

Mining in Space – Excavation of Raw Materials on Other Celestial Bodies

The exploration of space has fascinated humankind for decades. Along with this, establishing a colony on other celestial bodies, such as the moon or Mars, has gained increasing interest. For building such a colony, the use of extraterrestrial raw materials is of great importance. In order to make these raw materials usable, just as in terrestrial processes, the first tasks are prospecting for valuable resources as well as mining the mineral raw material. Due to the challenging environment, innovative and

highly autonomous processes are required for the excavation of raw materials. In research and teaching, the Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) at RWTH Aachen University (RWTH), Aachen/Germany, can contribute its expertise in the field of terrestrial mining to mining in space. Thus, it will not only be possible to develop innovative concepts for extraterrestrial mining, but the insights gained will also improve terrestrial mining in future.

Mining in Space – Rohstoffgewinnung auf anderen Himmelskörpern

Die Erkundung des Weltraums fasziniert die Menschheit seit Jahrzehnten. Damit einhergehend hat der Aufbau einer Kolonie auf anderen Himmelskörpern wie dem Mond oder Mars zunehmend an Interesse gewonnen. Für den Aufbau einer solchen Kolonie ist die Nutzung extraterrestrischer Rohstoffe von großer Bedeutung. Um diese nutzbar zu machen, stehen, wie auch in terrestrischen Prozessen, die Erkundung und Rohstoffgewinnung am Anfang der Prozesskette. Bedingt durch die herausfordernde Umgebung sind für die Rohstoffgewinnung innovative und

hochgradig autonom arbeitende Verfahren erforderlich. In Forschung und Lehre kann das Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) der RWTH Aachen University (RWTH), Aachen, hier seine Expertise im Bereich der terrestrischen Rohstoffgewinnung in den Bereich der Rohstoffgewinnung auf dem Mond einbringen. So können nicht nur innovative Konzepte für den extraterrestrischen Bergbau entwickelt werden, die Erkenntnisse können zukünftig auch zu Fortschritten im terrestrischen Bergbau beitragen.

1 Introduction

The exploration of outer space has always fascinated mankind. In this context, building colonies on moon or Mars has gained interest in the last years. In order to enable a long-term presence of humankind on other celestial bodies, the use of locally available raw materials, the so-called In Situ Resource Utilization (ISRU), is essential to reduce the need for raw materials that would otherwise have to be transported from Earth. The first objective will be to preserve life-supporting processes. (1)

Therefore, the ice that exists at the poles of the moon, e.g., is of interest. This could not only be used as water, but also be separated into oxygen and hydrogen, which could serve as fuel for rockets. (1, 2)

Besides the ice at the poles of the moon, the lunar regolith is of interest for any ISRU activity. The regolith is a fine dust-like raw material that covers the entire lunar surface. In the lunar highlands the depth of this layer is around 10 to 15 m, in the mare areas it is

1 Einleitung

Die Erkundung des Weltraums fasziniert den Menschen seit jeher. In den vergangenen Jahren ist damit einhergehend der Aufbau von Kolonien, beispielsweise auf dem Mond oder Mars, zunehmend in den Fokus gerückt. Um eine längerfristige Präsenz des Menschen auf anderen Himmelskörpern zu ermöglichen, ist die Nutzung der vor Ort vorhandenen Rohstoffe, die sogenannte In Situ Resource Utilization (ISRU) unumgänglich, um den Bedarf der Rohstoffe, die von der Erde aus transportiert werden müssten, zu reduzieren. (1)

Das erste Ziel wird die Erhaltung lebenserhaltender Prozesse sein. Aus diesem Grund ist beispielsweise das Eis, welches an den Polen des Mondes vorhanden ist, von Interesse. Dieses könnte nicht nur als Wasser verwendet werden, sondern ebenso in Sauerstoff und Wasserstoff separiert werden, der als Treibstoff für Raketen dienen könnte. (1, 2)

Neben dem Eis an den Polen des Mondes ist der lunare Regolith für sämtliche Aktivitäten im Bereich ISRU interessant. Es handelt

4 to 5 m. The regolith is formed by meteorite impacts that destroy the lunar surface. At the same time, subsequent impacts cause the regolith to mix, so that it is heterogeneous in its composition. (3)

In its original form, the regolith could be used as a building material or for radiation protection. Furthermore, the extraction of metals and oxygen, which exist in bonded form in the regolith, is part of ongoing research.

For being able to utilize the regolith, as in terrestrial processes, the excavation of the raw material follows the previous exploration. In the following, the challenges of resource excavation on the moon will be explained. Based on this, different concepts for the ISRU will be presented to meet these challenges.

2 Raw material excavation on the moon

Figure 1 schematically shows an ISRU process chain. First exploration takes place. Then mineral processing follows the excavation of the regolith. Finally, further processing, like metallurgical processes, might follow before the utilization of the material. For a responsible use of the resources available on the lunar surface, recycling is also intended to be part of the process chain for ISRU.

The raw material excavation, as well as other ISRU processes, is however challenged on the one hand by the characteristics of the regolith. The regolith is not only fine and dusty, but also electrostatically charged and has adhesive properties which poses challenges, e.g., when using cameras. (3, 4)

On the other hand, challenges arise from the lunar environment. In terrestrial mining, large and heavy machines are typically used to apply the digging forces required to mine the raw materials. On the moon, due to the reduced gravitational acceleration of $1.62 \frac{m}{s^2}$, compared to $9.81 \frac{m}{s^2}$ on Earth, applying the digging forces would get even more difficult. In addition, the lunar atmosphere is so thin that it is often described as a vacuum and temperatures are characterized by extremes of $-153 \text{ }^\circ\text{C}$ during the night and up to $107 \text{ }^\circ\text{C}$ during the lunar day. Another challenge is the radiation, which not only poses a danger to humans but can also cause damage to electronic equipment. Furthermore, the day and night cycles of 29.5 Earth days must be taken into account, especially in terms of energy supply. (3, 5, 6)

sich dabei um einen feinen staubartigen Rohstoff, zusammengesetzt aus verschiedenen Mineralien, der die gesamte Mondoberfläche bedeckt. In den Hochlandregionen beträgt die Dicke dieser Schicht 10 bis 15 m, in den Mare Regionen ist sie 4 bis 5 m dick. Der Regolith entsteht durch Meteoriteneinschläge, welche die Mondoberfläche zerstören. Gleichzeitig führen darauffolgende Einschläge zu einem Vermischen des Regoliths, sodass dieser heterogen in seiner Zusammensetzung ist. (3)

In seiner ursprünglichen Form könnte der Regolith zukünftig als Baumaterial oder zum Strahlenschutz verwendet werden. Darüber hinaus ist die Gewinnung von Metallen und Sauerstoff, der in gebundener Form im Regolith enthalten ist, Bestandteil der Forschung.

Um den Regolith nutzbar zu machen, folgt, wie auch in terrestrischen Prozessen, die Rohstoffgewinnung auf die vorherige Exploration. Nachfolgend sollen die Herausforderungen der Rohstoffgewinnung auf dem Mond erläutert werden. Darauf aufbauend werden verschiedene Konzepte für die ISRU vorgestellt.

2 Rohstoffgewinnung auf dem Mond

In Bild 1 ist eine ISRU-Prozesskette schematisch dargestellt. Zu Beginn erfolgt die Exploration, auf welche die Gewinnung und mineralische Aufbereitung des Regoliths folgen, bevor dieser abhängig vom Verwendungszweck weiterverarbeitet wird. Auf die Weiterverarbeitung folgen die Nutzung sowie die abschließende Verwertung im Sinne eines verantwortlichen Umgangs mit den auf dem Mond vorhandenen Ressourcen.

Die Rohstoffgewinnung, wie auch andere ISRU-Prozesse, wird jedoch durch die Eigenschaften des Regoliths erschwert. Dieser ist einerseits fein und staubartig und damit hochgradig abrasiv. Darüber hinaus ist der Regolith elektrostatisch geladen und besitzt klebende Eigenschaften, was Herausforderungen, beispielsweise für den Einsatz von Kameras, mit sich bringt. (3, 4)

Weitere Herausforderungen ergeben sich durch die auf dem Mond vorherrschenden Bedingungen. Im terrestrischen Bergbau werden üblicherweise große und schwere Maschinen eingesetzt, um die für die Rohstoffgewinnung erforderlichen Grabkräfte aufzubringen. Auf dem Mond ist es, bedingt durch die verringerte Gravitationsbeschleunigung von $1,62 \frac{m}{s^2}$ im Vergleich zu einer Gravitationsbeschleunigung von $9,81 \frac{m}{s^2}$ auf der Erde, noch herausfordernder, die erforderlichen

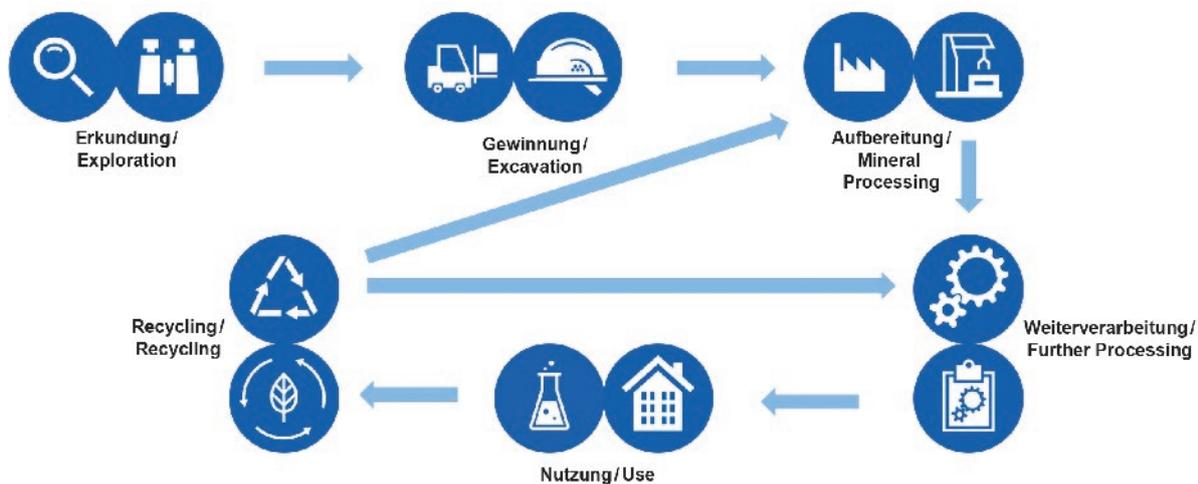


Fig. 1. Idealized sketch of an ISRU process chain. // Bild 1. Idealisierte Darstellung einer ISRU-Prozesskette. Source/Quelle: AMT

To sum it up, the lunar environment is extremely challenging. Therefore, all processes must work autonomous or at least tele remote. If necessary, personnel could monitor the processes from a control room integrated into a lunar habitat.

In addition to this, the distance between Earth and the moon is quite large and payloads of rockets are limited. Therefore, it would not be possible to transport terrestrial mining machines to the lunar surface. Moreover, it would not be reasonable to use large and heavy terrestrial mining machines, since it is likely that initially only small amounts of regolith will be excavated. Instead, machines for lunar mining should be small and lightweight.

2.1 Existing approaches for regolith mining

Existing concepts for mining regolith on the moon have focused on how to excavate the raw material under the lower gravity and how to reduce the digging forces that have to be applied during the process. Many of these concepts are inspired by terrestrial mining machines. An overview of these developments can be found, e. g., in Mueller und van Susante (7) or Just et al. (8).

The NASA, e. g., has been developing and optimising the RASSOR, the Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot. The RASSOR has two counter-rotating drums equipped with small blades in order to neutralize the digging forces. After initial testing, the RASSOR was further developed to have a lower mass and higher capacity. While the first version has been equipped with a chain drive, this was replaced by wheels as they would be less vulnerable. Currently, evolution from Technology Readiness Level (TRL) 4 to 5 is happening. As soon as TRL 6 is achieved, the RASSOR is expected to be a suitable candidate for missions on other celestial bodies. (7, 9) However, the RASSOR is equipped with many moving parts. Due to the challenging conditions, such as the abrasive characteristics of the regolith, this may be a disadvantage from a maintenance point of view.

In addition to the approaches inspired by terrestrial mining machines, there are other alternative concepts, such as the pneumatic regolith excavation, which can be compared to the principle of a vacuum cleaner (10) or percussive excavation. This concept involves a shovel equipped with a percussive function in order to reduce the digging forces. (11)

Furthermore, NASA regularly organizes challenges and competitions for extraterrestrial mining, in which mainly student teams can develop and test new excavation concepts (8). In 2020 a team of students from RWTH Aachen University (RWTH), Aachen/Germany, that was supported by the Institute for Advanced Mining Technologies (AMT), participated in a challenge to optimize the RASSOR.

So far, all the approaches for extraterrestrial mining have only been tested on Earth. Consequently, no optimal method for regolith extraction has been identified to date. This is, among other things, due to the fact that the environmental conditions on the lunar surface cannot be replicated 1 to 1 on Earth. Consequently, further investigations are required in the future.

2.2 Selective regolith mining

It becomes clear that innovative methods are required for mining raw materials on other celestial bodies, such as the moon, e. g., to meet the challenges posed by the reduced gravity. Due to the harsh environment, it would be favorable to have machines

Grabkräfte aufzubringen. Darüber hinaus ist die Atmosphäre des Mondes so dünn, dass sie häufig als Vakuum bezeichnet wird, die Temperaturen sind geprägt von Extrema von -153 °C während der Nacht und bis zu 107 °C während des lunaren Tags. Eine weitere Herausforderung stellt die Strahlung dar, die nicht nur eine Gefahr für den Menschen darstellt, sondern auch zu Beschädigungen an elektronischem Equipment führen kann. Weiterhin sind die Tag- und Nachtzyklen von 29,5 Erdtagen, insbesondere im Hinblick auf die Bereitstellung von Energie, zu berücksichtigen. (3, 5, 6)

Zusammenfassend ist die Umgebung charakterisiert durch Extrema. Folglich müssen alle Prozesse autonom oder zumindest teleremote stattfinden. Personen könnten diese Prozesse, falls erforderlich, aus einem Kontrollraum, der in ein Habitat integriert werden könnte, kontrollieren.

Darüber hinaus ist die Distanz von der Erde zum Mond groß und die Nutzlasten von Raketen sind begrenzt. Deshalb ist es nicht möglich und außerdem nicht sinnvoll, terrestrische Bergbaumaschinen zum Mond zu transportieren. Des Weiteren wäre es nicht sinnvoll, große und schwere Maschinen zu nutzen, da zu Beginn vermutlich nur kleine Mengen an Regolith gewonnen würden. Vielmehr sind für die Rohstoffgewinnung auf dem Mond kleine und leichte Maschinen erforderlich.

2.1 Bisherige Ansätze zur Gewinnung von Regolith auf dem Mond

Bisherige Konzepte zur Gewinnung von Regolith auf dem Mond fokussieren sich darauf, wie die Rohstoffgewinnung unter der geringeren Schwerkraft möglich ist und wie damit einhergehend die bei der Gewinnung aufzubringenden Grabkräfte reduziert werden können. Viele dieser Konzepte orientieren sich an terrestrischen Bergbaumaschinen. Ein Überblick dieser Entwicklungen ist beispielsweise in Mueller und van Susante (7) oder Just et al. (8) zu finden.

So verfolgt die NASA seit mehreren Jahren die Entwicklung und Optimierung des sogenannten RASSORs, dem Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot. Dieser besteht aus zwei gegenläufigen Trommeln, die mit kleinen Schaufeln ausgestattet sind. Dadurch sollen die Grabkräfte neutralisiert werden. Nach ersten Untersuchungen erfolgte die Weiterentwicklung hin zu einer geringeren Masse des RASSORs bei gleichzeitig höherer Kapazität. Während die erste Entwicklung mit einem Kettenantrieb ausgestattet war, wurde dieser durch Räder ersetzt, da sie weniger fehleranfällig seien. Derzeit erfolgt die Weiterentwicklung vom Technologiereifegrad (TRL) 4 hin zu TRL 5. Sobald der TRL 6 erreicht wird, soll der RASSOR ein möglicher Kandidat für zukünftige Missionen auf anderen Himmelskörpern sein. (7, 9) Zu berücksichtigen ist jedoch, dass der RASSOR mit vielen beweglichen Teilen ausgestattet ist. Dies kann bedingt durch die herausfordernden Bedingungen, wie die abrasiven Eigenschaften des Regoliths, aus Sicht der Instandhaltung ein Nachteil sein.

Neben den Ansätzen, die sich an terrestrischen Bergbaumaschinen orientieren, existieren weitere, alternative Konzepte, wie z. B. die pneumatische Regolithgewinnung, deren Prinzip sich mit einem Staubsauger vergleichen lässt (10), oder die schlagende Gewinnung. Dabei handelt es sich um eine Schaufel, die mit einer Schlagfunktion ausgestattet ist, um die aufkommenden Grabkräfte zu reduzieren. (11)

Darüber hinaus veranstaltet die NASA regelmäßig Challenges, in denen Studierendenteams neue Konzepte für die Rohstoffgewin-

without many moving parts. In addition, such machinery must be robust and operate tele remotely or even autonomously due to the environmental conditions. Moreover, to reduce transportation costs of the machinery or components, mining machines need to be small in size and operate efficiently.

These requirements can be partially compared with the requirements for terrestrial mining, where an increasing demand for raw materials, with simultaneously decreasing concentrations of valuables and more complex deposits, make the excavation of raw materials increasingly challenging. This is also accompanied by a growing awareness for safety and a responsible treatment of our planet. One approach to meet these challenges is the increasing automation of mining machinery and processes and the development of innovative methods for raw material excavation. From this, it becomes clear that the concepts, to meet the challenges in raw material excavation on Earth and on other celestial bodies, such as the moon, can be similar in some aspects. Therefore, developments in the area of space mining can be based on existing experience in the area of terrestrial mining. At the same time, future developments in the area of space mining can help to develop novel solutions for future challenges in the area of terrestrial mining. (12)

One possible approach to meet the demand for an efficient mining process is selective mining. In terms of the excavation of regolith this means, that only the regolith, that already has a slightly higher concentration of the valuable mineral is excavated.

In order to implement this concept, the requirements of the subsequent processes need to be known. A certain mineral composition or defined particle size, e. g., may be required or at least helpful to make the subsequent processes more efficient. In addition to this, it is necessary to know which quantities of the material must be provided at a defined place and time. Furthermore, the local environmental conditions must also be identified. This includes information on where to find the valuable resources and in which concentrations.

Therefore, the concept of selective raw material excavation differs from previous developments in the field of space mining, as no longer only the mining process itself is considered, but also the processes linked to it. In order to get this information, suitable sensor technologies for regolith characterization immediately before, during or after the excavation process should be integrated into the process.

The concept of selective regolith excavation will be explained in detail based on figure 2. This schematically shows a mine site as a block diagram. This is divided into smaller areas for excavation. For each field, a material characterization could be carried out using suitable sensor technologies. In the figure, different shades of grey represent different concentrations of the valuable mineral. The idea of selective regolith mining is now to mine the regolith in those areas, where the concentration of the valuable mineral is already slightly increased. Furthermore, mining conditions need to be considered. This means that regolith mining may also needs to take place in areas where the concentration of the valuable resource is not increased in order to expose areas with an increased concentration of the valuable resource. Even though absolute dimensions need to be defined for a specific use case, it becomes clear that the excavated masses and therefore the machine dimensions could be reduced with selective regolith mining.

nung auf anderen Himmelskörpern entwickeln und testen können (8). Im Jahr 2020 nahm ein Team von Studierenden der RWTH Aachen University (RWTH), Aachen, welches vom Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) betreut wurde, an einer Challenge zur Optimierung des RASSORs teil.

Alle beschriebenen Ansätze wurden bisher lediglich auf der Erde, nicht jedoch auf anderen Himmelskörpern getestet. Damit einher geht, dass bis heute keine optimale Methode für die Regolithgewinnung identifiziert werden konnte. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass die lunaren Umgebungsbedingungen nicht 1 zu 1 auf der Erde nachgebildet werden können. Folglich sind zukünftig weitere Untersuchungen erforderlich.

2.2 Selektive Regolithgewinnung

Für die Rohstoffgewinnung auf anderen Himmelskörpern wie dem Mond sind innovative Verfahren erforderlich, beispielsweise um Herausforderungen infolge der reduzierten Schwerkraft zu begegnen. Auch sind, bedingt durch die Umgebungsbedingungen, Maschinen mit geringer Anzahl an beweglichen Teilen wünschenswert. Darüber hinaus müssen diese aufgrund der vorherrschenden Umgebungsbedingungen robust sein und teleremote oder gar autonom arbeiten. Um die Kosten für den Transport der Maschinen oder Komponenten zu reduzieren, müssen Bergbaumaschinen des Weiteren im Vergleich zu terrestrischen Bergbaumaschinen klein sein und effizient arbeiten.

Diese Anforderungen lassen sich in Teilen mit den Anforderungen an den terrestrischen Bergbau vergleichen, wo ein steigender Rohstoffbedarf bei gleichzeitig sinkenden Wertstoffkonzentrationen und komplexeren Lagerstätten die Rohstoffgewinnung zunehmend herausfordernder macht. Damit einher geht auch das wachsende Bewusstsein für Sicherheit und den verantwortungsvollen Umgang mit unserem Planeten. Ein Ansatz, diesen Herausforderungen zu begegnen, ist die zunehmende Automatisierung von Bergbaumaschinen und -prozessen sowie die Entwicklung innovativer Methoden für die Rohstoffgewinnung. Daraus wird deutlich, dass die Ansätze, Herausforderungen in der Rohstoffgewinnung auf der Erde und auf anderen Himmelskörpern wie dem Mond zu begegnen, in einigen Aspekten ähnlich sein können. Entwicklungen im Bereich des Weltraumbergbaus können einerseits auf der bestehenden Erfahrung im Bereich des terrestrischen Bergbaus aufbauen. Gleichermaßen können zukünftige Entwicklungen im Bereich des Weltraumbergbaus dazu beitragen, Herausforderungen im Bereich des terrestrischen Bergbaus zu begegnen. (12)

Ein möglicher Ansatz, der Anforderung nach einem effizienten Gewinnungsprozess gerecht zu werden, ist der der selektiven Rohstoffgewinnung. In Bezug auf die Regolithgewinnung bedeutet dies, dass nur das Regolith bergmännisch gewonnen wird, welches bereits eine etwas höhere Konzentration des gesuchten Wertminerals enthält, während das Regolith, welches eine geringere Konzentration des Wertminerals enthält, nicht gewonnen wird.

Um die selektive Rohstoffgewinnung umzusetzen, müssen die Anforderungen der nachfolgenden Prozessschritte bekannt sein. Sind beispielsweise eine bestimmte mineralische Zusammensetzung oder eine definierte Partikelgröße erforderlich oder im Mindesten hilfreich, um die nachfolgenden Prozesse effizienter zu gestalten? Darüber hinaus muss für eine effiziente Regolithgewinnung bekannt sein, welche Mengen des Materials zu einem festgelegten Zeitpunkt und an einem festgelegten Ort bereitgestellt

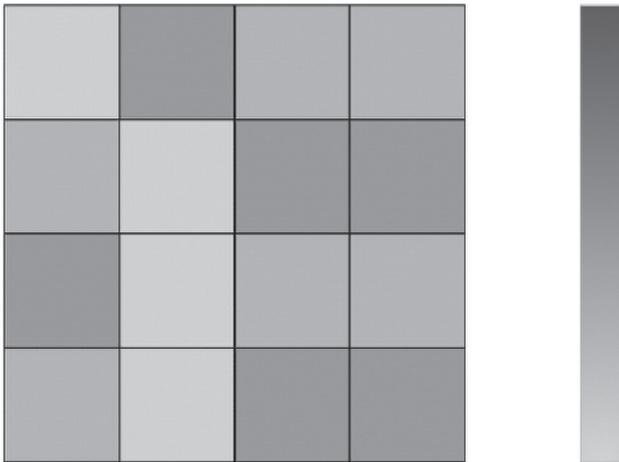


Fig. 2. Schematic depiction of a regolith mine site (12).
Bild 2. Schematische Darstellung einer Regolith-Lagerstätte (12).

Even if it is not possible to characterize and excavate single particles and therefore provide the perfect input material for subsequent processes, already slightly higher concentrations of the valuable resource will help to optimize those processes.

3 Concepts for ISRU

Consequently, a holistic approach is of great importance for all activities in the field of ISRU. Only when experts from different fields, both terrestrial and space, collaborate the challenges of ISRU can be addressed in the best possible way.

3.1 The Moon Factory concept

Out of the Aachen Space Forum (ASF) a network connecting representatives from industry and science in and around the city of Aachen in order to share ideas on space related topics, the Moon Factory concept was developed by the AMT, the Institute of Structural Mechanics and Lightweight Design (SLA) and the Institute of Textile Technology (ITA) of RWTH, which, as shown in figure 3, includes the process chain from regolith mining to the use of the material. After the exploration, the regolith is excavated. Subsequent mineral processing is followed by further processing steps,

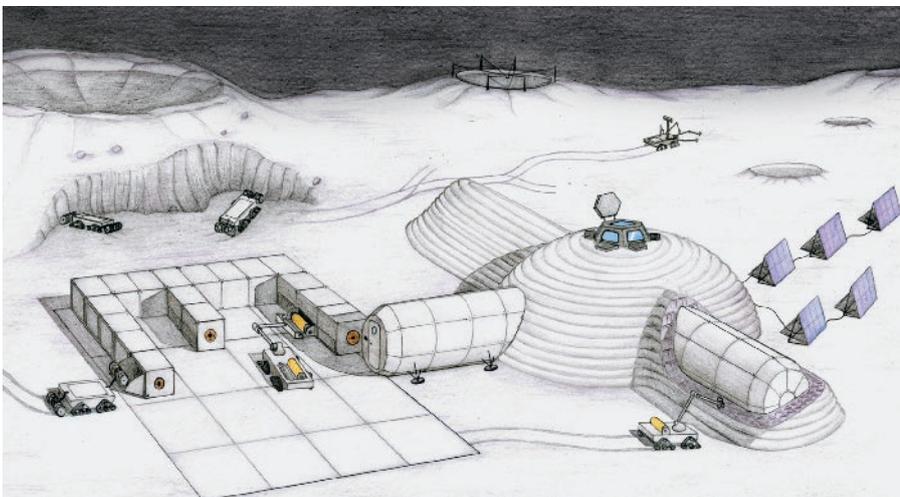


Fig. 3. Illustration of the Moon Factory concept.
Bild 3. Künstlerische Darstellung des Moon Factory Concepts. Source/Quelle: AMT

werden müssen. Neben den Anforderungen der nachfolgenden Prozessschritte müssen die lokalen Umgebungsbedingungen bekannt sein. Dies umfasst die Kenntnis darüber, an welcher Stelle der Regolith aufzufinden ist, dessen Eigenschaften denen der nachfolgenden Prozesse möglichst nahekommt.

Das Konzept der selektiven Rohstoffgewinnung unterscheidet sich damit von bisherigen Entwicklungen im Bereich des Welt-raumbergbaus, da nicht mehr nur der Gewinnungsprozess selbst, sondern auch die damit verknüpften Prozesse betrachtet werden. Dafür müssen zukünftig geeignete Sensortechnologien für die Charakterisierung des Regoliths während des Gewinnungsprozesses in diesen integriert werden.

Die Umsetzung der selektiven Regolithgewinnung soll anhand von Bild 2 erläutert werden. Dieses zeigt schematisch eine Lagerstätte, die in gleich große Felder aufgeteilt wurde. Für jedes Feld könnte nun eine Materialcharakterisierung unter Einsatz geeigneter Sensortechniken durchgeführt werden. In der Abbildung symbolisieren die verschiedenen Grautöne unterschiedliche Wertminerkonzentrationen. Im Anschluss an die Materialcharakterisierung könnte die Regolithgewinnung im Anschluss nur in den Bereichen erfolgen, in denen die Konzentration des Wertminerals leicht erhöht ist. Darüber hinaus ist es erforderlich, bergbauliche Rahmenbedingungen während der Rohstoffgewinnung zu berücksichtigen. Dies bedeutet, dass es erforderlich sein kann, dass der Regolith auch in den Bereichen abgebaut wird, in denen die Konzentration des Wertminerals nicht erhöht ist, um Bereiche mit erhöhtem Wertmineralgehalt freizulegen. Auch wenn die exakten Dimensionen von verschiedenen Einflussfaktoren abhängen, wird deutlich, dass die zu gewinnenden Regolithmengen und damit die Dimensionen der eingesetzten Maschinenteknik durch die selektive Rohstoffgewinnung reduziert werden könnten.

Zwar kann in Bezug auf die Regolithgewinnung, keine Entscheidung für jedes Einzelkorn getroffen werden und so niemals das ideale Material für die mineralische Aufbereitung bereitgestellt werden, dennoch können schon geringfügig erhöhte Konzentrationen des Wertminerals zu einer Optimierung der Folgeprozesse beitragen.

3 Konzepte für die ISRU

Für den Aufbau einer hochgradig effizient arbeitenden Prozesskette ist bei allen Aktivitäten im Bereich ISRU ein ganzheitlicher Ansatz von großer Bedeutung. Nur wenn Experten aus verschiedenen Gebieten, sowohl aus dem terrestrischen Bereich als auch aus der Raumfahrt, zusammenarbeiten, können die Herausforderungen der ISRU bestmöglich gelöst werden.

3.1 Das Moon Factory Concept

Aus dem Aachen Space Forum (ASF), einem Netzwerk, welches Vertreter aus Industrie und Wissenschaft in und um die Stadt Aachen zusammenbringt, um sich über raumfahrtbezogene Themen auszutauschen, wurde durch das AMT, das Institut für Strukturmechanik und Leichtbau (SLA) sowie das Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH das Konzept der Moon Factory entwickelt,

such as the extraction of oxygen and metals or, as shown in figure 3, the production of fibers. These fibers could be used for the construction of a lunar colony. The long-term objective of the Moon Factory is to create a factory on the moon that will help to build a lunar habitat, using the raw materials available on site as completely and efficiently as possible. In future, based on the concept, initial investigations should be conducted with emphasis the connection between the individual sub-processes.

3.2 From lunar regolith to oxygen and structural materials – an integrated conceptual approach

The idea of selective mining is also incorporated in a concept for the extraction of oxygen and structural materials from lunar regolith, which is shown in figure 4. The concept takes into account the excavation of raw materials as well as the mineral and metallurgical processing and has been developed by the AMT, the Unit for Mineral Processing (AMR) and the IME Metallurgical Process Engineering and Metal Recycling at RWTH. By the selective excavation of the regolith, an input material already enriched with ilmenite is provided for mineral processing. The latter will

welches, wie in Bild 3 dargestellt, die gesamte Prozesskette zur Gewinnung und Nutzung von Regolith berücksichtigt. Nach der Erkundung soll zunächst die Gewinnung des Regoliths erfolgen. Auf die anschließende mineralische Aufbereitung folgt die Weiterverarbeitung, beispielsweise in Form der Sauerstoffgewinnung oder, wie dargestellt, in Form der Faserproduktion. Diese Fasern könnten dann für verschiedene Anwendungen, beispielsweise den Aufbau von Wohnraumstrukturen, verwendet werden. Langfristig soll durch die Moon Factory eine Fabrik auf dem Mond geschaffen werden, die dazu beiträgt, eine Siedlung auf diesem aufzubauen und dafür die vor Ort vorhandenen Rohstoffe möglichst vollständig und effizient nutzt. Dafür sollen, aufbauend auf der Konzeptentwicklung, zukünftig erste Untersuchungen durchgeführt werden, die insbesondere darauf abzielen, die Verknüpfung der einzelnen Teilprozesse zu untersuchen.

3.2 Vom lunaren Regolith zu Sauerstoff und strukturellen Materialien – ein integrativer Konzeptansatz

Der Ansatz der selektiven Rohstoffgewinnung wird auch in dem in Bild 4 dargestellten Konzept zur Gewinnung von Sauerstoff und Metallen aus Regolith berücksichtigt, das vom

AMT, dem Lehr- und Forschungsgebiet für die Aufbereitung mineralischer Rohstoffe (AMR) und dem IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH entwickelt wurde. Durch die selektive Rohstoffgewinnung soll ein bereits mit Ilmenit angereichertes Eingangsmaterial für die mineralische Aufbereitung bereitgestellt werden. Durch dieses soll anschließend ein Ilmenit-Konzentrat erzeugt werden, das wiederum das Eingangsmaterial für einen nachfolgenden metallurgischen Prozessschritt ist. Mittels der MOSARI-Technik sollen abschließend Sauerstoff sowie hochqualitative Metalle erzeugt werden. Das Konzept zeichnet sich durch eine Reduktion der Restströme durch eine effiziente und möglichst vollständige Nutzung des Regoliths aus. (12)

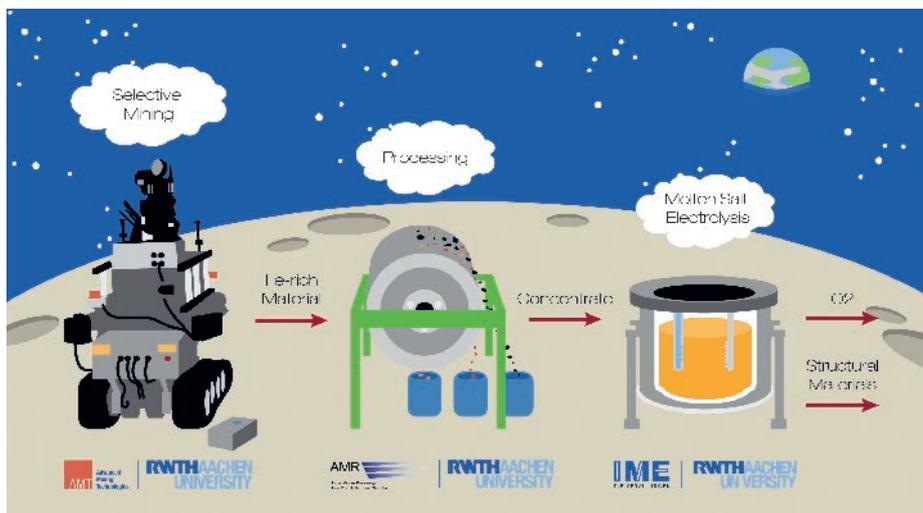


Fig. 4. Integrated approach for the production of oxygen and metals using lunar regolith.
Bild 4. Integrierter Ansatz zur Gewinnung von Sauerstoff und Metallen aus lunarem Regolith.
Source/Quelle: RWTH

then produce an ilmenite concentrate which is the input for metallurgical processing. Finally, oxygen and high-quality metals are produced using the MOSARI technique. The concept is characterized by the reduction of residual streams by an efficient and as fully as possible utilization of the regolith. (12)

3.3 New ideas for regolith mining – the SILER

The safe and efficient supply of raw materials through the automation and digitalization of mining machinery and processes plays an important role not only in research and transfer, but also in teaching at the AMT. The aim is to train young engineers and equip them with the necessary skills they need for working in and creating the mining industry of the future. These young engineers are in the focus of the AMT's teaching. The aim is to provide them a structured framework that will enable them to gain the best possible qualifications and thus be qualified for their future tasks. By

3.3 Neue Ideen für die Gewinnung von lunarem Regolith: der SILER

Die sichere und effiziente Rohstoffversorgung durch die Automatisierung und Digitalisierung von Bergbaumaschinen und -prozessen nimmt nicht nur in Forschung und Transfer, sondern ebenso in der Lehre des AMT eine wichtige Rolle ein. Das Ziel ist es, junge Ingenieurinnen und Ingenieure auszubilden und sie beim Erwerb der Kompetenzen zu unterstützen, die sie benötigen, um den Bergbau der Zukunft mitgestalten zu können. Diese jungen Ingenieurinnen und Ingenieure stehen im Fokus der Lehre des AMT. Ihnen soll ein strukturierter Rahmen gegeben werden, der es ermöglicht, dass sie sich bestmöglich qualifizieren und so für ihre zukünftigen Aufgaben befähigt werden. Durch das Angebot und die Betreuung von Studierenden-Challenges erhalten die Studierenden schon während des Studiums die Gelegenheit, selbstständig Herausforderungen in einem Team zu lösen und so

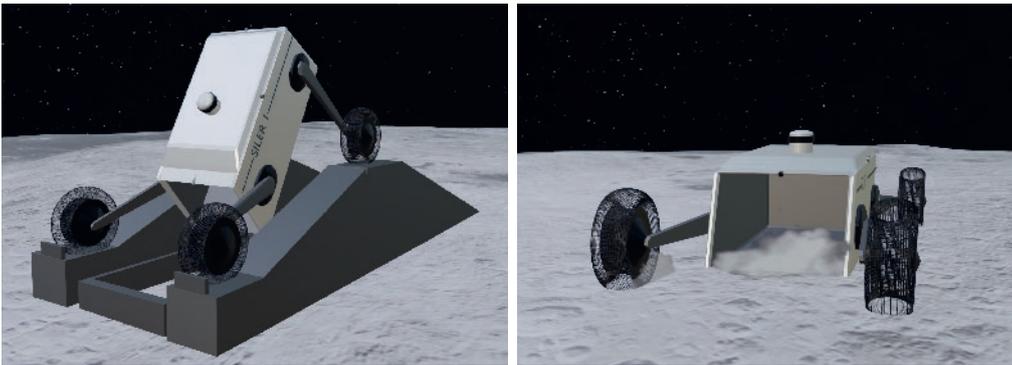


Fig. 5. // Bild 5. Scaper Inspired Lunar Excavation Rover. Source/Quelle: RWTH

offering and supervising student challenges, students are given the opportunity to independently solve challenges in a team while still studying and thus actively contribute to forming the mining industry of the future. Within a structured framework, students work in teams to apply and develop the skills they have acquired during their studies to real issues, including those in the ISRU field.

As part of the master's course "MTPlan", a device for mining regolith was designed in the winter semester 2020/2021. The Scaper Inspired Lunar Excavation Rover (SILER), which is shown in figure 5, is based on a simple, modular and robust design. It is further characterized by few moving parts. The developed concept was presented at the Space Resources Week 2021 poster exhibition in Luxembourg. (13)

3.4 New approaches for transporting lunar regolith – the regONE system

In 2022, the Moon Aixperts, an interdisciplinary team of RWTH students supported by the AMT and others, participated in the Over the Dusty Moon Challenge of the Colorado School of Mines (CSM). The task was to develop a concept for the transport of lunar regolith. As part of the final, the Moon Aixperts presented the prototype of their regONE system, shown in figure 6, in June 2022 and received the award for the most innovative system. The regONE system is a modular system for transporting large volume flows. It comprises a component for the horizontal transport and one for the vertical transport.

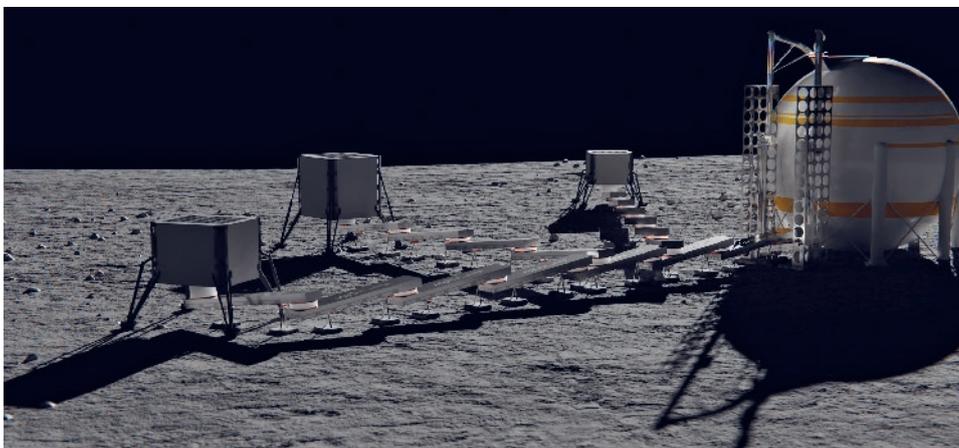


Fig. 6. The Moon Aixperts' regOne system.
Bild 6. Das regONE-System der Moon Aixperts. Source/Quelle: RWTH

aktiv den Bergbau der Zukunft mitzugestalten. Innerhalb eines strukturierten Rahmens können die Studierenden in Teams die im Studium erworbenen Kompetenzen an realen Fragestellungen, auch im Bereich ISRU, anwenden und ausbauen.

Im Rahmen der Veranstaltung Maschinentechnische Planung von Betriebspunkten, die im dritten Mastersemester des Studiengangs Rohstoffingenieurwesen verankert ist, wurde im Wintersemester 2020/2021 ein Gerät zur Gewinnung von Regolith entworfen.

Der Scaper Inspired Lunar Excavation Rover (SILER), welcher in Bild 5 dargestellt ist, basiert auf einem einfachen, modularen und robusten Aufbau. Er zeichnet sich darüber hinaus durch wenige bewegliche Teile aus. Das entwickelte Konzept wurde auf der Poster Ausstellung der Space Resources Week 2021 in Luxemburg vorgestellt. (13)

3.4 Neue Ansätze für den Transport von lunarem Regolith: das regONE-System

Im Jahr 2022 nahmen die Moon Aixperts, ein interdisziplinäres Team aus Studierenden der RWTH, welches u. a. vom AMT unterstützt wurde, an der Over the Dusty Moon Challenge der Colorado School of Mines (CSM) teil. Aufgabe war es, ein Konzept für den Transport von lunarem Regolith zu entwickeln. Im Rahmen des Finales stellten die Moon Aixperts im Juni 2022 den Prototypen ihres regONE-Systems, welches in Bild 6 dargestellt ist, vor und erhielten den Preis für das innovativste System. Es handelt sich um ein modulares System, welches für den Transport großer Volumenströme geeignet ist und aus einem Teilsystem für den horizontalen und einem für den vertikalen Transport besteht. (14)

4 Zusammenfassung und Ausblick

Um eine längerfristige Präsenz des Menschen auf anderen Himmelskörpern wie dem Mond zu ermöglichen, ist die Nutzung extraterrestrischer Rohstoffe, die sogenannte in situ resource utilisation (ISRU), von großer Bedeutung. Im Fokus der Forschung steht u. a. der lunare Regolith, ein staubartiger Rohstoff, der die gesamte Mondoberfläche bedeckt.

Der erste Schritt, um Rohstoffe nutzbar zu machen, ist, wie auch auf der Erde, ihre Gewinnung. Auf dem Mond wird die Rohstoffgewinnung jedoch durch verschiedene Faktoren, wie beispielsweise die geringere Schwerkraft oder die Eigenschaften des Regoliths, erschwert. Um den Herausforderungen zu begegnen, sind neue, innovative Ideen für die Rohstoffgewinnung erforderlich. Ein möglicher Ansatz ist die selektive Rohstoffgewinnung,

4 Summary and Outlook

In order to enable a long-term presence of humans on other celestial bodies, such as the Moon, the utilization of extraterrestrial raw materials is of great importance. Among others, research focuses on the lunar regolith, a dust-like raw material that covers the entire lunar surface.

The first step in making raw materials usable, as on Earth, is to mine them. On the moon, however, mining raw materials is complicated by an extreme challenging environment and the properties of the regolith. To meet the challenges, new innovative ideas for raw material excavation are needed. One possible solution is the concept of selective mining in order to provide the required amount of the highest quality raw material possible at the right time and place for the subsequent processes.

It becomes clear that a holistic approach as well as cooperation in interdisciplinary teams are inevitable in all activities in the field of ISRU. Examples that include various activities along the process chain for ISRU and are based on collaborative efforts in interdisciplinary teams are the Moon Factory Concept and a concept for the extraction of oxygen and metals, were and are further developed at RWTH.

In addition, student activities such as the development of the SILER or the regONE system also show approaches to address various challenges in the field of ISRU.

sodass die erforderliche Menge eines möglichst hochqualitativen Rohstoffs zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort für die nachfolgenden Prozessschritte bereitgestellt werden kann.

Es wird deutlich, dass bei allen Aktivitäten im Bereich ISRU ein ganzheitlicher Ansatz sowie die Zusammenarbeit in interdisziplinären Teams unumgänglich sind. Beispiele, die verschiedene Aktivitäten entlang einer Prozesskette zur ISRU einschließen und auf der Zusammenarbeit in interdisziplinären Teams beruhen, sind das Moon Factory Concept sowie ein Konzept zur Gewinnung von Sauerstoff und Metallen, welche beide an der RWTH entstanden sind und zukünftig weiterentwickelt werden.

Darüber hinaus zeigen auch studentische Aktivitäten wie die Entwicklung des SILERS oder das regONE-System Ansätze, um verschiedenen Herausforderungen im Bereich der ISRU zu begegnen.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Sanders, G. B. (2015): Space Resource Utilization: Technologies and Potential Synergism with Terrestrial Mining. NASA Johnson Space Center. Canada. Online verfügbar unter <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150003499>
- (2) Sanders, G. B.; Larson, W. E. (2013): Progress Made in Lunar In-Situ Resource Utilization under NASA's Exploration Technology and Development Program. In: *Journal of Aerospace Engineering* 26 (1). DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000208.
- (3) Heiken, G. H.; Vaniman, D. T.; French, B. M. (1991): Lunar sourcebook: a user's guide to the Moon.
- (4) Stubbs, T.; Vondrak, R.; Farrell, W. (2007): Impact of dust on lunar exploration. In: *Dust in Planetary Systems* 643, pp 239 – 243.
- (5) Benaroya, H. (2017): Lunar habitats: A brief overview of issues and concepts. In: *REACH* 7-8, pp 14–33. DOI: 10.1016/j.reach.2018.08.002.
- (6) Gläser, P.; Oberst, J.; Neumann, G. A.; Mazarico, E.; Speyerer, E. J.; Robinson, M. S. (2018): Illumination conditions at the lunar poles: Implications for future exploration. In: *Planetary and Space Science* 162, pp 170 – 178. DOI: 10.1016/j.pss.2017.07.006.
- (7) Mueller, R. P.; van Susante, P. J. (2012): A Review of Extra-Terrestrial Mining Robot Concepts. In: K. Zacny, R. B. Malla und W. K. Binienda (Hg.): *Earth and Space 2012. Engineering, science, construction, and operations in challenging environments. Proceedings of the 13th ASCE Aerospace Division International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments and the 5th NASA/ASCE Workshop on Granular Materials in Space Exploration. April 15 – 18, 2012, Pasadena, California, United States. Reston, VA: American Society of Civil Engineers*, pp 295 – 314.
- (8) Just, G. H.; Smith, K.; Joy, K. H.; Roy, M. J. (2020): Parametric review of existing regolith excavation techniques for lunar In Situ Resource Utilisation (ISRU) and recommendations for future excavation experiments. In: *Planetary and Space Science* 180 (4), p 104746. DOI: 10.1016/j.pss.2019.104746.
- (9) Mueller, R. P.; Smith, J. D.; Schuler, J. M.; Nick, A. J.; Gelino, N. J.; Leucht, K. W. et al. (2017): Design of an Excavation Robot: Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot (RASSOR) 2.0. DOI: 10.1061/9780784479971.018.
- (10) Zacny, K.; Mungas, G.; Mungas, C.; Fisher, D.; Hedlund, M. (2008): Pneumatic Excavator and Regolith Transport System for Lunar ISRU and Construction. AIAA Space 2008 Conference & Exposition. AIAA SPACE 2008 Conference & Exposition. San Diego, California. (Reston, Va.): (American Institute of Aeronautics and Astronautics), p 456, zuletzt geprüft am 27.05.2021.
- (11) Mueller, R.; Smith, J. D.; Lippitt, T.; Schuler, J.; Nick, A. (2013): Reducing extra-terrestrial excavation forces with percussion. IEEE Aerospace Conference, 2013. 2 – 9 March 2013, Big Sky, Montana. 2013 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, 3/2/20132 – 3/9/2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ: IEEE, pp 1 – 11, zuletzt geprüft am 27.05.2021.
- (12) Radl, A.; Milicevic Neumann, K.; Wotruba, H.; Clausen, E.; Friedrich, B. (2022): From lunar regolith to oxygen and structural materials: an integrated conceptual design. In: *CEAS Space J*. DOI: 10.1007/s12567-022-00465-w.
- (13) Esthiaghi, P.; Bauer, S.; Ede, D.; Hamann, P.; Harthaus, F.; Illgner, S. et al. (2021): *Scraper Inspired Lunar Excavation Rover*. Luxembourg.
- (14) MoonAixperts e.V. (Hg.) (2022): *Moon Aixperts*. Online verfügbar unter www.moonaixperts.de/de, zuletzt geprüft am 30.11.2022.

Authors / Autoren

Alexandra Radl M. Sc., Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen, Institute for Advanced Mining Technologies (AMT), RWTH Aachen University, Aachen