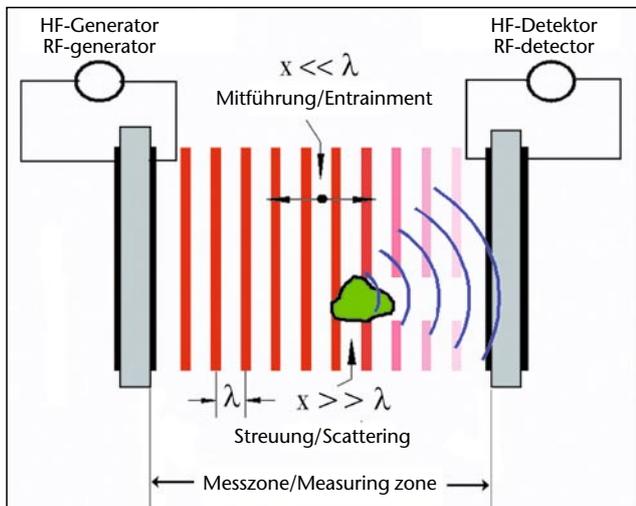


Bild 1: Schematische Darstellung des Messprinzips
Fig. 1: Schematic of the measurement principle

In a poly-disperse system the extinction of single particles overlay:

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} = \Delta l \cdot C_{PF} \cdot \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} K(f_i, x) \cdot q_2(x) dx \quad (2)$$

The integral in equation 2 can be substituted by a sum as a first approach and the project area concentration can be substituted by the particle concentration and the 1st momentum of the $q_2(x_j)$ distribution:

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} \cong \Delta l \cdot 1.5 \cdot c_V \cdot \frac{1}{M_{1,2}} \sum_j K(f_i, x_j) \cdot q_2(x_j) \Delta x \quad (3)$$

If now extinction measurements are performed at various frequencies, this results in a linear equation system:

$$\begin{pmatrix} m(f_1) \\ \vdots \\ m(f_j) \end{pmatrix} = \Delta l \cdot 1.5 \cdot \frac{1}{M_{1,2}} \cdot C_V \cdot \begin{pmatrix} K_{1,1} & \dots & K_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{j,1} & \dots & K_{j,j} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_{2,1} \Delta x_1 \\ \vdots \\ q_{2,j} \Delta x_j \end{pmatrix} \quad (4)$$

This equation system is numerically unstable and must be solved by suitable algorithms.

2.2 OPUS probe

In order to obtain a particle size distribution with 31 classes, the attenuation at 31 frequencies is taken as one measurement within 60 s (typically). This leads to an attenuation spectrum exemplarily shown in **Fig. 2**. With the knowledge of the acoustic properties represented by the extinction function as shown in **Fig. 3** (e.g. iron ore), the particle size distribution and solid concentration is calculated from the effective signal ΔD . The entire measuring range of OPUS covers 0.01 to 3,000 μm . The applied measuring range can be set according to the demands of the product and should not exceed a factor of 1,000 between the minimum and maximum size range (i.e. 1–1,000 μm for ore applications).

Fig. 4 presents the Sympatec OPUS System. The instrument is designed as probe and can be adapted to nearly all kind of process pipes or vessels using a DN 100 flange or process adapters. OPUS is designed for fully automatic real-time particle size analysis in process environment. The system is rated IP 56 and complies with the regulation of the CE label regarding electromagnetic compatibility (EMC) and electrical security to the applicable ISO standards.

OPUS is available in different lengths from 330 to 3,500 mm (measured from flange to tip) and thus, the instrument can be applied to a variety of processes. For smaller pipe diameters adapters covering process pipes down to 10 mm (DN 10) are available. OPUS operates under process conditions and fulfils the below listed requirements such as

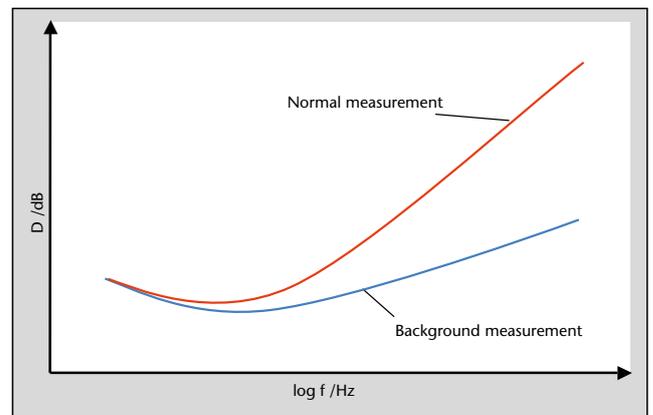


Bild 2: Dämpfungsspektren des Hintergrunds und normale Messung
Fig. 2: Attenuation spectra of the background and normal measurement

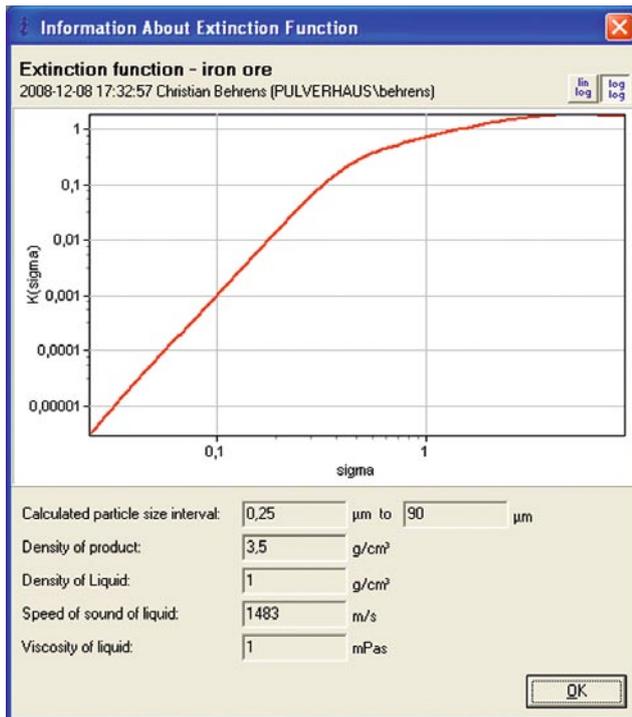


Bild 3: Typische Extinktionsfunktion (hier: Eisenerz)
Fig. 3: Typical extinction function (here: iron ore)

Bild 4 zeigt das OPUS-System von Sympatec. Das Gerät ist als Sonde konstruiert und kann in nahezu alle Rohrleitungen oder Behälter integriert werden. Hierzu stehen verschiedene Prozessadapter zur Verfügung. OPUS ist für eine vollautomatische Partikelgrößenanalyse in Echtzeit in Prozessumgebung ausgelegt. Das Gerät hat die Schutzart IP 56 und entspricht den Bestimmungen des CE-Labels bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und der elektrischen Sicherheit der anwendbaren ISO Normen.

OPUS ist in unterschiedlichen Baulängen von 300 bis 3500 mm erhältlich (gemessen vom Flansch bis zur Spitze) und kann somit in unterschiedlichste Prozesse eingesetzt werden. Für kleinere Rohrdurchmesser bis hinunter zu einer Nennweite von 10 mm sind Prozessadapter verfügbar. OPUS arbeitet unter Prozessbedingungen und erfüllt u.a. die nachstehenden Anforderungen:

- Hohe Feststoffkonzentration von 1 bis 70 Vol.-% (reiner Feststoff)
- Hohe Temperaturen zwischen 0 und 120 °C
- Breiter Messbereich von 0,01 bis 3000 µm
- Leichte Anpassung durch eine große Palette von Prozessadaptern von NW 10 bis NW 200 und unterschiedliche Sondenlängen von 330 bis 3500 mm
- pH-Werte zwischen 1 und 14
- Leicht zugänglich (z. B. für Kopplungsstellelement und Reiniger)
- Hohe Viskositäten
- Druckbereich von 0 bis 40 bar
- Sehr verschleißfest durch Verwendung von Edelstahl (SS316), Teflon®, Sigradur® für alle produktberührten Teile
- Schutzarten: IP56 (Standard), Ex-p ATEX 100 G2 EEx p T5 (Option)

2.3 Verfahren auf Volumenbasis

Ähnlich der Laserbeugung ist auch die Ultraschallextinktion ein volumenbasiertes Verfahren, das die Messung einer relativen Materialmenge in Kubikmetern oder Kilogramm gestattet.

Bild 5 zeigt eine typische Partikelgrößenverteilung in Form einer auf die Masse bzw. das Volumen bezogenen Summenverteilung



Bild 4: Technische Realisierung der Ultraschallextinktion bei der on-line Partikelgrößenanalyse
Fig. 4: Technical realization of Ultrasonic Extinction for on-line particle size analysis

- High solid concentration 1–70 % vol. (pure solid)
- High temperatures between 0–120 °C
- Broad measuring range 0.01–3,000 µm
- Easy adaptation by a large variety of process adapters from DN 10–200 and different probe lengths from 330–3,500 mm
- pH-values between 1–14
- Easy to access (e.g. Docking-Positioner & Cleaner)
- High viscosities
- Pressure range from 0 to 40 bar
- Highly resistant due to the applied materials in contact with the product like stainless steel (SS316), Teflon®, Sigradur®
- Protection classes: IP56 (standard), Ex-p ATEX 100 G2 EEx p T5 (option)

2.3 Volume based method

Similar to laser diffraction, also USE is a volume based method that allows for measuring the relative amount of material in cubic meters or kilograms.

Fig. 5 shows a typical PSD in terms of mass or volume related cumulative distribution $Q_3(x)$ and the frequency distribution $q_3^*(x)$. While the latter provides information about how often size fractions are represented within certain size classes, the cumulative distribution presents the relative amount of analysed material in percentage by volume or weight (density = constant) below a certain size limit.

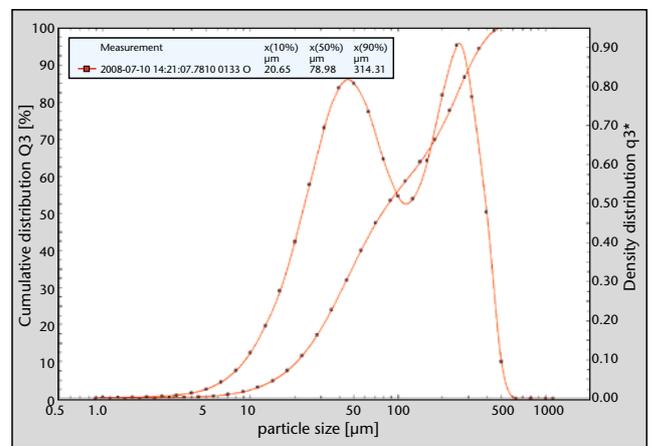


Bild 5: Partikelgrößenverteilung, Summen- und Dichteverteilung

Fig. 5: Particle size distribution, cumulative and density distribution

$Q_3(x)$ und Dichteverteilung $q_3^*(x)$. Während Letztgenannte die Informationen liefert, wie oft Größenfraktionen innerhalb bestimmter Größenklassen vertreten sind, stellt die Summenverteilung den relativen Betrag des analysierten Materials in Volumen- oder Gewichtsprozent (Dichte = konstant) unterhalb einer bestimmten Partikelgrößengrenze dar.

Somit wird mit der USE-Methode das Produkt auf jene Weise charakterisiert, wie es von Produktionsleitern zur Überwachung der Produktion bzw. zur Qualitätskontrolle gefordert wird. Im Gegensatz zur volumenbasierten USE müssen Teilchenzählensysteme eine astronomisch große Anzahl von Einzelpartikeln zählen, um eine angemessene Statistik auch für den Nachweis größerer Teilchen zu erhalten. Für den Fall, dass Grobanteile nicht repräsentativ und somit nicht korrekt erfasst werden, führt das unbeabsichtigt zu massiven Fehlern in der gesamten Volumen-Partikelgrößenverteilung.

Bild 6 zeigt ein einfaches Beispiel für das Verhältnis zwischen feinem und grobem Material. Sowohl A als auch B repräsentieren die gleiche Materialmenge. Wenn aus statistischen Gründen das einzelne grobe Teilchen (A) von einem Teilchenzähler nicht erfasst wird, werden 50 % des gesamten produzierten Materialvolumens bzw. -gewichts überhaupt nicht analysiert.

Mit OPUS werden diese Einschränkungen einerseits durch das angewandte Prinzip und andererseits aufgrund einer exzellenten Statistik überwunden. Während Zählprinzipien normalerweise auf ein paar Dutzend oder einige hundert Vorgänge pro Sekunde begrenzt sind, erfasst OPUS durch sein Wirkprinzip in der gleichen Zeit 10 bis 1000-mal mehr Teilchen nach. **Tabelle 1** enthält dazu typische Zahlen. Einmal korrekt analysiert, können die Ergebnisse in beliebige Verteilungsarten (z. B. Volumen-, Oberflächen-, Längen- oder Anzahlverteilung) mithilfe der leistungsstarken Sensorsoftware umgerechnet werden.

Tabelle 1: Nachweis einer typischen Anzahl von Teilchen während einer OPUS-Analyse von 30 Sekunden in Abhängigkeit von der Partikelgröße. Annahmen: monodisperse Teilchen, Teilchengeschwindigkeit 1 m/s, Feststoffkonzentration 30 Vol.-%.

Partikelgröße/ μm	Anzahl der Teilchen
10	5.000.000.000.000
100	5.000.000.000
1000	5.000.000

2.4 Software WINDOX

Sowohl die Steuerung des Sensors als auch die Speicherung der Rohdaten sowie deren Auswertung erfolgen durch die datenbankorientierte System-Software WINDOX (**Bild 7**), die unter der jeweils aktuellen Windows-Version bequem und intuitiv zu bedienen ist.

2.4.1 Applikationsprogramme

Nach dem Laden eines auf den Kunden zugeschnittenen, vorprogrammierten Standardprogramms arbeitet der Sensor vollautomatisch, ohne dass ein Bedieneingriff notwendig wird. Durch den Einsatz des robusten und einfach zu handhabenden Programminterpreters (**Bild 8**) können diese Programme selbst vom Endbenutzer an alle applikationsspezifische Anforderungen angepasst werden.

2.4.2 Kommunikationsschnittstellen

Dies beinhaltet neben der Sensorkontrolle auch die Kommunikation mit den Prozessleitsystemen, entweder digital über das kundeneigene Intranet (TCP/IP) oder durch Einsatz einer SPS mittels analogen, digitalen oder Profibus-Datenaustauschs. Alle Schnittstellen sind standardmäßig in die Systemsoftware implementiert.

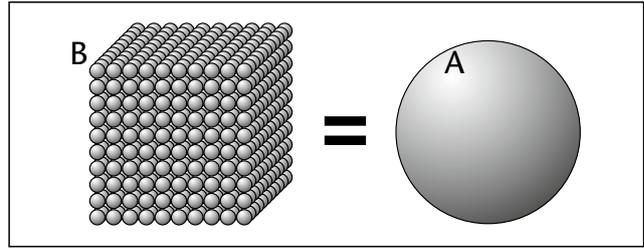


Bild 6: Verhältnis zwischen groben und feinen Partikeln. 1000 feine Teilchen (B) stellen die gleiche Materialmenge dar wie ein zehnmals größeres Teilchen (A)

Fig. 6: Relationship between coarse and fine particles. 1,000 fine particles (B) representing the same amount of material as one particle 10 times larger (A)

Thus, the volume or weight based method detects the product in the same way as production managers look at their production. In contrast, particle counting systems have to count an astronomically large number of particles to receive a reasonable statistic for detecting coarser particles as well. Missing the coarse material accidentally leads to a massive lack of information about nearly the entire product.

Fig. 6 shows simple example for the relationship between fine and coarse material. Both figures A and B are representing the same amount of material. If for statistic reasons the single coarse particle (A) is missed by a particle counter, 50 % of the totally produced material volume or weight is not analysed at all.

OPUS overcomes these restrictions based on its principle on one hand and due to an excellent statistic on the other. While counting principles are typically limited to a few dozen to several hundred events per second, OPUS detects 10–1,000 times more particles in the same time by fundamental principle. Typical numbers are shown in **Table 1**. Once analysed appropriately, the results can be presented in a large variety of outputs (e.g. volume, surface, length or number distribution) due to the powerful sensor software.

Table 1: Typical numbers of particle detected during one OPUS measurement of 30 s depending on the particle size. Estimations: monodisperse particles, particle velocity 1 m/s, solids concentration 30 % vol.

Particle size/ μm	No. of Particles
10	5,000,000,000,000
100	5,000,000,000
1,000	5,000,000

2.4 WINDOX software

Both, the control of the sensor, raw data storage and evaluation is done by the database oriented WINDOX software (**Fig. 7**) running on the sensor's PC which is comfortably and intuitively to operate and running under the latest MS Windows operating system.

2.4.1 Application routines

Calling up a customized pre-programmed standard operating procedure, the sensor is running fully automatically without any need of intervention by the operator. By applying the robust but simple to use application program editor (**Fig. 8**), these routines can be adapted to all kind of application specific demands.

2.4.2 Communication interfaces

This also includes the communication to the process control systems either digitally via a PC network or using a PLC for analogue,

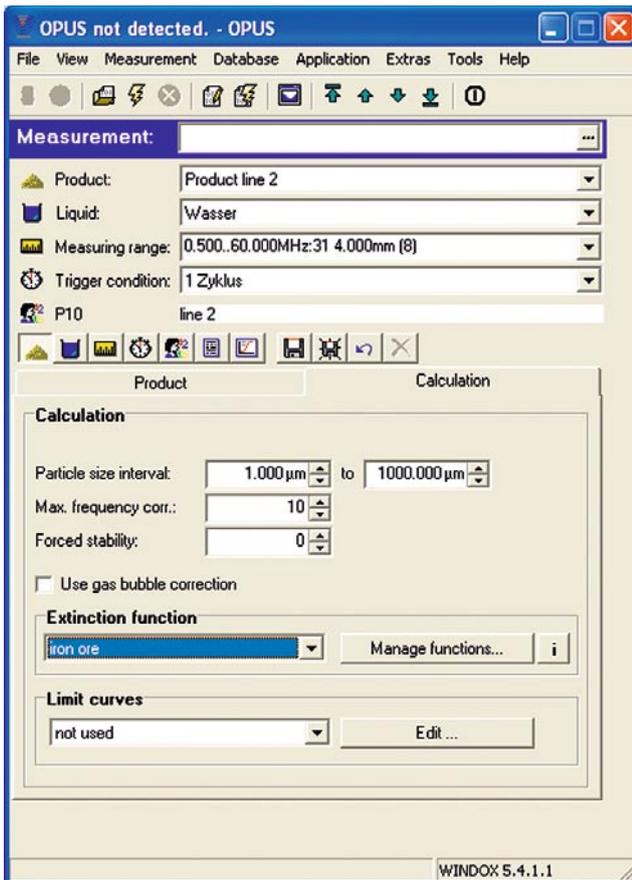


Bild 7: Erscheinungsbild der WINDOX-Software zur Steuerung des Sensors
Fig. 7: Appearance of WINDOX sensor control software

2.5 Präsentationen von Daten

Die auf der Grundlage genauer Analysen erhaltenen Partikelgrößenverteilungen können in den aus der Literatur bekannten Präsentationsarten dargestellt werden. Die bekanntesten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Diese Daten sind als numerische Tabelle (Bild 9), grafische Verteilungsdiagramme (Bilder 12–15) und Trenddiagramme verfügbar und sowohl für Einzelergebnis als auch als Statistik anwählbar.

Alle Datenpräsentationen können nach den Wünschen des Kunden in vielfältiger Weise auf diesen zugeschnitten werden. Damit wird allen Anforderungen Rechnung getragen, z. B. Daten und Layout von Kurven, statischen Kurven oder Qualitätsgrenzen, Layout der Achse, von Rastern und Hilfslinien des Diagramms sowie Inhalt und Layout von Legenden, Textkästen und vieles mehr.

2.5.1 Trenddiagramme

Bild 12 zeigt ein Beispiel eines Trenddiagramms von WINDOX QT (hier: Feststoffkonzentration in Vol.-% und Rückstandswerte bei 75 µm und 32 µm). Neben der Auftragung von diskreten Messwerten ermöglicht WINDOX auch die Berechnung selbst definierter Formeln in Echtzeit.

2.5.2 Auswertung und Behandlung von Störsignalen

Die Auswertung der OPUS-Rohdaten und deren Überführung in Partikelgrößenverteilungen erfolgen auf Grundlage der Theorie der Ultraschallextinktion unter Anwendung der Streutheorie sowie unter Berücksichtigung viskoser Effekte. Die Auswertelgorithmen sind in die WINDOX-Software implementiert und enthalten Korrekturen für den Einfluss von Temperaturänderungen und Sensorbelegungen. Zusätzlich enthalten ist ein leistungs-

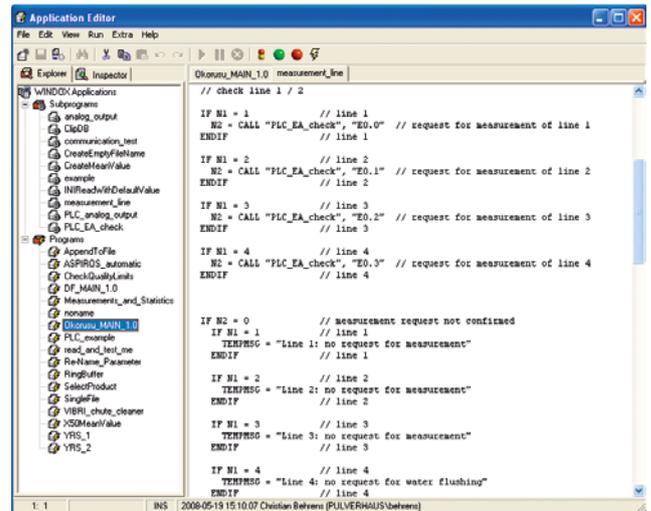


Bild 8: WINDOX-Software für Applikationsprogramme
Fig. 8: Appearance of WINDOX application program software

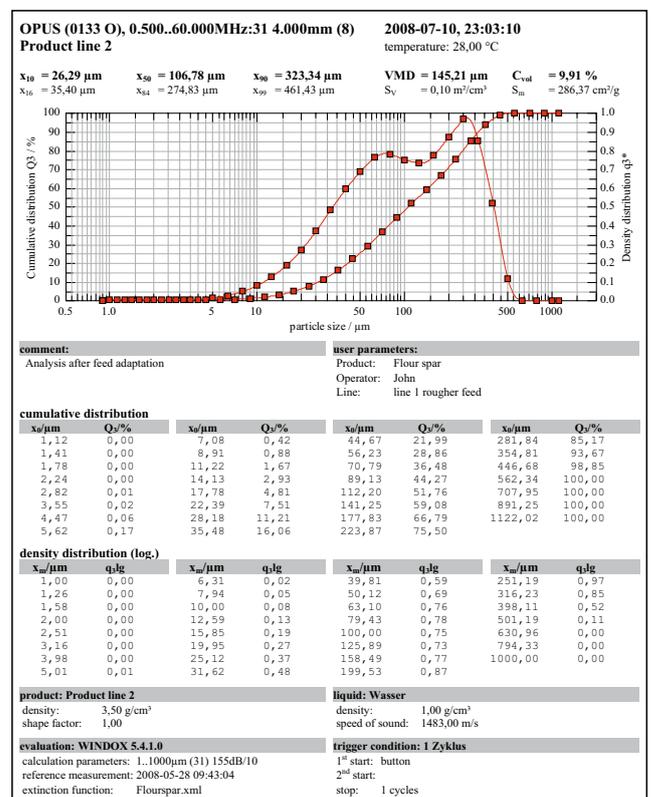


Tabelle 2: Übliche Präsentationen von Partikelgrößenverteilungen [2]
 Table 2: Common presentations of particle size distributions [2]

Nomenklatur Nomenclature	Symbole Symbols	Abszissen- und Ordinatenkala Scale of abscissa and ordinate
Summenverteilung Cumulative distribution	$Q_i(x)$, $i = 0,1,2,3$	lin-lin / lin-log / RRSB / LND
Rückstand Residue	$R_i(x)$, $i = 0,1,2,3$	lin-lin / lin-log
Dichteverteilung Density distribution	$q_i(x)$, $q_i^*(x)$ $i = 0,1,2,3$	lin / log
Treppenpolygon Histogram	$q_i(x)$, $q_i^*(x)$ $i = 0,1,2,3$	lin / log
Fraktion Fraction	dQ_i	lin / log

starkes Modell zur Korrektur von Störsignalen, die durch mitgeführte Gasblasen, die in fast jedem Produktionsprozess auftreten, hervorgerufen werden. Die Korrektur der Gasblasensignale wird möglich aufgrund des völlig andersartigen Extinktionsverhaltens von Gasblasen im Vergleich zu Teilchen [3, 4]. Wendet man hier optische Methoden an, so würden sowohl Gasblasen als auch Partikel fehlinterpretiert, da optische Instrumente in der Regel nicht zwischen Partikel und Blasen unterscheiden können. Aufgrund der wirkungsvollen Gasblasenkorrekturfunktion werden keine zusätzlichen Entlüftungsbehälter o. ä. für das System benötigt.

3. Anwendung

Um sofort ohne Zeitverzögerung Informationen zur Partikelgrößenverteilung aus dem Mahlprozess zu erhalten, wird OPUS direkt hinter der Mühle bzw. dem Zyklonauslauf installiert. Auch für die Überwachung der Flotation ist die on-line Partikelgrößenanalyse von entscheidender Bedeutung. Grundsätzlich ist der OPUS-Sensor so konstruiert, dass er direkt im Hauptprozessstrom installiert werden kann. Um jedoch mit Blick auf möglichen Verschleiß eine lange Standzeit des Sensors zu garantieren, wird empfohlen, OPUS vom Hauptproduktstrom, mit typischen Fließgeschwindigkeiten von einigen m/s, zu trennen und OPUS durch einen separaten Probestrom mit einer geringeren Fließgeschwindigkeit mit dem Produkt zu versorgen. Der minimal erforderliche Probestrom hängt dabei von der Sedimentationsgeschwindigkeit der Teilchen, und damit von der

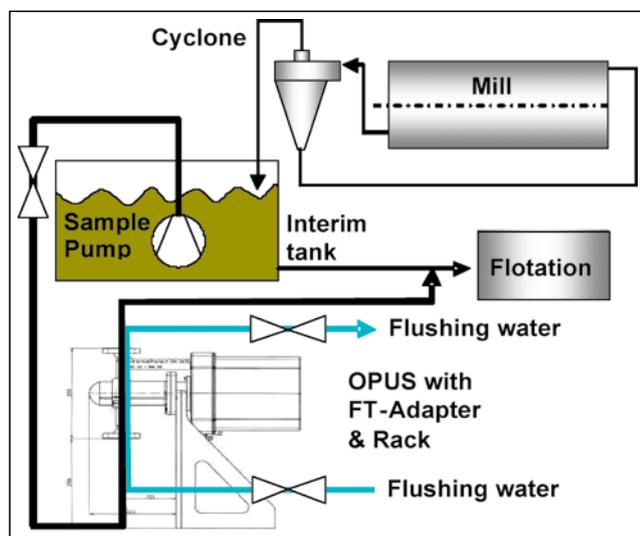


Bild 10: Installationsschema Beispiel 1
 Fig. 10: Scheme of installation example 1

axis, grids, auxiliary lines of the diagram and content and layout of legends, text-boxes and further more.

2.5.1 Trend diagrams

Fig. 12 shows an example of the WINDOX QT trend diagram (here: solid concentration % vol. and residue values at 75 µm and 32 µm). Beside monitoring pre-defined values, WINDOX allows for the calculation of self-defined values in real-time, too.

2.5.2 Evaluation and noise compensation

OPUS raw data are processed and transferred into particle size distributions applying the rigorous ultrasonic extinction theory based on scattering theory under consideration of viscous effects as well. The algorithms are implemented in the WINDOX



Bild 11: OPUS-Installation Beispiel 1
 Fig. 11: OPUS installation example 1

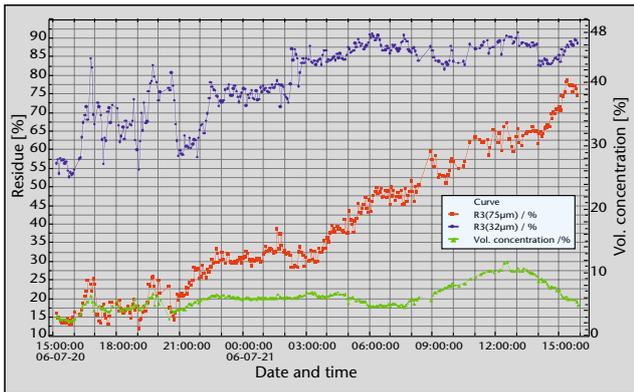


Bild 12: Typischer Trend der Partikelgröße von Eisenerz hinter einem Zyklon, hier: Rückstand bei 74 µm, 32 µm und Feststoffgehalt in Vol.-%

Fig. 12: Typical particle size trend of iron ore behind a cyclone, here: residue at 74 µm, 32 µm and solid content by volume

Teilchengröße und physikalischen Dichte, ab. Typischerweise sind Fließgeschwindigkeiten von 0,1 bis 1 m/s völlig ausreichend, um einen zuverlässigen und homogenen Probenfluss durch die OPUS Meßzone sicherzustellen. Hierfür sind verschiedene Systemadaptionen möglich.

3.1 Beispiel 1 (Eisenerz)

Die Trennung des Hauptproduktstroms vom Probenstrom erfolgt durch eine zusätzliche Probenpumpe, die z. B. aus einem vorhandenen Zwischengefäß installiert wird und permanent Produkt durch den Sensor pumpt.

OPUS wird mit dem FT25-Adapter, der mit Standardflanschen der DN 25 ausgerüstet ist, in die Probenleitung eingebaut.

Bild 11 zeigt diese Anordnung.

Um einen ungestörten Betrieb zu gewährleisten, ist OPUS zusätzlich mit einer Spülwasserzufuhr sowie einem zusätzlichen Probenahmehahn zur manuellen Probenahme und einer Bypassleitung zur Umgehung des OPUS-Systems versehen. Somit ist der Zugang zum Sensor jederzeit gewährleistet, ohne die Probenleitung abzustellen. Bild 10 zeigt den schematischen Aufbau.

3.2 Ergebnisse

Auch wenn die vollständige Partikelgrößenverteilung analysiert wird, werden zur on-line Überwachung in der Regel nur einige, die Produktqualität charakterisierende Werte abgefragt. Dies sind z. B. der Rückstand bei 125 µm oder 75 µm, wie in Bild 12 dargestellt. Diese oder andere Einzelwerte der Partikelgrößenverteilung sind entweder auf dem Analysen-PC oder zusätzlich über TCP/IP, Profibus oder als 4- bis 20-mV-Signal auf dem Prozesssteuersystem erhältlich.

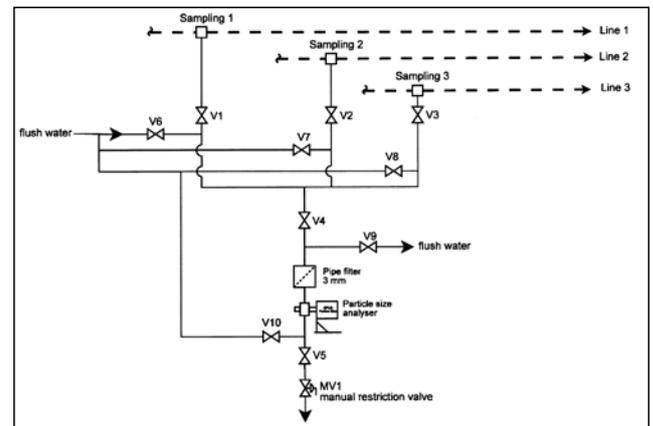
3.3 Beispiel 2 (Nickel-Kupfer-Erz)

Auch ein Zusammenschluss dreier Primärprobennehmer an einen OPUS ist möglich. Die Anlage ist an drei Leitungen einschließlich Spülwasserleitungen angeschlossen. Mithilfe des WINDOX-Applikationsprogramms und einer SPS Simatic S7 300 werden alle erforderlichen Ventile und Probennehmer von OPUS angesteuert, um z. B. eine Probe zu nehmen, die Analysen durchzuführen oder anschließend die Leitungen vollautomatisch zu spülen. Die Bilder 13 a und b zeigen das PI-Diagramm und die mechanische Installation. OPUS ist mit einem BP50-Adapter an das 50-mm-Rohrleitungssystem angeschlossen. Die Partikelgrößenverteilungsergebnisse werden ca. alle 5 Minuten pro Leitung auf den neuesten Stand gebracht und über die Profibus-Schnittstelle der SPS an das Prozessleitsystem übergeben.

software and include compensations for temperature and layering effects but in addition provide a powerful gas bubble correction model for the reliable reduction of gas bubble evoked noise, which is present in nearly every production process. The correction of gas bubble signals becomes possible due to significantly different extinction behaviour of gas bubbles compared to particles [3, 4]. Applying optical methods gas bubbles are misinterpreted as particles as well, since these instruments can not distinguish between particles and bubbles. Due to the powerful gas bubble correction functionality of OPUS no de-aeration tanks are needed.

3. Application

In order to obtain instant PSD information from the grinding process stage without lag times, OPUS is installed behind the mill



Bilder 13 a und b: Schematische Anordnung Beispiel 2

a) PI-Diagramm

b) Installation von OPUS

Fig. 13 a und b: Setup example 2 with direct connection to primary sampler

a) PI-diagram

b) OPUS installation

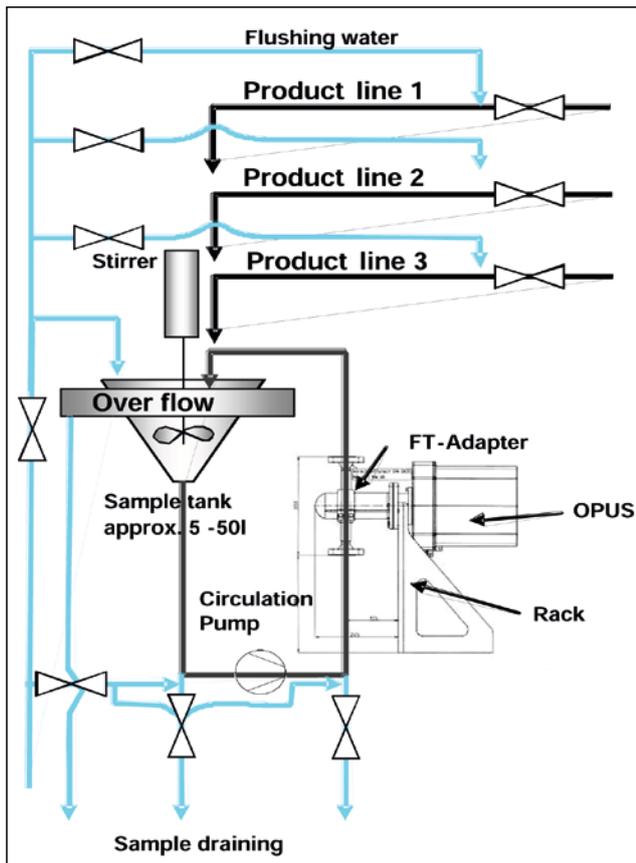


Bild 14: Schematische Anordnung Beispiel 3
 Fig. 14: Scheme of setup 3

3.4 Beispiel 3 (Flussspat)

Falls eine stärkere Unabhängigkeit des Analysenaufbaus in Kombination mit einer Option off-line Proben zu analysieren gefordert wird, wird eine Installation, wie sie in Bild 15 gezeigt wird, eingesetzt. Im on-line Betrieb wird eine Probe von 5 bis 50 l Suspension automatisch aus der Prozessleitung entnommen und in einen Probenkreislauf gegeben. Diese Anordnung erlaubt es zum einen, OPUS als eine zentrale Messstation für quasi beliebig viele Produktionslinien zu betreiben als auch (Bild 14 und 15) per Knopfdruck auf manuelle Nutzung umzuschalten und dem Probenkreislauf off-line Proben zuzuführen.

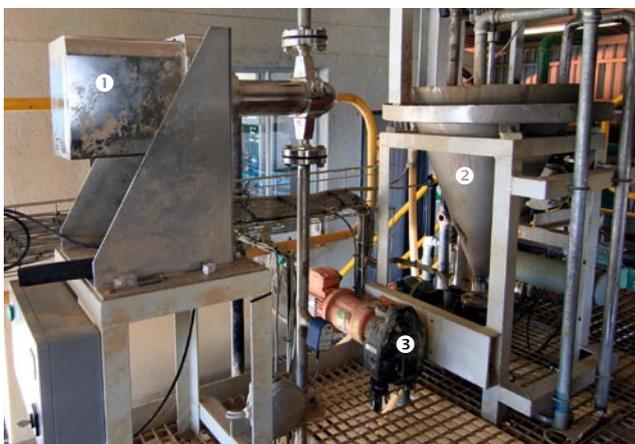


Bild 15: Beispiel 3 einer Anordnung mit Probekreislauf. Multiplex-Messstation: 1) OPUS, 2) Vorlagebehälter, 3) Pumpe, 4) Rührwerk, 5) Umlaufleitung, 6) Probenahmeleitung 1, 7) Probenahmeleitung 2, 8) Spülwasser.

Fig. 15: Setup example 3 with sampling loop. Multiplex measuring station: 1) OPUS, 2) sample reservoir, 3) pump, 4) stirrer, 5) sample loop, 6) sampling line 1, 7) sampling line 2, 8) flushing water out

or cyclone outlet. Also for the flotation control on-line particle size analysis is of decisive importance.

Basically the sensor is designed to be installed directly in the main process flow. However, to ensure a long lifetime of the sensor it is recommended to separate the sensor from the main product flow with flow speeds of typically several m/s and supply OPUS with product by an individual sample flow of lower flow speed. The minimum required sample flow depends on the sedimentation velocity of the particles and thus on the particle size and physical density. Typically only 0,1–1 m/s are necessary to ensure a reliable and homogeneous sample flow. Various system adaptations are possible.

3.1 Example 1 (iron ore)

The separation of the main product flow and the sample flow is realized by an addition sample circulation pump installed e.g. into an existing intermediate sample tank.

OPUS is adapted into the sample line using the FT25-Adapter that provides standard DN25 flanges. Fig. 10 illustrate this setup.

In order to guarantee an unobstructed operation the OPUS measuring stage is equipped with fresh water supply, an additional sampling valve to obtain manual samples and a bypass line in order to bypass OPUS and have access to the sensor any time without stopping or draining the sample flow line. Fig. 11 shows the instrument integration.

3.2 Results

Even if the full particle size distribution is analysed, in most cases of on-line monitoring only a few, the product quality describing values are requested to control the process, e.g. the residue at 125 µm or 75 µm (Fig. 12). These or other individual values from the PSD are available presented either on the system PC or in addition via TCP/IP, Profibus or as 4 to 20mV signal on a process control system.

3.3 Example 2 (nickel copper ore)

Also a direct connection of OPUS to 3 primary samplers is successfully realized. The system is connected to 3 lines including water-flushing-lines. Using the WINDOX application routines and a Simatic S7 300 PLC, all necessary valves and samplers are controlled to acquired a sample, perform the analyses and flush the lines fully automatically. Fig. 13 a and b shows the PI-diagram and the mechanical installation. OPUS is adapted to the 50 mm pipe systems using the BP50-Adapter. The particle size results are



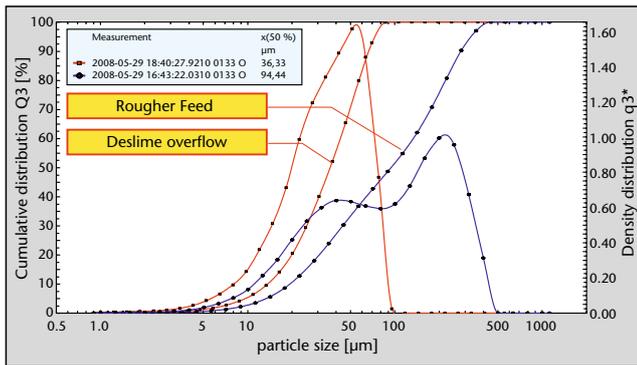


Bild 16: Typische Partikelgrößenverteilungen (Summen- und Dichteverteilung) von Fluorapatit. Aufgabegut Flotation und Entschlammungsleitung

Fig. 16: Typical particle distribution (cumulative and density distributions) of fluorspar for rougher feed and de-slime line

In diesem Fall ist OPUS mit einem FT25-Adapter an den Probenkreislauf angeschlossen. Der Probenkreislauf ist mit einer Wasserleitung versehen, die nach jeder Probenahme eine automatische Spülung ermöglicht. Die Steuerung aller Ventile, der Pumpe, des Rührers etc. wird vom WINDOX-Applikationsprogramm in Verbindung mit einer SPS vorgenommen. Somit erfolgen die gesamte Probenahme und Analyse vollautomatisch.

3.5 Ergebnisse

Bild 16 zeigt typische Partikelgrößenverteilungen (Summen- und Dichteverteilung) eines Flotations-Aufgabegutes und einer Entschlammungsleitung für Fluorapatit.

4. Vergleichbarkeit

Eine der am häufigsten gestellten Fragen betrifft die Vergleichbarkeit von Ultraschallextinktionsergebnissen mit denen anderer Methoden wie z. B. Laserbeugungs- oder Siebanalyse.

Unter der Annahme solider Analyseergebnisse korrespondierender Messmethoden, die ggf. bereits etabliert wurden, können die Resultate der Ultraschallextinktion an diese Methoden angepasst werden.

OPUS verwendet eine produktspezifische Extinktionsfunktion für die Auswertung der gemessenen Rohdaten (Dämpfungsspektren) und die Berechnung der Partikelgrößenverteilung. Die

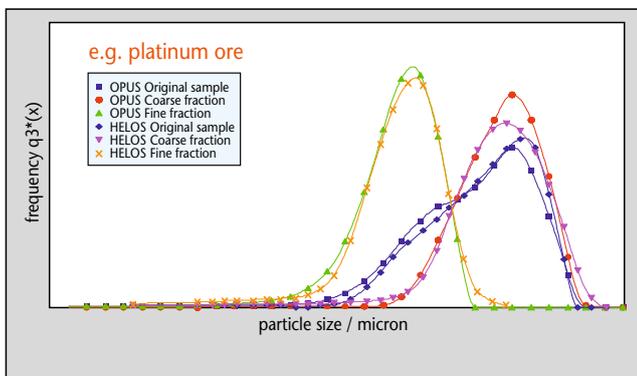


Bild 17: Typische Vergleichbarkeit zwischen OPUS- und der Laserbeugungsanalysen (HELOS), dargestellt als Dichteverteilung. Material: Platinerz – grob, fein und gemischt

Fig. 17: Typical comparability between OPUS and laser diffraction (HELOS) analyses shown as density distribution. Material: Platinum ore – coarse, fine and mixture

linked to the PROFIBUS interface of the PLC and updated approx. each 5 min/line.

3.4 Example 3 (fluorspar)

In case a stronger independency of the analysis setup in combination with a manual operation option is requested an installation as shown in Fig. 15 is applied. A sample of 5 to 50 l suspension is taken automatically and released into the sample circulation loop. This setup also allows to multiplex OPUS as a central measuring station to several product lines (Fig. 14 and 15) as well as the analyses of manually fed samples.

Here, OPUS is adapted to the sample loop using the FT25-Adapter. The sampling loop is equipped with tap water line that allows to flush and clean the loop after each sample automatically. The control of the valves is realized applying a PCL in combination with the WINDOX application program software. Thus, the entire sampling and analysing system runs fully automated. In addition, manual samples can be analysed by this setup too.

3.5 Results

Fig. 16 shows some typical particle size distribution data (cumulative and density distributions) for the rougher feed and the de-slime lines of a fluorspar flotation plant.

4. Comparability

One of the most frequently asked questions concerns the comparability of USE results to other methods such as laser diffraction or sieving analysis.

Presuming adequate analysis result from the corresponding methods, USE results can be adapted to these methods that probably are already established at customer's site.

OPUS applies a product specific extinction function for the evaluation of the measured raw data (attenuation spectra). The calculation of the extinction function is performed by the KSIGMA extension of the WINDOX software. KSIGMA allows to feed customer data for alternative methods (e.g. sieve, laser diffraction, image analysis) into the calculation. Based on measured extinction raw data and reference data on the particle size distribution of the analysed sample the calculation of the extinction function is done automatically. It should be pointed out that this product specific calculation/calibration is required only once and takes place during initial tests or installation. In addition an existing extinction function library covers over 300 different products already, which includes most ore and mining applications. The quality of comparability between OPUS and the laser diffrac-

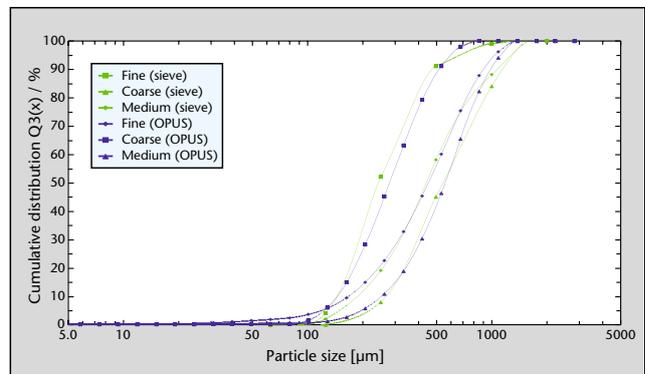


Bild 18: Typische Vergleichbarkeit von OPUS- und der Siebanalyse in Form der Summenverteilung. Material: Quarzsand – grobe, mittlere und feine Fraktion

Fig. 18: Typical comparability between OPUS and sieve analysis in terms of cumulative distributions. Material: Quartz sand – coarse, medium and fine fraction

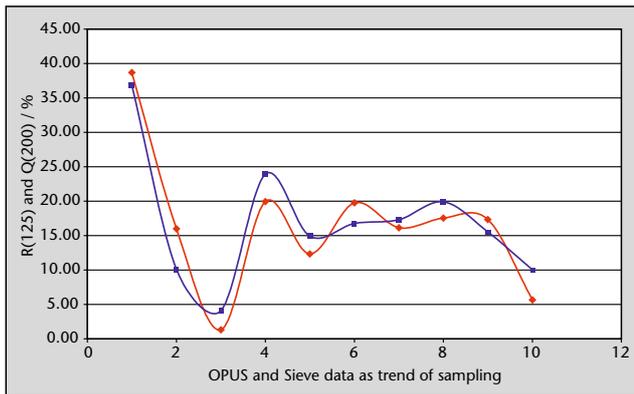


Bild 19: OPUS- und Siebergebnisse für R (125 µm) bei 10 Eisenerzproben

Fig. 19: OPUS and sieve results for R (125 µm) on 10 iron ore samples

Berechnung der Extinktionsfunktion wiederum wird durch die WINDOX-KSIGMA Software durchgeführt. Mit KSIGMA können Kundendaten korrespondierender Methoden (z. B. Siebanalyse, Laserbeugung, Bildanalyse) in die Berechnung mit eingegeben werden. Auf der Grundlage der gemessenen Extinktionsausgangsdaten und Bezugsdaten der Partikelgrößenverteilung der analysierten Probe erfolgt die Berechnung der Extinktionsfunktion. Es sei darauf hingewiesen werden, dass diese produktspezifische Berechnung/Kalibrierung nur einmal erforderlich ist und während der Inbetriebnahme bzw. der Installation durchgeführt wird. Außerdem steht bereits eine Bibliothek von Extinktionsfunktionen mit mehr als 300 unterschiedlichen Produkten aus dem Bereich Erz und Mineralien zur Verfügung.

Die Qualität der Vergleichbarkeit zwischen OPUS und der Laserbeugung auf der Grundlage des Systems HELOS wird in Bild 17 für drei unterschiedliche Fraktionen von Platinerz dargestellt (Dichteverteilung). Bild 18 zeigt ein Beispiel der sehr guten Übereinstimmung zwischen OPUS und Siebanalyse. Dabei werden die Partikelgrößenverteilungen von drei Fraktionen Quarzsand, gemessen mit OPUS bzw. der Siebanalyse, verglichen (Summenverteilung).

Wie bereits erwähnt, sind in den meisten Fällen einer on-line Partikelgrößenanalyse nur einige Kennwerte der Partikelgrößenverteilung zur Prozesssteuerung erforderlich. Bild 19 vergleicht exemplarisch den mit OPUS analysierten Rückstandswert bei 125 µm mit einer Siebanalyse. Die ausgezeichnete Übereinstimmung für den R-Wert (75 µm) wird in Bild 20 quantifiziert.

5. Schlussfolgerung

Die vorhandenen und dargestellten Installationen zeigen eindeutig die Anwendbarkeit des auf der Grundlage der Ultraschall-extinktion arbeitenden OPUS-Systems für die on-line Partikelgrößenanalyse unterschiedlicher Erz- oder Mineralschlämme.

Diese analytische Methode gestattet den Einsatz in der rauen Umgebung von Bergbau- und Aufbereitungsanlagen und ist in der Lage, Erzsuspensionen in ihrem ursprünglichen Zustand ohne vorherige Probenaufbereitung oder -konditionierung zu analysieren. Die hoch auflösende Partikelgrößenverteilung liefert eine Vielzahl von Daten für die Prozess- und Produktsteuerung. Diese Daten stimmen mit denen anderer Verfahren, z. B. der Laserbeugung oder der Siebanalyse, überein.

Alle beschriebenen Merkmale kennzeichnen OPUS als herausragende Methode für die Analyse der Partikelgrößenverteilung in der Bergbau- und Erzaufbereitungsindustrie.

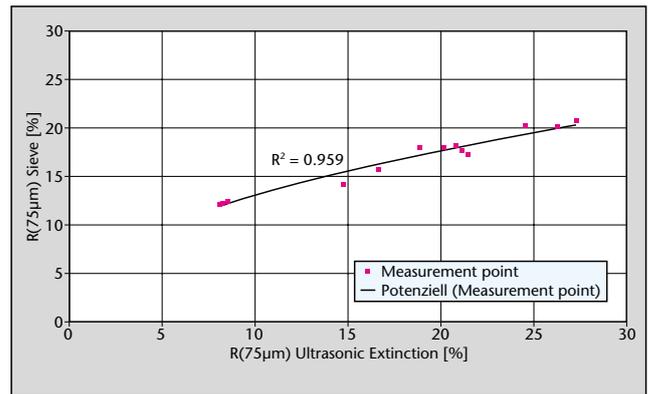


Bild 20: Typische Korrelation zwischen einer Siebanalyse und OPUS, hier: Rückstand auf 75 µm von Kupfer-Nickel-Erz

Fig. 20: Typical correlation between sieve analysis and OPUS, here: residue on 75 µm of copper nickel ore

tion based HELOS system is shown in Fig. 17 (density distributions) for 3 different fractions of platinum ore. Fig. 18 (Cumulative distributions) shows an example for the good agreement between OPUS and sieve analysis. It compares OPUS PSD of 3 fractions of quartz sand to sieve analysis (cumulative distributions).

As mentioned before, in most cases of on-line particle size analysis only some characteristic values of the PSD are required for process control. Fig. 19 exemplarily compares the 125 µm residue value analysed with OPUS with the corresponding sieve results. The excellent agreement is quantified in Fig. 20 for the R (75 µm) value.

5. Conclusion

The established and presented installations clearly indicate the feasibility of the ultrasonic extinction based OPUS system for the on-line particle size analyses of various ore or mineral slurries.

The analytical method allows for operation in the rugged and rough environment of mining and exploitation plants and is capable to handle mineral slurries in their original state without preliminarily conditioning. The high resolution particle size distribution provides a large variety of data available for process and product control. These data agrees with other methods such as laser diffraction or sieve analyses.

All the described features award OPUS an outstanding position for particle size distribution analysis in the mining and exploitation industry.

Symbols

I	Intensity of the received sound wave	[J m ² s ⁻¹]
I ₀	Intensity of the introduce sound wave	[J m ² s ⁻¹]
f	frequency	[Hz]
Δl	thickness of suspension layer	[m]
C _{PF}	projection area-concentration	[m ⁻¹]
K	Extinction coefficient	[-]
x	particle size diameter	[m]
q ₂	projection area density distribution	[m ⁻¹]
m	measured extinction	[-]
R	residue value of PSD	[%]
q ₃ *	density distribution value of volume based log PSD	[%]
Q	Cumulative value of PSD	[%]

Symbole

I	Intensität der empfangenen Schallwelle	[$\text{J m}^2 \text{s}^{-1}$]
I ₀	Intensität der eingeleiteten Schallwelle	[$\text{J m}^2 \text{s}^{-1}$]
f	Frequenz	[Hz]
Δl	Dicke der Suspensionsschicht	[m]
C _{PF}	Projektionsflächenkonzentration	[m^{-1}]
K	Extinktionskoeffizient	[-]
x	Partikeldurchmesser	[m]
q ₂	Dichteverteilung der Projektionsfläche	[m^{-1}]
m	Gemessene Extinktion	[-]
R	Rückstandswert der Partikelgrößenverteilung	[%]
q ₃ *	Wert der Dichteverteilung auf Basis Volumen log Partikelgrößenverteilung	[%]
Q	Summe der Partikelgrößenverteilung	[%]

Literatur/References

- [1] *Riebel, U.*: Diss. Karlsruhe 1988, Die Grundlage der Partikelgrößenanalyse mittels Ultraschallspektrometrie
- [2] DIN ISO 9276-2:2001, 2006-02, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [3] *Behrens, Chr.*: Untersuchungen zur Beschreibung der Ultraschallextinktion von Gasblasen in Flüssigkeiten, Diplomarbeit TU Clausthal, 2000
- [4] *Nishi, R. Y.*: The Scattering and Absorption of Sound Waves by a Gas Bubble in a Viscous Liquid. *Acustica*, Vol. 33, Nr. 2, 1975

2/3-Seite Anzeige Thyssen

Klicken Sie mal rein!
Click on now!
www.at-online.info



AUFBEREITUNGS TECHNIK
MINERAL PROCESSING