

# A Tech Company's View on IoT-Based Condition Monitoring – Utilizing Web-based Data Assessment Platform and Connected Devices to Improve Machine Utilization and Productivity

Condition monitoring and analysis of mining equipment requires more than suitable and reliable sensor technology, but also a holistic approach that makes use of interdisciplinary capabilities and intelligent software applications. Today, modern sensors consist of hardware and software components and ensure that machine data can be recorded and transmitted at any time. The Internet of Things (IoT) uses innovative software solutions to process the data collected on huge data platforms to make it available as valuable

information. It is only with these technologies that the sensor data on the machine condition, which is available today but still little used, can be processed in such a way that measures for a considerable increase in availability and productivity can be implemented. From the point of view of a technology company, the next stage of digitization can only be achieved through strong and interdisciplinary cooperation between mining companies, machine and plant manufacturers (OEMs) and technology companies.

## Web-basierte Zustandsüberwachung im Bergbau – Nutzung von Web-basierten Analyse-Plattformen für eine bessere Maschinennutzung und höhere Produktivität

Eine leistungsorientierte Web-basierte Zustandsüberwachung und -analyse von Bergbaumaschinen und -anlagen erfordert neben einer geeigneten und sicher funktionierenden Sensorik einen ganzheitlichen Ansatz, der interdisziplinäre Fähigkeiten und intelligente Softwareanwendungen nutzt. Moderne Sensoren bestehen heute aus Hard- und Softwarekomponenten und stellen sicher, dass Maschinendaten jederzeit erfasst und übertragen werden können. Mit dem Internet der Dinge (IoT) werden die so erfassten Daten mittels innovativer Softwarelösungen auf riesigen Datenplattformen verarbeitet und als wertvolle Information zur

Verfügung gestellt. Erst mit diesen Technologien können die heute verfügbaren, aber noch immer wenig genutzten Sensordaten über den Maschinenzustand so verarbeitet werden, dass damit Maßnahmen zur erheblichen Steigerung von Verfügbarkeit und Produktivität umgesetzt werden können. Aus Sicht eines Technologieunternehmens ist die nächste Stufe der Digitalisierung nur durch eine starke und interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Bergbauunternehmen, Maschinen- und Anlagenherstellern und Technologieunternehmen erreichbar.

### 1 Special challenges in the mining industry

Mining processes are complex and mining equipment – mobile, semi-mobile or stationary – is capital-intensive. In underground mining standard load-haul-dump (LHD) vehicles are approximately 70% more expensive than wheel-loaders and/or trucks with the same capacity used in surface operations. In large open-cast mines, huge off-high way trucks and heavy excavators and dozers represent a tremendous amount of investment of several hundreds of million US\$. However, in surface mines or in underground mines, mobile mining equipment, as well as stationary machines like processing plants, do contribute the main share of capital expenditure (CAPEX) in mining.

### 1 Besondere Herausforderungen im Bergbau

Bergbauprozesse sind komplex und Investitionen in die benötigten Baumaschinen, seien sie stationär, semi-stationär oder mobil, erfordern enorme Investitionskosten. So sind die im untertägigen Bergbau eingesetzten Fahrlader rd. 70% teurer als Radlader oder Straßen-LKW für den übertägigen Betrieb mit vergleichbarer Leistung. Vor allem die in internationalen Tagebaubetrieben eingesetzten Großgeräte, wie Muldenkipper mit Nutzlasten bis zu 400 t oder Hydraulikbagger mit über 50 m<sup>3</sup> Schaufelinhalt, tragen häufig einen Großteil zu den benötigten Investitionskosten im Bergbau bei.

Betriebskosten sind, neben den Investitionskosten, die andere wesentliche betriebswirtschaftliche Komponente, die über die

Operational expenditures (OPEX) are another major concern in mining. They are decisive for being competitive or not and can easily amount to a sum threefold of what was invested as CAPEX. Maintenance costs for mobile equipment often account to up to 25% of total OPEX. Adding the costs for running processing plants to this, will display the largest share (> 50%) of total spending during the life of a mine. Hence, maintaining machine fleets and processing plants should be the main concern when mining operations need to improve their margin. Digitalization offers the opportunity to claim a further piece of this potential.

Additionally, mine managers are facing further major challenges: skilled and experienced labor is more and more difficult to source as mining exposes to rough and hazardous working conditions and/or is practiced in remote areas.

In short, the mining industry seeks reducing risk exposure as well as increasing efficiency and productivity through the whole mining process and over all types of machinery. To do so, the industry follows various initiatives of improving existing measures and tools, such as smart sensors, condition monitoring systems, on-board assistance systems, or implementing new technologies, like autonomous operations and robotics etc. Most of the measures are understood to be related to the Internet of Things (IoT) or Industrial Internet of Things (IIoT).

Almost all players in mining industry follow the implementation of IoT related operations, products and services. To name a few: Rio Tinto established "The mine of the future™" (1) in 2008 implementing intelligent tools and a remote operations center for autonomous operations in Perth/Australia; Anglo American (2) introduced autonomous drills in underground mining as part of their FutureSmart Mining™. Original Equipment Manufacturers (OEMs), like Caterpillar (3) and Komatsu (4, 5) or Sandvik (6), Epiroc (7) and Metso (8), or service companies, like DMT (9), developed data driven and connected devices, including smart sensors, to generate and utilize data.

Last but not least, new tech players in the mining industry offer IoT solutions providing advanced and predictive analytics, often not linked to traditional OEMs but independent and universally applicable. They all have in common to stand on the doorstep into the digital age.

## 2 Condition monitoring in mining

For mining companies, as in most manufacturing industries, one of the key performance indicators is asset uptime. Hence, preventing equipment failure becomes crucial. Gathering data and insights on the machine, continuously or periodically, to be able to implement measures before failures occur is known as condition monitoring.

Condition monitoring is not unique for the mining industry, but broadly applied in other industries as well. However, the rough and harsh environment, the continuously changing conditions make mining operations standalone. Condition monitoring in mining does not distinguish between machine monitoring and process monitoring, but explicitly combines both.

A web-based approach to mining condition monitoring should therefore take a holistic approach that goes beyond machine condition monitoring to process condition monitoring. A more complete picture, from which suitable measures can be derived, e.g. for predictive maintenance, only emerges from a joint appraisal.

Wirtschaftlichkeit von Bergbauprojekten entscheidet. Allein die Instandhaltungskosten für mobile Anlagen können bis zu einem Viertel der gesamten Betriebskosten ausmachen. Addiert man die Kosten für die Instandhaltung der Aufbereitungsanlagen, kann der Anteil der Wartungskosten an den Gesamtkosten eines Bergbaubetriebs – auf die Lebensdauer des Projekts bezogen – mehr als 50% ausmachen. Den Instandhaltungskosten wird daher besonderes Augenmerk geschenkt, wenn es um die Kosten- und Margenoptimierung in Bergwerken geht. Die Digitalisierung von Maschinen und Prozessen bietet hier große Chancen, um weitere Potentiale in der Minimierung dieser Kostenstelle zu erschließen.

Neben dem Wettbewerbsdruck stehen Bergbauunternehmen vor weiteren großen Herausforderungen. Bergbau wird meistens in abgelegenen Gegenden betrieben. Errichtung und Betrieb der benötigten Infrastruktur sind oft kostenintensiv und langwierig. Trotz Mechanisierung sind die Arbeitsbedingungen hart und teilweise gefährlich, die Anforderungen hoch. Qualifizierte und erfahrene Arbeitskräfte zu finden, wird zunehmend schwieriger.

Der Bergbau steht also vor einer Reihe von Herausforderungen. Um die Attraktivität zu erhöhen und die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern, haben die Unternehmen bisher eine ganze Reihe von Maßnahmen ergriffen, z. B. den Einsatz intelligenter Sensoren für eine kontinuierliche Zustandsüberwachung einhergehend mit einer vorrausschauenden Instandhaltung mit On-board Assistenzsystemen auf den Bergbaumaschinen oder mit ganz neuen Systemen, die z. B. autonomes Fahren ermöglichen. Die letztgenannten Maßnahmen können als Produkt des sogenannten Internet der Dinge (IoT/Internet of Things) bzw. des Industriellen Internet der Dinge (IIoT/Industrial Internet of Things) bezeichnet werden.

Beispiele hierfür sind der „Tagebau der Zukunft“, den Rio Tinto seit 2008 in Australien mit autonomen Fahrzeugen und einer Steuerzentrale im 1.500 km entfernten Perth führt ("The mine of the future™" (1)), das FutureSmartMining-Programm von Anglo American, u. a. mit einem Projekt über autonomes Abbohren von Sprenglöchern im untertägigen Bergbau Südafrikas (FutureSmart Mining™ (2)). Aber auch Bergbaumaschinenhersteller wie Caterpillar (3), Komatsu (4, 5), Sandvik (6), Epiroc (7) und Metso (8), sowie Dienstleister wie die DMT (9) entwickeln datengesteuerte und fernüberwachte Bergbaumaschinen mit intelligenten Sensoren oder digitalisierte Dienstleistungen.

Neben den klassischen Unternehmen sind neue Akteure am Markt. Junge (IT-)Technologieunternehmen bieten IoT-Lösungen auf Web-basierten Plattformen an, die Bergbauunternehmen mit zielgerichteten Analysen unterstützen oder Lösungen für vorausschauende Instandhaltung oder für Automatisierung anbieten. Die Lösungen von Dritten bieten oftmals den Vorteil, dass sie herstellerunabhängig sind und universal eingesetzt werden können.

Allen Lösungen und Maßnahmen, ob von Bergbaubetreibern, Zulieferern oder neuen Technologieunternehmen, ist gemein, dass sie im Begriff sind, die vollen Potentiale der vierten industriellen Revolution, der Digitalisierung, zu erschließen.

## 2 Zustandsüberwachung im Bergbau

Für Bergbauunternehmen wie auch für die übrigen produzierenden Industrien sind Verfügbarkeit und Nutzungsgrad von Anla-

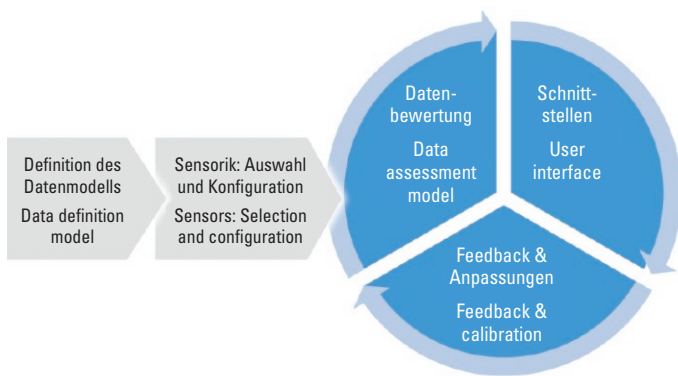


Fig. 1. Condition monitoring process.  
Bild 1. Prozessablauf in der Zustandsüberwachung.

For a basic understanding, the essential elements of condition monitoring are briefly described in the following (Figure 1).

## 2.1 Data definition model

Condition monitoring was predominantly developed for the application in static production processes, such as oil refining, machinery manufacturing or energy production. It is based on continuous or periodically measurable physical events, such as vibrations, temperatures, forces, current, mechanical wear etc. of dynamic components in machines. By measuring various parameters (vibration, temperatures, throughput etc.), of certain components during operation, their remaining lifetime can be estimated. It is further necessary to understand when and in which frequency measurement needs to be done (start-up, normal operation cycle, overload) leading to certain events (wear-out, overheat, damages of certain machine parts).

In mining, conditions of machines depend on various influences from environmental conditions, e.g. weather, and operating conditions, e.g. road inclination, road conditions, mineral grain size, loading cycles, and operators handling.

The data acquisition model is created by summarizing all knowledge or understanding of what needs to be monitored when and how. Thus, the data baseline for sourcing insights from the monitoring is defined.

## 2.2 Sensor selection/configuration

As a next step, the data which was defined to be relevant in the data acquisition model needs to be sourced. Therefore, it is crucial to have a clear understanding “with what” sensors the data can be acquired.

Nowadays most new machines are supplied with a full set of different sensors pre-installed. The range of sensor varies broadly from single to multi-measurement sensors, storing and transmitting data capabilities, integration and connectivity capabilities with different hardware and software.

Sensors today are intelligent and smart, means that they include micro-controllers, which enable them not only measuring single signals but also processing the complete set of signals. In this regard, it is common to take existing sensor configuration into account while working on the data model.

However, when it comes to retrofit-solutions most clients are reluctant as acquiring and installing a large number of suit-

gen und Maschinen wesentliche Kenngrößen. Die Vermeidung von Maschinenfehlern und Stillstandzeiten wird daher immer prioritär behandelt. Um Aussagen über Störungen und Maschinenzustände zu erhalten, ist eine Zustandsüberwachung und somit auch eine kontinuierliche oder periodische Übertragung von Maschinen- und Prozessdaten notwendig. Zustandsüberwachung meint hier das Erfassen und Protokollieren sowohl von technischen Zuständen als auch von Belastungen von Bauteilen, Baugruppen oder ganzen Maschinen.

Wie in einigen anderen Industrien auch, findet im Bergbau Zustandsüberwachung statt. Gegenüber anderen industriellen Anwendungen sieht sich der Bergbau zusätzlich ständig ändernden Produktionsbedingungen und einer besonders rauen Arbeitsumgebung ausgesetzt.

Deshalb sollte die Zustandsüberwachung im Bergbau einen gesamtheitlichen Ansatz verfolgen, der über die Überwachung von Maschinenzuständen hinaus auch die Überwachung von Prozesszuständen umfasst. Erst aus der gemeinsamen Betrachtung ergibt sich ein vollständigeres Bild, aus dem geeignete Maßnahmen, etwa für eine vorausschauende Instandhaltung, ableitbar sind.

Zum grundlegenden Verständnis werden im Folgenden wesentlich Elemente des Zustandsüberwachungsprozesses dargestellt (Bild 1).

## 2.1 Definition des Datenmodells

Die Zustandsüberwachung wurde ursprünglich für den Einsatz in statischen Produktionsprozessen wie in der Erdölraffination, dem Maschinenbau oder in der Energieerzeugung entwickelt, und wird heute auch auf dynamische Produktionsprozesse wie im Bergbau übertragen. Grundlage für die Zustandserfassung sind kontinuierliche oder periodisch messbare physikalische Daten, wie Vibrationen, Temperaturen, Kräfte, Spannungen und Energieverbrauch. Die Datenbasis ist so zu gestalten, dass sie die verschiedenen Betriebszustände mit unterschiedlichen Belastungszuständen einer Maschine, etwa beim Anfahren, im Dauer- oder Regelbetrieb oder bei Grenzbelastungen, abdecken kann. Durch die Messdaten sollen auch Zustände, z.B. Überhitzung, erfasst werden können, die zu einem Schaden oder Ausfall der Maschine führen würden.

Da der Einsatz und damit die Belastungen der Maschinen im Bergbau den starken variablen Abbaubedingungen unterliegen, muss eine Zustandsüberwachung auch eine geeignete Erfassung von Umfelddaten berücksichtigen. So wirken sich die Umgebungsbedingungen im Tagebau (z.B. Wetter, Temperaturschwankungen, Straßenneigung, Fahrwegoberfläche), die prozessualen Bedingungen (z.B. Korngröße, Lade- und Rangierzyklen) sowie das Verhalten der Fahrzeugführer (Beschleunigen, Bremsen) ganz wesentlich auf die Maschinenzustände aus.

Insofern ist es wichtig, das Datenerfassungsmodell auf die jeweiligen Einsatzbedingungen so anzupassen und festzulegen, dass alle wesentlichen Messgrößen und beeinflussenden Informationen für eine umfassende Auswertung vorliegen.

## 2.2 Sensoren – Auswahl und Konfiguration

Neben der Festlegung der benötigten Daten, also der Definition des Datenmodells, die für eine Bewertung des Maschinen-

able sensors can be quite costly, not taking into account the additional downtime of the concerned asset. Another issue in mining industry is common variety of machines from various OEMs in one fleet. Also, standards for internal data transmission in mobile equipment do exist but are respected rarely. Furthermore, OEMs tend to be sceptic or strongly dismissive about opening their machine's data protocols to third party suppliers or service providers. However, a number of hardware and software solutions to tackle this issue do exist.

### 2.3 Data assessment model

The data assessment model is the most critical part of the entire condition monitoring concept and is meant to set up the limits and ranges applicable to defining the risks of failure of certain parts of equipment under normal utilization or sudden impact conditions. There are two approaches to creating data assessment models (10):

- Knowledge based approach:  
In this approach, the experienced based expert knowledge is primarily integrated in the modelling of condition monitoring. It requires expert knowledge about specifics of operational conditions and experts who are able to define load limits and at which moment the possible wear-out or failure of the equipment can be estimated. This approach is currently most exercised in the industry. However, certain lack of expert knowledge as well as high risk of improper evaluation at the initial stage results in quite frequent failures of the strategy. At first attempt the fear that defined failures will occur more frequently instead of being managed properly, might lead to abandon such initiatives. The right approach to this would be assuming that knowledge-based models need calibration and reconciliation and allow certain time for implementation before the model becomes final.
- Data driven approach:  
The data-driven approach is based on data from different sensor systems and other data sources. The approach is particularly well suited if sufficient historical data over a longer period of time is already available to assess incidents. The data patterns are then depicted in algorithms and automatically optimized by the growing amount of data. The physical understandings of aging processes (fatigue, wear) and recurring events of malfunction are thus digitally modeled so that the time points of malfunction can be calculated. The precision of the predictions increases with the amount of data and the number of historical incidents covered by it. The data-based approach has two distinct advantages over the expert system:
  - No assumptions are made, but real historical data is assessed.
  - Multi-factorial correlation analyses can be carried out, which make correlations apparent that may not yet have been covered by expert knowledge.

### 2.4 User interface/process integration

The user interface seems to be obvious for automated computer-based monitoring. However, very often it becomes a hurdle during implementation, if the interface is not intuitive enough for various user groups within a company.

zustands geeignet sind, gilt es die Frage zu beantworten „mit welchen Sensoren“ gemessen werden soll. Diese Antwort wird vielfach von den Maschinenherstellern gemeinsam mit Sensorherstellern entwickelt und bestimmt. So werden Bergbaumaschinen heute mit verschiedensten Maschinen- und Umfeldsensoren ausgeliefert, die teilweise als intelligente Sensoren bereits über technische Möglichkeiten des Datenspeicherns und der Datenübertragung bis zur Datenverarbeitung verfügen.

Sensoren sind heute intelligent, d.h. sie verfügen über Mikroprozessoren und Speichermöglichkeiten, sodass nicht nur einzelne Signale, sondern komplette Signalsätze gemessen und verarbeitet werden können. Insofern muss auch das jeweilige Datenmodell an das komplexere Sensornetzwerk angepasst werden.

Die nachträgliche Ausstattung von Maschinen und Anlagen mit Sensorik ist grundsätzlich möglich. Sogenannte Retrofit-Lösungen werden allerdings von Kunden nur zurückhaltend angenommen, da die Anschaffung und die nachträgliche Installation zeitaufwendig sind und die Montage zu spürbaren Betriebsunterbrechungen führen kann. Für etliche Bergbauunternehmen besteht zudem die Schwierigkeit, passende Sensorik auf Maschinen unterschiedlicher Hersteller unterzubringen. So ist eine technische Einbindung in vorhandene Konstruktionen nicht immer möglich oder seitens der Hersteller nicht gewollt, da sie unter Umständen herstellereigene Produkte umgehen, auch wenn diese häufig nicht die gleichen oder passenden Leistungsspektren abdecken.

### 2.3 Datenbewertungsmodell

Das Datenbewertungsmodell ist der kritischste Teil geeigneter Konzepte zur Zustandsüberwachung. Hier werden der Rahmen und die Grundlage für die Bewertung von Ausfallrisiken bestimmter Maschinen- und Anlagenteile für die jeweiligen Einsatzbereiche festgelegt. Grundsätzlich können zwei Herangehensweisen unterschieden werden (10):

- Wissensbasierter Ansatz/ Expertenlösung:  
Im wissensbasierten Ansatz wird vor allem erfahrungsbasiertes und kontextsensitives Expertenwissen formalisiert und in die Modellierung der Zustandsüberwachung integriert. Das Fachwissen bezieht sich einerseits auf die maschinenseitige Kenntnis und Erfahrung von Belastungsgrenzen und Verschleißcharakteristika, die zu einem Schaden oder Ausfall der Maschine oder des Bauteils führen können. Zu diesem Wissen zählt auch das Wissen und die Erfahrung über unterschiedliche Instandhaltungsstrategien, seien sie zyklisch/präventiv oder vorausschauend. Das Expertenwissen umfasst vor allem das Wissen und die Erfahrung aus der betrieblichen Anwendung, aus den Einsatz- und Rahmenbedingungen, aber auch das anwenderseitige Fachwissen, d.h. das Wissen über den Einsatz, dessen Rahmenbedingungen und das Bedienerverhalten. In diesem wissensbasierten Ansatz sind auch kontextuelle Informationen dauerhaft integrierbar.
- Datengesteuerter Ansatz:  
Der datengesteuerte Ansatz basiert auf Daten unterschiedlicher Sensorsysteme und anderen Datenquellen. Der Ansatz eignet sich vor allem, wenn bereits ausreichend historische Daten (Trainingsdaten) über einen längeren Zeitraum vorliegen, die es erlauben, Störfälle auszuwerten und anhand spezieller Datenmuster zu definieren. Die Datenmuster werden

One further aspect needs to be considered. The integration of condition monitoring software in its role to feed relevant data to other business processes or partners within or outside the company, such as maintenance planning, spare parts management, and budgeting and procurement management.

In this regard it is very important to understand how the condition monitoring interface will be integrated into the existing software landscape that is used in the company or otherwise choose a partner that is able to provide and maintain the system allowing integration of all the processes in one single platform.

### 2.5 Calibration and reconciliation

It is a known fact that the development of any monitoring system is a cyclical process that requires permanent tracking of modelled results versus real outcomes. There is hardly any mathematical model in the world that will allow defining its limits in the first go. Having permanent feedback loops supplied into the model allows its continuous improvement and development using new influencing factors that can arise. This is especially important in the continuously changing conditions of the mining industry.

Therefore, a crucial point is the ability of the system to provide extensive level of feedback regarding the model that it is using, to achieve steady improvement by further calibration and reconciliation. This should include the opportunity to derive (manually or automatically) historical analysis of the events, interpretations and failures as a sufficient basis of future improvements.

### 3 The next step: IoT-based condition monitoring and predictive maintenance

It is still common to limit condition monitoring to a single piece of equipment or even certain components of such. Sensor measurement of vibration, noise, oil contamination, pressure losses etc. diagnoses asset health, indicating which machine components are about to fail, giving alerts and warnings to the operator and maintenance crew in order to initiate further actions.

However, without additional information about the operational processes further analysis is not possible. Without such adjacent information the causes or circumstances of failures and likelihood to re-occur cannot be defined.

With the advent of IoT, equipment is built and retrofitted with significantly more and more digital and/or intelligent sensors (smart sensors) and directly connected to the internet. This enables monitoring measurable condition(s) of a machine continuously and in real-time. Machine data can easily be linked to operational and contextual data, fueling the data base for in depth analytics.

Mining companies and OEMs today have recognized that emerging digital technologies, such as IoT, Artificial Intelligence (AI) and machine learning will inevitably change the way of industrial mining. Faster and better decisions based on more transparent and rapidly available information will most certainly be a game changer for managing mining operations.

It has now become a matter of course that digitalization of equipment and processes leads the way to a safe, stable and automated production environment. In the initial phase of digitalization, utilizing automated real-time data streams from ma-

dann durch Algorithmen abgebildet und mit zunehmender Datenmenge automatisch optimiert. Das physikalische Verständnis von Alterungsvorgängen, z.B. Ermüdung, Verschleiß, und wiederkehrenden Schadensfällen wird somit digital abgebildet, sodass Zeitpunkte von Schadensfällen oder Störungen berechnet werden können. Die Präzision der Vorhersagen steigt dabei mit zunehmenden Datenmengen und der Anzahl der durch Daten belegten historischen Störfälle. Der datenbasierte Ansatz hat gegenüber dem Expertensystem zwei deutliche Vorteile:

- Es werden keine Annahmen getroffen, sondern Muster echter historischer Daten ausgewertet.
- Es können multifaktorielle Korrelationsanalysen durchgeführt werden, die Zusammenhänge sichtbar machen, die u.U. im Expertenwissen bisher nicht belegt sind.

### 2.4 Nutzerschnittstelle und Prozessintegration

Ein weiteres Element des Prozessablaufs zur Zustandsüberwachung ist die Erstellung der Kommunikationsschnittstelle und der Benutzeroberfläche. Grundsätzlich sind die informationstechnischen Schnittstellen und industriellen Kommunikationsstandards auf der jeweiligen Datenebene der Sensorik, der Maschinensteuerung oder der Bedienelemente und Leitstandansichten logisch konzipiert, auch wenn ggf. verschiedene Hersteller unterschiedliche Standards verwenden. In Bezug auf die unterschiedlichen Nutzergruppen in den Unternehmen stellen sie jedoch besondere Herausforderungen dar.

Gerade bei der Zustandsüberwachung und den hieraus ableitbaren Informationen und Handlungsempfehlungen haben die unterschiedlichen Nutzergruppen sehr verschiedene Anforderungen, die sich nach ihren jeweiligen Aufgaben und Funktionen richten. Beispielhaft seien hier auf Seiten des Bergbauunternehmens die Bediener und Fahrzeugführer und ihre Vorgesetzten, der Instandhaltungsmanager, das Ersatzteilmanagement, die Planungsabteilung, und auf Seiten der Maschinenhersteller, das Servicepersonal und Konstruktionsingenieure genannt.

Die Integration einer Anwendung zur Zustandsüberwachung in die bestehende Softwarelandschaft des jeweiligen Bergbauunternehmens bzw. Maschinenherstellers stellt eine gesonderte Herausforderung dar. Die Schnittstellen und Integrationsmöglichkeiten sind so zu konzipieren, dass dem Anwender zwar zusätzliche Informationen bereitgestellt werden, aber möglichst kein zusätzlicher Bedienungsaufwand entsteht. Zu komplexe, nicht intuitive Anwendungen werden oftmals von den Nutzern ignoriert, selbst wenn sie bei richtiger Bedienung großen Mehrwert liefern könnten. Im Zweifelsfall werden dadurch nicht alle Nutzergruppen erreicht.

### 2.5 Feedback und Anpassung

Die bereits genannten besonderen Anforderungen im Bergbau mit einer sich ständig verändernden Datengrundlage und wachsenden Datenmenge erfordert einen regelmäßigen Feedbackprozess, in dem die technischen und prozessualen Parameter sowohl auf der maschinentechnischen Seite als auch der Bergbauseite überprüft und ggf. neu eingestellt werden. So können sich Messgenauigkeiten ändern, zusätzliche Messdaten und Kontextdaten aufgenommen werden, Grenzwerte noch genauer dargestellt

chines combined with big data technologies and algorithms will enable location tracking, activity monitoring, and continuous machine health information. Mines and operations will become transparent, as well, without the necessity to allocate physical resources other than some hardware updates.

Consequently, IoT-based condition monitoring is an essential component and a prerequisite for predictive maintenance, which is based on a holistic view of real-time and historical machine and contextual data, processed by intelligent machine learning mechanisms.

#### 4 talpasolutions' approach

The environment described in the preceding is where talpasolutions GmbH, an in Essen/Germany based company, has found its business base.

talpasolutions offers an asset analytics platform for the mining industry and OEMs in which real-time and historical data of machines and plants as well as contextual information of operational and environmental conditions can be stored, standardized, processed, analyzed, validated and reflected back in a clear and understandable form (Figure 2).

The platform provides a broad range of different functions for different user groups in mine operations and OEMs.

The platform will enable mining companies as well as OEMs and service companies to create new service offerings. Such, as refined condition and performance monitoring, display of trends and forecasts relevant to planning with regard to downtimes, operational anomalies, consumption of consumables including energy, predictive diagnostic and repair recommendations, optimization of spare parts stocking and delivery.

However, those advanced use-cases of digitalized machinery can only be implemented in fully connective fleets. Also, sufficient historic data needs to be present or sourced. To do so, the IoT solution developed by talpasolutions is currently laying the data-foundation for this revolution:

The continuous transmission of sensor data from assets produces multiple Gigabytes of data per day. In order to process this (big) data effectively, tailor made software is required. The software has to be designed to capture all five V's of big data

und neue wissenschaftliche Erkenntnisse hinzukommen, um nur einige Beispiele zu nennen.

#### 3 Der nächste Schritt – eine Web-basierte Zustandsüberwachung und vorausschauende Instandhaltung

Derzeit ist es gängige Praxis, die Zustandsüberwachung auf einzelne Maschinen und deren Bauteile und Komponenten zu beschränken. Das Messen von Vibrationen, Geräuschen, Ölverunreinigungen, Druckverlusten usw. diagnostiziert lediglich den derzeitigen Maschinenzustand. Bei Erreichen eines vom Hersteller vorgegebenen Schwellenwerts wird der Bediener oder ggf. das Wartungspersonal gewarnt bzw. informiert, sodass sofortige Maßnahmen oder geeignete Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten geplant werden können.

Ohne zusätzliche Information über die jeweiligen Rahmen- und Einsatzbedingungen ist eine tiefgreifende Analyse jedoch schwerlich möglich. Ursachen und Umstände, die im Zusammenhang mit den jeweiligen Messdaten liegen, können nicht erfasst oder hergeleitet werden, sofern keine hierfür ausgerichtete Sensorik oder weiterführende Datenverarbeitung vorhanden ist.

Mit den heute zur Verfügung stehenden Technologien des IoT lassen sich Maschinen und Anlagen mit ihren intelligenten und vernetzten Sensoren in Echtzeit überwachen. Die Messdaten aus Maschinen- und Umfeldsensorik können zudem langfristig gespeichert werden und stehen somit für weiterführende Analysen zur Verfügung.

Bergbauunternehmen und Maschinenhersteller nutzen die neuen digitalen Technologien an vielen Stellen. Das IoT mit seinen Instrumenten der Künstlichen Intelligenz (AI) oder des Maschinenlernens (Machine Learning) sind nicht mehr wegzudenken. Sie werden die Industrie mit ihren Arbeits- und Entscheidungsprozessen maßgeblich verändern.

Es wird inzwischen als selbstverständlich angesehen, dass nur mit einer weiteren Digitalisierung von Maschinen und Arbeitsprozessen diese sicherer, effizienter und produktiver gestaltet werden können. Messdaten können heute in Echtzeit erfasst, übertragen und langfristig gespeichert werden. Sie erlauben eine jederzeitige Überwachung des Zustands einzelner Komponenten und der gesamten Maschine oder Anlage. Maschinendaten

lassen sich mit zahlreichen Kontextdaten wie etwa Positionsdaten verknüpfen, sodass auch eine Überwachung der Maschinenumgebung und vor- oder nachgelagerter Prozesse möglich ist. Dies ist vor allem für die Positionierung oder für Kollisionsmeldungen/-warungen mobiler Fahrzeuge und hieraus resultierender Schäden sinnvoll.

Daher ist die Web-basierte Zustandsüberwachung eine Voraussetzung für eine vorausschauende Instandhaltung von Ma-

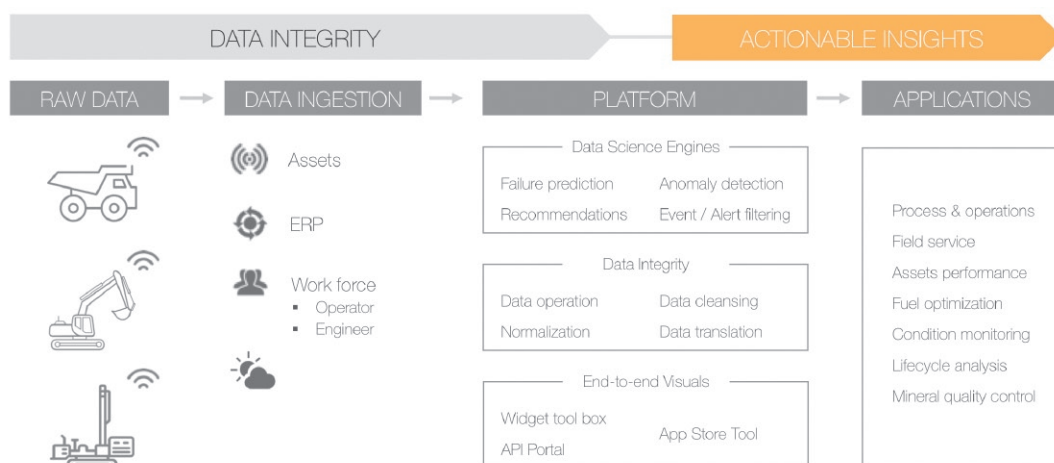


Fig. 2. Software concept of asset analytics – data sources, platform, and applications.

Bild 2. Softwarekonzept der Asset-Analyse – Datenquellen, Plattformen und Anwendungen.

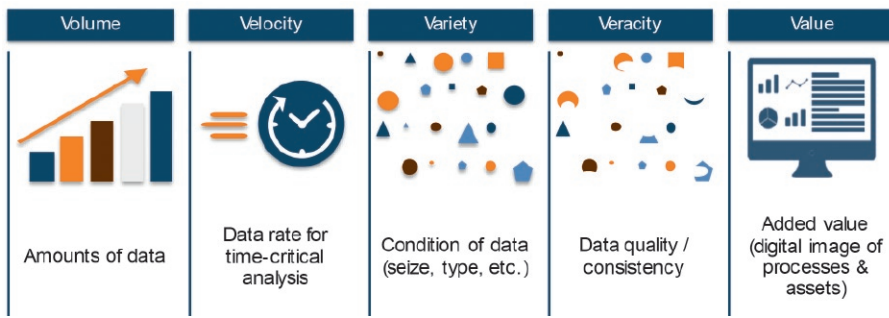


Fig. 3. Understanding big data – five V's (Volume, Velocity, Variety, Veracity, and Value).  
 Bild 3. Big Data verstehen – fünf V's (Volume, Velocity, Variety, Veracity, and Value).

analytics: volume, velocity, variety, veracity, and value of data (Figure 3).

Applying big data analytics needs to reflect the continuous increasing amount of data – with multiple gigabyte per hours to be monitored and processed. To allow a flawless operation of the system as well as a fast response on changes in processes, all data has to be transmitted, processed, and analyzed in real-time, where necessary, especially when real-time alerts are inevitable. When analyzing data of assets from different manufacturers, a broad variety of sensor data can be found. The data differentiates not only through amount but more crucially is transmitted in different formats and units of temperature, pressures, and power or, e.g., different grid standards, when it comes to positioning data. The variety is further enlarged by all kind of mine data, e.g. from environmental or geological origin.

As complex analyses can no longer be handled manually to gain added value, advanced machine learning algorithms are applied in big data analytics. They do not only take into account solid measurements but also empirical values of experts and benchmarked and approved best-practice.

Last but not least, a fundamental prerequisite is a user-friendly, simple and at-a-glance interface and visualization (Figure 4) which allows personnel with user-/role-specific access authorization to receive the required information and improve the decision-making process in time, accuracy and quality.

Today, these are the major challenges in the industry on its journey towards digital transformation and key discipline of talpasolutions. Especially in the fields of maintenance and process optimization in mining industry, the potentials for optimization are significant. This is valid for fleet-wide computer-based adjustments in maintenance, based on live data and accumulating historical data of asset wear and tear. Also, the same correlations can be utilized by leveraging predictive and prescriptive analytics to optimize mixed fleets involved in the mining cycle by a timely coordination of all processes of the production chain.

## 5 Linking interdisciplinary skills of mining, mechanics and IT

To create valuable insights it is of utmost necessity to gain a fully and deep understanding of the construction and behavior of the machine, of the machine in operation and how the individual sensor data contributes to conditional monitoring and further to insights on the vehicle and the mining process, thus leading to predictive maintenance measures.

schinen und ihren Bauteilen sowie für eine vorausschauende Gefahrenabwehr. Web-basiert meint hier auch die ganzheitliche Betrachtung von Echtzeit- und historischen Maschinen- und Kontextdaten und deren Verarbeitung mit Big Data-Verfahren.

## 4 Der Ansatz von talpasolutions

In diesem bisher geschilderten Umfeld hat die talpasolutions GmbH, ein in Essen ansässiges Technologieunternehmen, seine Geschäftsgrundlage gefunden.

talpasolutions bietet eine Asset-Analytics-Plattform für die Bergbauindustrie und Maschinenhersteller an, in der Echtzeit- und historische Daten von Maschinen und Anlagen sowie kontextbezogene Informationen über Betriebs- und Umgebungsbedingungen gespeichert, standardisiert, verarbeitet, analysiert, validiert und in verständlicher Form wiedergegeben werden können (Bild 2).

Die Plattform bietet ein breites Spektrum an unterschiedlichen Funktionen für verschiedene Benutzergruppen in Bergbauunternehmen und bei den Maschinenherstellern. Sie ermöglicht Zustands- und Leistungsüberwachung von einzelnen Maschinen und ganzen Flotten. Die Darstellung von Trends und planungsrelevanten Prognosen in Bezug auf Ausfallzeiten, Betriebsanomalien, Verbrauchsanalysen von Kraftstoffen, Energie und anderen Betriebsstoffen wird von überall zugänglich. Vorausschauende Diagnose- und Reparaturempfehlungen oder die Optimierung der Ersatzteilbevorratung und -lieferung bauen auf diesen Daten und Erkenntnissen auf und optimieren Geschäftsabläufe tiefgreifend.

Mit seiner Lösung verfolgt das Unternehmen einen grundlegend neuen Ansatz, welcher der kontinuierlichen Übertragung und ihrer Verarbeitung geschuldeten großen Datenmenge gerecht wird. Die Lösung ist so konzipiert, dass sie alle fünf V's der Big Data Analytics erfasst: Volumen (Volume), Geschwindigkeit (Velocity), Vielfalt (Variety), Wahrhaftigkeit (Veracity) und Wert der Daten (Value) (Bild 3).

Das erste V steht für das große und ständig zunehmende Datenvolumen, das überwacht und verarbeitet werden muss (Volume).

Je nach Übertragungsart und -geschwindigkeit, WLAN oder Funknetzwerke, ist eine zeitweise Zwischenspeicherung auf der Maschine oder auf Zwischenservern notwendig und damit paketweise Datenübertragung möglich. Um allerdings einen einwandfreien Betrieb des Systems sowie eine schnelle Reaktion auf Prozessänderungen zu ermöglichen, ist es zielführend, alle Daten in Echtzeit zu übertragen, zu verarbeiten und zu analysieren, insbesondere dort, wo Alarmer oder Benachrichtigungen in Echtzeit notwendig werden (Velocity).

Wie erwähnt, ist die von den Herstellern und Bergbauunternehmen verwendete Sensorik sehr unterschiedlich. Die Daten unterscheiden sich somit nicht nur der Menge nach, sondern auch in Formaten, Standards, Übertragungsverfahren, nach Signalen und SI-Einheiten. Bei der Positionierung etwa können unterschiedliche GPS-Raster genutzt und übertragen werden, geologische Daten verfügen über unterschiedliche Nomenklaturen usw. Damit wird die Komplexität weiter erhöht (Variety).

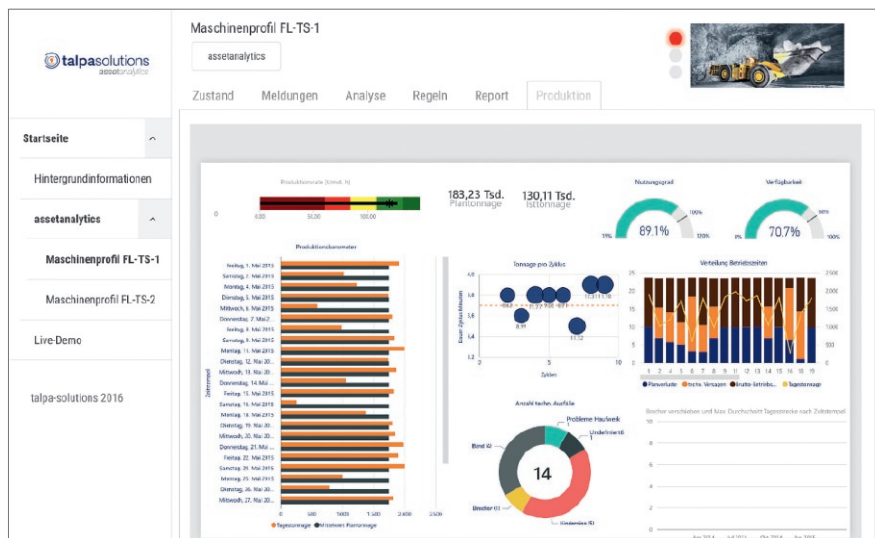


Fig. 4. Screenshot of the asset analytics. // Bild 4. Screenshot der Asset-Analyse.

As operational insights do not focus exclusively on real-time data but on previous findings and experiences, it is necessary to include historical and contextual data. Therefore, such data needs to be uploaded manually or automated via web-based interfaces in an appropriate software format.

The actual data processing starts with the automatic recognition of data types and formats, their temporal and spatial allocation to machines and processes. In a further step the analysis of the data processed in this way and the acquisition of valuable operational insights consists of transferring and combining the processed data to the complex processes of mining – and last but not least to the typical success indicators for mine productivity and efficiency.

Here is where mining expertise meets IT know-how. Mining experts have a profound machine and process understanding to the data set, which in joint collaboration with the data analysts, is transferred into operational insights (Figure 5).

### 5.1 Conclusion 1 – machine learning approach is the future of condition monitoring

The knowledge-based approach to defining the limits of equipment failure is prevailing in the industry nowadays, due to the facts that no reliable platforms are available for extensive data analytics. Additionally, there is a lack of understanding how to handle various kinds of contextual data in order to build reliable condition monitoring models.

However, the data driven approach using amounts of already available historical data is the only suitable way for the future, allowing to avoid assumptions and using multi-factor assessment of the failure events. This is especially the case in mining industry, where operational conditions of equipment are affected by permanently changing work environments. Once the data baseline has been built, changing work environments will not be a concern anymore. Real-time data combined with historical and contextual data will allow to recognize patterns, regardless the frequency of events. Deep learning algorithms will continue utilizing such data-sets to provide operational insights and enabling predictions, as precise as no one can imagine today.

Da komplexe Analysen nicht mehr manuell durchgeführt werden können, um einen Mehrwert zu erzielen, werden in der Big Data-Analytik Algorithmen des Maschinenlernens eingesetzt. Die erfordern eine klare Struktur, Validität und Schärfe aller Rohdaten, seien sie aus der Maschinen- und Umfeldsensoren oder den Kontextdaten, wie sie aus anderen Systemen oder auch von Experten zur Verfügung gestellt werden (Varicity).

Zu guter Letzt müssen die komplexen Analyseergebnisse und sich hieraus ergebende Informationen und Handlungsempfehlungen/-anweisungen für den jeweiligen Nutzer auf einer benutzerfreundlichen, einfachen und übersichtlichen Oberfläche (Bild 4) verständlich visualisiert werden (Value).

Mit ihrer Web-basierten Lösung einer Asset Analytics-Plattform beschreitet talpasolutions den von vielen Bergbauunternehmen und Maschinenherstellern eingeschlagenen Weg zur digitalen Transformation ihrer Produkte, ihrer Prozesse und sogar ihrer Geschäftsmodelle. Insbesondere in den Bereichen Instandhaltung und Prozessoptimierung im Bergbau sind die Optimierungspotentiale groß. Eine Web-basierte Zustandsüberwachung basierend auf einem ganzheitlichen Ansatz ist daher eine wesentliche Voraussetzung, um Maschinen und Produktionsprozesse produktiver und effizienter zu gestalten.

## 5 Die Verknüpfung interdisziplinärer Kompetenzen aus Bergbau, Maschinenbau und Informationstechnologie

Wie bereits erwähnt, erfordert eine effiziente Zustandsüberwachung einen ganzheitlichen Ansatz, der nur durch die Beteiligung des Bergbaubetriebs, des Maschinenentwicklers und eines (IT-) Technologie-Partners vollumfänglich erarbeitet werden kann.

Um wirklich essentielle Erkenntnisse zu gewinnen, ist es in erster Linie notwendig, ein vollständiges und tiefes Verständnis für den Aufbau und das Verhalten der Maschine im Betrieb sowie der einzelnen Maschinen- und Umfeldsensordaten zu haben. Schließlich sollten die Bedeutung und der Einfluss der Daten vor allem auf mögliche Instandhaltungsmaßnahmen/-alternativen und/oder andere organisatorische Maßnahmen plausibilisiert sein. Da sich operative Erkenntnisse nicht ausschließlich auf Echtzeitdaten konzentrieren, sondern auf frühere Erkenntnisse und Erfahrungen, ist es notwendig, historische und kontextbezogene Daten einzubeziehen.

Auf der IT-technischen Seite ist sicherzustellen, dass alle Daten über geeignete Schnittstellen in die Analyseplattform integriert und in für die weitere Speicherung und Verarbeitung geeignete Formate übertragen werden. Die eigentliche Datenverarbeitung beginnt mit der automatischen Erkennung von Datentypen und -formaten, deren zeitlicher und räumlicher Zuordnung zu Maschinen und Prozessen. Dabei sind die Algorithmen so anzuwenden, dass sie die Indikationen für eine vorausschauende Instandhaltung bzw. produktivitäts- und effizienzsteigernde Maßnahmen benennt.

Hier trifft Bergbaukompetenz auf IT-Know-how. Bergbauexperten verfügen über ein tiefes Maschinen- und Prozessverständ-



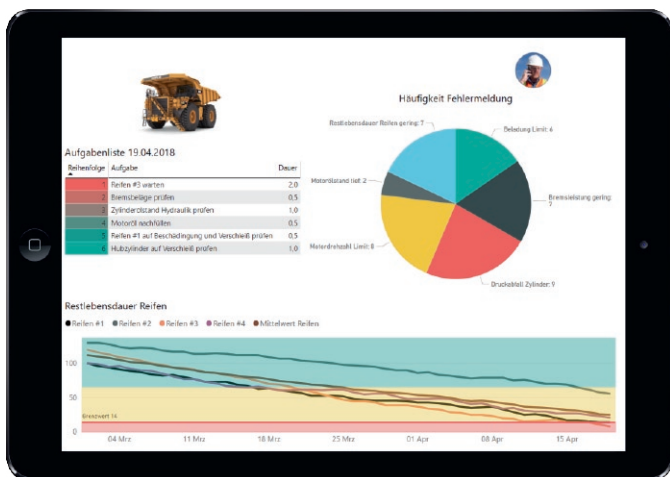


Fig. 5. Predictive maintenance will most likely boost up-time of assets, resulting in a higher productivity and cost efficiency. Once sufficient sensors and data are integrated, all crucial parts can be monitored and tasks advised. // Bild 5. Digitallösungen für vorausschauende Wartung, basierend auf Zustandserfassungssystemen, werden die Effizienz des Maschineneinsatzes neu definieren, sobald ausreichende Sensorik flächendeckend vorhanden ist und somit Daten zu allen kritischen Teilen und Prozessen zur Verfügung stehen.

### 5.2 Conclusion 2 – IoT is the way forward

IoT being the network of objects such as computing machines, embedded devices, equipment and tools, and sensors; a new level of contextual or relevant data can be sourced. The focus will be set on conditions and processes, and not be limited on single assets themselves.

In the mining industry, data is generated in remote mines sites. IoT-connected platforms can store the ever-expanding amount of diversified data from multiple sources and from the machine learning algorithms.

IoT-based condition monitoring is essential for the next level of digitalization of mining. It will open the way to access efficiency levels which have never been there before. Additionally, the risky and hazardous environment will not endanger miners anymore, as they will be able to control the equipment and perform operations from air-conditioned working stations in safe environments.

### 5.3 Conclusion 3 – Opportunities to be revealed by collaboration of tech companies, mining enterprises and OEMs

According to the German Mechanical Engineering Association (VDMA) (11), IoT platforms and IoT software will create the basis for a digital eco-system (Figure 6). The mechanical industry is striving to implement and make use of application for their products, their services, and their own processes. The biggest obstacle, however, is the lack of skilled personnel. Conclusively, the answer is to build cooperation between IT companies, machinery and plant engineering companies, service partners, research organization and universities, and last but not least users.

Due to the increasing technical complexity of the equipment, an interdisciplinary cooperation between end users at the mining companies, the OEMs and the tech companies is becoming more and more important.

nis, das in Zusammenarbeit mit den Datenanalysten in operative Erkenntnisse umgesetzt und in Datenmuster und Algorithmen übersetzt wird (Bild 5).

### 5.1 Schlussfolgerung 1 – die zukünftige Zustandsüberwachung und prädiktive/präventive Instandhaltung fußt auf Machine Learning

Der wissensbasierte Ansatz (Expertensystem) zur Definition der Grenzen von Geräteausfällen ist in der heutigen Industrie weit verbreitet, da es keine zuverlässigen Plattformen für umfangreiche Datenanalysen gibt. Darüber hinaus fehlt es an Verständnis dafür, wie man mit verschiedenen Arten von Kontextdaten umgeht, um zuverlässige Zustandsüberwachungsmodelle aufzubauen.

Der datengetriebene Ansatz unter Verwendung von Mengen bereits verfügbarer historischer Daten ist jedoch der einzig geeignete Weg für die Zukunft, um Annahmen zu vermeiden und eine multifaktorielle Bewertung der Ausfallereignisse vorzunehmen. Dies gilt insbesondere für den Bergbau, wo die Betriebsbedingungen der Anlagen durch sich ständig verändernde Arbeitsbedingungen beeinflusst werden. Sobald eine ausreichende Datenbasis geschaffen ist, werden sich ändernde Arbeitsumgebungen keine Herausforderung mehr darstellen. Echtzeitdaten in Kombination mit historischen und kontextbezogenen Daten ermöglichen es, Muster zu erkennen unabhängig von der Häufigkeit der Ereignisse. Deep Learning-Algorithmen werden solche Datensätze weiterverarbeiten, um betriebliche Erkenntnisse zu liefern und Vorhersagen zu ermöglichen, so präzise, wie es sich heute noch niemand vorstellen kann. Das frühzeitige Umsetzen und Entwickeln moderner Zustandsüberwachung sichert somit Wettbewerbsfähigkeit.

### 5.2 Schlussfolgerung 2 – Im Bergbau geht nichts mehr ohne das IoT

IoT ist das Netzwerk von Objekten wie Maschinen, eingebetteten Geräten, Werkzeugen sowie Sensoren. Ein neues Level an kontextbezogenen und relevanten Daten kann genutzt werden. Der Fokus liegt nunmehr auf Rahmenbedingungen und Prozessen und nicht auf einzelnen Betriebsmitteln selbst.

In der Bergbauindustrie werden Daten in abgelegenen Minenstandorten erzeugt. IoT-verbundene Plattformen können die ständig wachsende Menge an diversen Daten aus unterschiedlichsten Quellen und die Ergebnisse der Algorithmen des maschinellen Lernens speichern.

Die IoT-basierte Zustandsüberwachung ist für die nächste Stufe der Digitalisierung des Bergbaus unerlässlich. Sie wird den Weg für den Zugang zu Effizienzniveaus ebnen, die es bisher nicht gegeben hat. Darüber hinaus wird die riskante und gefährliche Umgebung in vielen Grubengebäuden keine Bedrohung für die Bergleute mehr darstellen, da sie in der Lage sein werden, die Geräte aus sicherer Umgebung von klimatisierten Arbeitsplätzen aus zu steuern.

### 5.3 Schlussfolgerung 3 – In der Kollaboration von Technologieunternehmen, Bergbau und Maschinenherstellern liegt die treibende Kraft für Innovation

Laut Studien des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) (11) werden IoT-Plattformen und IoT-Software die

## Beurteilung von IT-Trends für den Maschinenbau IoT-Plattformen

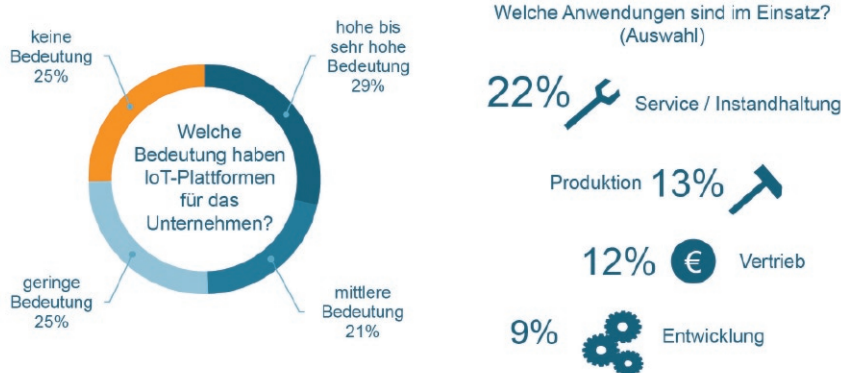


Fig. 6. Importance of IoT platforms in the mechanical industry (11).  
Bild 6. Bedeutung von IoT-Plattformen in der mechanischen Industrie (11).

In the digital world, collaboration models and agile development tools are not only significant, but also inevitable to be innovative and to keep up with the pace of the industry. The high speed of software development drives the hardware development of machine and plant manufacturers. The need for mine operators to react and make decisions faster, better and more flexible requires that both hardware and software are adapted to the needs of the operation. A dialogue of all stakeholders helps to get a better understanding of the requirements and challenges of each other. The challenge lies in mastering complexity and speed. In this environment, tech companies, like talpasolutions, are driver, enabler and facilitator.

Grundlage für ein digitales Ökosystem schaffen (Bild 6). Die Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau sind bestrebt, solche Anwendungen für ihre Produkte, ihre Dienstleistungen und ihre eigenen Prozesse einzuführen und zu nutzen. Das größte Hindernis ist jedoch der Mangel an Fachkräften.

Aufgrund der zunehmenden technischen Komplexität der Maschinen und Anlagen einerseits und gerade der besonders hohen Anforderungen im Bergbau wird eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Endanwendern in den Bergbauunternehmen, den Maschinenherstellern und den Technologieunternehmen immer wichtiger.

In der digitalen Welt sind Kollaborationsmodelle und agile Entwicklungswerkzeuge nicht nur wichtig, sondern auch nicht mehr wegzudenken, um innovativ und schnell zu sein. Die hohe Geschwindigkeit der Softwareentwicklung treibt hier die Hardwareentwicklung von Maschinen- und Anlagenbauern voran und vor sich her. Die Notwendigkeit, dass Bergbauunternehmen schneller, besser und flexibler reagieren und Entscheidungen treffen müssen, erfordert eine grundlegende Anpassung von Hard- und Software an die Bedürfnisse des Betriebs. Ein Dialog aller Stakeholder hilft, die Anforderungen und Herausforderungen des jeweils Einzelnen besser zu verstehen. Die Herausforderung liegt darin, die Komplexität und die Schnelligkeit zu beherrschen. In diesem Umfeld sind IT-Technologieunternehmen Treiber, Pionier und Moderator zugleich.

### References / Quellenverzeichnis

- (1) Rio Tinto: Mine of the Future™, 2018. <https://www.riotinto.com/australia/pilbara/mine-of-the-future-9603.aspx>
- (2) AngloAmerican: The modern mine, 01/2018. <https://www.angloamerican.com/futuresmart/our-industry/technology/picture-this-the-modern-mine>
- (3) Caterpillar: CAT® Connect: [https://www.cat.com/en\\_US/support/operations/technology.html](https://www.cat.com/en_US/support/operations/technology.html)
- (4) Komatsu Mining: Smart Solutions: [https://mining.komatsu/docs/default-source/non-product-documents/services/joysmart-solutions/smart-solutions-brochure.pdf?sfvrsn=4aa50c6b\\_65](https://mining.komatsu/docs/default-source/non-product-documents/services/joysmart-solutions/smart-solutions-brochure.pdf?sfvrsn=4aa50c6b_65)
- (5) Komatsu: Development of Vehicle Health Monitoring System for Large-Sized Construction Machines. Technical report, 2002. [http://www.komatsu.com/CompanyInfo/profile/report/pdf/150-04\\_E.pdf](http://www.komatsu.com/CompanyInfo/profile/report/pdf/150-04_E.pdf)
- (6) Sandvik: Optimine® analytics and process automation; <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/automation/optimine-information-management-system/>
- (7) Certiq, a telematics solution from epiroc. <https://www.epiroc.com/de-de/products/parts-and-services/telematics/certiq>
- (8) Metso: Metso Metrics. <https://www.metso.com/campaigns/metso-metrics/>
- (9) DMT: Online Condition Monitoring Systems. [https://www.dmt-group.com/fileadmin/redaktion/documents/products/DMT-Online\\_Condition\\_Monitoring\\_System\\_MineSafe\\_for\\_machinery\\_and\\_facilities\\_in\\_coal\\_mining\\_web\\_en.pdf](https://www.dmt-group.com/fileadmin/redaktion/documents/products/DMT-Online_Condition_Monitoring_System_MineSafe_for_machinery_and_facilities_in_coal_mining_web_en.pdf)
- (10) Atamuradov, V.; Medjaher, K.: Prognostic and Health Management for Maintenance Practitioners-Review, Implementation and Tools Evaluations. In: International Journal of Prognostics and Health Management. 12/2017.
- (11) VDMA IT-Report 2018-2020. [https://sud.vdma.org/documents/15012668/28825507/2018-10%20VDMA%20IT-Report%202018%20bis%202020%20\(Auswahl\)\\_1548570929071.pdf/5722ad14-f727-8ad2-ede2-8f42976dde5a](https://sud.vdma.org/documents/15012668/28825507/2018-10%20VDMA%20IT-Report%202018%20bis%202020%20(Auswahl)_1548570929071.pdf/5722ad14-f727-8ad2-ede2-8f42976dde5a)

### Authors / Autoren

Mirko Liebetau M. Sc., MBA Alexey Shalashinski B. Sc.,  
Dr.-Ing. Michael Suci, talpasolutions GmbH, Essen/Germany