

Optimisation of Ore Milling Processes Using On-line Particle Size Distribution and Solid Content Analysis

The particle size distribution of ground minerals is of decisive importance for downstream processes like flotation, separation, drying or others. In order to optimize process efficiency on one hand and final product quality on the other hand, early control of the grinding or classification stage is essential. The ultrasound-based particle size analyser OPUS of Sympatec GmbH, Clausthal-Zellerfeld/Germany is capable of performing on-line particle size distribution (PSD) and solid content measurement of mineral slurries such as iron ore, copper ore, fluorspar, quartz sand and alumina directly in a tough process environment. OPUS provides a 31-size class PSD and can be

applied for particles from nanometre range up to several millimetres. Interpolations between any of the 31 measured points are available in addition to customer specific calculations. Typical OPUS values show an excellent agreement with off-line particle size analysis methods such as sieve analysis, cyclosizer or laser diffraction. OPUS is designed as rugged in process probe made from stainless steel. The technique is not affected by product flow dynamics, contamination, optical properties, vibrations, pressures or changes in solid concentrations. The instrument provides all analysis data on the system's PC or on the process control system by a variety of interfaces.

Online-Partikelgrößen- und Konzentrationsanalyse zur Optimierung der Mahlprozesse in der Erzaufbereitung

Die Partikelgrößenverteilung gemahlener Materialien ist von entscheidender Bedeutung für nachgeschaltete Prozesse, wie z. B. Flotation, Abscheidung oder Trocknung. 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 Partikelgrößenanalysesystem OPUS der Sympatec GmbH, Clausthal-Zellerfeld, ist in der Lage, Online-Messungen der Partikelgrößenverteilung sowie des Feststoffgehalts mineralischer Schlämme, wie z. B. Eisenerz, Kupfererz, Flussspat bzw. Quarzsand und Tonerde im Minutentakt und direkt in einer rauen Prozessumgebung durchzuführen. Der Sensor misst eine Partikelgrößenverteilung

von 31 Größenklassen im unverdünnten Massenstrom und kann für Teilchen aus dem Nanometerbereich bis zu einigen Millimetern eingesetzt werden. Zwischen den 31 Messstellen sind beliebige Interpolationen möglich. Die typischen Rückstandswerte stimmen ausgezeichnet mit den Methoden der Offline-Partikelgrößenanalyse, wie z. B. Siebanalysen, Cyclosizer oder Laserbeugung überein. OPUS ist eine robuste Inline-Sonde aus Edelstahl. Die angewendete Technik ist unabhängig von Strömungsdynamik, Verunreinigung, optischen Eigenschaften, Schwingungen, Drücken oder wechselnden Feststoffgehalten des jeweiligen Produkts. Über eine Reihe von Schnittstellen sind alle Daten des Geräts für das Prozessleitsystem verfügbar.

1 Introduction

For efficient down-stream processing of ore slurries, the particle size distribution behind a milling and cyclone stage is of decisive importance. Slurries with excessively coarse particle sizes can hardly be liberated mechanically what leads to a poor quality of the final concentrate. Further, the subsequent flotation step requires a specific particle size distribution for smooth operation, too. Overgrinding on the other hand leads to fine distributions and a waste of energy and reagents. An efficient process operation obtained by controlling the particle size distribution behind the mill-cyclone-stage allows the design of ideal size distributions using minimal energy and reagent.

Off-line methods, such as e.g. sieve analysis, are not suitable for providing the required size information in real-time due to the

1 Einleitung

Für die Aufbereitung von Erzsschlämme ist die Partikelgrößenverteilung nach der Mahl- und Klassierstufe von entscheidender Bedeutung. Erzsschlämme mit übermäßig groben Partikelgrößenverteilungen können nur schwer getrennt werden, was in einer unzureichenden Qualität des finalen Produkts resultiert. Daneben wird auch die Erztrennung in Flotationszellen selbst von einer unzureichenden Partikelgrößenverteilung sowie ungeeigneten Feststoffbelastungen negativ beeinflusst. Nicht zuletzt führen eine Übermahlung und die damit verbundene zu feine Partikelgrößenverteilung ebenfalls zu unnötigem Energieverbrauch und Einsatz von Reagenzien. Ein wirksamer Verfahrensablauf kann durch die Steuerung der Partikelgrößenverteilung nach der Klassierstufe erreicht werden, wodurch eine ideale Partikelgrößenverteilung ermöglicht wird.

time lag between sampling and the availability of the results. On-line instruments are mostly based on either optical or mechanical principles, both of which have significant drawbacks. Optical systems work only on highly diluted. Dilution of broadly distributed particle sizes often leads to non-representative samples and thus does not represent the real PSD in the product flow. Further, optical instruments are very sensitive to contamination of the optics. Mechanical systems interact with only a very few particles – in fact only the single biggest particle per stroke and require constant recalibration of the prediction model to obtain only a few measurement points.

Ultrasonic Extinction (USE) applies sound waves instead of light and therefore overcomes the limitations of optical instruments, being able to operate in totally opaque media with concentrations up to 70 Vol.-%. This allows the design of robust instruments particularly made for tough industrial environments.

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

2 Ultrasonic Extinction with OPUS

The fundamentals for OPUS (**O**n-line **P**article Size Analysis using **U**ltrasonic **S**pectroscopy) were established in 1988 at the University of Karlsruhe (1). In the early 1990th Sympatec GmbH from Clausthal-Zellerfeld/Germany, developed the OPUS sensor into a robust and industrial design.

2.1 Principle

The design of an instrument for the determination of frequency dependent USE is schematically presented in figure 1. An electrical high frequency generator is connected to a piezo-electric 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 converted back into an electrical signal.

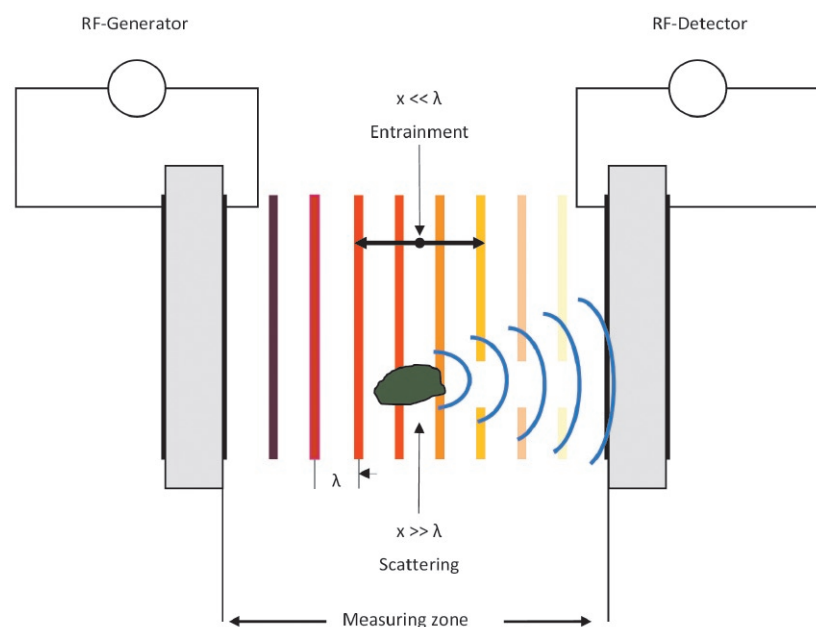


Fig. 1. Schematic of the OPUS measurement principle.

Bild 1. Schematische Darstellung des Messprinzips von OPUS. Source/Quelle: Sympatec

Offline-Methoden, wie z.B. Siebungen, sind aufgrund der Zeitverzögerung, die durch die Probenahme und Analysezeiten zustande kommt, nicht geeignet, um die erforderlichen Informationen für die Prozesssteuerung in Echtzeit zur Verfügung zu stellen. Andererseits basieren viele Online-Methoden 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. Dies beeinträchtigt die Genauigkeit der Analyseergebnisse erheblich. So führt die Verdünnung von breiten Partikelgrößenverteilungen in der Regel zu einer nicht repräsentativen Probe und stellt folglich nicht die wirkliche Partikelgrößenverteilung im Produktstrom dar. Darüber hinaus sind optische Geräte sehr empfindlich gegenüber Verunreinigungen der Sensorik. Dahingegen erfassen mechanische Systeme meist nur eine sehr geringe Anzahl an Partikeln und vor allem nur die größten Partikel pro Probe. Dies führt zu regelmäßigen Neukalibrierungen des Vorhersagemodells, aufgrund der nicht repräsentativen Probenmenge.

Anstelle von Licht (elektromagnetische Wellen) arbeitet die Ultraschallextinktion (USE) mit Schallwellen und überwindet damit die Einschränkungen optischer Geräte. 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 nachfolgenden Artikel werden das auf Ultraschallextinktion basierende OPUS-System und seine erfolgreiche Online-Anwendung für trübe Suspensionen und Schlämme, wie sie z.B. in der Aufbereitung von Eisenerz, Flussspat, Kupfer, Tonerde oder Quarzsand vorliegen, beschrieben.

2 Ultraschallextinktion mit OPUS

Die Grundlagen für OPUS (**O**nline-**P**artikelgrößenanalyse mittels **U**ltraschall-**S**pektroskopie) wurden 1988 an der Universität Karlsruhe gelegt (1). Anfang der 1990er Jahre entwickelte die Sympatec GmbH in Clausthal-Zellerfeld das OPUS-System als robuste Prozessmesssonde.

2.1 Prinzip

Bild 1 stellt das Prinzip zur Bestimmung der frequenzabhängigen 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. Beim Durchlaufen der Messzone erfährt die Schallwellenenergie eine Schwächung infolge von Streuung und Absorption, die wiederum maßgeblich von der Partikelgröße sowie der Partikelmenge abhängt.

Die Extinktion der Ultraschallwellen wird aus dem Verhältnis der Signalamplituden auf dem Generator zu denen auf der Seite des Detektors berechnet

While crossing the measuring zone the energy of the sound waves is attenuated due to scattering and absorption, which again depends on the particle size and particle amount. The ultrasonic extinction can be calculated from the ratio of received and transmitted sound amplitudes and can be described by the Lambert-Beer equation:

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} = e^{-\Delta l \cdot \alpha} \quad (1)$$

Here, the frequency depending ratio of the received and transmitted sound intensity $\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i}$ corresponds exponentially to the suspension layer Δl and the so called extinction cross section α . The extinction cross section can be broken down into the concentration of particle projection area C_{pf} and the extinction coefficient K . Logarithmise of (1) the Lambert-Beer law turns into:

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} = \Delta l \cdot C_{pf} \cdot K(f_i, x) \quad (2)$$

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

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} = \Delta l \cdot C_{pf} \cdot \int_{x_{min}}^{x_{max}} K(f_i, x) \cdot q_2(x) dx \quad (3)$$

The integral in equation 3 can be substituted by a sum as a first approach and the projected area concentration can be substituted by the particle concentration and the 1st momentum of the $q_2(x)$ -distribution:

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} \cong \Delta l \cdot 1,5 \cdot c_v \cdot \frac{1}{M_{1,2}} \sum_j K(f_i, x_j) \cdot q_2(x_j) \Delta x \quad (4)$$

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

$$\begin{pmatrix} m(f_v) \\ \vdots \\ m(f_j) \end{pmatrix} \cong \Delta l \cdot 1,5 \cdot \frac{1}{M_{1,2}} \cdot c_v \cdot \begin{pmatrix} k_{1,1} & \dots & k_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{i,1} & \dots & k_{i,j} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_{21} \cdot \Delta x_1 \\ \vdots \\ q_{2i} \cdot \Delta x_i \end{pmatrix} \quad (5)$$

This equation system is rendered stable using proprietary algorithms. Beside the 31 particle size values $q_{2,1} \dots q_{2,31}$ this equation system also provides the solid concentration value c_v by using the normalization equation for particle size distributions $\sum_{k=0}^i \Delta Q_{2i} = 1$.

2.2 OPUS probe

In order to obtain a particle size distribution of 31 classes, the attenuations at 31 frequencies are taken within 90 s (typically). This leads to an attenuation spectrum exemplarily shown in figure 2.

With the knowledge of the acoustic properties, represented by the extinction function as exemplarily shown in figure 3 for ore, the particle size distribution and solid concentration is calculated from the effective signal ΔD . The entire measuring range of

und kann durch das Lambert-Beer'sche Gesetz wie folgt beschrieben werden:

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} = e^{-\Delta l \cdot \alpha} \quad (1)$$

Hierin ist das frequenzabhängige Verhältnis der ausgesandten und empfangenden Schallwellenintensität $\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i}$ exponentiell abhängig von der Dicke der Suspensionsschicht Δl und dem Extinktionsquerschnitt α . Letzterer kann aufgebrochen werden in die Konzentration der Partikelprojektionsfläche C_{pf} sowie den Extinktionskoeffizient K . Es ergibt sich nach Logarithmieren:

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} = \Delta l \cdot C_{pf} \cdot K(f_i, x) \quad (2)$$

In einem polydispersen (verschieden großen) System überlagern sich die Extinktionen aller Teilchen zu:

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} = \Delta l \cdot C_{pf} \cdot \int_{x_{min}}^{x_{max}} K(f_i, x) \cdot q_2(x) dx \quad (3)$$

Das Integral in Gleichung 3 kann durch eine Summe als erste Näherung ersetzt werden. Die Konzentration der Partikelprojektionsflächen kann durch die Partikelvolumenkonzentration und das 1. Moment der $q_2(x)$ -Verteilung ersetzt werden:

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{f_i} \cong \Delta l \cdot 1,5 \cdot c_v \cdot \frac{1}{M_{1,2}} \sum_j K(f_i, x_j) \cdot q_2(x_j) \Delta x \quad (4)$$

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

$$\begin{pmatrix} m(f_v) \\ \vdots \\ m(f_j) \end{pmatrix} \cong \Delta l \cdot 1,5 \cdot \frac{1}{M_{1,2}} \cdot c_v \cdot \begin{pmatrix} k_{1,1} & \dots & k_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{i,1} & \dots & k_{i,j} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_{21} \cdot \Delta x_1 \\ \vdots \\ q_{2i} \cdot \Delta x_i \end{pmatrix} \quad (5)$$

Dieses Gleichungssystem ist numerisch instabil und wird durch geeignete Algorithmen gelöst. Neben den 31 Partikelgrößenverteilungswerten $q_{2,1} \dots q_{2,31}$ liefert das Gleichungssystem unter Berücksichtigung der Normierung von Partikelgrößenverteilungen $\sum_{k=0}^i \Delta Q_{2i} = 1$ auch die Feststoffvolumenkonzentration c_v .

2.2 Die OPUS-Sonde

Um eine Partikelgrößenverteilung mit 31 Klassen zu erhalten, werden die Dämpfungen bei 31 Frequenzen als eine Messung innerhalb von 90 s (typisch) 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 Erze und Minerale gezeigte Extinktionsfunktion beschrieben werden, werden die Partikelgrößenverteilung und die Feststoffkonzentration aus dem effektiven Signal ΔD berechnet. Der gesamte Messbereich von OPUS erstreckt sich von < 0.1 bis $3.000 \mu m$. Der angewendete Messbereich kann je nach Produkthanforderungen eingestellt werden.

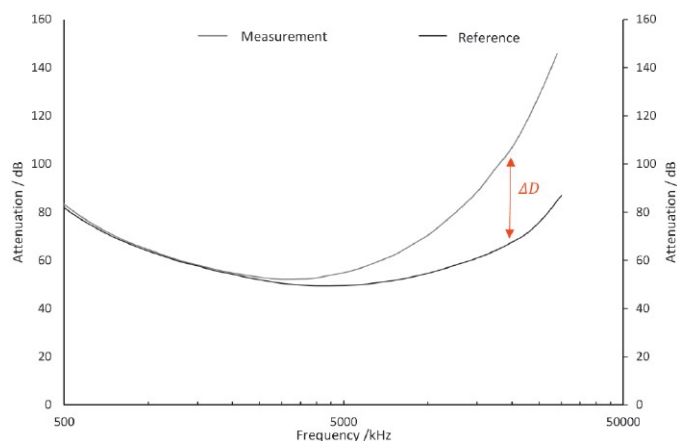


Fig. 2. Attenuation spectra of the background and normal measurement of an OPUS analysis. // Bild 2. Beispielhaftes Dämpfungsspektrum einer OPUS-Analyse. Source/Quelle: Sympatec

OPUS covers < 0.1 to $3.000 \mu\text{m}$. The applied measuring range can be optimised according to the demands of the product.

Figure 4 shows the Sympatec OPUS System. The instrument is designed as probe and can be installed into nearly all kind of process pipes or vessels. Therefore, a variety of process adapters are available. OPUS is designed for fully automatic real-time particle size analysis in process environment. The system is rated IP65 and complies with the regulation of the CE label regarding electromagnetic compatibility (EMC) and electrical safety.

OPUS can directly flanged into vessels and pipe lines with minimum size of 200 mm. For smaller pipe diameters adapters covering process pipes down to 10 mm (DN10) are available. The probe is made from stainless steel. To introduce the sound waves into the suspension, high-density carbon-plates (SIGRADUR®) are employed. OPUS operates under process conditions and fulfils the requirements listed in table 1.

Measuring-Range // Messbereich	$< 0.1 \mu\text{m} - 3.000 \mu\text{m}$
Concentration // Konzentration	1 – 70 Vol.-%
Pressure // Druck	0 – 40 bar
Temperature // Temperatur	0 – 120 °C
pH-Value // pH-Wert	1 – 14
Safetyclass // Sicherheitsklasse	IP65 / ATEX II 2G Eex p II T5
Installation // Installationsarten	in-line, on-line & off-line

Table 1. Process parameters. // Tabelle 1. Prozessparameter. Source/Quelle: Sympatec

2.3 Sensor-software PAQXOS

Control of the sensor, raw data storage and evaluation is processed by the sensor's software PAQXOS, running on the OPUS PC (Figure 5). PAQXOS saves each measurement with a time-stamp to the split millisecond and is both simple yet powerful with software views to satisfy the needs of process operators to research engineers. All stored data may be reprocessed and output at any time in the future to explore correlations between the full distribution data and process efficiency

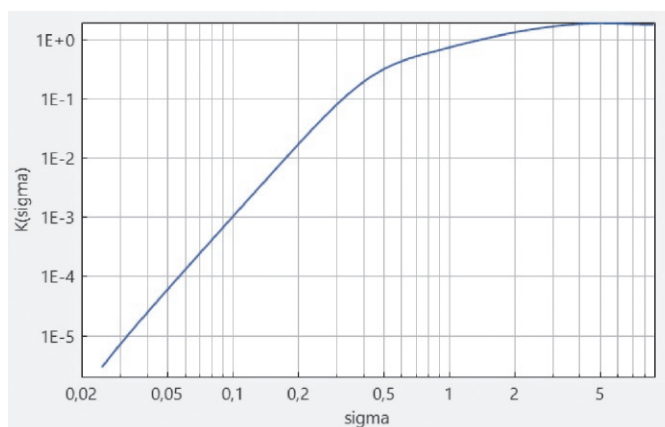


Fig. 3. Typical extinction function (here iron ore). Bild 3. Typische Extinktionsfunktion (hier für Eisenerz). Source/Quelle: Sympatec

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 IP65 und entspricht den Bestimmungen des CE-Labels.

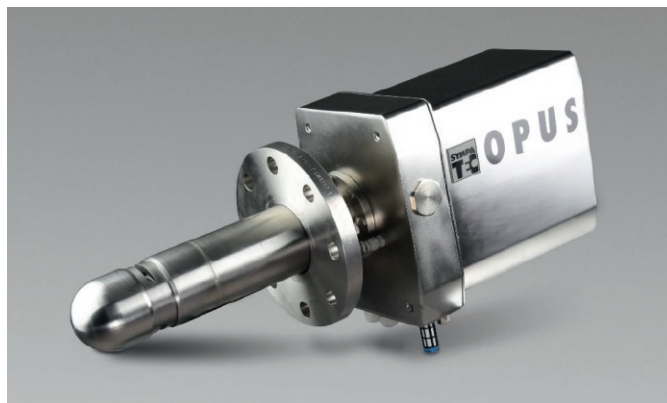


Fig. 4. Technical realisation of USE for on-line particle size analysis. Bild 4. Technische Realisierung von USE bei der Online-Partikelgrößenanalyse. Photo/Foto: Sympatec

OPUS kann direkt in Behälter und Rohrleitungen ab 200 mm und größer eingeflanscht werden. Für kleinere Rohrdurchmesser bis hinunter zu einer Nennweite von 10 mm sind Prozessadapter verfügbar. Die Sonde besteht aus Edelstahl. Zur Schalleinkopplung wird hochrobuster, glasifizierter Kohlenstoff (SIGRADUR®) verwendet. OPUS arbeitet unter Prozessbedingungen und erfüllt u. a. die in Tabelle 1 aufgeführten Spezifikation.

2.3 Sensor-Software PAQXOS

Sowohl die Steuerung des Sensors als auch die Speicherung der Rohdaten und deren Auswertung erfolgen durch die System-Software PAQXOS (Bild 5). Die Sympatec-eigene Windows-Software speichert jede Einzelmessung mit einem Zeitstempel auf die Millisekunde genau ab und ist Dank Drag-and-Drop-Funktionen nicht nur einfach und intuitiv zu bedienen, sondern aufgrund Konfigurations- und Filteroptionen sehr leistungsfähig.

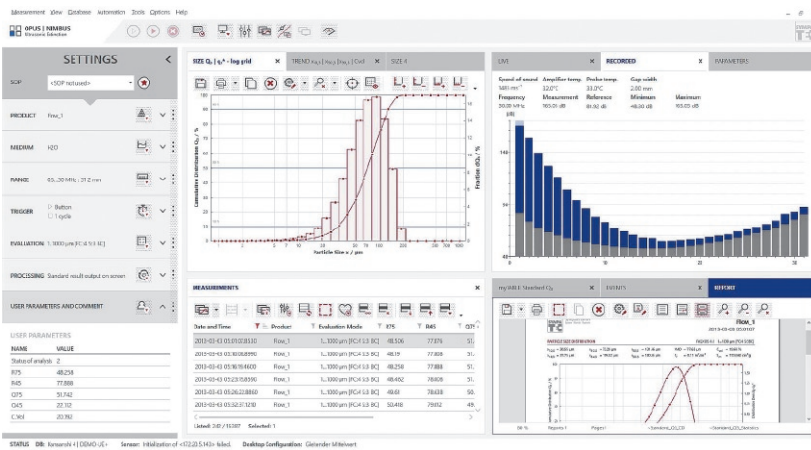


Fig. 5. Appearance of Sympatec's PAQXOS sensor control software.
 Bild 5. Benutzeroberfläche von Sympatec's PAQXOS-Software.
 Source/Quelle: Sympatec

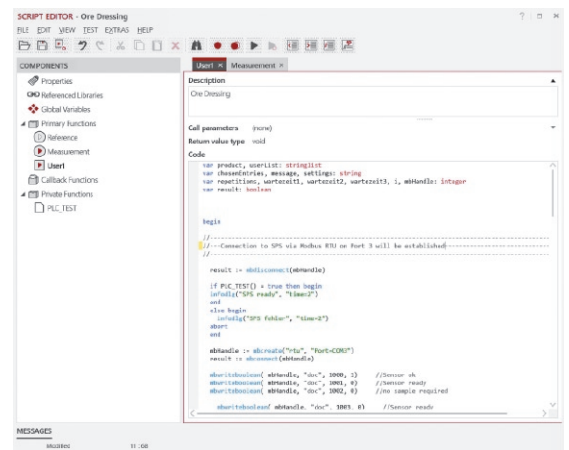


Fig. 6. Appearance of PAQXOS script editor.
 Bild 6. Skripteditor der PAQXOS-Software.
 Source/Quelle: Sympatec

2.3.1 Application programs

Customized pre-programmed application programs, called scripts, allow the sensor to run fully automatically without any need of intervention by the operator. This includes the control of peripherals and also data transfer to the DCS-System. By applying easy to use script editor (Figure 6), these routines can be adapted to all kinds of application specific demands.

2.3.2 Communication interfaces

OPUS can be embedded to the DCS-System via common communication standards such as Modbus® RTU, Modbus® TCP, Profibus®, OPC (Open Platform Communications), TCP/IP, FTP or analogue PLC-Signals to integrate a remote controlled or automatic trigger of the measurements. Real-time analysis of the particle size distribution and solid content are provided to the distributed control system for process control.

2.4 Data presentation

Based on the precise analysis, the output and presentation of 31 particle classes allows for all kind of presentation styles known from technical literature. The most common ones are listed

Nomenclature Nomenklatur	Symbols Symbole	Scale of abscissa and ordinate / Abszissen- und Ordinatenkala
Cumulative distribution Summenverteilung	$Q_{i(x)}; i = 0,1,2,3$	lin-lin / lin-log / RRSB / LND
Residue Rückstand	$R_{i(x)}; i = 0,1,2,3$	lin-lin / lin-log
Density distribution Dichteverteilung	$q_{i(x)}; q_{i(x)}^* i = 0,1,2,3$	lin / log
Histogram Treppenvolygon	$q_{i(x)}; q_{i(x)}^* i = 0,1,2,3$	lin / log
Fraction Fraktion	dQ_i	lin / log

Table 2. Common presentations of particle size distributions.
 Tabelle 2. Übliche Präsentationen von Partikelgrößenverteilungen.
 Source/Quelle: Sympatec

2.3.1 Applikationsprogramme

Nach dem Laden eines auf den Kunden zugeschnittenen Applikationsskripts arbeitet der Sensor vollautomatisch, ohne dass ein Bedieneingriff notwendig wird. Dies bezieht die Ansteuerung etwaiger Peripherien sowie die Datenübertragung an ein Prozessleitsystem explizit ein. Durch den Einsatz des robusten und einfach zu handhabenden Programminterpreters (Bild 6) können diese Programme vom Endbenutzer selbst an alle applikationsspezifischen Anforderungen angepasst werden.

2.3.2 Kommunikationsschnittstellen

Das OPUS-System kann flexibel über gängige Kommunikationsstandards wie Modbus® RTU, Modbus® TCP, Profibus®, OPC (Open Platform Communications), TCP/IP, FTP oder analoge SPS-Signale in ein Leitsystem eingebunden werden, um eine ferngesteuerte oder autonome Durchführung von Messungen einzurichten. Die in Echtzeit gewonnenen Informationen über die Partikelgrößenverteilung und die Konzentration werden dem Prozessleitsystem zur Prozessüberwachung oder -steuerung zur Verfügung gestellt.

2.4 Präsentation von Daten

Basierend auf den genauen Analysen, ermöglichen die Ausgabe und Präsentation der 31 Partikelklassen alle Arten von den aus der Literatur bekannten Präsentationsarten, welche in Tabelle 2 aufgeführt sind. Diese Daten sind als numerische Tabelle, druckfertige Reports, grafische Verteilungs- und Trenddiagramme verfügbar und sowohl für Einzelergebnis als auch Statistik anwählbar.

Die Daten und deren Präsentation können applikationsspezifisch zugeschnitten werden. Das betrifft nicht nur kundeneigene Layouts, sondern auch die Ausgabe anwendungstypischer Werte. So werden für die Charakterisierung von Erzschlammungen traditionsgemäß häufig die Rückstandsmengen der Siebe 32 µm, 45 µm, 75 µm, 212 µm sowie die Feststoffkonzentration der Schlämme genutzt.

2.4.1 Verteilungsdiagramme, druckfertige Reports und Tabellenausgaben

Jede Einzelanalyse liefert eine hochauflösende Partikelgrößenverteilung, wie sie z.B. in Bild 7 in Form einer Verteilungssum-

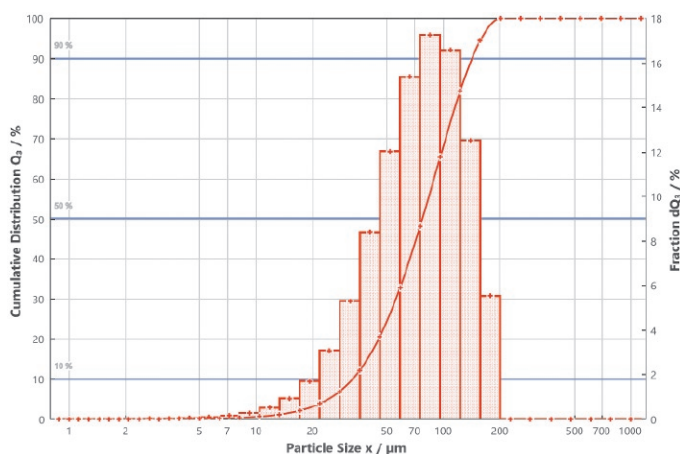


Fig. 7. Exemplary diagram of the cumulative distribution and fraction.
Bild 7. Beispielhaftes Verteilungssummen- und Fraktionsdiagramm während der Erzaufbereitung. Source/Quelle: Sympatec

in table 2. These data are available as numerical tables, report printouts, graphical distributions and trend diagrams and can be called as individual or statistical output.

These data and their presentation can be tailored individually in each application. This does not only include customer's own layout, but furthermore, this contains the output of application specific values. For the analysis of ore slurries these can be the sieve residue at 32 μm , 45 μm , 75 μm , 212 μm and the solid content of the slurries.

2.4.1 Distribution diagrams, reports and tables

Each analysis provides a high-resolution particle size distribution as shown in figure 7 in terms of the cumulative (sieve passage) and fraction distribution. Visualization of the plots can be changed in many different particle size distribution types such as sieve-residue, histograms, distribution-density or even RRSB-distributions. Furthermore, versatile overlays and scaling options are possible.

A combination of numerical and graphical presentation is part of the report. Hence, particle size values, graphics and layouts can be totally individualised by the integrated report-editor, so that each operator gets his relevant parameters quick and easy.

Last but not least, the output window myTABLE allows to export specific values from the single analysis into a MS-Excel compatible format like *.csv or *.txt.

2.4.2 Trend diagram

Figure 8 shows an example of the PAQXOS QT trend diagram (here: x_{10} , x_{50} and x_{90}). Beside monitoring pre-defined values, PAQXOS allows for the calculation of self-defined values in real-time, too.

2.4.3 Evaluation and handling of noise signals

OPUS raw data are processed and transferred into particle size distributions applying the rigorous USE theory based on scattering theory under consideration of viscous effects as well. The algorithms are implemented in the PAQXOS software and include compensations for temperature and fouling effects. In addition, a powerful gas bubble correction model for the reliable reduction of

menkurve (Siebdurchgangskurve) und dem Fraktionsdiagramm dargestellt ist. Die Darstellung kann beliebig auch in Rückstandskurven, Histogramme, Verteilungsdichten oder sogar die RRSB-Verteilung gewechselt werden. Vielfältige Overlays und Skalierungen sind dabei möglich.

Eine Kombination tabellarischer und grafischer Darstellung liefert die Reportausgabe. Aufgeführte Werte, Graphiken und Layouts lassen sich frei über einen integrierten Editor leicht und schnell individuell gestalten und anpassen, sodass immer alle benötigten Kenngrößen und Diagramme zur Verfügung stehen.

Über das Ausgabefenster myTABLE lassen sich bequem einzelne Analysenwerte auswählen und für eine Selektion von Analysen als Tabelle ausgeben. Abgespeichert werden die Tabellen in der Datenbank der PAQXOS-Software oder auch in MS-Excel-kompatiblen Dateiformaten wie *.csv oder *.txt.

2.4.2 Trenddiagramme

Bild 8 zeigt ein Beispiel eines PAQXOS-Trenddiagramms (hier die charakteristischen Kennwerte x_{10} , x_{50} und x_{90}). Neben dem Auftragen von diskreten Messwerten ermöglicht PAQXOS auch die Berechnung von selbst definierten Formeln in Echtzeit.

2.4.3 Auswertung und Behandlung von Störsignalen

Die Auswertung der OPUS-Rohdaten und deren Überführung in Partikelgrößenverteilungen erfolgen auf Grundlage der Theorie der USE unter Anwendung der Streutheorie sowie unter Berücksichtigung viskoser Effekte. Die Auswertelgorithmen sind in die PAQXOS-Software implementiert und enthalten Korrekturen für den Einfluss von Temperaturänderungen und Sensorbelegungen. Zusätzlich enthalten ist ein leistungsstarkes Modell zur Korrektur von Störsignalen, die durch mitgeführte Gasblasen, die in fast jedem Produktionsprozess auftreten, hervorgerufen werden. Die Korrektur der Gasblasensignale wird aufgrund des völlig andersartigen Extinktionsverhalten von Gasblasen im Vergleich zu Feststoffteilchen möglich (2). Bei Anwendung von optischen Methoden würden die Gasblasen fehlerhafterweise als Partikel interpretiert werden, da diese Methoden nicht zwischen Gasblasen und Partikeln differenzieren können. Aufgrund der wirkungsvollen Gasblasenkorrekturfunktion werden keine zusätzlichen

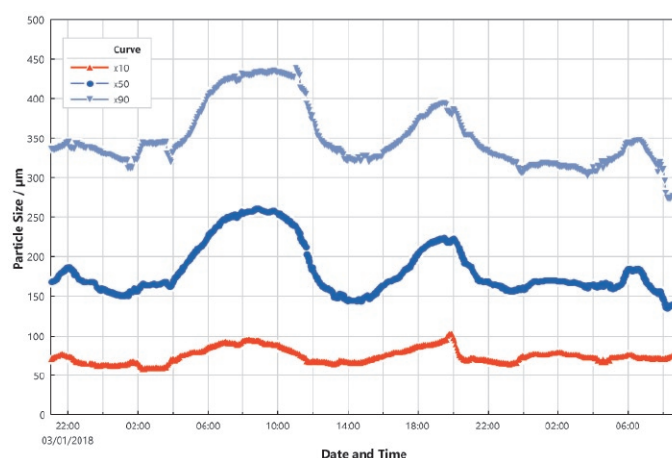
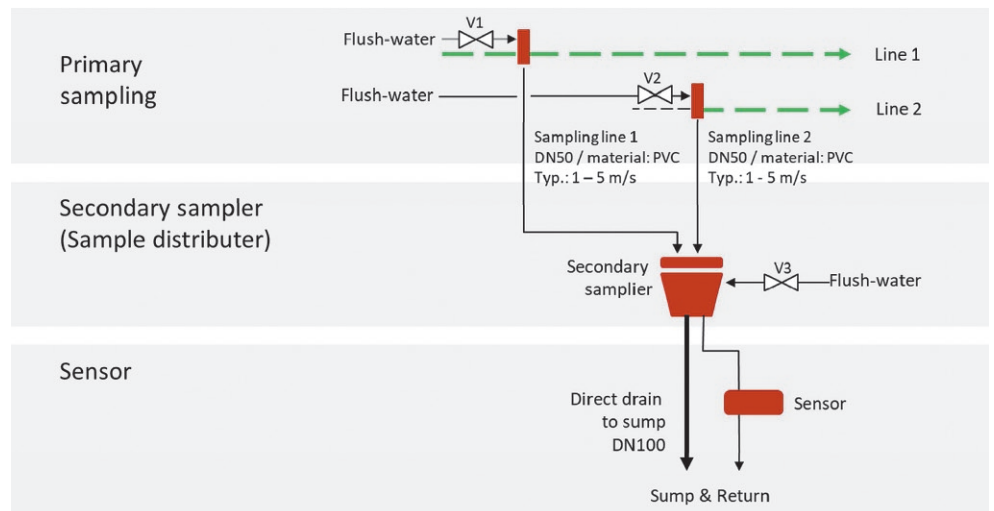


Fig. 8. Exemplary trend-diagram with the characteristic particle size at 10 μm , 50 μm and 90 μm . // Bild 8. Beispielhaftes Trenddiagramm mit den Kennwerten x_{10} , x_{50} und x_{90} . Source/Quelle: Sympatec

Fig. 9. Three-stage-concept for ore dressing.
Bild 9. Drei-Stufen-Konzept in der Erzaufbereitung.
Source/Quelle: Sympatec



gas bubble evoked noise, which is present in nearly every production process, is provided. The correction of gas bubble signals is possible due to significantly different extinction behaviour of gas bubbles compared to solid particles (2). Applying optical methods gas bubbles would be misinterpreted as particles as well, since these instruments cannot distinguish between particles and bubbles. Due to this powerful gas bubble correction functionality of OPUS no de-aeration tanks are required. Last but not least the influence of gas bubbles can partially be excluded by the use of the high frequencies, as minor influences of gas bubbles in this frequency area is expected.

3 Concept

Basically, the sensor is designed to be installed directly in the main process. However, to ensure a long lifetime of the sensor and to permit multiplexing of streams, it is recommended to separate the sensor from the main product flow whenever abrasive ore slurries are involved. Here the OPUS should be supplied with a separate, representative product flow. This requires some considerations for the overall concept. First of all, the sample, which flows through the sensor for analysis has to be representative. Further, it has to be ensured, that the velocity of ore slurries in an ideal range to optimize the life time of wear parts in a 24/7-operation. Also, for best return on investment, the need for multiplex applications has to be considered. And last but not least, the full concept has to be low-maintenance and not prone to failure.

To fit all the requirements Sympatec uses a three-stage-concept, which contains of primary sampler located in the main process line, the secondary sample distributor and finally the OPUS sensor itself. Here, a main focus is set on allowing continuous sample flow to avoid blockages and sanding. This three-stage-concept is shown in figure 9.

The first stage is the primary sampling out of the main process line. This is done, e.g., by cross-cut-samplers, that take around 50 to 200 l of slurry within 120 s and transfer this flow to MULTIPLEXER.

In the second stage the sample-flow is handled by the MULTIPLEXER. MULTIPLEXER consists of two chambers (Figure 10). The sampling lines end on top of the MULTIPLEXER and emptying into the first of two chambers, from here the samples by-pass OPUS back into the process.

Entlüftungsbehälter o.ä. für das System benötigt. Nicht zuletzt wird durch die Nutzung von hohen Frequenzen der Einfluss von Luftblasen im Vorfeld weitestgehend ausgeklammert, da im Hauptsignalbereich des OPUS kaum ein Einfluss von Gasblasen zu erwarten ist.

3 Konzept

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 für den Einsatz in der Erzaufbereitung empfohlen, OPUS vom Hauptstrom zu trennen und durch einen separaten, repräsentativen Probestrom zu versorgen. Dabei ergeben sich einige Anforderungen an das Gesamtkonzept. Die Probe, die dem Sensor zur Analyse hinzugefügt wird, muss repräsentativ sein. Gleichzeitig ist bei der Durchströmung des Sensors mit großen Mengen Erzschlamm auf eine möglichst geringe Strömungsgeschwindigkeit zu achten, um die Standzeiten im Dauerbetrieb zu maximieren. Weiterhin ist der Nachfrage der Multiplex-Fähigkeit, also dem Anschließen mehrerer Probenahmestellen an einen Sensor, Rechnung zu tragen. Und nicht zuletzt soll das ganze Konzept möglichst wartungsarm und störungsunanfällig sein.

Um all diesen Anforderungen gerecht zu werden, nutzt Sympatec ein Drei-Stufen-Konzept, das aus einer primären Probenahme direkt im Prozess, einem sekundären Probenverteiler und abschließend dem OPUS-Sensor als Messsonde besteht. Hierbei wurde ein Hauptaugenmerk darauf gelegt, dass das Probenhandling kontinuierlich betrieben wird, sodass Verstopfungen und Versandungen etwaiger Sperrorgane ausgeschlossen werden können. Dieses Drei-Stufen-Konzept ist in Bild 9 dargestellt.

An erster Stelle steht die primäre Probenahme aus der Rohrleitung. Diese erfolgt mithilfe von Querschnittsprobennehmern, die binnen 120 s etwa 50 bis 200 l Erzschlamm in Richtung Probenverteilsystem MULTIPLEXER führen.

Im zweiten Schritt erfolgt dann die Probenverteilung mit dem aus zwei Kammern bestehenden MULTIPLEXER (Bild 10). Oberhalb des MULTIPLEXERs enden die Probenahmeleitungen und entleeren sich in die erste der beiden Kammern, von wo die Probenahmeströme zurück in den Prozess geführt werden. Für den kontinuierlichen Betrieb und zur Vermeidung der Versandungen aller

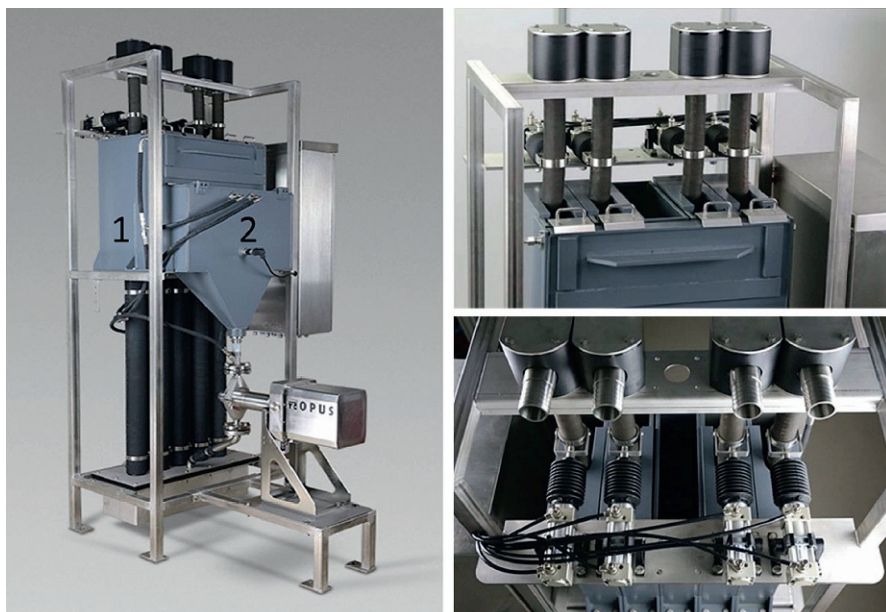


Fig. 10. MULTIPLEXER with OPUS. The left picture shows the MULTIPLEXER with the chambers 1 and 2. The two pictures on the right side show a closer view of the end of the sampling line and the pneumatic actuator. // Bild 10. MULTIPLEXER mit OPUS. Auf dem linken Bild ist der Gesamtaufbau mit den Kammern 1 und 2 zu sehen, auf der rechten Seite zwei Nahaufnahmen des Probenzulaufs und der pneumatischen Antriebe. Photos/Fotos: Sympatec

The end of the sampling pipe line is made from rubber and can be bent by an pneumatic actuator in order to drain into chamber two. This chamber drains through the measuring zone of the OPUS sensor before returning back into the process, too. This way, every sampling line can be linked to OPUS without stopping the flow which else would end up in blockage. Last but not least level sensors, flush connections and protection sieves ensure a safe, reliable operation.

4 Application

In order to obtain instant PSD information from the grinding process stage without lag times, OPUS typically is installed behind the mill or cyclone overflow. Even for flotation control, on-line particle size and solid content analysis is of decisive importance.

4.1 Copper ore

Figure 11 shows the three-stage-concept exemplarily on a copper ore dressing plant. On the left side of Figure 11 the primary pipe sampler is shown. In total there are four pipe samplers for four

Armaturen ist der Auslass der Kammer so groß dimensioniert, dass alle Produktströme, die hinein fließen, auch ohne Unterbrechung abfließen können, ohne dass die Kammer überläuft.

Die Enden der Probenahmeleitungen sind als Gummischlauch ausgeführt und lassen sich über pneumatische Stößel automatisch auf die zweite Kammer schieben. Diese Kammer entleert sich durch den OPUS-Sensor, bevor auch dieser Probestrom zurück in den Prozess geführt wird. Auf diese Weise können einzelne Probenahmeströme auf den OPUS-Sensor gelenkt werden, ohne dass auch nur einer der Probenahmeströme angehalten wird. Für einen prozesssicheren Ablauf dieser Probeverteilungsroutine sorgen zudem Füllstandssensoren, Spülanschlüsse und Schutzsiebe.

4 Anwendung

Um Informationen zur Partikelgrößenverteilung aus dem Mahlprozess in Echtzeit zu erhalten, wird OPUS direkt hinter der Mühle bzw. dem Zyklonüberlauf installiert. Auch für die Überwachung der Flotation ist die Online-Partikelgrößenanalyse von entscheidender Bedeutung.

4.1 Kupfererz

Bild 11 zeigt das Drei-Stufen-Konzept am Beispiel einer Kupfererz-Aufbereitung. Auf der linken Seite von Bild 11 ist der Rohrprobenehmer zu sehen. Insgesamt sind in dieser Installation vier Probenehmer für vier Prozesslinien im Einsatz. Installiert sind diese im Zyklonüberlauf, also jenem Teilstrom, der von den Mühlen kommt und fein genug ist, um auf die Flotation geführt zu werden. Die genommene Probe gelangt über eine Rohrleitung zum MULTIPLEXER. Hier können alle vier Linien entweder über Kammer 1, und damit auf direktem Weg zurück in die Produktion, oder ebenso in Kammer 2 umgelenkt werden, sodass der Probenahmestrom durch den OPUS-Sensor fließt. Man wählt nur eine der ankommenden Rohrleitungen dazu aus, durch den Sensor zu strömen, während die verbleibenden Leitungen am Sensor vorbeigeführt werden. Nach der

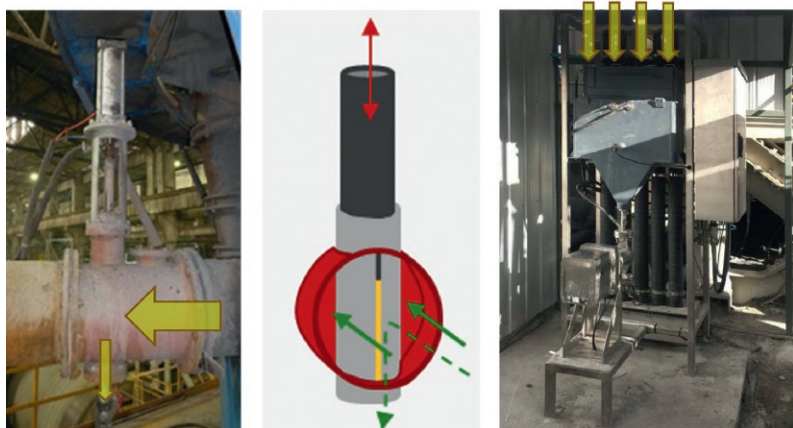


Fig. 11. Three-stage-concept in process..

Bild 11. Drei-Stufen-Konzept in der Praxis. Photos/Fotos: Sympatec

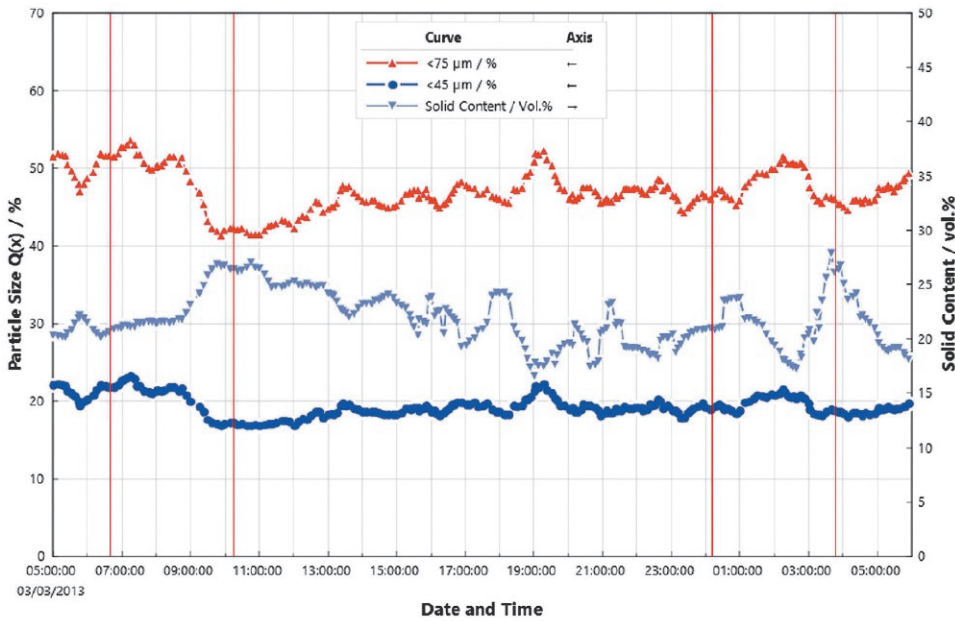


Fig. 12. Trend diagram of an ore dressing over 24 h. The fine parts <45 µm and <75 µm are opposite to the solid content. If the solid content rises (overload of the mill) the fine parts in the ore slurries decrease and vice versa.

Bild 12. Verlauf der Partikelgrößen über 24 h: Die Feinanteile <45 µm bzw. <75 µm sind gegenläufig zur Feststoffkonzentration. Steigt der Feststoffanteil (Überfrachten der Mühle) geht der Feinanteil im Erzschlamm zurück und umgekehrt. Source/Quelle: Sympatec

process-lines in operation with this installation. The samples are taken from the cyclone overflows. These primary samples flow to MULTIPLEXER. Here, all four lines either flow into chamber one and hence directly back to the process or are redirected into chamber two and thus through OPUS. Obviously only one of the four incoming sample flows is selected for chamber two and hence for the analysis while the other lines by-pass OPUS. After the analysis of the selected line, the next line is analysed automatically until each line is measured. After that the entire sequence starts again with line one. In this way the plant operator gets a full particle size and solid content analysis approximately every 5 min.

Figure 12 shows a trend diagram of the particle size fractions <45 µm, <75 µm and the solid content (Vol.%). This data can be used as an early warning system for a mill-overload or an insufficient liberation of the ore. Thus, as seen in the red marked area of Figure 12 the amount of fine particle decreases – the particles are getting larger. At the same time the solid content of the slurry

Analyse des gewählten Probenahmestroms wird automatisch zur nächsten Linie gewechselt, bis alle Linien analysiert sind und wieder mit der ersten von vorne begonnen wird. Auf diese Weise erhält der Anwender eine vollständige Partikelgrößen- und Feststoffkonzentrationsanalyse ca. alle 5 min je Linie.

Bild 12 zeigt einen Auszug aus einem Trenddiagramm, in dem die Partikelgrößenfraktion <45 µm, <75 µm und die Feststoffkonzentration (Vol.%) aufgetragen sind. Dies liefert ein zuverlässiges Frühwarnsystem für ein Überladen der Mühle bzw. für eine unzureichende Partikelanmahlung. Wie im markierten Bereich zu erkennen ist, sinkt der Feinanteil der Partikelgrößenverteilung ab – die Partikel sind zu groß. Gleichzeitig steigt der Feststoffgehalt der Schlämme an. Da solche Vorgänge mit OPUS frühzeitig erkannt werden, kann gezielt gegengewirkt werden, um sowohl die Partikelgröße als auch die Feststoffkonzentration wieder in die vorgegebenen Spezifikationen zu führen, z.B. durch Anpassen der Menge des Aufgabeguts.

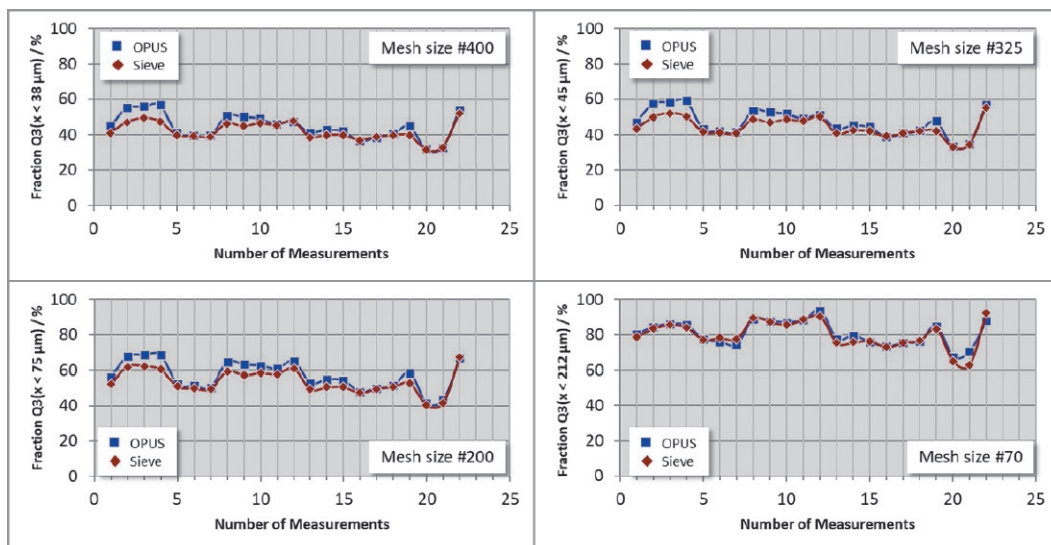


Fig. 13. Comparison of OPUS and sieve analyses for copper ore.

Bild 13. Vergleich von OPUS-Messungen mit Siebanalysen für Kupfererz. Source/Quelle: Sympatec

increases. Due to the installation of OPUS, those trends can be identified in time and countermeasures can be taken to re-align particle size and solid content, e.g. by control adjusting the mill-feed.

5 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 results from the corresponding methods, USE results can be adapted to these methods that probably are already established at customer's site. The adaptation is done once during the system configuration and does not need to be repeated any time later again. Hence, a regular re-calibration is not necessary.

Figure 13 shows the comparison of OPUS results with results from sieve analyses for copper ore. For these comparisons more than 20 samples were measured first with OPUS, afterwards these samples were dried and analysed by sieving. The presented sieve classes are $< 38 \mu\text{m}$, $< 45 \mu\text{m}$, $< 75 \mu\text{m}$, $< 212 \mu\text{m}$ show a good agreement with OPUS results.

Furthermore, studies from the FH Flensburg in Germany could show, that the good correlation is even achieved, if the composition of the minerals varies or totally change (3).

6 Conclusion

The established and presented installations clearly indicate the feasibility of the USE-based OPUS system for on-line particle size and solid concentration analysis of ore and mineral slurries.

The analytical method allows for operation in the harsh environment of mining and exploitation plants and is able to handle mineral slurries in their original state without preliminary sample preparation or conditioning. The high-resolution particle size distribution and solid content analysis provides a large variety of data available for process and production control. OPUS data agrees with other methods, such as e.g. sieve analyses.

The described features demonstrate OPUS is an outstanding prospect for particle size distribution analysis in the mining and exploitation industry.

5 Vergleichbarkeit

Eine der am häufigsten gestellten Fragen betrifft die Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus der USE mit denen anderer Methoden, wie z. B. der traditionellen Siebanalyse.

Mithilfe valider Analyseergebnisse korrespondierender und unter Umständen anwenderseitig bereits etablierter Messmethoden können die Resultate der USE an jene Analysenergebnisse angepasst werden. Dieser Abgleich erfolgt einmalig im Rahmen der Gerätekonfiguration und braucht später nicht mehr wiederholt zu werden. Eine regelmäßige Kalibrierung ist somit nicht erforderlich.

Bild 13 zeigt die auf diese Weise erreichte Qualität der Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen des OPUS-Sensors und jener der Siebanalyse für Kupfererz. Hierbei wurden mehr als 20 Proben zunächst mit dem OPUS und anschließend getrocknet mit einem Siebturm analysiert. Die dargestellten Rückstandswerte für die Siebklassen $< 38 \mu\text{m}$, $< 45 \mu\text{m}$, $< 75 \mu\text{m}$ und $< 212 \mu\text{m}$ stimmen sehr gut überein.

Studien der Fachhochschule (FH) Flensburg haben gezeigt, dass diese Übereinstimmung auch dann erreicht wird, wenn die Zusammensetzung der Erze variiert oder sich gar gänzlich ändert (3).

6 Schlussfolgerung

Die vorhandenen und dargestellten Installationen zeigen eindrucksvoll die Anwendbarkeit des auf der Grundlage der USE arbeitenden OPUS-Systems für die Online-Partikelgrößenanalyse unterschiedlicher Erz- und 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 hochauflösende Partikelgrößenverteilung und Feststoffkonzentration liefert eine Vielzahl von Daten für die Prozess- und Produktsteuerung. Diese Daten stimmen mit anderen Verfahren überein, wie z. B. der Siebanalyse.

Alle beschriebenen Merkmale kennzeichnen den OPUS-Sensor als besonders leistungsfähige Methode für die Analyse der Partikelgrößenverteilung in der Bergbau- und Erzaufbereitungsindustrie.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Riebel, U.: Die Grundlage der Partikelgrößenanalyse mittels Ultraschallspektrometrie. Diss. Karlsruhe, 1988.
- (2) Behrens, C.: Untersuchung zur Beschreibung der Ultraschallextinktion von Gasblasen in Flüssigkeiten. Diplomarbeit, TU Clausthal, 2000.
- (3) Stender, M.: Veröffentlichung IMPC, FH Flensburg, 2014.

Authors / Autoren

Fabian Borrmann M. Sc., Dip.-Ing. Christian Behrens, Sympatec GmbH, Clausthal-Zellerfeld/Germany