

ARTUS: Decentralised Communication of Mobile Mining Machines

The ARTUS research project aimed to develop systems for a holistic implementation of a complete loading-unloading cycle conducted by an autonomous fleet of special-purpose mining vehicles. A key challenge in developing such systems is providing the communication infrastructure and ensuring technical capabilities to fulfil needs for machine-to-machine communication (M2M). This article presents project works and research re-

sults of the Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) of RWTH Aachen University (RWTH), Aachen/Germany, in the field of M2M communication for mobile mining machines within the ARTUS project. As a prototype solution to this problem, the M2X gateway was developed at the AMT, which enables the communication of mining machines on ISO communication layers 1 to 7, customised to the requirements of mining.

ARTUS: Dezentrale Kommunikation mobiler Bergbaumaschinen

Das Forschungsprojekt ARTUS zielte auf die Entwicklung von Systemen für die ganzheitliche Umsetzung eines vollständigen Belade-Entlade-Zyklus durch eine autonome Sonderfahrzeugflotte ab. Eine Herausforderung hierbei ist der Aufbau einer Kommunikationsinfrastruktur für Bergbauumgebungen und die Sicherstellung benötigter Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M). Dieser Artikel präsentiert Projektinhalte und Forschungsergebnisse des Institute for Advanced Mining Techno-

logies (AMT) der RWTH Aachen University (RWTH), Aachen, im Bereich der M2M-Kommunikation mobiler Bergbaumaschinen innerhalb des ARTUS-Projekts. Als prototypischer Lösungsansatz zu dieser Problematik wurde am AMT das M2X-Gateway entwickelt, das, maßgeschneidert auf die Anforderungen des Bergbaus, die Kommunikation von Bergbaumaschinen auf den ISO-Kommunikationsebenen 1 bis 7 ermöglicht.

Introduction

The development of autonomous mining machines and autonomous haulage systems (AHS) for mining has attracted the attention of many machine manufacturers in recent years (1, 2). These systems automate material handling in truck-and-shovel mining operations and, according to manufacturers, have led to improvements in productivity and safety in numerous mining operations (3). Typically, the development interest in these cases focuses on autonomous material transport. The ARTUS research project (autonomous robust transport system for hybrid environmentally friendly raw material extraction based on articulated special purpose vehicles) also aimed to develop systems for the holistic implementation of a complete loading-unloading cycle by an autonomous special purpose vehicle fleet. In this context, a fleet consisting of several articulated dump trucks and a loading vehicle was converted for autonomous operation. A broad consortium of academic and private-sector partners was involved in realising the research goals of the ARTUS project:

Einführung

Die Entwicklung autonomer Bergbaumaschinen sowie autonomer Transportsysteme (AHS) für den Bergbau hat in den vergangenen Jahren die Aufmerksamkeit zahlreicher Maschinenhersteller auf sich gezogen (1, 2). Diese Systeme automatisieren den Materialtransport in Truck-and-Shovel-Bergbaubetrieben und haben laut Herstellerangaben in zahlreichen Bergbauoperationen zu Verbesserungen in Produktivität und Sicherheit geführt (3). Das Forschungsprojekt ARTUS (Autonomes robustes Transportsystem für hybride umweltschonende Rohstoffgewinnung auf Basis knickgelenkter Sonderfahrzeuge) zielte über reinen Materialtransport hinaus auf die Entwicklung von Systemen für die ganzheitliche Umsetzung eines vollständigen Belade-Entlade-Zyklus durch eine autonome Sonderfahrzeugflotte ab. In diesem Zusammenhang wurde eine Flotte aus mehreren knickgelenkten Muldenkippern sowie einem Beladefahrzeug zum autonomen Betrieb umgerüstet. An der Realisierung der Forschungsziele des ARTUS-Projekts war ein breites Konsortium aus akademischen und privatwirtschaftlichen Partnern beteiligt:

- Conversion of articulated dump trucks for autonomous operation (Fritz Rensmann GmbH);
- sensor equipment and automation of articulated dump trucks (mascor-Institute, FH Aachen und xtonomy GmbH);
- localisation and trajectory control of articulated dump trucks (Institute for Control Engineering, RWTH Aachen);
- fleet planning (mascor-Institute, FH Aachen);
- automation of the loading vehicle (nerospec SK GmbH); and
- M2M communication of process participants (Institute for Advanced Mining Technologies, RWTH Aachen).

This article presents project works and research results of the Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) of RWTH Aachen University (RWTH), Aachen/Germany, in the field of machine-to-machine (M2M) communication of mobile mining machines within the ARTUS project. The background and problems of M2M communication in mining as well as the solution approach of currently available systems are presented. Subsequently, the developed solution approach using an M2X gateway is explained. Finally, the technical implementation and evaluation are discussed.

Interaction and communication

The loading and transport cycle is responsible for the efficient transport of large quantities of material from the mining site and is therefore a central part of the mining process. In discontinuous mining, the loading and transport cycle refers to the intake of material by loaders, the loading of the material onto transport vehicles, and the transport to a dump site. Because of its integral role, the efficiency of this cycle is critical to the overall success of a mining operation. This cooperative process with physical interaction of heavy machinery also requires a high degree of coordination between the process participants to ensure not only efficiency but also the smooth and safe execution of the process. Beyond the technically demanding realisation of individual autonomous mining machines, another central aspect of autonomous fleets is thus the interaction of several process participants. One challenge is the development of a communication infrastructure for mining environments and ensuring the required M2M communication.

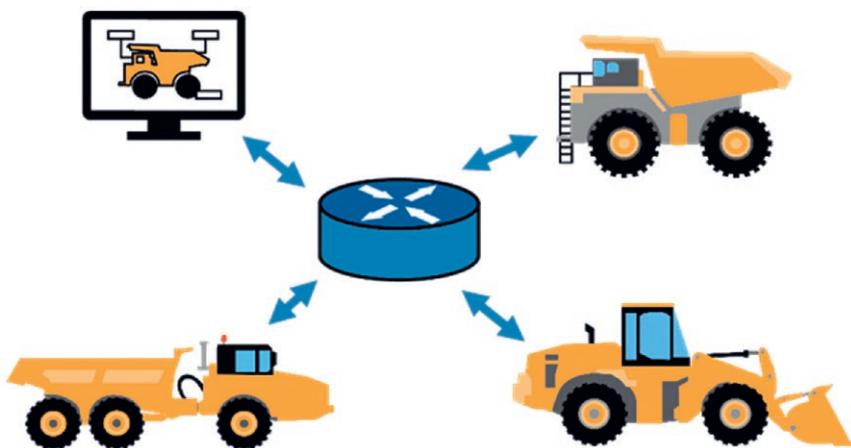


Fig. 1. A centralised network in a star topology making use of a constant connection to the router. // Bild 1. Zentralisiertes Netzwerk in Sterntopologie mit ständiger Verbindung zum Router. Source/Quelle: AMT

- Umrüstung knickgelenkter Muldenkipper für den autonomen Betrieb (Fritz Rensmann GmbH),
- sensorische Ausstattung und Automatisierung knickgelenkter Muldenkipper (mascor-Institut, FH Aachen und xtonomy GmbH),
- Lokalisierung und Trajektorienfolgeregelung knickgelenkter Muldenkipper (Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen),
- Flottenplanung (mascor-Institut, FH Aachen),
- Automatisierung des Beladefahrzeugs (nerospec SK GmbH) und
- M2M Kommunikation der Prozessteilnehmer (Institute for Advanced Mining Technologies, RWTH Aachen).

Dieser Artikel präsentiert Forschungsergebnisse des Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) der RWTH Aachen University (RWTH), Aachen, im Bereich der Maschine-zu-Maschine (M2M)-Kommunikation mobiler Bergbaumaschinen. Die dargestellten Inhalte wurden im Rahmen des ARTUS-Projekts erarbeitet. Hintergrund und Problemstellung der M2M-Kommunikation im Bergbau sowie ein Lösungsansatz gegenwärtig verfügbarer Systeme werden dargelegt. Daraufaufgehend wird der entwickelte Lösungsansatz mittels M2X-Gateways erläutert und abschließend auf die technische Umsetzung und Evaluierung eingegangen.

Interaktion und Kommunikation

Der Lade- und Transportzyklus dient dem effizienten Transport großer Mengen Materials von der Abbaustelle und ist somit ein zentraler Teil des Bergbauprozesses. Im diskontinuierlichen Bergbau bezeichnet der Lade- und Transportzyklus die Aufnahme von Material durch Ladegeräte, das Verladen des Materials auf Transportfahrzeuge und den Transport zu einer Kippstelle. Aufgrund seiner integralen Rolle ist die Effizienz dieses Zyklus ausschlaggebend für den Gesamterfolg eines Bergbaubetriebs. Für diesen kooperativen Prozess mit physischer Interaktion schwerer Maschinen ist darüber hinaus ein hohes Maß der Koordination zwischen den Prozessteilnehmern erforderlich, um neben Effizienz auch die reibungslose und sichere Durchführung des Prozesses zu gewährleisten. Über die technisch anspruchsvolle Realisierung einzelner autonomer Bergbaumaschinen hinaus ist ein weiterer zentraler Aspekt autonomer Flotten somit die Interaktion mehrerer Prozessteilnehmer.

Eine Herausforderung hierbei ist der Aufbau einer Kommunikationsinfrastruktur für Bergbauumgebungen und die Sicherstellung benötigter M2M-Kommunikation.

Am Markt befindliche AHS lösen diese Problematik mittels flächendeckender Netzwerkabdeckung und dauerhafter Anbindung aller Teilnehmer an ein zentralisiertes Netzwerk (4). Solche konventionellen Netzwerke in Sterntopologie sind für die Aufrechterhaltung der Kommunikationsfähigkeit immer auf eine intakte Verbindung zu einem zentralen Knoten (Router) angewiesen, der für das Routing der Datenpakete an die jeweiligen adressierten Netzteilnehmer verantwortlich ist. Diese Netzwerke besitzen somit einen Single-Point-of-Failure. Bild 1 verdeutlicht den Aufbau eines zentralisierten Netzwerks. Eine Unterbrechung der Verbindung zum Router bedeutet hier

Autonomous Haulage Systems on the market solve this problem by means of comprehensive network coverage and permanent connection of all participants to a centralized network (4). Such conventional networks using a star topology are always dependent on an intact connection to a central node (access point), which is responsible for routing the data packets to the respective addressed network nodes, in order to maintain communication capability. These networks thus have a single point of failure. Figure 1 illustrates the structure of a centralised network. Here, an interruption of the connection to the router not only means a loss of monitoring capabilities in a fleet management system (FMS) but also a loss of communication links with other process participants in the immediate vicinity.

Notably, following the ore deposits, surface and underground mines are expansive and variable environments. Thus, due to the progression of the extraction site, a constant expansion of the network and regular upgrading of infrastructure is required. In mine sites, device and maintenance of a centralised, wide-area network infrastructure represent significant cost and labor, which is a reason why the problem of connectivity in mining is often a barrier to innovation. (5)

Decentralised communication via M2X gateway

In order to meet these increased requirements, an ad-hoc communication system for special mining vehicles was developed in the ARTUS project to enable decentralised communication between the participants in the mining process. The development, evaluation and integration of the communication hardware and software into a M2X gateway was conducted by the AMT in the ARTUS project.

To meet the requirements resulting from the mining process, two communication technologies are synergistically combined in the M2X gateway. In this way, both direct communications between machines in spatial proximity are ensured and robust, basic monitoring of the machines by an FMS is enabled.

Decentralised M2M communication is based on a mesh communication network that enables direct communication. In such a mobile ad-hoc network for vehicles (VANET), each vehicle acts as its own network node that can communicate with neighbouring nodes in a direct way, as well as adaptively connect remote systems through multi-hopping. In contrast to a star topology of a network, the VANET is not spanned by stationary access points, but by the M2X gateway of the vehicles themselves. In this way, process participants can communicate with each other in spatial proximity without having to rely on the connection to external network infrastructure. Furthermore, the mesh network can be flexibly expanded by strategically placing additional M2X gateways as network nodes.

As a physical network layer, the M2X gateway uses the IEEE802.11n standard, also known as Wi-Fi 4, to achieve the highest possible radio range with high data throughput. All Wi-Fi stations of the M2X network are used in IBSS mode (Independent Basic Service Set) so that they can communicate directly with each other. An operating system kernel-based mesh network driver implements a mesh routing protocol that enables multi-hopping across multiple Wi-Fi stations. The mesh routing protocol works on the data link layer, which enables agnostic application of various network protocols of the higher layers.

neben dem Verlust der Überwachung in einem Flottenmanagementsystem (FMS) auch einen Ausfall der Kommunikation mit anderen Prozessteilnehmern in direkter räumlicher Nähe.

Der Lagerstätte folgend und über die Zeit wachsend sind über- und untertägige Bergwerke jedoch weitläufige und veränderliche Umgebungen. Somit erfordert das Fortschreiten der Abbaufont eine ständige Erweiterung des Netzwerks und das regelmäßige Nachrüsten von Infrastruktur. Vorrichtung und Instandhaltung einer flächendeckenden, zentralisierten Netzwerkinfrastruktur bedeuten vor diesem Hintergrund einen erheblichen Kosten- und Arbeitsaufwand, weshalb das Problem der Konnektivität im Bergbau häufig ein Innovationshemmnis darstellt. (5)

Dezentrale Kommunikation via M2X-Gateway

Um diesen erhöhten Anforderungen gerecht zu werden, wurde im ARTUS-Projekt ein Ad-hoc-Kommunikationssystem für bergbauliche Sonderfahrzeuge entwickelt, um die dezentrale Kommunikation der Teilnehmer im Bergbauprozess zu ermöglichen. Die Entwicklung, Evaluation und Integration der Kommunikationshardware und -software in ein M2X-Gateway wurden im ARTUS-Projekt durch das AMT übernommen.

Zur Erfüllung der aus dem bergbaulichen Prozess resultierenden Anforderungen werden im M2X-Gateway zwei Kommunikationstechnologien synergetisch miteinander vereint. Auf diese Weise wird sowohl die direkte Kommunikation zwischen Maschinen in räumlicher Nähe gewährleistet als auch eine robuste, grundlegende Überwachung der Maschinen durch ein FMS ermöglicht.

Die dezentrale M2M-Kommunikation basiert auf einem Mesh-Kommunikationsnetzwerk, das eine direkte Kommunikation ermöglicht. In einem solchen mobilen Ad-hoc-Netzwerk für Fahrzeuge (Vehicular Ad-Hoc Network – VANET) fungiert jedes Fahrzeug als eigener Netzwerkknoten, der mit benachbarten Knoten auf direktem Weg kommunizieren sowie durch „multi-hopping“ auch entfernte Systeme adaptiv anbinden kann. Im Gegensatz zu einer Stern-Topologie eines Netzwerks wird das VANET nicht durch stationäre Access Points aufgespannt, sondern durch das M2X-Gateway der Fahrzeuge selbst. Auf diese Weise können Prozessteilnehmer in räumlicher Nähe miteinander kommunizieren, ohne auf die Verbindung zu externer Netzwerkinfrastruktur angewiesen zu sein. Darüber hinaus kann das Mesh-Netzwerk durch die strategische Platzierung weiterer M2X-Gateways als Netzwerkknoten flexibel erweitert werden.

Als physische Netzwerkschicht nutzt das M2X-Gateway den IEEE802.11n-Standard, auch als Wi-Fi 4 bezeichnet, um eine möglichst hohe Funkreichweite bei hohem Datendurchsatz zu erreichen. Dabei werden alle Wi-Fi-Stationen des M2X-Netzwerks im IBSS-Modus (Independent Basic Service Set) genutzt, sodass diese direkt miteinander kommunizieren können. Ein Betriebssystemkernel-basierter Mesh-Netzwerk-Treiber implementiert ein Mesh-Routing-Protokoll, das ein multi-hopping über mehrere Wi-Fi-Stationen ermöglicht. Das Mesh-Routing-Protokoll arbeitet dabei auf dem Data-Link-Layer, was eine agnostische Anwendung verschiedenster Netzwerkprotokolle der höheren Schichten ermöglicht.

Zur Überwachung der Bergbaufahrzeuge in entlegenen Bereichen wird als zweiter Funkstandard die Long-Range-Kommunikationstechnologie (LoRa) genutzt. Bei der LoRa-Technologie handelt es sich um eine Funktechnologie (868 MHz), die sich gegenüber



Fig. 3. M2X gateway in battery mode.
Bild 3. M2X-Gateway im Akkubetrieb. Photo/Foto: AMT



Fig. 4. Articulated dump truck with integrated M2X gateway.
Bild 4. Knickgelenkter Muldenkipper mit integriertem M2X-Gateway. Photo/Foto: AMT

nication Unified Architecture) was implemented as a manufacturer-interoperable and standardised protocol interface from ISO layer 5 onwards and was integrated into the M2X gateway. Thus, relevant vehicle data are made available semantically structured via an OPC UA server. This enables, e.g., the implementation of the OPC UA Companion Mining, which specifies the relevant information for handling the loading and unloading process in mining, among other things.

Technical implementation and evaluation

The physical integration of the developed system takes the form of additional hardware in dustproof and waterproof housings, which are subsequently integrated on the machines and connected to the machine's internal network via wired Ethernet LAN. Power is supplied via a vehicle-typical 24 VDC voltage circuit. Besides the supply via vehicle voltage, further gateways for battery operation were designed to enable flexible expansion of the mesh network by additional placement of nodes. Figure 3 shows the M2X gateway developed by AMT, figure 4 the converted dump truck with integrated M2X gateway.

In test measurements, the developed VANET met the requirements for transmitting standardised text-based messages. The re-routing of the network path over one or more hops was seamless and without noticeable delay. Network coverage was evaluated using a custom mapping tool (heat map) that displays selected network metrics in spatial relation for the user to read. Figure 5 shows a section of this heat map over the test environment of the mining area. The trajectory of the mobile node can be seen based on the measurement points (red). The signal strength of a mobile network node is shown in colour, with green symbolising a higher and red a lower signal strength to the next best node in the environment. The LoRa network for data transmission of sporadic status messages has fully met the requirements and it was possible to transmit data over the entire test site of an open pit mine using a single transceiver pair.

routing des Netzwerkspfads über einen oder mehrere Hops erfolgt nahtlos und ohne wahrnehmbare Verzögerung. Die Evaluierung der Netzwerkabdeckung erfolgt über ein entwickeltes Kartentool (Heatmap), das ausgewählte Netzwerkmetriken in räumlicher Relation für den Benutzer lesbar darstellt. Bild 5 zeigt einen Ausschnitt dieser Heatmap über der bergbaulichen Testumgebung. Zu erkennen ist die Trajektorie des mobilen Knotens anhand der Messpunkte (rot). Farblich dargestellt wird die Signalstärke eines mobilen Netzwerkknotens, wobei grün eine höhere und rot eine geringere Signalstärke zum jeweils nächstbesten in der Umgebung befindlichen Knoten symbolisiert. Das LoRa-Netzwerk zur Datenübertragung von sporadischen Statusnachrichten hat sich gemäß den Anforderungen bewährt. Über das gesamte Testgelände eines Tagebaus konnten Daten bestehend aus GPS-Position und Zustand der Maschine mittels eines einzigen Transceiver-Paars übertragen werden.

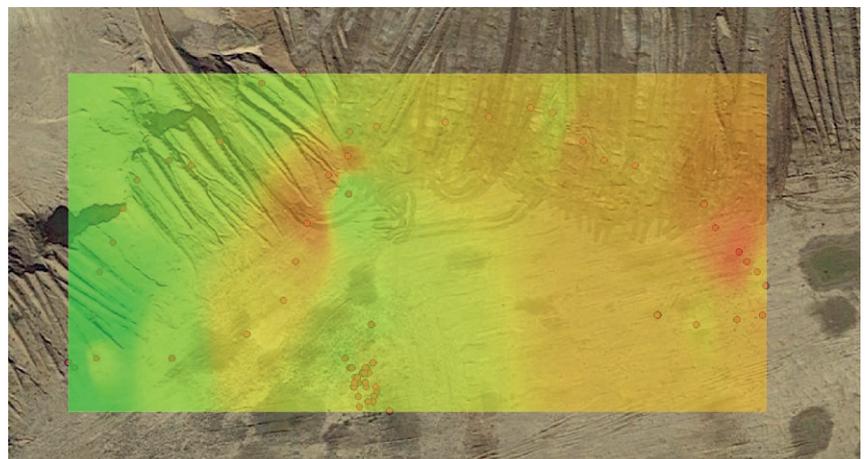


Fig. 5. Heat map for the open-pit test environment. Green symbolises higher and red lower signal strength of a mobile node to the respective next network node. // Bild 5. Heatmap über der tagebaulichen Testumgebung. Grün symbolisiert höhere und rot eine geringere Signalstärke eines mobilen Knotens zum jeweils nächsten Netzwerkknoten. Source/Quelle: AMT

Summary

The goal of the ARTUS project was to implement an autonomous vehicle fleet for a truck-and-shovel mining operation. An integral part of this is the interaction of the process participants and therefore the M2M communication of mobile mining vehicles. The AMT has developed the M2X gateway as a prototype that enables decentralised communication between the process participants via a VANET. The radio technologies LoRa and Wi-Fi are implemented here to synergistically use the strengths of both technologies in the application case. While direct M2M communication takes place via the Wi-Fi VANET, which has a higher throughput, LoRa communication is used for sporadic status communication of the machine to the FMS. To standardise M2M communication at the higher network layers, an OPC UA interface was implemented to make relevant and defined information accessible to the machine. Certain aspects of the M2X gateway, as developed in ARTUS, will be taken up at the AMT in the course of further projects. Within the NexGen-SIMS project, the use of LoRa technology for underground environments is being evaluated. In the ELMAR project, AI-supported algorithms for protocol negotiation of the application layer are being implemented and tested.

Funding

The project is funded by the funding programme "IKT 2020 – Research and Innovations" of the Federal Ministry of Education and Research under project funding number 033R126DN.

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des ARTUS-Projekts war die Umsetzung einer autonomen Fahrzeugflotte für einen Truck-and-Shovel-Bergbaubetrieb. Integraler Bestandteil war die Interaktion der Prozessteilnehmer und damit die M2M-Kommunikation mobiler Bergbaufahrzeuge. Das AMT hat in diesem Zuge das M2X-Gateway entwickelt, das als Prototyp die dezentrale Kommunikation der Prozessteilnehmer über ein VANET ermöglicht. Die Funktechnologien LoRa und Wi-Fi wurden hier implementiert, um die Stärken beider Technologien im Anwendungsfall synergetisch zu nutzen. Während die direkte M2M-Kommunikation über das durchsatzstärkere Wi-Fi-VANET erfolgt, wird die LoRa-Kommunikation für eine sporadische Statusmitteilung der Maschine an das FMS herangezogen. Zur Standardisierung der M2M-Kommunikation auf den höheren Netzwerkschichten wurde eine OPC UA-Schnittstelle implementiert, die relevante und definierte Informationen der Maschine zugänglich macht. Aspekte des in ARTUS entwickelten M2X-Gateways werden am AMT im Zuge weiterführender Projekte aufgegriffen. Innerhalb des NexGen-SIMS Projekts wird u. a. die Nutzung der LoRa-Technologie für untertägige Umgebungen evaluiert. Im ELMAR-Projekt werden KI-gestützte Algorithmen zur Protokollverhandlung der Anwendungsschicht implementiert und getestet.

Förderung

Das Projekt wurde durch das Förderprogramm „IKT 2020 – Forschung und Innovationen“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter der Projektfördernummer 033R126DN gefördert.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

References / Quellenverzeichnis

- (1) Hitachi Ltd. (2022): [hitachicm.com](https://www.hitachicm.com/global/en/solutions/solution-linkage/ahs/), 29.11.2022. Online available: www.hitachicm.com/global/en/solutions/solution-linkage/ahs/
- (2) Komatsu Ltd. (2022): [komatsu.com](https://www.komatsu.com/en/site-optimization/smart-mining/loading-and-haulage/autonomous-haulage-system/), 29.11.2022. Online available: www.komatsu.com/en/site-optimization/smart-mining/loading-and-haulage/autonomous-haulage-system/
- (3) Caterpillar Inc. (2022): [mining.com](https://www.mining.com/web/caterpillar-autonomously-hauls-more-than-1-billion-tonnes-of-material-with-cat-command-for-hauling-in-less-than-a-year/), 16.3.2022. Online available: www.mining.com/web/caterpillar-autonomously-hauls-more-than-1-billion-tonnes-of-material-with-cat-command-for-hauling-in-less-than-a-year/
- (4) Gaber, T.; El Jazouli, Y.; Eldesouky, E.; Ali, A. (2021): Autonomous Haulage Systems in the Mining Industry: Cybersecurity, Communication and Safety Issues and Challenges. *Electronics*, 2021.
- (5) Clausen, E.; Lehen, F.; Sörensen, A.; Uth, F.; Mitra, R.; Schwarze, B. (2020): Assessment of the Effects of Global Digitalization Trends on Sustainability in Mining Part II. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2020.
- (6) Adelantado, F.; Vilajosana, X.; Tuset-Peiro, P.; Martinez, B.; Melia-Segui, J.; Watteyne, T. (2017): Understanding the Limits of LoRaWAN. In: *IEEE Communications Magazine*, September 2017, pp. 34-40.
- (7) OPC Foundation (2022): OPC UA for Mining – OPC UA Companion Specification. 1.10.2022.

Authors / Autoren

Moritz Ziegler M. Sc., Arne Köller M. Sc., Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen, Institute for Advanced Mining Technologies (AMT), RWTH Aachen University (RWTH), Aachen/Germany