

# ELMAR: Research on Electric-Autonomous Transportation and the Implications for Mine Design and Energy Management

The ELMAR research project, funded by the German Federal Ministry of Economics and Climate Action (BMWK), aims to integrate and demonstrate electric and autonomous transport vehicles in raw material extraction operations. This will be done with special consideration of maintaining process reliability and ensuring electrical supply security, as well as their coupling to renewable energy sources within the framework of suitable representative

application scenarios (use cases). This article describes the basic principles and objectives of the ELMAR research project as well as the research objectives of the Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) of RWTH Aachen University (RWTH), Aachen/Germany, within the ELMAR project. These are the development of a mining energy model and optimized mining planning, as well as a transformation concept for raw material extraction operations.

# ELMAR: Forschung an elektrisch-autonomem Transport und den Auswirkungen auf Mine Design und Energiemanagement

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Forschungsprojekt ELMAR hat die Integration und Demonstration von elektrischen und autonomen Transportfahrzeugen in Rohstoffgewinnungsbetrieben zum Ziel. Dies erfolgt unter besonderer Berücksichtigung des Erhalts der Prozesssicherheit und der Gewährleistung der elektrischen Versorgungssicherheit sowie deren Kopplung an erneuerbare Energiequellen im Rahmen von geeigneten repräsentativen Anwendungsszenarien

(Use Cases). Dieser Artikel beschreibt die Grundlagen und Ziele des Forschungsprojekts ELMAR sowie die Forschungsziele des Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) der RWTH Aachen University (RWTH), Aachen, innerhalb des ELMAR-Projekts. Diese sind die Entwicklung eines bergbaulichen Energiemodells und einer optimierten Abbauplanung sowie eines Transformationskonzepts in Hinblick auf die Elektrifizierung von Rohstoffgewinnungsbetrieben.

## 1 Motivation

A secure supply of mineral raw materials is an essential basis for Germany's competitiveness and prosperity and is based on the three supply pillars of domestic raw material extraction, imports and recycling. Without a secure supply of the raw materials needed for the energy and mobility transformation, the German government's climate policy goals in the area of energy and transport cannot be achieved. In 2018, about 550 Mt of sands, gravels and natural stones were extracted in about 2,700 mostly medium-sized and small enterprises. For their part, raw material extraction operations are among the most energy-intensive industries and the highest process-related emissions in Germany are in the ceramics, stone and earth sectors. Consequently, domestic raw material extraction must be part of the decarbonization strategy not only as a supplier of raw materials, but also to become CO<sub>2</sub> neutral as an industrial sector in the future and to remain competitive. Today, a significant proportion of energy use is accounted for by internal transport, which is mostly realized by means of

## 1 Motivation

Eine sichere Versorgung mit mineralischen Rohstoffen stellt eine wesentliche Grundlage für die Wettbewerbsfähigkeit und den Wohlstand Deutschlands dar und basiert auf den drei Versorgungssäulen heimische Rohstoffgewinnung, Importe und Recycling. Ohne eine sichere Versorgung mit den für die Energie- und Mobilitätswende benötigten Rohstoffen sind die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung im Bereich Energie und Verkehr nicht zu erreichen. Im Jahr 2018 wurden etwa 550 Mio. t an Sanden, Kiesen und Natursteinen in rd. 2.700 zumeist mittelständischen und kleinen bis hin zu teilweisen Kleinstbetrieben gewonnen. Die Betriebe der Rohstoffgewinnung zählen ihrerseits zu den energieintensiven Industrien und die höchsten prozessbedingten Emissionen in Deutschland entfallen auf die Bereiche Keramik, Steine und Erden. Die heimische Rohstoffgewinnung muss demzufolge nicht nur als Rohstofflieferant, sondern gleichermaßen, um als Industriezweig zukünftig CO<sub>2</sub>-neutral zu werden und wettbewerbsfähig bleiben zu können, Teil der Dekarbonisierungsstrategie sein.

mobile diesel-powered vehicles. Different trends can be identified for the future of mining. These consist of electrification, digitalization, and the increasing use of autonomous technologies (1,7).

Electrification is closely linked to an associated increase in operational energy requirements (2). Increased political, social and environmental demands are reinforcing this trend by also seeking to reduce CO<sub>2</sub> emissions in the context of raw material extraction (3). Decarbonization and ESG compliance are also being considered to regulate access to finance and are key to obtaining the “social license to operate”. Based on current research, many decarbonization solutions are expected to be commercially viable within the decade (4). The use of diesel-powered machinery, which is mostly used today, for the loading and transport process in the context of resource extraction can account for up to 50% of total energy consumption, depending on the operation (5).

Replacing diesel-powered transport machines with lower CO<sub>2</sub> alternatives is therefore one of those measures taken to reduce emissions. According to current research, battery electric vehicles (BEVs) are currently one of the alternatives, both for surface and underground operations (6). The integration of these battery electric transport machines in raw material extraction is associated with changes in charging infrastructure, energy demand management, and process stability. Likewise, it is necessary to rethink the processes and to consider and take into account the energy supply side as part of the process design.

If it is possible to convert existing operations and new operations to be built in the future to (battery) electric operation, which not only means replacing the machine technology used, but rather adapting the operational processes and infrastructure to the changed process- and energy-related framework conditions, an important contribution can be made to achieving Germany's energy and climate policy goals. Similarly, the findings, approaches and technologies can be transferred to other mining transport processes with equally challenging conditions, which are characterized by a dynamic variability of the individual process steps, which in turn exhibit a high degree of dependency and complex interdependencies (1, 7).

This is precisely where the “ELMAR” project enters the topic, laying the foundations for the use of electric, autonomous mobile heavy-duty transport machines in raw materials extraction.

## **2 Research project: Integration and demonstration of the use of electric heavy-duty transport machines in raw material extraction (ELMAR)**

ELMAR is a research project funded by the BMWK with a duration of three years (end: July 2025) with a funding volume of approximately 6 M € and a total volume of around 11 M €. The aim of the project is the electrification of internal transport in raw material extraction based on battery-electric and autonomous transport vehicles. With a special focus of maintaining process reliability in production and ensuring electrical supply security, as well as coupling these to renewable energy sources, the research project is developing solution approaches which will be demonstrated and validated in three representative application scenarios. The holistic approach from the production and energy demand side to the energy supply side enables the targeted optimization of both sides.

Heutzutage entfällt ein wesentlicher Teil des Energieeinsatzes auf den innerbetrieblichen, zumeist mittels mobiler dieselbetriebener Fahrzeuge realisierten Transport. Für die Zukunft des Bergbaus lassen sich unterschiedliche Trends festhalten. Diese setzen sich zusammen aus der Elektrifizierung, der Digitalisierung sowie einer zunehmenden Automatisierung und Autonomisierung von Gewinnungssystemen. (1,7)

Insbesondere die Elektrifizierung steht in engem Zusammenhang mit einem damit einhergehenden gesteigerten betrieblichen Energiebedarf (2). Erhöhte politische, soziale und ökologische Anforderungen verstärken diesen Trend, indem auch im Rahmen der Rohstoffgewinnung die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden sollen (3). Dekarbonisierung und ESG-Konformität werden zudem in Betracht gezogen, um Zugang zu Finanzmitteln zu regulieren, und sind der Schlüssel zur Erteilung der „Social License to Operate“. Der aktuellen Studienlage zur Folge ist davon auszugehen, dass viele Dekarbonisierungslösungen bereits innerhalb dieses Jahrzehnts wirtschaftlich sein werden. (4) Der Einsatz von heutzutage zumeist eingesetzten dieselbetriebenen Maschinen für den Lade- und Transportprozess im Rahmen der Rohstoffgewinnung kann je nach Betrieb bis zu 50% des Gesamtenergieverbrauchs ausmachen (5).

Der Austausch dieselbetriebener Transportmaschinen durch CO<sub>2</sub>-ärmere Alternativen ist daher eine derjenigen Maßnahmen, die für die Emissionsreduktion ergriffen werden. Nach aktuellem Stand der Forschung stellen batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV) derzeit eine Möglichkeit sowohl für den Über- als auch für den Untertageeinsatz dar (6). Die Integration dieser batterieelektrischen Transportmaschinen in der Rohstoffgewinnung ist auch mit Veränderungen in Hinblick auf die Ladeinfrastruktur, das Energiebedarfsmanagement und die Prozessstabilität verbunden. Ebenfalls gilt es, die Prozesse neu zu überdenken sowie die Energieangebotsseite im Rahmen der Prozessgestaltung zu betrachten und zu berücksichtigen.

Wenn es gelingt, die bestehenden und zukünftig neu zu errichtenden Betriebe auf einen (batterie-)elektrischen Betrieb umzustellen, was nicht nur bedeutet, die eingesetzte Maschinenteknik auszutauschen, sondern vielmehr die betrieblichen Prozesse und die Infrastruktur auf die geänderten prozess- und energiebedingten Rahmenbedingungen anzupassen, kann ein wichtiger Beitrag zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele Deutschlands geleistet werden. Gleichmaßen lassen sich die Erkenntnisse, Ansätze und Technologien auf andere bergbauliche Transportprozesse mit ebenso herausfordernden Bedingungen übertragen, die durch eine dynamische Veränderlichkeit der einzelnen Prozessschritte charakterisiert sind, die ihrerseits wiederum eine hohe Abhängigkeit und komplexe wechselseitige Wirkungszusammenhänge aufweisen. (1, 7)

Genau hier setzt das Projekt „ELMAR“ an und legt die Grundlagen für den Einsatz von elektrischen, autonomen mobilen Schwerlasttransportmaschinen in der Rohstoffgewinnung.

## **2 Forschungsprojekt: Integration und Demonstration des Einsatzes von elektrischen Schwerlasttransportmaschinen in der Rohstoffgewinnung (ELMAR)**

ELMAR ist ein durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördertes Forschungsprojekt mit einer Laufzeit von drei Jahren (Ende: Juli 2025) mit einem För-

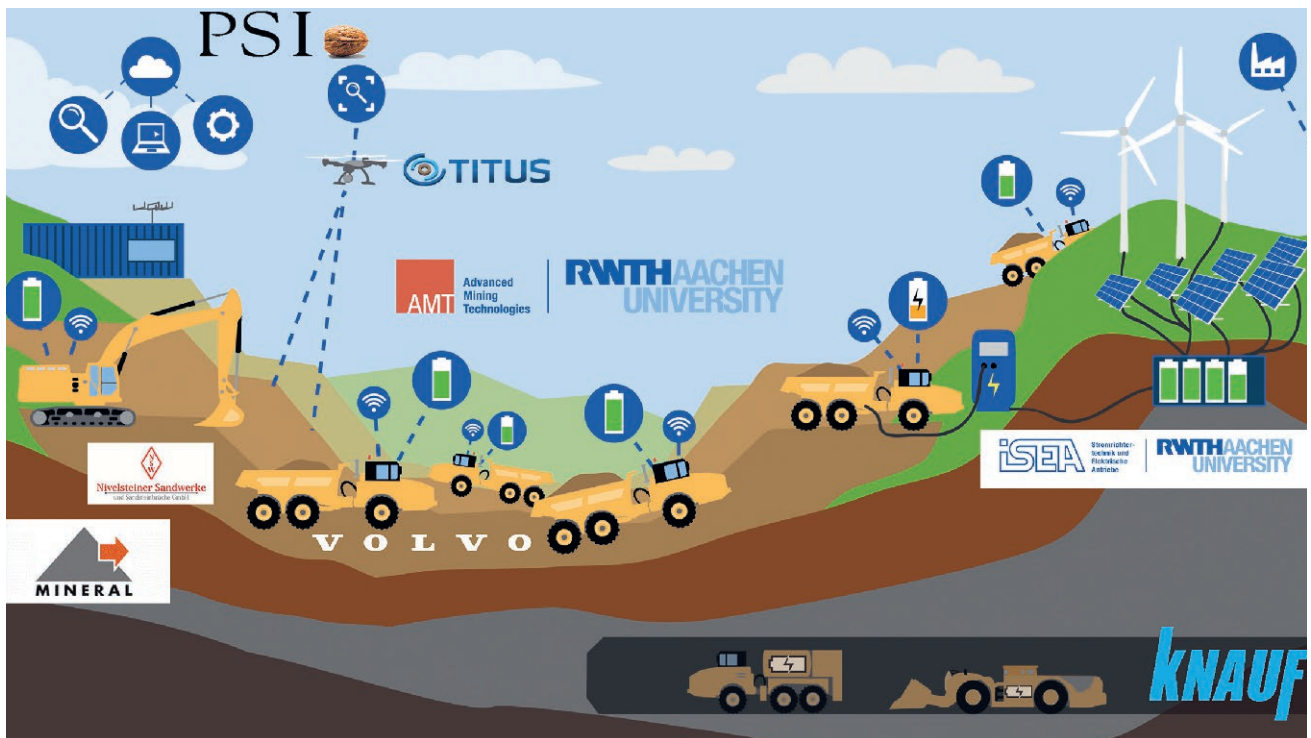


Fig. 1. ELMAR project partner. // Bild 1. ELMAR Projektpartner. Source/Quelle: AMT

## 2.1 General information

The project consortium is composed of a total of eleven partners with expertise in complementary fields, as listed in figure 1.

The Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) of RWTH Aachen University, Aachen/Germany, is coordinating the overall project and is researching the impact of electrification on resource extraction operations as part of the project to enable the development of two key technologies from this. One is the development of a mining energy model and optimized mining planning for consumption forecasting and operational optimization. Furthermore, the AMT is developing a transformation concept for the electrification of raw material extraction operations within the framework of ELMAR. In addition, the AMT is responsible for the implementation of the transport solution within the Nivelstein Living Lab as one of the use cases.

As an OEM, the Volvo Group is involved in the ELMAR project with a total of three Group divisions. These are Volvo Autonomous Solutions (VAS), Volvo Construction Equipment and Volvo Trucks. In the project, these business units are responsible for the provision and further development of the transport system, as well as for site design.

As a software company and digital service provider, PSI AG is part of the consortium with two business units (Renewable Energy and FLS). The expertise from the optimization of energy and material flows will lead to the development of a cloud-based platform for integral real-time control and optimization for climate-neutral raw material extraction planned in this project.

Furthermore, three companies are involved from the operator side. Mineral Baustoff GmbH, part of the STRABAG SE Group, has set itself the goal of sustainable and environmentally friendly raw material extraction and efficient raw material management.

dervolumen von ca. 6 Mio. € und einem Gesamtvolumen von rd. 11 Mio. €. Ziel des Projekts ist die Elektrifizierung des innerbetrieblichen Transports in der Rohstoffgewinnung auf der Grundlage von batterieelektrischen und autonomen Transportfahrzeugen. Unter besonderer Berücksichtigung des Erhalts der Prozesssicherheit in der Produktion und der Gewährleistung der elektrischen Versorgungssicherheit sowie deren Kopplung an erneuerbare Energiequellen, entwickelt das Forschungsprojekt Lösungsansätze, welche in drei repräsentativen Anwendungsszenarien demonstriert und validiert werden. Der ganzheitliche Ansatz von der Produktions- und Energiebedarfs- bis hin zur Energieversorgungsseite ermöglicht die angestrebte Optimierung beider Seiten.

## 2.1 Allgemeine Informationen

Das Projektkonsortium setzt sich aus insgesamt elf Partnern zusammen, welche Fachexpertise aus komplementären Fachbereichen aufweisen und in Bild 1 aufgeführt werden.

Das Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) der RWTH Aachen University, Aachen, ist Koordinator des Gesamtprojekts und erforscht im Rahmen des Projekts die Auswirkungen der Elektrifizierung auf Rohstoffgewinnungsbetriebe, um hieraus die Entwicklung zweier Schlüsseltechnologien zu ermöglichen. Hierbei handelt es sich zum einen um die Entwicklung eines bergbaulichen Energiemodells und einer optimierten Abbauplanung zur Verbrauchsprognose und betrieblichen Optimierung. Des Weiteren entwickelt das AMT im Rahmen von ELMAR ein Transformationskonzept für die Elektrifizierung von Rohstoffgewinnungsbetrieben. Das AMT ist verantwortlich für die Implementierung der Transportlösung im Reallabor Nivelstein als einer der Use Cases.

Within the scope of this project, this partner acts as operator of the use case “Eigenrieden”.

The Nivelsteiner Sandwerke und Sandsteinbrüche GmbH is involved as an associated partner. The company is a medium-sized, traditional and future-oriented enterprise in the sand and gravel industry in the Aachen region, which has been active as a family business since 1904. In close cooperation with the AMT, the company supports the research project by providing the required operating areas for the implementation of the electrified transport process within the living lab in the second use case “Nivelstein”.

Knauf Gips KG, which operates in Germany, specializes in systems for drywall and flooring, plaster and facades. Natural gypsum and anhydrite are important raw materials here, which are extracted both underground and above ground in several operations. Knauf as a partner participates in this research project as operator of the third use case “Altertheimer Mulde”.

Another partner from the field of academic research is the Institute for Power Electronics and Electrical Drives (ISEA) of RWTH. For the research area of electrical storage technology and energy supply, ISEA is developing various models for the charging management of electrical mining machines as well as the optimized charging control.

As part of its research and development activities, TITUS Research GmbH works on the integration and design optimization of

Die Volvo Group ist als OEM mit insgesamt drei Konzernabteilungen am Projekt ELMAR beteiligt. Diese sind Volvo Autonomous Solutions (VAS), Volvo Construction Equipment und Volvo Trucks. Im Projekt sind diese Geschäftsbereiche insbesondere für die Bereitstellung und Weiterentwicklung der Transportmulden sowie für das Site Design verantwortlich.

Als Softwareunternehmen sowie digitaler Dienstleister ist die PSI AG mit zwei Geschäftsbereichen (Erneuerbare Energie und FLS) Teil des Konsortiums. Die Expertise aus der Optimierung von Energie- und Materialflüssen fließen in die in diesem Vorhaben geplante Entwicklung einer Cloud-basierten Plattform zur integralen Echtzeitsteuerung und -optimierung für die klimaneutrale Rohstoffförderung ein.

Weiterhin sind von Betreiberseite drei Unternehmen beteiligt. Die Mineral Baustoff GmbH als Teil des STRABAG SE-Konzerns hat sich eine nachhaltige und umweltfreundliche Rohstoffgewinnung sowie ein effizientes Rohstoffmanagement zum Ziel gesetzt. Im Rahmen dieses Projekts agiert dieser Partner als Betreiber des Use Case „Eigenrieden“.

Die Nivelsteiner Sandwerke und Sandsteinbrüche GmbH ist als assoziierter Partner beteiligt. Das Unternehmen ist ein mittelständisches, traditionsverbundenes und zukunftsorientiertes Unternehmen der Sand- und Kiesindustrie in der Städteregion Aachen, das bereits seit 1904 als Familienbetrieb aktiv ist. In enger Zusammenarbeit mit dem AMT unterstützt das Unterneh-



mission-specific sensors and actuators. TITUS is involved as a partner with tasks in airborne process automation and digitalization.

## 2.2 Aims of the research project

To achieve the goals of the overall project, the following focal points will be addressed in the project:

1. Conceptual design, planning and preparation of the use cases.
2. Validation of prototype vehicles and step-by-step demonstration of an electrified and integrated transportation process.
3. Build-up of a cloud-based service platform to link the energy consumption and supply side with digital twins and process data in the AI-based decision model for active control.
4. Development of a mining energy model and optimized mine planning for consumption forecasting and operational optimization.
5. Development of an energy supply model for the optimization and decoupling of the local energy supply.
6. Optimization and design of the energetic coupling of extraction operation and (local) energy generation including storage systems.
7. Development of an airborne acquisition and digitization of operational data.
8. Development of a transformation concept for raw material extraction sites to define requirements, target states, implementation scenarios and cross-industry transfer of results.
9. Implementation of the project findings for the "Alterthemer Mulde" greenfield project.

The technological basis of the research project is formed by the battery-electric and autonomous transport machines developed by VAS, with the TA15 (Figure 2). In addition to full autonomy, a novel feature of this system is the approach to fast charging based on a conductive charging concept. The TA15s have a payload capacity of 15 t. Volvo's approach within the TARA system is to enable economical transport through the combination of autonomous driving, fast charging system, as well as higher vehicle numbers. The choice of the fast-charging system allows the use of a smaller battery capacity, as the transport troughs are electrically charged at regular time intervals by conduction. This eliminates the need to transport an unnecessary amount of bat-

men das Forschungsvorhaben durch die Bereitstellung der benötigten Betriebsbereiche für die Umsetzung des elektrifizierten Transportprozesses im Reallabor Nivelstein im zweiten Use Case „Nivelstein“.

Die in Deutschland tätige Knauf Gips KG ist spezialisiert auf Systeme für Trockenbau und Boden, Putz und Fassade. Naturgips und -anhydrit sind dabei ein wichtiger Rohstoff, der in mehreren Rohsteinbetrieben sowohl unter- als auch übertägig gewonnen wird. Knauf als Partner beteiligt sich als Betreiber des dritten Use Case „Alterthemer Mulde“ an diesem Forschungsprojekt.

Als weiterer Partner aus dem Bereich der akademischen Forschung ist das Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe (ISEA) der RWTH beteiligt. Für den Forschungsbereich elektrische Speichertechnologie und Energieversorgung entwickelt das ISEA verschiedene Modelle für ein Lademanagement von elektrischen Bergbaumaschinen sowie eine optimierte Lade-steuerung.

Im Rahmen seiner Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten arbeitet die TITUS Research GmbH an der Integration und Design-optimierung von missionspezifischen Sensoren und Aktoren. TITUS ist als Partner mit Aufgaben der luftgestützten Prozess-automatisierung und Digitalisierung beteiligt.

## 2.2 Ziele des Forschungsprojekts

Zur Erreichung der Ziele des Gesamtvorhabens werden im Projekt folgende Schwerpunkte bearbeitet:

1. Konzeptionierung, Planung und Vorbereitung der Use Cases.
2. Validierung der Prototypenfahrzeuge und schrittweise Demonstration eines elektrifizierten und integrierten Transportprozesses.
3. Aufbau einer Cloud-basierten Service-Plattform zur Verknüpfung der energetischen Verbrauchs- und Versorgungsseite mit digitalen Zwillingen und Prozessdaten im KI-basierten Entscheidungsmodell zur aktiven Steuerung.
4. Entwicklung eines bergbaulichen Energiemodells und einer optimierten Abbauplanung zur Verbrauchsprognose und betrieblichen Optimierung.
5. Aufbau eines Energieversorgungsmodells zur Optimierung und Entkopplung der lokalen Energieversorgung.



Fig. 2. // Bild 2. TARA System (8).

tery mass (8). The integration of this innovative transport system is to be demonstrated in real application scenarios as part of the use cases planned in ELMAR.

### 2.3 Use Cases

Within the scope of ELMAR, two pilot plants were selected as use cases in which the TA15s are to be integrated and demonstrated. These are the "Eigenrieden" limestone quarry of Mineral GmbH and the "Nivelstein" quartz sand plant of Nivelsteiner Sandwerke und Sandsteinbrüche GmbH. Furthermore, the underground gypsum mine "Altertheimer Mulde" of Knauf, which is currently being planned, functions as a greenfield use case for the further utilization and implementation of the results from the preceding two use cases.

In Eigenrieden, a total of up to three TA15s will gradually go into research operation, as the introduction of electrically operated and autonomously driving vehicles for raw material extraction in the quarry is a core element on the way to CO<sub>2</sub> reduction. The sustainability plan for the quarry also includes the perspective switch to climate-neutral fuels for construction machinery and the use of PV. The Eigenrieden limestone quarry has been part of STRABAG since 2009. The quarry currently has a deposit of around 6 Mt of rock in the strata of the lower limestone. The annual production volume of building material mixtures and chip-pings is around 220,000 t (9).

As an associated partner of the research project, the Nivelsteiner Sandwerke und Sandsteinbrüche provides different areas of the Nivelstein plant. The implementation will finally be conducted by the AMT within the framework of the "Living Lab" and represents the second use case for the ELMAR research project, in which TA15 operation is planned for internal transport. Both use cases will include a 5G network for the operation of the transport machines as well as a local battery storage for an optimal energy management.

The underground gypsum mine "Altertheimer Mulde" of Knauf planned near Würzburg is the third use case. The findings from the ELMAR project are to support the planning regarding the complete electrification of the underground operation. The status as a greenfield project should be emphasized. All planning already includes the possibilities of an electrified vehicle fleet and operation management adapted to the electric load from the very beginning. Figure 3 gives an overview of the three use cases.

### 2.4 Research objectives AMT

As part of ELMAR, the AMT is researching two goals for the electrification of resource extraction operations. These are:

1. Development of a mining energy model and an energetically optimized operational mine plan for consumption forecasting and operational optimization.
2. Development of a transformation concept for raw material extraction sites to define requirements, target states, implementation scenarios and cross-company transfer of results.

## 3 Development of a mining energy model and optimized mining planning

This sub-goal pursues an approach based on the consideration and modeling of relevant energetic parameters for mining

6. Optimierung und Auslegung der energetischen Kopplung von Gewinnungsbetrieb und (lokaler) Energieerzeugung samt Speichersystemen.
7. Entwicklung einer luftgestützten Erfassung und Digitalisierung von Betriebsdaten.
8. Entwicklung eines Transformationskonzepts für Rohstoffgewinnungsbetriebe zur Definition von Anforderungen, Soll-Zuständen, Umsetzungsszenarien und betriebsübergreifender Übertragung der Ergebnisse.
9. Umsetzung der Erkenntnisse für das Greenfield-Projekt „Altertheimer Mulde“.

Die technologische Grundlage des Forschungsprojekts bilden die von VAS entwickelten batterieelektrischen und autonomen Transportmulden mit der Typenkennzeichnung TA15 (Bild 2). Neuartig an diesem System ist neben der vollen Autonomie der Ansatz des Schnellladens auf Basis eines konduktiven Ladekonzepts. Die TA15 verfügen über eine Nutzlast von 15 t. Der Ansatz von Volvo im Rahmen des TARA-Systems ist es, einen wirtschaftlichen Transport durch die Kombination aus autonomem Fahren, Schnellladesystem sowie höherer Fahrzeuganzahl zu ermöglichen. Die Wahl eines Schnellladesystems ermöglicht die Nutzung einer kleineren Batteriekapazität, da die Transportmulden in regelmäßigen Zeitintervallen konduktiv elektrisch geladen werden. Hierdurch muss nicht unnötig viel Batteriemasse transportiert werden. (8) Die Einbindung dieses innovativen Transportsystems soll im Rahmen von realen Anwendungsszenarien im Rahmen der im Projekt eingeplanten Use Cases demonstriert werden.

### 2.3 Use Cases

Im Rahmen von ELMAR werden in zwei Pilotbetrieben jeweils mehrere TA15 integriert und ihr Einsatz demonstriert. Hierbei handelt es sich zum einen um den Kalksteinbruch „Eigenrieden“ der Mineral GmbH sowie zum anderen um das Quarzsandwerk „Nivelstein“ der Nivelsteiner Sandwerke und Sandsteinbrüche GmbH. Des Weiteren fungiert das in Planung befindliche untertägige Gipsbergwerk „Altertheimer Mulde“ von Knauf als Greenfield Use Case zur weiteren Nutzung und Verwertung der vorherigen Ergebnisse aus den vorangehenden Use Cases.

In Eigenrieden werden insgesamt bis zu drei TA15-Mulden schrittweise in den Forschungsbetrieb gehen, da die Einführung elektrisch betriebener und autonom fahrender Mulden zur Rohstoffförderung im Steinbruch ein Kernelement auf dem Weg zur CO<sub>2</sub>-Reduktion ist. Zum Nachhaltigkeitsplan für den Steinbruch zählen auch die perspektivische Umstellung auf klimaneutrale Kraftstoffe für Baumaschinen und die Nutzung von Photovoltaik (PV). Der Kalksteinsteinbruch Eigenrieden gehört seit 2009 zum Verbund von STRABAG. Der Steinbruch verfügt in den Schichten des unteren Muschelkalks aktuell über ein Vorkommen von ca. 6 Mio. t Gestein. Die jährliche Produktionsmenge an Baustoffgemischen und Splitt liegt bei rd. 220.000 t. (9)

Als assoziierter Partner des Forschungsprojekts stellen die Nivelsteiner Sandwerke und Sandsteinbrüche Teile des Werks Nivelstein zur Verfügung. Die Umsetzung erfolgt schließlich im Rahmen des Reallabors durch das AMT und stellt den zweiten Use Case für das Forschungsprojekt ELMAR dar, in welchem der TA15-Betrieb für den innerbetrieblichen Transport geplant ist. Bestandteil bei-





Fig. 3. ELMAR use cases.  
 Bild 3. ELMAR Anwendungsbetriebe.  
 Source/Quelle: Mineral, AMT, Knauf

der Use Cases werden neben einem 5G-Netzwerk für den Betrieb der Transportmulden ebenfalls ein lokaler Batteriespeicher für ein optimales Energiemanagement sein.

Das in der Nähe von Würzburg geplante untertägige Gipsbergwerk „Altertheimer Mulde“ von Knauf ist der dritte Use Case. Die Erkenntnisse aus dem Projekt ELMAR sollen die Planungen hinsichtlich einer kompletten Elektrifizierung des untertägigen Betriebs unterstützen. Hervorzuheben ist der Status als Greenfield-Projekt. Alle Planungen beziehen bereits von Anfang an die Möglichkeiten einer elektrifizierten Fahrzeugflotte und einer an die elektrische Last angepassten Betriebsführung ein. Bild 3 gibt eine Übersicht über die drei Use Cases.

## 2.4 Forschungsziele AMT

Das AMT erforscht im Rahmen von ELMAR zwei Ziele der Elektrifizierung von Rohstoffgewinnungsbetrieben. Diese sind:

1. Entwicklung eines bergbaulichen Energiemodells und einer optimierten Abbauplanung zur Verbrauchsprognose und betrieblichen Optimierung.
2. Entwicklung eines Transformationskonzepts für Rohstoffgewinnungsbetriebe zur Definition von Anforderungen, Soll-Zuständen, Umsetzungsszenarien und betriebsübergreifender Übertragung der Erkenntnisse im Rahmen der Elektrifizierung.

## 3 Entwicklung eines bergbaulichen Energiemodells und optimierter Abbauplanung

Dieses Teilziel verfolgt einen Ansatz auf Basis der Berücksichtigung und Modellierung relevanter energetischer Parameter für die Abbauplanung und Produktionssteuerung. Dazu gehören die Energieerzeugung vor Ort, beispielweise durch PV-Anlagen, eine Energiespeicherung durch lokale Batteriespeichersysteme, die Optimierung des Energieverbrauchs von Fahrzeugen sowie Produktionsziele und -beschränkungen. Diese energetischen Einflussfaktoren werden mit Hilfe dieses Teilziels in der täglichen Produktionssteuerung und kurzfristigen Planung, aber auch in der mittel- und langfristigen Planung berücksichtigt. Dieser Ansatz eines energetisch optimierten operativen Abbauplans kann dann auf den taktischen oder strategischen Abbauplan übertragen werden. Mit der geometrischen Ausweitung eines Bergbaubetriebs steigt z. B. durch die Verlängerung der Fahrwege auch entsprechend der Energiebedarf im Transport, was insbesondere für die Prozesssicherheit batterieelektrischer Transportfahrzeuge eine erhebliche Herausforderung darstellen kann. Mit Hilfe der zu entwickelnden energieoptimierten und modellbasierten Abbauplanung wird es möglich sein, Emissionen zu reduzieren und ein nachhaltiges sowie effizientes Energiemanagement in der Rohstoffgewinnung zu erreichen.

Die Grundlage für dieses Teilziel des AMT bilden die Datenerfassung und Modellierung des Transportsystems. Hierbei werden den Transportprozess abbildende Modellierungen erstellt und anschließend eine geeignete energieoptimierte Abbauplanung entwickelt. Im Rahmen der Kopplung von Modellierungen und Simulationen können die Optimierungsergebnisse wieder in die Modelle integriert werden. Diese Modelle werden dann zur Validierung in den Use Case-Betrieben getestet und iterativ an den realen Prozess angepasst. Auf diese Weise wird es möglich, verschiedene Szenarien und alternative Produktionsweisen in einer realen Anwendungsumgebung zu testen.

planning and production control. These include on-site energy generation, e. g., through PV systems, energy storage through local battery storage systems, optimization of vehicle energy consumption and production targets and constraints. These energetic influencing factors are taken into account with the help of this sub-goal in daily production control and short-term planning, but also in medium- and long-term planning. This approach of an energetically optimized operational mine plan can then be trans-

ferred to the tactical or strategic mine plan. With the geometric expansion of a mining operation, e.g., the energy requirement in transport also increases accordingly due to the extension of the travel routes, which can represent a considerable challenge, particularly for the process reliability of battery-electric transport vehicles. With the help of the energy-optimized and model-based mine planning to be developed, it will be possible to reduce emissions and achieve sustainable and efficient energy management in raw material extraction.

The basis for this sub-objective of the AMT is data acquisition and modeling of the transport system. Here, the transport process is modeled, and a suitable energy-optimized mine plan is developed. As part of the coupling of modeling and simulation, the optimization results can be integrated back into the models. These models are then validated in the use case operations and iteratively adapted to the real process. In this way, it becomes possible to test different scenarios and alternative production methods in a real application environment.

The considered components of the energy model to be developed are:

1. Vehicle energy characteristics: Knowing the power requirements and energy consumption patterns of vehicles is critical to accurately assessing and modeling their energy performance.
2. Geometric and energy characteristics of the routes: The geometric aspects of routes, including their length, gradients, rolling resistance and curvature, play a significant role in energy consumption during transportation. Incorporating such information, along with energetic characteristics such as route parameters and traffic patterns, allows for more accurate modeling of the energy requirements of each transportation route.
3. Mass flow of transported material: Quantifying and integrating this information into the energy model enables a comprehensive analysis of the energy demand associated with the transport process.

The transformation concept described below and the energy-optimized decommissioning plan are mutually influenced by each other's outcomes. Certain models, such as the vehicle's energy model, are shared and the results from the short-term plan can be utilized to optimize mid-term decisions, e.g., infrastructure location.

The results of forecasting of the specific energy demand of the transport vehicles can furthermore be processed for the planning of the network capacity as well as the integration potentials of renewable energy sources. Building on this, energy resources can thus also be optimized by identifying opportunities for load shifting and demand reduction, as well as taking into account off-peak energy generation or excess availability of renewable energy.

Overall, such an energy consumption model enables efficient raw material extraction, renewable energy integration and infrastructure planning support. It also optimizes the use of energy resources and ultimately facilitates the making of informed and data-driven decisions about the deployment of battery-powered transportation vehicles.

Die betrachteten Komponenten des zu entwickelnden Energiemodells sind:

1. Energetische Eigenschaften der Fahrzeuge: Die Kenntnis des Leistungsbedarfs und der Energieverbrauchsmuster der Fahrzeuge ist entscheidend für die genaue Bewertung und Modellierung ihrer energetischen Leistung.
2. Geometrische und energetische Merkmale der Strecken: Die geometrischen Aspekte der Strecken, einschließlich ihrer Länge, Steigungen, Rollwiderstand und Krümmung, spielen eine wichtige Rolle für den Energieverbrauch während des Transports. Die Einbeziehung solcher Informationen, zusammen mit den energetischen Eigenschaften wie Streckenparametern und Verkehrsmustern, ermöglicht eine genauere Modellierung des Energiebedarfs der jeweiligen Transportstrecken.
3. Massenfluss des transportierten Materials: Die Quantifizierung und Integration dieser Informationen in das Energiemodell ermöglicht eine umfassende Analyse des Energiebedarfs im Zusammenhang mit dem Transportprozess.

Das nachfolgend beschriebene Transformationskonzept sowie der hier dargestellte energetisch optimierte Abbauplan sind eng miteinander verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig. Bestimmte Modelle, wie z.B. das Energiemodell des Fahrzeugs, werden gemeinsam genutzt, und die Ergebnisse des kurzfristigen Plans können für die Optimierung mittelfristiger Entscheidungen verwendet werden, z.B. für den Standort der Ladeinfrastruktur.

Die Ergebnisse der Prognose des spezifischen Energiebedarfs der Transportfahrzeuge können darüber hinaus für die Planung der Netzkapazität sowie die Integrationspotentiale erneuerbarer Energiequellen weiterverarbeitet werden. Aufbauend darauf können somit auch die Energieressourcen optimiert werden, indem Möglichkeiten zur Lastverschiebung und Nachfragereduzierung ermittelt sowie die Erzeugung von Energie außerhalb der Spitzenzeiten oder von Überverfügbarkeiten erneuerbarer Energien berücksichtigt werden.

Insgesamt ermöglicht ein derartiges Energieverbrauchsmodell einen effizienten Gewinnungsbetrieb, die Integration erneuerbarer Energien sowie eine Unterstützung der Infrastrukturplanung. Darüber hinaus wird die Nutzung von Energieressourcen optimiert und schließlich das Treffen fundierter und datengestützter Entscheidungen über die Einführung von batteriebetriebenen Transportfahrzeugen erleichtert.

#### 4 Entwicklung eines Transformationskonzepts für Rohstoffgewinnungsbetriebe

Die Entwicklung eines Transformationskonzepts hat das Ziel, auf Grundlage der Use Cases des Projekts ELMAR eine systematische und modulare Methodik für die Umstellung konventioneller Betriebsmodelle hin zu einem elektrifizierten Transport in der Rohstoffgewinnung zu realisieren.

Die Elektrifizierung geht weit über den bloßen Austausch von Verbrennungsmotoren durch elektrische Antriebssysteme hinaus. Hervorzuheben ist dabei, dass neben den Änderungen von Maschinenkonstellationen gleichermaßen weitere betriebliche Bereiche wie die Betriebsgeometrie, betriebliche Energiezustände sowie die lokale Infrastruktur berücksichtigt werden müssen. Die Notwendigkeit dieses Transformationskonzepts leitet sich aus der



#### **4 Development of a transformation concept for raw material extraction companies**

The development of a transformation concept aims to implement a systematic and modular methodology for the conversion of conventional operating models to electrified transport in raw material extraction based on the use cases of the ELMAR project.

Electrification goes far beyond the mere replacement of combustion engines by electric drive systems. It should be emphasized that, in addition to changes in the machine constellation, other operational areas such as mine site and route design, operational energy conditions and local infrastructure must be equally considered. The necessity of this transformation concept is derived from the complex problem of operational and process transformation as well as the effects of electrification, which are difficult to estimate.

From these effects, in turn, various fields of consideration can be derived, which must be taken into account in every phase of the transformation. These include the site geometry based on the properties of the deposit and the resulting operating and route design. In addition, the charging times of battery electric vehicles represent a new element in the consideration of the transportation process. Furthermore, the available machines, especially the electrified ones, are the technological basis of the concept. These technologies are accompanied by a new type of infrastructure, which must be integrated and connected into the operations in order to meet the specific requirements of the respective technology. This includes not only the infrastructure for electric charging, but also the communication and monitoring infrastructure. For a successful transformation, these areas of consideration must be harmonized.

For the transformation from a diesel-powered to an electrified transport, four different phases are considered as part of the transformation concept. These are:

1. analysis phase;
2. planning phase;
3. implementation phase; and
4. evaluation phase.

In the framework of the project, the requirements of the raw material extraction sites for electric transport machines are therefore analyzed in the analysis phase. The objectives and focal points of the electrification project are defined and specific measures for electrification are derived. Subsequently, the planning of the electrified transport for the respective operation takes place within the planning phase. The implementation of these measures is followed by an investigation of the effects of electrification on the transformation of raw material extraction sites using the example of the use cases Nivelstein and Eigenrieden within the implementation phase. In the evaluation phase, the results will be assessed and general recommendations for action derived from the findings of the two use cases of the project for the electrification of raw material extraction sites. The aim is that the findings and methodology can also be transferred to other raw material extraction sites.

Based on the developed systematic methodology of this transformation concept, the electrification of raw material extraction sites should be comprehensible, facilitated and more

komplexen Problemstellung der Betriebs- und Prozesstransformation sowie den nur schwer abschätzbaren Auswirkungen der Elektrifizierung ab.

Aus diesen Auswirkungen lassen sich wiederum verschiedene Betrachtungsfelder ableiten, welche in jeder Phase der Transformation berücksichtigt werden müssen. Hierzu zählen insbesondere die Betriebsgeometrie basierend auf den Eigenschaften der Lagerstätte sowie dem daraus bedingten Betriebs- und Streckendesign. Zudem stellen die Ladezeiten der batterieelektrischen Fahrzeuge ein neues und entscheidendes Element in der Betrachtung des Transportprozesses dar. Des Weiteren sind die zur Verfügung stehenden Betriebsmittel, insbesondere die elektrifizierten Maschinen, die technologische Grundlage des Konzepts. Begleitet werden diese Technologien durch eine neuartige Infrastruktur, welche in die Betriebe integriert und eingebunden werden muss, um den spezifischen Anforderungen der jeweiligen Technologie gerecht zu werden. Hierzu gehören neben der Infrastruktur für das elektrische Laden ebenfalls die Kommunikations- und Überwachungsinfrastruktur. Für eine erfolgreiche Transformation müssen diese Betrachtungsfelder in Einklang gebracht werden.

Für die Transformation von einem dieselbetriebenen zu einem elektrifizierten Transportbetrieb werden im Rahmen des Transformationskonzepts vier unterschiedliche Phasen betrachtet. Diese sind:

1. Analysephase,
2. Planungsphase,
3. Umsetzungsphase und
4. Evaluierungsphase.

Im Rahmen des Projekts werden deshalb zu Beginn die Anforderungen der Rohstoffgewinnungsbetriebe an elektrische Transportmaschinen in der Analysephase durchleuchtet, Zielsetzung sowie Schwerpunkte des Elektrifizierungsvorhabens definiert und spezifische Maßnahmen für die Elektrifizierung abgeleitet. Anschließend erfolgt die Planung des elektrifizierten Transports für den jeweiligen Betrieb im Rahmen der Planungsphase. An die Umsetzung der Maßnahmen schließt sich eine Untersuchung der Auswirkungen einer Elektrifizierung auf die Transformation von Rohstoffgewinnungsbetrieben am Beispiel der Use Cases Nivelstein und Eigenrieden in der Umsetzungsphase an. Im Rahmen der Evaluierungsphase erfolgt dann die Bewertung der Ergebnisse und das Ableiten allgemeiner Handlungsempfehlungen aus den Erkenntnissen der beiden Use Cases des Projekts für die Elektrifizierung von Rohstoffgewinnungsbetrieben. Es besteht das Ziel, dass sich die Erkenntnisse und Methodik auch auf weitere Rohstoffgewinnungsbetriebe übertragen lassen.

Mit Hilfe der entwickelten systematischen Methodik dieses Transformationskonzepts soll zukünftig die Elektrifizierung von Rohstoffgewinnungsbetrieben nachvollziehbar, erleichtert und stärker vorangetrieben werden. Auf diese Weise wird es möglich, dass die Rohstoffgewinnung an der Erfüllung der Klimaziele von EU und Bundesregierung partizipieren kann.

#### **5 Zusammenfassung**

Im Rahmen des Forschungsprojekts ELMAR werden neben der Demonstration und Integration des elektrischen und autonomen

strongly promoted in the future. In this way, it will be possible for raw material extraction to participate in meeting the climate targets of the EU and the German government.

## 5 Summary

In the ELMAR research project, in addition to the demonstration and integration of electric and autonomous transport, the impact of electrification on operational and medium-term planning in raw material extraction is being researched. Furthermore, a methodology is being developed to accompany the transformation of raw material extraction operations from fossil to electrified transport technologies.

The project consortium consists of the following eleven partners from industry and research:

- AMT;
- Volvo Autonomous Solutions;
- Volvo Construction Equipment;
- Volvo Trucks;
- PSI AG Business Unit Renewable Energy;
- PSI AG Business Unit FLS;
- Mineral Baustoff GmbH;
- Knauf Gips KG;
- ISEA;
- TITUS Research GmbH; and
- Nivelsteiner Sandwerke und Sandsteinbrüche GmbH (associated).

The goal of the ELMAR project is the integration and demonstration of battery-electric and autonomous transport in raw material extraction. This is done with a special focus on maintaining process reliability in production and ensuring the security of electrical supply, as well as linking it to local energy generation using renewable energy sources. An integral part of this is the consideration of planning aspects. This includes mine planning and control as well as medium-term operational planning for a transformation of the transport machines. In this context, the AMT will develop an energetically optimized mine planning as well as a transformation concept for raw material extraction operations to investigate the challenges and opportunities of electrification and approaches to solutions for the integration of electrified transport machines in raw material extraction operations.

In the context of energy-optimized mine planning, modeling the energy consumption of transport machines enables the inclusion of energy optimization already in the planning phase. This in turn leads to the facilitation of the integration of battery-powered transport machines into the mining process. By estimating the energy demand based on different parameters such as transport distances, loading capacities and terrain conditions, the developed model can show different possibilities to minimize the energy consumption and to optimize the transport routes. These findings should thus enable more efficient planning and allocation of operational resources.

The development of a transformation concept aims at the elaboration of a methodology which includes the entire methodical procedure from analysis to planning and implementation to evaluation. In the project, elementary factors and criteria of the

Transports insbesondere die Auswirkungen der Elektrifizierung auf die betriebliche und mittelfristige Planung bei der Rohstoffgewinnung untersucht. Zudem wird eine Methodik entwickelt, welche die Transformation von Rohstoffgewinnungsbetrieben von fossilen zu elektrifizierten Transporttechnologien begleitet.

Das Projektkonsortium besteht aus den folgenden elf Partnern aus Industrie und Forschung:

- AMT,
- Volvo Autonomous Solutions,
- Volvo Construction Equipment,
- Volvo Trucks,
- PSI AG Geschäftsbereich Erneuerbare Energie,
- PSI AG Geschäftsbereich FLS,
- Mineral Baustoff GmbH,
- Knauf Gips KG,
- ISEA,
- TITUS Research GmbH und
- Nivelsteiner Sandwerke und Sandsteinbrüche GmbH (assoziiert).

Ziel des ELMAR-Projekts ist die Integration und Demonstration eines batterieelektrischen und autonomen Transports in der Rohstoffgewinnung. Dies erfolgt unter besonderer Berücksichtigung des Erhalts der Prozesssicherheit in der Produktion und der Gewährleistung der elektrischen Versorgungssicherheit sowie deren Kopplung an die lokale Energieerzeugung mit Hilfe erneuerbarer Energiequellen. Integraler Bestandteil hierbei ist die Berücksichtigung planerischer Aspekte. Hierzu zählen die Abbauplanung und -steuerung sowie die mittelfristige Betriebsplanung für eine Transformation der Transportmaschinen. Das AMT wird in diesem Zuge eine energetisch optimierte Abbauplanung sowie ein Transformationskonzept für Rohstoffgewinnungsbetriebe entwickeln, um die Herausforderungen und Chancen der Elektrifizierung zu untersuchen und Lösungsansätze für eine Integration von elektrifizierten Transportmaschinen in Betriebe der Rohstoffgewinnung zu finden.

Im Rahmen der energetisch optimierten Abbauplanung wird durch die Modellierung des Energieverbrauchs von Transportmaschinen die Einbeziehung einer energetischen Optimierung bereits in der Planungsphase ermöglicht. Dies führt wiederum zu einer Erleichterung der Integration von batteriebetriebenen Transportmaschinen in den Gewinnungsprozess. Durch eine Abschätzung des Energiebedarfs auf Basis verschiedener Parameter, wie z. B. Transportentfernungen, Ladekapazitäten und Geländebedingungen, kann das entwickelte Modell unterschiedliche Möglichkeiten zur Minimierung des Energieverbrauchs und zur Optimierung der Transportstrecken aufzeigen. Diese Erkenntnisse sollen somit eine effizientere Planung und Zuteilung von betrieblichen Ressourcen ermöglichen.

Die Entwicklung eines Transformationskonzepts hat die Erarbeitung einer Methodik zum Ziel, welche das gesamte methodische Vorgehen im Zuge der Transformation von der Analyse über die Planung und Umsetzung bis zur Evaluation beinhaltet. Im Projekt werden elementare Faktoren und Kriterien der Transformation erarbeitet, welche durch die Erkenntnisse aus der praxisnahen Durchführung von Elektrifizierungsvorhaben gewonnen werden. Diese Erkenntnisse werden innerhalb der Methodik des

transformation are elaborated, which are gained through the findings from the practical implementation of electrification projects. These findings will be used within the methodology of the transformation concept final for the formulation of recommendations for action that go beyond the individual case to make the opportunities and challenges of the electrification of transport machinery visible.

These research objectives will enable an important contribution to understanding the effects of electrification of raw material extraction based on innovative technologies. At the same time, successful electrification forms the basis for ensuring the climate-neutral future viability of this industry.

### Funding

The ELMAR project will run until the end of July 2025 and is being funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Protection (BMWK) under the “Research and Development in the Field of Electromobility” funding guidelines with around 6 M€ out of a total project volume of approximately 11 M €. The project is funded under the project funding number FKZ 01MV22001\*.

Transformationskonzepts final für die Formulierung von über den Einzelfall hinausgehenden Handlungsempfehlungen verwendet, um die Chancen und Herausforderungen der Elektrifizierung von Transportmaschinen sichtbar zu machen.

Mit diesen Forschungszielen wird ein wichtiger Beitrag für das Verständnis der Auswirkungen einer Elektrifizierung der Rohstoffgewinnung auf Basis innovativer Technologien ermöglicht. Zeitgleich bildet eine erfolgreiche Elektrifizierung die Grundlage für die Sicherung der klimaneutralen Zukunftsfähigkeit dieser Branche.

### Förderung

Das Projekt ELMAR läuft bis Ende Juli 2025 und wird gefördert seitens des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) nach der Förderrichtlinie „Forschung und Entwicklung im Bereich Elektromobilität“ mit rd. 6 Mio. € bei einem Gesamtvolumen des Projekts von ca. 11 Mio. €.

Das Projekt wird unter der Projektfördernummer FKZ 01MV22001\* gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### References / Quellenverzeichnis

- (1) BMWi (2021): Rohstoffe Bergbau, Recycling, Ressourceneffizienz – wichtig für Wohlstand und Arbeitsplätze (bmwi.de).
- (2) Clausen, E.; Sörensen, A.; Uth, F.; Mitra, R.; Schwarze, B.; Lehnen, F. (2020): Assessment of the effects of global digitalization trends on sustainability in mining. Aachen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- (3) Ertugrul, N.; Kani, A. P.; Davies, M.; Sbarbaro, D.; Moran, L. (2020): Status of Mine Electrification and Future Potentials. IEEE.
- (4) Legge, H.; Müller-Falcke, C.; Nauclicr, T.; Östgren, E. (2021): Creating the zero-carbon mine. Online available: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/creating-the-zero-carbon-mine>
- (5) Sahoo, L. K.; Bandyopadhyay, S.; Banerjee, R. (2014): Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines. Applied Energy, Bd. 113, pp 1382–1396.
- (6) Makarova, I.; Mavlyautdinova, G.; Mavrin, V.; Makarov, D.; Barinov, A. (2023): Improving the Environmental Friendliness of the Mining Complex Through Alternative Fuel for Mine Dump Trucks. Transportation Research Procedia, Bd. 68, pp 755–760.
- (7) BMWi (2019): Die Rohstoffstrategie der Bundesregierung (bmwi.de).
- (8) <https://www.volvoautonomoussolutions.com/en-en/our-solutions/autonomous-transport-solution-by-volvo/quarries-mining-and-industrial-material-handling/tara.html>
- (9) <https://newsroom.strabag.de/news-pilotprojekt-in-eigenrieden-strabag-will-bis-2030-den-ersten-klimaneutralen-steinbruch-in-deutschland-realieren?id=169047&menueid=28033>

### Authors / Autoren

Dennis Wagner M. Sc., Pablo Muñoz Sánchez M. Sc., Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen, Institute for Advanced Mining Technologies (AMT), RWTH Aachen University, Aachen