Sunny Schoone
Maximilian Getz
Elisabeth Clausen

Detection and Differentiation of Sand Content in Hydraulic Transport using Acoustic Emission Technology

Deep-sea mining represents an opportunity for an alternative supply of high-tech raw materials. A concept for the extraction of polymetallic nodules from the seabed envisages the use of a harvester that extracts the nodules using a hydraulic principle. To design an effective and efficient mining process, the composition of the material flows must be continuously monitored. A promising technology for this task is the Acoustic Emission (AE) technology, which has already been successfully used for material flow characterisation of aggregates transported by belt conveyors. In the scientific investigations presented in this paper, AE technology was used to differentiate different sand contents of hydraulic material flows. Differentiation of the different sand contents using interval analysis of the AE signals was possible in a laboratory environment. These results provide a basis for further investigations of more complex material flows consisting of water, sediment and polymetallic nodules.

Erfassung und Differenzierung sandbeladener hydraulischer Massenströme mittels Acoustic Emission-Technologie

Der Tiefseebergbau stellt eine Chance für ein alternatives Angebot von Hochtechnologierohstoffen dar. Ein Konzept zur Gewinnung von polymetallischen Knollen vom Meeresgrund sieht den Einsatz von Tiefseebergbaufahrzeugen vor, welche die Knollen über ein hydraulisches Prinzip gewinnen. Um einen effektiven und effizienten Abbauprozess zu gestalten, müssen die Stoffströme eines solchen Tiefseebergbaufahrzeugs kontinuierlich in Ihrer Zusammensetzung überwacht werden. Eine vielversprechende Technologie für diese Aufgabe ist die Acoustic Emission (AE)-Technologie, welche bereits erfolgreich für die Stoffstromcharakterisierung mittels Gurtbandförderern transportierter Gesteinskörnungen eingesetzt wurde. In den in dieser Arbeit vorgestellten wissenschaftlichen Untersuchungen wurde die AE-Technologie verwendet, um verschiedene Sandbeladungen hydraulischer Massenströme zu differenzieren. Eine Differenzierung der verschiedenen Sandbeladungen mittels einer Intervallanalyse der AE-Signale war im Technikumsmaßstab möglich. Diese Ergebnisse stellen eine Grundlage für weitergehende Untersuchungen komplexerer Massenströme aus Wasser, Sediment und polymetallischen Knollen dar.

1 Introduction

The demand for critical raw materials is increasing due to industrial and social developments. This increase in demand is supported by a more intensive need for raw materials used in energy transition and the electrification of the mobility industry. To secure a sufficient supply at an early stage, companies already form long-term contracts (ten to 20 years) with various mining companies (1, 2). This is complicated by the fact that the supply of selected metals, e. g., cobalt, depends on a very limited field of mining companies. These include Glencore, China Molybdenum and the Eurasian Resources Group. All of which are active in the Democratic Republic of Congo (DRC) (3). Access to new sources of raw materials could help to disrupt this market situation and meet demand on an alternative basis. In this context, deep-sea polymetallic deposits, and polymetallic nodules, in particular, represent an important option. (4)

1 Einleitung

Die Nachfrage nach kritischen Rohstoffen steigt aufgrund industrieller und gesellschaftlicher Entwicklungen an. Unterstützt wird diese Nachfragesteigerung durch einen intensiveren Bedarf an Rohstoffen, die im Rahmen der Energiewende und der Elektrifizierung der Mobilitätsindustrie eingesetzt werden. Um die begrenzten Lieferkapazitäten der Großunternehmen frühzeitig zu sichern, werden bereits langfristige Verträge (zehn bis 20 Jahre) mit verschiedenen Bergbauunternehmen abgeschlossen (1, 2). Erschwerend kommt hinzu, dass die Rohstoffversorgung ausgewählter Metalle, beispielsweise die zukünftige Kobaltversorgung, von einer sehr begrenzten Anzahl von Bergbauunternehmen abhängt. Dazu gehören Glencore, China Molybdenum und Eurasian Resources Group, welche alle in der Demokratischen Republik Kongo aktiv sind (3). Der Zugang zu neuen Rohstoffquellen könnte helfen, diese Marktsituation zu verändern und die Nachfrage

The focus of this work is on the extraction of polymetallic nodules by deep-sea mining utilising a polymetallic nodule collector (harvester). To ensure the greatest possible process reliability and efficiency, all sub-processes within the polymetallic nodule collector are to be monitored by sensors. To achieve this goal, both input and output variables must be recorded. The continuous digital recording of the composition of the material flow is vital information for the successful determination of the valuable content for subsequent processing steps. Through the continuous sensor-based recording of the material flows in the harvester, the respective process steps – extraction, sediment separation, transfer to the vertical riser system – can be monitored and controlled by comparing target and actual values. In addition to increasing quality and performance, this continuous material flow analysis is an indispensable basic parameter for the targeted automation of the mining and sediment extraction processes. An increase in the performance of the entire mining process not only improves the efficiency of the process but also ensures a reduction in the occurrence of sediment plumes by separating the sediment as early as possible in the mining process. Thus, supporting compliance with environmental regulations for deep-sea mining. (5)

The Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) at RWTH Aachen University considers Acoustic Emission (AE) technology to be a suitable sensor technology for monitoring hydraulic transport processes in the deep sea due to its robustness and miniaturisation. These material flows need to be monitored from the uptake of the polymetallic nodules, through preprocessing and then to the discharge of the harvester to avoid gangue material being transported to the mining vessel at the sea surface. (5)

AMT is one of the pioneers in the application of AE technology in harsh mining environments (6, 7, 8). This technology is a robust, non-destructive and passive sensor technology that has been successfully used in other material characterisation projects (8).

Since this technology incl. analysis, sensor application, integration into PLCs, etc. has not been used in deep-sea environments so far, the AMT is trying to investigate the applicability of this technology for material flow characterisation in hydraulic transport processes using different test series to define the possibilities and limits for the use of AE technology. At a later stage, the application of AE technology is intended to detect and characterise the material flow in its entirety. A basis for this is the elaboration of the different possible basic states of the individual components, water, different sediments and polymetallic nodules. Thus, in the first step, the influence of different load states of sediment, i.e. sand was investigated. The aim is to investigate the feasibility, possible limits and selectivity to differentiate between various loading conditions.

2 Notions of deep-sea mining

Approximately 73 % of the earth's surface is covered by water. The fishing-, gas-, oil- and shipping industry make extensive use of the seas and the continental shelf regions (9). For the last 200 years a continuous increase in the need for waterways led to an increase in the economic utilization of the open water zone. While increasing demand for metals has resulted in rising interest in deep-sea mining. (4)

auf alternativer Basis zu decken. In diesem Zusammenhang stellen die polymetallischen Lagerstätten der Tiefsee und insbesondere die polymetallischen Knollen eine wichtige Option dar. (4)

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Gewinnung polymetallischer Knollen im Tiefseebergbau mittels eines Polymetallknollenkollektors, auch Tiefseebergbaufahrzeug genannt. Um eine größtmögliche Prozesssicherheit und Effizienz zu gewährleisten, sollen alle Teilprozesse innerhalb des Polymetallknollenkollektors durch Sensoren überwacht werden. Um dieses Ziel beim Polymetallknollenabbau zu erreichen, müssen sowohl Eingangs- als auch Ausgangsgrößen erfasst werden. Die kontinuierliche digitale Erfassung der Zusammensetzung des Materialflusses ist eine grundlegende Information für die erfolgreiche Bestimmung des Wertstoffs für nachfolgende Prozessschritte. Durch die kontinuierliche sensorbasierte Erfassung der Materialströme im Tiefseebergbaufahrzeug können die jeweiligen Prozessschritte – Extraktion, Sedimentabscheidung, Übergabe an das Fördersystem – durch den Vergleich von Soll- und Istwerten überwacht und gesteuert werden. Neben der Qualitäts- und Leistungssteigerung ist diese planbare kontinuierliche Materialflussanalyse ein unverzichtbarer Basisparameter für die gezielte Automatisierung der Abbau- und Sedimentgewinnungsprozesse. Eine gezielte Leistungssteigerung des gesamten Abbauprozesses verbessert nicht nur die Effizienz des Prozesses, sondern sorgt auch für eine Reduzierung des Auftretens von Sedimentwolken durch eine möglichst frühe Abtrennung des Sediments im Abbauprozess und unterstützt die kontrollierte Rückführung in die Umwelt, was die Einhaltung der Umweltauflagen für den Tiefseebergbau unterstützt. (5)

Das Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) der RWTH Aachen sieht die Acoustic Emission (AE)-Technologie aufgrund ihrer Robustheit und Miniaturisierung als geeignete Sensortechnologie zur Überwachung hydraulischer Materialflüsse in der Tiefsee an. Diese Materialflüsse müssen von der Aufnahme der polymetallischen Knollen über die Vorverarbeitung bis zur Entladung des Polymetallknollenkollektors überwacht werden, um einen unnötigen Materialtransport zum Bergbauschiff an der Meeresoberfläche zu vermeiden. (5)

Das AMT ist einer der Pioniere bei der Anwendung der AE-Technologie in rauen Bergbauumgebungen (6, 7, 8). Diese Technologie ist eine robuste, zerstörungsfreie und passive Sensortechnologie, die bereits in anderen Projekten zur Materialcharakterisierung erfolgreich eingesetzt wurde (8).

Da diese Technologie inkl. Analyse, Sensorapplikation, Integration in die SPS etc. bisher nicht in Tiefseeumgebungen eingesetzt wurde, versucht das AMT die Anwendbarkeit dieser Technologie für die hydraulische Materialfluss-Charakterisierung anhand verschiedener Testreihen zu untersuchen, um die Möglichkeiten und Grenzen für den Einsatz der AE-Technologie zu definieren. Zu einem späteren Zeitpunkt soll durch die Anwendung der AE-Technologie der vollständige Materialstrom erfasst und charakterisiert werden. Eine Grundlage dafür ist die Erarbeitung der unterschiedlichen möglichen Grundzustände der einzelnen Komponenten Wasser, unterschiedliche Sedimente und polymetallische Knollen des realen Materialstroms. Somit wurde in einem ersten Schritt der Einfluss unterschiedlich großer Belastungszustände des hydraulischen Massenflusses durch Sande untersucht. Ziel ist es hierbei, die Durchführbarkeit, mögliche Grenzen

In the 1950s John L. Mero has researched deep-sea polymetallic nodules – also known as manganese nodules – as a potential commercial source for metals (10). The 1970s and 1980s saw a multitude of exploration and research activities for polymetallic nodules. Some of which were conducted in the Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) (11). In terms of economic viability, the CCZ is the most promising area. The nodule abundance in the CCZ is about 15 kg/m^2 on average (12). Other economically relevant deposits for manganese nodules are in the Peru Basin, the Penrhyn Basin and the Central Indian Basin (4, 13).

The first mining trials for manganese nodules go back to the years 1974 to 1979. Testing different methods for mining the nodules were a focus of these mining trials. Commercial mining of the nodules failed due to the collapse of world metal prices, technological advances in onshore exploration and mining, and the strict provisions of the United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS) (14, 15). The UNCLOS, which entered into force in 1994, is a multilateral treaty with 320 articles and regulates almost all areas of international maritime law (16).

Increasing metal prices due to technological advances led to a reoccurring interest in deep-sea mining in the 21st century (17, 18). To organise the management of the so-called Common Heritage of Humanity, the International Seabed Authority (ISA) was enacted in Jamaica. It has the task of regulating, organising and controlling deep-sea mining. It also develops resource-specific regulations, such as a mining code, and administers exploration licences (19, 20). Since 2001, 30 exploration licences have been issued by the ISA, 18 of which are for manganese nodules, seven for polymetallic sulphides and five for cobalt-rich iron and manganese crusts (21).

Apart from geopolitical and juristical questions, the technological feasibility of deep-sea mining is a topical issue. Figure 1 depicts a potential concept of a holistic system for the extraction of polymetallic nodules. For a simplified description, it is common

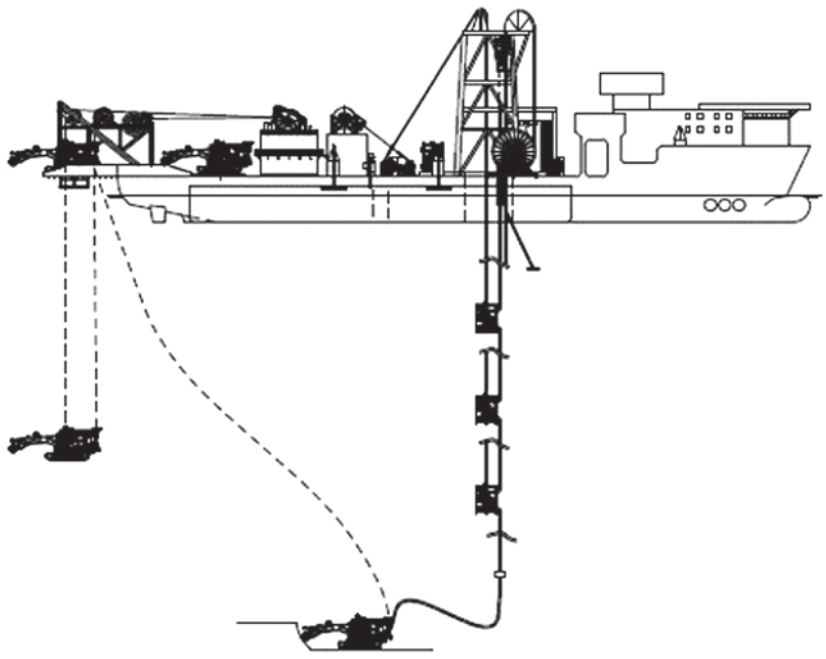

Fig. 1. Concept for deep-sea mining of polymetallic nodules (22).
Bild 1. Konzept einer Manganknollengewinnung (22).

und die Selektivität zwischen verschiedenen Belastungszuständen zu untersuchen.

2 Vorstellung Tiefseebergbau

Ca. 73 % der Erdoberfläche ist von Wasser bedeckt. Die Meere und Kontinentalschelfregionen werden intensiv für beispielsweise Fischerei, Gas- und Ölförderung sowie die Schifffahrt genutzt (9). Angetrieben durch den steigenden Bedarf neuer Wasserwege wurde im Verlauf der letzten 200 Jahre die Nutzung der Freiwasserzone immer weiter wirtschaftlich erschlossen. Mit dem steigenden und sich verschiebenden Bedarf hin zu metallischen Rohstoffen der modernen Industrie wurde auch eine Umsetzung des Tiefseebergbaus immer wieder in Betracht gezogen. (4)

Eines der ersten direkten wirtschaftlichen Interessen resultierte aus den Forschungsergebnissen von John L. Mero, der sich in den 1950er Jahren mit polymetallischen Knollen – auch Manganknollen genannt – als potentiell kommerzielle Metallquelle beschäftigte (10). In den folgenden 1970er und 1980er Jahren gab es eine Reihe von Explorations- und Forschungsvorhaben, die u.a. in der Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) stattgefunden haben (11). Die CCZ ist das Gebiet mit dem größten und wirtschaftlich lukrativsten Vorkommen an Manganknollen. Die durchschnittliche Menge an Manganknollen in der CCZ betragt ca. 15 kg/m^2 (12). Neben der CCZ gelten das Peru-Becken, das Penrhyn-Becken und das Zentralindische Becken als die vier wirtschaftlich relevanten Vorkommen an Manganknollen (4, 13).

Die ersten Abbauversuche der Manganknollen datieren aus den Jahren 1974 bis 1979. Getestet wurden in dieser Zeit Methoden zur Gewinnung der Knollen. Der wirtschaftliche Abbau scheiterte am Zusammenbruch der Weltmarktpreise für Metalle, den technologischen Fortschritten bei der Exploration und Gewinnung an Land und den strengen Bestimmungen des Seerechtsübereinkommens der Vereinten Nationen (SRU) (14, 15). Das SRU, welches 1994 in Kraft trat, ist ein multilateraler Vertrag mit 320 Artikeln und trifft Regelungen über nahezu alle Bereiche des Seevölkerrechts (16).

Die steigende Metallnachfrage durch den weltweiten technologischen Fortschritt löste im 21. Jahrhundert ein erneutes Interesse für die Rohstoffe aus der Tiefsee aus (17, 18). Um die Verwaltung des sogenannten „Gemeinsamen Erbes der Menschheit“ zu organisieren, wurde auf Jamaika die internationale Meeresbodenbehörde (IMB) gegründet. Sie hat die Aufgabe der Regulierung, Organisation und Kontrolle des Tiefseebergbaus. Sie entwickelt zudem rohstoffspezifische Regelungen wie ein Regelwerk für den Abbau und verwaltet Explorationslizenzen (19, 20). Durch das steigende Interesse an einer Umsetzung des Abbaus der polymetallischen Knollen wurden seit dem Jahr 2001 von der IMB 30 Lizenzen für Explorationen vergeben, davon 18 Lizenzen für Manganknollen, sieben für polymetallische Sulfide und fünf für kobaltreiche Eisen- und Mangankrusten (21).

Neben den geopolitischen und rechtlichen Fragestellungen ist auch die technische Machbarkeit

to divide a deep-sea mining production system into three subsystems: mining support vessel, vertical riser and mining equipment. The latter being the focus of the upcoming elaboration. (22)

The mining equipment is a harvester, whose nodule collector is based on a hydraulic principle. After the collection sediment separation is conducted and the material flow is guided toward the vertical riser system.

Due to the environmental conditions and requirements, extensive demands are placed on the implementation of such a harvester. Thus, the highest possible level of technology and automation is to be achieved to ensure a high level of process reliability. The Blue Harvesting project (project number: 18138 – EIT Raw Materials), which is based on the Horizon 2020 projects Blue Mining (grant agreement no. 604500) and Blue Nodules (grant agreement no. 688975), starts at this point. (23, 24, 25). This project aims at developing a mining and processing platform that can meet the demanding ecological, economical and technological requirements for the deep-sea mining of polymetallic nodules. More explicitly, the environmental impacts of polymetallic nodule mining are to be assessed and minimised. (25) One component of this project is the sensor-based characterisation of the material flows present in the harvester for efficient process control. AE technology will be utilized for this task.

3 Fundamentals

3.1 Principles of the hydraulic transport of solids

Due to the special working environment, the extraction of deep-sea raw materials can only be implemented through hydraulic transport processes. The suction of the harvester creates a multi-phase, dispersed material flow. The solid particles of the disperse phase are generally referred to as grains or particles, which can differ in important characteristics such as size, density or grain shape. (26, 27).

Since solids mostly have a polydisperse character and can be described, e.g., in their geometry in distribution functions and equivalent values, suspensions are not treated as homogeneous fluids in hydraulic conveying technology. Rather, suspensions can be regarded as heterogeneous mixtures of substances in which the interactions of the particles of the individual phases must considered. (28)

In practice, heterogeneous suspensions are predominantly conveyed in horizontal or inclined pipelines under turbulent flow conditions to prevent settling of the solid phase and thus clogging. For this purpose, it is important not to fall below the critical transport velocity. (28)

On the other hand, the balancing mechanisms of the liquid molecules act more intensively with increasing transport velocity, which leads to an intensification of the turbulence. An increased transport velocity also triggers an inherent rotation – also known as Magnus force – due to the incident flow of solid particles. This force acts transversely to the direction of flow and against gravity. Due to the greater proximity of the solid particles to the inner pipe wall, this phenomenon intensifies and creates a friction effect between the outer part of the flow and the inner pipe wall (Figure 2). (29)

Impact processes between particles or between particles and the inner pipe wall lead to the overcoming of gravity and act as a Magnus force or as turbulence. This phenomenon is enhanced by increasing the transport velocity. (29)

einer Gewinnung von Tiefseerohstoffen eine aktuell behandelte Thematik. Bild 1 stellt ein typisches Konzept eines gesamtheitlichen Systems zur Gewinnung von polymetallischen Knollen dar. Zur vereinfachten Darstellung und Beschreibung ist es üblich, ein Tiefseebergbaufördersystem in die drei Teilsysteme Abbau-Begleitschiff, Förderstrang und Tiefseebergbaufahrzeug zu unterteilen. Ein näherer Fokus wird nachfolgend auf das Tiefseebergbaufahrzeug gelegt. (22)

Die Gewinnungseinrichtung ist ein Tiefseebergbaufahrzeug (Harvester). Dieses Fahrzeug soll die polymetallischen Knollen mittels eines hydraulischen Kollektors aufnehmen, erste Aufbereitungsschritte wie die Sedimentabscheidung durchführen und den Förderstrom an das Fördersystem zum Bergbauschiff übergeben.

Aufgrund der Umgebungsbedingungen und den zu beachtenden Umweltanforderungen werden umfangreiche Anforderungen an die Umsetzung eines solchen Tiefseebergbaufahrzeugs gestellt. Somit soll ein möglichst hoher Technologie- und Automatisierungsgrad erreicht werden, um eine hohe Prozesssicherheit zu gewährleisten. Das auf den Horizon 2020-Projekten Blue Mining (Grant Agreement Nr. 604500) und Blue Nodules (Grant Agreement Nr. 688975) basierende Projekt Blue Harvesting (Projektnummer: 18138 – EIT Raw Materials) setzt an dieser Stelle an. (23, 24, 25). Ziel dieses Projekts ist es, ein Tiefseebergbaufahrzeug mit einer inkludierten Aufbereitungsanlage zu entwickeln, welches den anspruchsvollen ökologischen, ökonomischen und technologischen Anforderungen für den Abbau von polymetallischen Knollen in der Tiefsee gerecht wird. Expliziter dargestellt sollen die Umweltauswirkungen des Abbaus von polymetallischen Knollen bewertet und minimiert werden. (25) Eine Komponente dieses Vorhabens ist die sensortechnische Erfassung der im Fahrzeug vorhandenen Materialströme für eine effiziente Abbausteuerung. Die sensortechnische Erfassung soll mittels der AE-Technologie vorgenommen werden.

3 Grundlagen

3.1 Hydraulischer Massentransport

Die Förderung von Tiefseerohstoffen ist aufgrund des besonderen Arbeitsumfelds nur mittels hydraulischem Massentransport umzusetzen. Durch die hydraulische Förderung des Tiefseebergbaufahrzeugs entsteht eine Suspension, die eine Mehrphasenströmung eines dispersen Stoffstroms beschreibt. Die festen Partikel der dispersen Phase werden dabei allgemein als Körner oder Partikel bezeichnet, die sich in wichtigen Merkmalen wie der Größe, Dichte oder Kornform unterscheiden können. (26, 27)

Da Feststoffe zumeist einen polydispersen Charakter aufweisen und beispielsweise in ihrer Geometrie in Verteilungsfunktionen und Äquivalenzwerten beschrieben werden können, werden Suspensionen in der hydraulischen Fördertechnik nicht als homogene Fluide behandelt. Vielmehr können Suspensionen als heterogene Stoffgemische aufgefasst werden, in denen die Wechselwirkungen der Partikel der einzelnen Phasen untereinander zu berücksichtigen sind. (28)

In der Praxis werden heterogene Suspensionen überwiegend in horizontalen oder geneigten Rohrleitungen unter turbulenten Strömungsbedingungen gefördert, um Absetzerscheinungen der festen Phase und somit Verstopfungen zu verhindern. Dazu

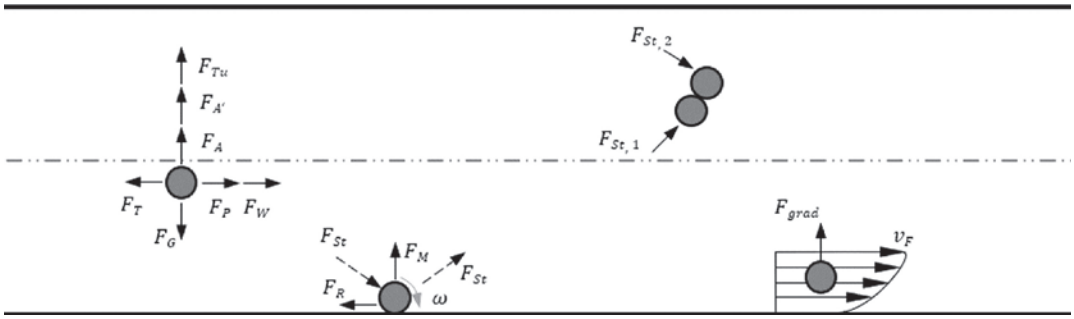

Fig. 2. Forces acting on solid particles in a horizontal pipe flow according to (29).
Bild 2. Wirkende Kräfte auf Feststoffpartikel in einer horizontalen Rohrströmung nach (29).

Pipe bends also influence turbulence and thus contact of solids with an inner pipe wall. These deflections cause centrifugal forces to act on the solid particles. As a result, the solid particles are very likely to be moved against the wall by the centrifugal force of the flow (Figure 3).

When the solid particles hit the inner wall of the pipe, impact and friction processes occur again. The resulting forces move the solid particles back into the direction of flow. In the case of a forced deflection, the phenomenon is further intensified. (29, 30)

The interactions with the inner pipe wall resulting from the flow behaviour of disperse material flows can be used to determine the composition of the disperse material flow via the impact and friction effects.

3.2 Acoustic emission testing

AE is the phenomenon of transient elastic wave generation in materials due to rapid releases of strain energy and it is comparable to seismic phenomena. The standards DIN EN 13554 and DIN EN 1330-9 delimit this physical phenomenon to airborne and structure-borne sound. Most of the AE waves have frequencies in the range from 20 kHz to 2 MHz. According to (8) and (32), AE can be triggered by various physical effects such as friction, plastic deformation, erosion and many more. (8)

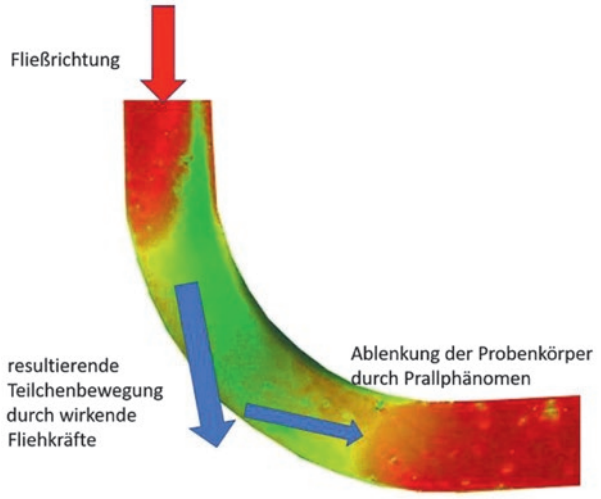

Fig. 3. Exemplary representation of the motion behaviour of solid matter in a pipe bend according to (31). // Bild 3. Beispielhafte Darstellung des Bewegungsverhaltens fester Materie in einem Rohrbogen in Anlehnung an (31).

gilt es, die kritische Transportgeschwindigkeit nicht zu unterschreiten, um Absetzungen und somit Verstopfungen zu vermeiden. (28)

Dahingegen wirken Ausgleichsmechanismen der Flüssigkeitsmoleküle intensiver bei steigender Strömungsgeschwindigkeit, was zu einer Intensivierung der Turbulenzen führt. Auch erzeugt eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit durch die Anströmung der Feststoffteilchen die Magnus-Kraft, was zu einer Eigenrotation der Teilchen führt. Diese Kraft wirkt quer zur Strömungsrichtung und entgegen der Schwerkraft. Durch eine größere Nähe der Feststoffpartikel zur Rohrinnenwand wird dieses Phänomen zusätzlich verstärkt und erzeugt einen Reibeffekt zwischen der Randströmung und der Rohrinnenwand (Bild 2). (29)

Stoßvorgänge zwischen den Feststoffteilchen oder mit der Rohrinnenwand führen zur Überwindung der Schwerkraft und wirken als Magnus-Kraft oder als Turbulenz. Dieses Phänomen wird durch eine steigende Strömungsgeschwindigkeit ebenfalls verstärkt. (29)

Ein weiterer konstruktiver Einfluss auf die Turbulenz und somit Kontakt der Festkörper mit einer Rohrinnenwand sind Rohrbögen. Durch diese Ablenkungen wirken sich Fliehkräfte auf die Feststoffpartikel aus. Als Folge werden die Feststoffpartikel durch die Fliehkraft der Strömung mit großer Wahrscheinlichkeit gegen die Wand bewegt (Bild 3).

Beim Auftreffen der Feststoffpartikel auf die Rohrinnenwand treten erneut ausgeprägte Stoß- und Reibungsvorgänge auf. Die so entstandenen Kräfte bewegen die Feststoffpartikel wieder zurück in die Strömungsrichtung. Bei einer erzwungenen Umlenkung wird das Phänomen weiter intensiviert. (29, 30)

Die durch die Strömungsverhalten von hydraulischen dispersen Massenströmen entstehenden Interaktionen mit der Rohrinnenwand können genutzt werden, um über die Prall- und Reibungseffekte Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des dispersen Massenstroms treffen zu können.

3.2 Messen von Schallemissionen

Die AE-Technologie basiert auf Schallemissionseffekten und ist vergleichbar mit den seismischen Phänomenen, die als transiente elastische Wellen definiert sind. Durch die Normen DIN EN 13554 und DIN EN 1330-9 wird dieses physikalische Phänomen von Luft- und Körperschall abgegrenzt. In der Regel liegen AE-Wellen im Frequenzbereich von 20 kHz bis 2 MHz. Eine AE-Welle wird nach (8) und (32) durch verschiedene phy-

The transient elastic waves travel through a solid body and generate surface waves, which can be detected by an AE sensor. AE sensors utilise the piezoelectric effect and convert the wave energy into a transient electrical voltage signal. Such a signal is depicted in figure 4. Signals shaped like this are called AE bursts. The conversion of the signals after the detection of the surface wave by the AE sensor and the subsequent algorithm-based processing of the signals form the basis for the signal-based analysis presented in the result section of this paper. (8)

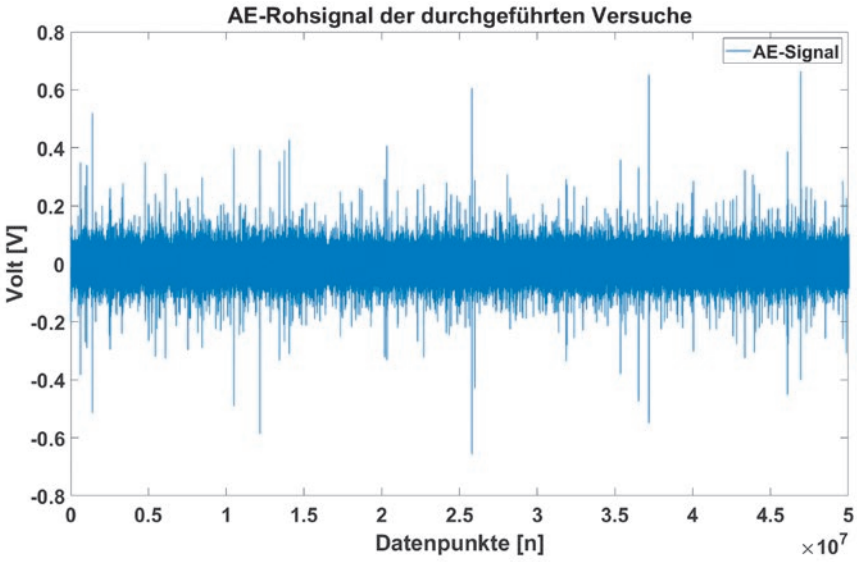

Fig. 4. AE signal sample. // Bild 4. AE-Rohsignal der Versuchsreihe. Source/Quelle: AMT

3.3 Principles of the applied data analysis

The recorded AE signals of the material flow were analysed by applying interval analysis. The method for signal processing was successfully used in material flow characterisation on conveyor belts in land-based mining (8). Interval analysis as a method is described in the following paragraphs.

An interval analysis divides the AE signal into predefined windows (Figure 5). The windows isolate several data points, which are then used for calculating various statistical features. (8)

In this paper the Root-Mean-Square (RMS) of the beforehand described intervals was used as a statistical feature. The RMS originates from electrical engineering and describes the power of a periodic signal over a predefined interval. (8) Thus, analogous to the examples previously shown in the literature, the basic feasibility of distinguishing different loading conditions in a sand-laden hydraulic material flow shall be provided.

Before the analysis, the main hypothesis was that increasing sand loading in a hydraulic transport process would also increase the detected AE activity in the measured AE signals. Therefore, in this paper, the basic feasibility of detecting and distinguishing different contents of sand in a two-component material flow was investigated by analysing the calculated RMS curves.

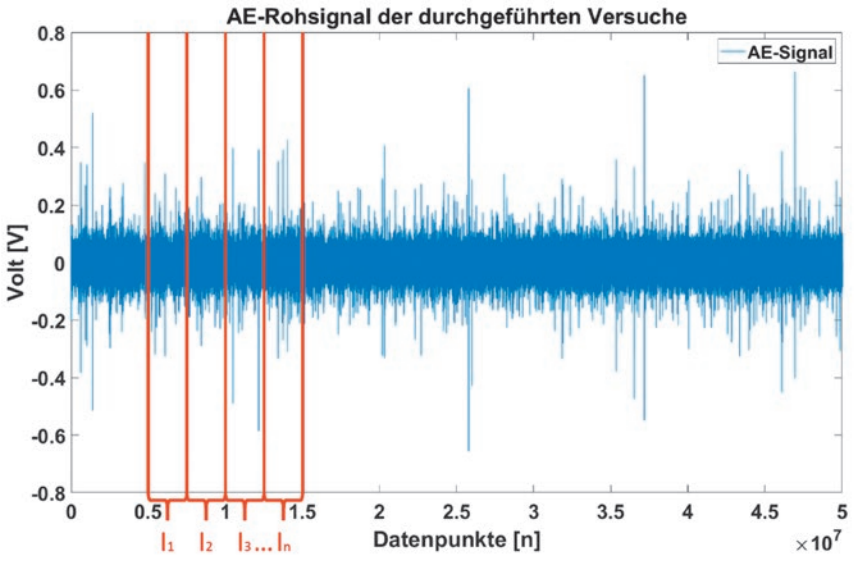

Fig. 5. AE signal sample including interval analysis.
Bild 5. AE-Rohsignal mit Intervallanalyse. Source/Quelle: AMT

sikalische Effekte wie Reibung, plastische Verformung, Erosion u. v. m. ausgelöst.

Diese Energiewellen durchlaufen den Festkörper und erzeugen Oberflächenwellen. Die Oberflächenwellen werden vom AE-Sensor aufgrund des piezoelektrischen Effekts detektiert und die Wellenenergie wird dann in ein transientes elektrisches Spannungssignal umgewandelt, wie in Bild 4 anhand eines AE-Rohsignals beispielhaft dargestellt. Diese typisch geformten Signale werden als AE-Bursts bezeichnet. Die Umwandlung der Signale nach der Detektion der Oberflächenwelle durch den AE-Sensor und die anschließende algorithmenbasierte Verarbeitung der Signale bilden die Grundlage für die im Analyseteil dargestellte Auswertung. (8)

3.3 Grundlagen der angewandten Datenanalyse

Im Zusammenhang mit der Auswertung der AE-basierten Materialstromcharakterisierung wurde in einem ersten Schritt die Methode einer Intervallanalyse mit der Berechnung von statistischen Kennwerten verwendet. Diese Methode der Signalanalyse wurde bei der Entwicklung der trockenen Materialstromcharakterisierung an Förderbändern im Bergbau erfolgreich eingesetzt und auch in der wissenschaftlichen Literatur diskutiert, z. B. in (8). Die Intervallanalyse als Verfahren wird im folgenden Abschnitt kurz beschrieben.

Eine Intervallanalyse teilt das AE-Rohsignal in vordefinierte Fenster ein (Bild 5). Durch die Fenstereinteilung wird eine definierte Anzahl an Datenpunkten abgegrenzt und nachfolgend werden im digitalen Signal verschiedene Kennwerte berechnet und ausgewertet. (8)

Mittels der Intervallanalyse wurde der Effektivwert (Root-Mean-Square, RMS) für die Datenanalyse berechnet. Der RMS stammt aus der Elektrotechnik und beschreibt die Leistung eines periodischen Signals über das vordefinierte Intervall. (8) So soll analog zu den zuvor in der

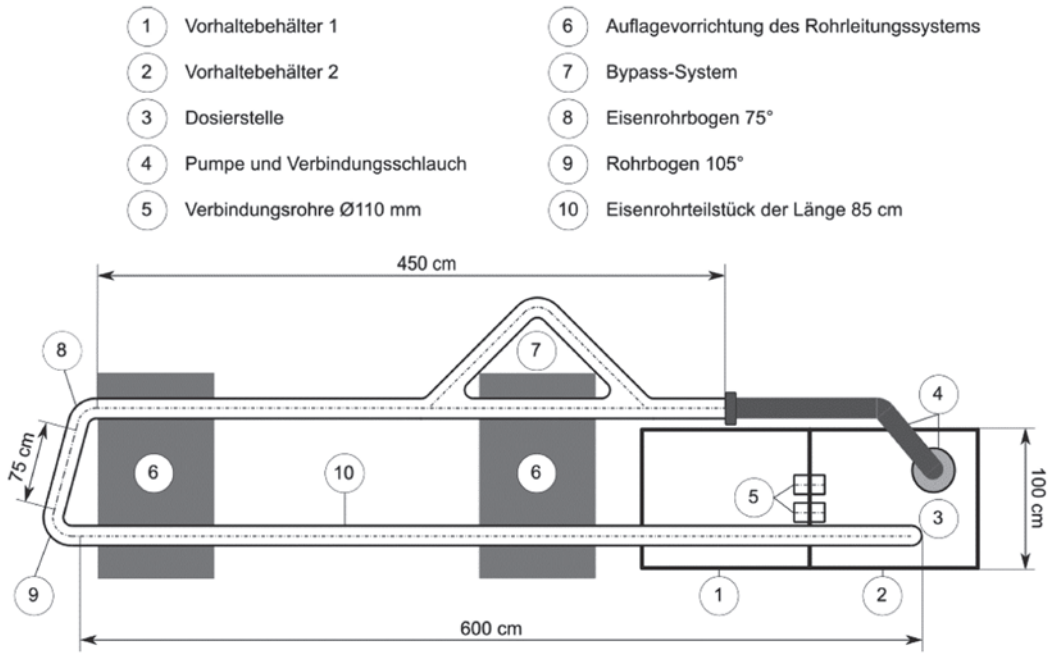

Fig. 6. Drawing of the test setup according.
Bild 6. Zeichnung des Versuchsstands.
Source/Quelle: AMT

4 Conducted experiments

4.1 Experimental setup

The test series was carried out on a test stand in the AMT's test centre. The setup of the test stand is shown in figure 6. An Auras P 40 ND A wastewater pump positioned in the centre of a 1,000 l rectangular tank pumps a mixture of water and sand in a closed circuit through a pipe system of PVC and iron pipes. The pump operates at a flow rate of 120 m^3/h, which corresponds to roughly 33 l/s.

An AE sensor was attached to the 75° iron pipe bend (8). The deflection in the pipe system increases the turbulent flow because of the physical effects occurring there (cf. chapter 3.1). Due to the arrangement of the pipe sections, it can be assumed that the metallic pipe bend section represents a promising contact point between the components of the hydraulic material flow and the inner pipe wall. Due to the centrifugal forces and the inertia of the components transported in the material flow, the sample is in constant contact with the horizontal inner surface of the bend. Therefore, the AE sensor is attached to the outer surface of the bend with a magnetic mount to ensure a sufficient transmission path of the emissions to the sensor and thus a high-quality raw signal.

4.2 Experimental procedure

The tests consisted of 15 sub-segments. In the first segment, clear water was pumped through the test stand. After this 15 min segment, 25 kg of quartz sand were added over 2 min. After 15 min, another 25 kg of sand were added. This process was repeated until a total mass of 300 kg of sand had been added to the tank. For two more segments, 50 kg were added. At a cumulative mass of 400 kg of sand filled in, the experiment was stopped. In each 15 min sub-segment, five samples of the material flow at the pipe outlet were taken. The weight and volume of each sample were measured to determine the mixture density and thus the sand content. The mixture density was determined by subtracting the density of water at a room temperature of 25 °C from the mixture density. Quartz sand was used as a test ingredient. It had an average particle size of 0.11 mm and a density of 2.65 g/cm^3.

Literatur aufgezeigten Beispielen eine grundlegende Machbarkeit der Unterscheidung unterschiedlicher Beladungszustände in einem sandbeladenen hydraulischen Massenstrom erbracht werden.

Im Vorfeld der Analyse wurde die Haupthypothese aufgestellt, dass durch eine steigende Sandbeladung in einem hydraulischen Massenstrom, auch die detektierte AE-Aktivität in den gemessenen AE-Signalen steigt. Daher wurde in dieser Abhandlung eine grundsätzliche Machbarkeit der Detektion und Unterscheidung differierender Einträge von Sand im Zwei-Komponentenmaterialstrom mittels der Analyse der errechneten RMS-Verläufe untersucht.

4 Durchgeführte Testserien im Technikum

4.1 Versuchsaufbau

Die Versuchsreihe wurde an einem Versuchsstand im Technikum des AMT durchgeführt. Der Aufbau des Versuchsstands ist in Bild 6 dargestellt. Eine Auras P 40 ND A Abwasserpumpe, die mittig in einem 1.000 l-Quaderbehälter positioniert ist, fördert ein Gemisch aus Wasser und Probenmaterial in einem geschlossenen Kreislauf durch ein Rohrsystem aus PVC- und Eisenrohren. Die Pumpe arbeitet mit einer Förderleistung von 120 m^3/h, was ungefähr 33 l/s entspricht.

An dem 75°-Eisenrohrbogen (8) wurde ein AE-Sensor befestigt. Die Umlenkung im Rohrsystem erhöht aufgrund der dort auftretenden physikalischen Effekte (vgl. Kapitel 3.1) die turbulente Strömung. Aufgrund der Anordnung der Rohrstrecken kann davon ausgegangen werden, dass der metallische Rohrbogenabschnitt eine vielversprechende Kontaktstelle zwischen den Komponenten des hydraulischen Massenstroms und der Rohrinnenwand darstellt. Aufgrund der Fliehkräfte und der Trägheit der im Stoffstrom transportierten Komponenten befindet sich die Probe in ständigem Kontakt mit der horizontalen Innenfläche des gebogenen Rohrs. Deshalb wird der AE-Sensor mit einer magnetischen Halterung an der Außenfläche des Rohrs befestigt, um einen ausreichenden Übertragungsweg der Emissionen zum Sensor und damit ein qualitativ hochwertiges Rohsignal zu gewährleisten.

Input of sand Sandeintrag	Percentage by mass of solids in the mass flow Prozentualer Massenanteil Feststoff im Massenstrom	
Total / Gesamt	Dosed / Dosiert	Measured / Gemessen
–	0 %	0 %
25 kg	0,93 %	0,67 %
50 kg	1,85 %	0,89 %
75 kg	2,75 %	1,28 %
100 kg	3,64 %	1,45 %
125 kg	4,50 %	1,85 %
150 kg	5,36 %	2,09 %
175 kg	6,19 %	2,76 %
200 kg	7,02 %	3,31 %
225 kg	7,82 %	4,38 %
250 kg	8,62 %	6,65 %
275 kg	9,40 %	8,36 %
300 kg	10,17 %	10,73 %
350 kg	11,67 %	14,50 %
400 kg	13,11 %	16,50 %

Table 1. Comparison of the dosed and the measured loading of the mass flow rate. // Tabelle 1. Gegenüberstellung der dosierten und der gemessenen Beladung des Massenstroms. Source/Quelle: AMT

The AE signals were measured continuously throughout the experiments. The continuous signals were stored as Technical Data Management Streaming (TDMS) files at 1 min intervals to simplify data handling.

Due to the chosen scale of the experimental setup and the test series, deviations from an ideal experimental setup occurred. During the test, quartz sand settled in the tank. To obtain a real value of the mass flow composition, the pumped suspension was continuously subjected to a turbidity test. Table 1 compares the ideal target suspension with the actually achieved sand loading during the test.

4.3 Configuration of measurement system

In addition to the manual, discontinuous turbidity measurement, the AE technology was used as described in the experimental setup. For this purpose, the experimental setup was expanded to include an AE measuring point, which was attached to the pipeline system in the direct vicinity of the process (Figure 6). The AE sensor was mounted with a magnetic holder centrally at the apex in the pipe plane. The application of the sensor also included the smoothing of the outer pipe wall and the use of a coupling agent (0.1 ml copper paste) to minimise interference.

All in all, the entire measurement system consisted of the aforementioned piezoelectric AE sensor (VS375-M), a preamplifier (AEP3N), a decoupling box (DCPL2) from Vallen Systeme GmbH and an analogue/digital converter (AD converter, NI 9775) from National Instruments. The measuring system was supplemented by a Dell Latitude laptop (Figure 7).

For determining the signal characteristics, as described in chapter 3.2, an interval-based calculation depending on the defined sampling rate of fs = 1 MHz is conducted. The corresponding data acquisition with an interval width of N = 1,000,000 samples is considered a reasonable configuration for material flow characterisation.

4.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche bestanden aus 15 Teilsegmenten. Im ersten Segment wurde klares Wasser durch den Prüfstand gepumpt. Nach diesem 15 min-Segment wurden 25 kg Quarzsand über eine Zeit von 2 min hinzugegeben. Nach den 15 min wurden weitere 25 kg Sand zugegeben. Dieser Vorgang wurde so lange wiederholt, bis eine Gesamtmasse von 300 kg Sand in den Behälter eingebracht war. Für zwei weitere Segmente wurden jeweils 50 kg eingefüllt. Bei einer kumulierten Masse von 400 kg eingefülltem Sand wurden die Versuche gestoppt. In jedem 15 min-Teilsegment wurden fünf Proben des Materialflusses am Rohrausgang genommen. Das Gewicht und Volumen jeder Probe wurde gemessen, um die Mischungsdichte und damit den Sandgehalt zu bestimmen. Die Mischungsdichte wurde durch Subtraktion der Dichte von Wasser bei einer Raumtemperatur von 25 °C bestimmt. Für die Versuchsdurchführung wurde Quarzsand genutzt mit einer durchschnittlichen Korngröße von 0,11 mm und eine Dichte von 2,65 g/cm^3.

Über die gesamte Dauer der Experimente wurden die AE-Signale kontinuierlich gemessen. Die kontinuierlichen Signale wurden als Technical Data Management Streaming (TDMS)-Dateien in Intervallen von 1 min gespeichert, um das Datenhandling zu vereinfachen.

Durch den gewählten Maßstab des Versuchsaufbaus und der Testserien waren Abweichungen im Vergleich zu einem idealen Versuchsaufbau möglich. Während der Versuchsdurchführung kam es zum Absetzen von Quarzsand im Tank. Um einen Realwert der Massenstromzusammensetzung zu erhalten, wurde die geförderte Suspension während der Versuchsdurchführung noch einer Trübedichtemessung unterzogen. Tabelle 1 stellt die ideal angestrebte Suspension der während der Versuchsdurchführung erreichten Feststoffbeladung gegenüber.

4.3 Konfiguration des Messsystems

Neben der manuellen, diskontinuierlichen Trübedichtemessung sollte wie im Versuchsaufbau beschrieben die AE-Technologie genutzt werden. Zu diesem Zweck wurde der Versuchsaufbau um eine AE-Messstelle erweitert, die in direkter Prozessumgebung am Rohrleitungssystems angebracht wurde (Bild 6). Die Positionierung der AE-Messstelle wurde an einem Eisenrohrteilstück des Rohrleitungssystems vorgenommen. Der AE-Sensor wurde mit einem Magnethalter mittig am Scheitelpunkt in der Rohrebene angebracht. Die Applikation des Sensors umfasste zudem das Abglätten der Rohraußenwand und die Verwendung eines Kopplungsmittels (0,1 ml Kupferpaste) zur Minimierung von Störeinflüssen.

Insgesamt bestand die gesamte Messtechnik aus dem genannten piezoelektrischen AE-Sensor (VS375-M), einem Vorverstärker (AEP3N) einem Entkoppler (DCPL2) der Firma Vallen Systeme GmbH und einem Analog/Digitalwandler (AD Wandler, NI 9775) der Firma National Instruments. Ergänzt wurde das Messsystem durch einen Dell Latitude Laptop (Bild 7).

Für die Berechnung der Signal-Kennwerte wird wie in Kapitel 3.2 beschrieben eine intervallbasierte Berechnung in Abhängigkeit von der definierten Abtastrate von fs = 1 MHz und der entsprechenden Datenbasis mit einer Intervallbreite von N = 1.000.000 Abtastungen als sinnvolle Konfiguration zur Materialfluss-Charakterisierung angesehen und durchgeführt.

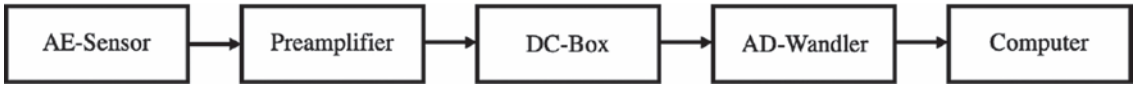

Fig. 7. Set up of the AE measurement system. // Bild 7. Aufbau der AE Messkette. Source/Quelle: AMT

5 Results

For the presentation of the results, a core state was cut out of the respective operating state and shown in comparison. The periods of material infill during which sand is added to the system were explicitly cut out. Figure 8 shows an excerpt from the entire result of the case study. The calculated RMS in volt is plotted against the test time in seconds. The results shown are extracts from the respective 15 min sub-segments of the test compositions. The trend of possible differentiation between different sand contents using AE technology can be confirmed.

The RMS curve of an almost pure water mass flow compared to a two-component material flow loaded with 0.67 % sand can be distinguished from each other in terms of the RMS value. Also, not only a separation between a pure water flow and a multiphase flow of sand and water can be seen, but also the differences in the signal intensity increase continuously with increasing sand content. This is due to an increasing interaction between the sand particles and the inner pipe wall as the solids content increases.

From this result, the visual observation of the RMS curves alone can confirm the hypothesis posed at the beginning. In the following, the result shown in Figure 8 was supplemented by another investigation to validate the result. In Figure 9, the RMS values calculated by the interval analysis were assigned to the respective sand contents and shown as a boxplot. This representation not only shows the intensity of the AE signal, but also describes the distribution of the RMS values determined in each case.

When looking at the results presented, it can be visually determined that the 15 different operating states can be distinguished

5 Ergebnisse der Untersuchungen

Zur Ergebnisdarstellung wurde aus dem jeweiligen Betriebszustand ein Kernzustand herausgeschnitten und im Vergleich dargestellt. Die Zeiträume der Materialzugabe wurden explizit herausgeschnitten. Bild 8 zeigt einen Ausschnitt aus dem gesamten Ergebnis der durchgeführten Fallstudie. Dabei wird der berechnete statistische Kennwert RMS in Volt gegenüber der Versuchszeit in Sekunden aufgetragen. Bei den dargestellten Ergebnissen handelt es sich um Auszüge aus den jeweiligen 15 min-Teilsegmenten der Versuchskompositionen. Die Möglichkeit der Differenzierung zwischen unterschiedlichen mit Sand beladenen hydraulischen Massenströmen mittels AE-Technologie lässt sich somit bestätigen.

In Bild 8 kann nicht nur eine Trennung zwischen einem reinen Wasserstrom und einer Mehrphasenströmung aus Sand und Wasser herausgearbeitet werden. Der RMS-Verlauf eines nahezu reinen Wassermassenstroms gegenüber eines mit 0.67 % Sand beladenen Zwei-Komponentenmassenstroms kann bezogen auf den Kennwertverlauf voneinander sehr einfach visuell unterschieden werden, was auch in der Gesamtdarstellung bestätigt wird. Der Unterschied in der Signalintensität steigt kontinuierlich bei steigender Sandbeladung. Das ist auf eine steigende Interaktion zwischen den Sandpartikeln und der Rohrinnenwand bei steigendem Feststoffgehalt zurückzuführen.

Von diesem Ergebnis kann allein schon durch die visuelle Betrachtung der RMS-Verläufe eine Bestätigung der eingangs gestellten Hypothese erfolgen. Im Folgenden wurde das in Bild 8 aufgezeigte Ergebnis durch eine weitere analytische Untersuchung ergänzt, um das Ergebnis zu validieren. In Bild 9 wurden die durch die Intervallanalyse berechneten RMS-Werte den jeweiligen Beladungszuständen zugeordnet und als Boxplot dargestellt. In dieser Darstellung wird nicht nur die Intensität des AE-Signals dargestellt, sondern auch die Verteilung der jeweils bestimmten RMS-Werte auf alle Teilsegmente beschrieben.

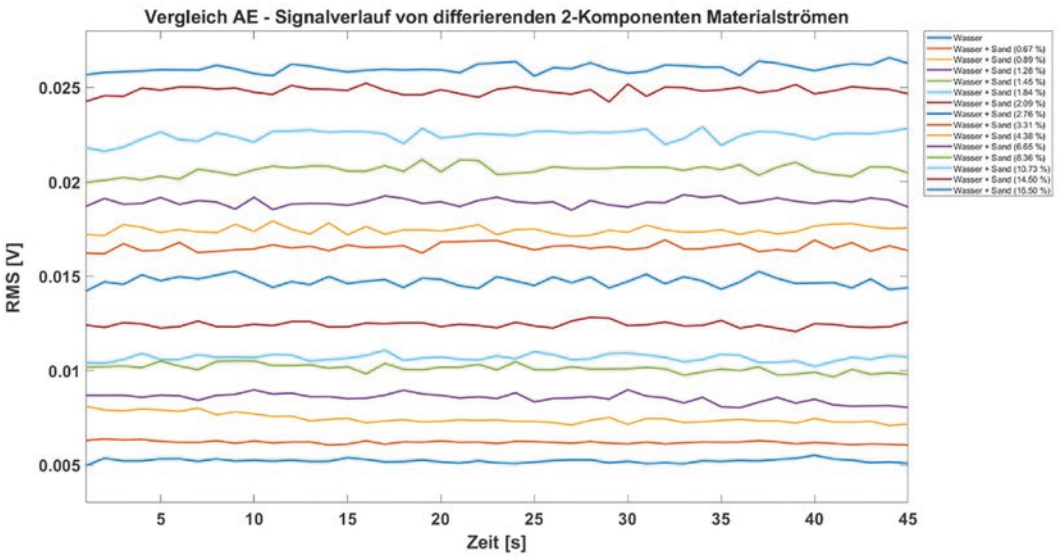

Fig. 8. Comparison of the RMS curve of a one-component (water) and the RMS curve of all two-component material flows (water and sand). // Bild 8. Vergleich des RMS-Verlaufs eines Einkomponenten (Wasser)-Materialstroms und den RMS-Verläufen aller Zwei-Komponentenmaterialströme (Wasser und Sand). Source/Quelle: AMT

Bei der Betrachtung der dargestellten Ergebnisse kann wiederum festgestellt werden, dass die 15 unterschiedlichen Betriebszustände voneinander unterscheidbar sind. Auch in der Analyse der Boxplots wird somit die Haupthypothese belegt.

Jedoch wurden im Grenzbereich zwischen einer Sandbeladung im Massenstrom von 1,45 und 1,85 % leichte Überschneidungen der Ergebnisse fest-

from each other. The analysis of the boxplots also proves the main hypothesis.

However, in the area between a sand content of 1.45 and 1.85 %, slight overlaps of the results were observed. This can be seen in the graph in Figure 8 as well as in the boxplot in Figure 9.

An explanation for this slight overlap in the results can be explained by the presentation of the turbidity density test (Figure 10). One interpretation of this result is that there was inadequate mixing between the added sand and the carrier medium water, especially at the beginning of the test series. In the range of 100 kg (1.45 %) and 125 kg sand (1.85 %) added there was only a slight change of the sand content in the water. This leads to only a slight increase in AE activities and could explain the described problems in the differentiation of the two two-component material flows. The reason for the discrepancy between the added sand mass and the sand mass that is actually in the hydraulic circuit is the sedimentation in the tank.

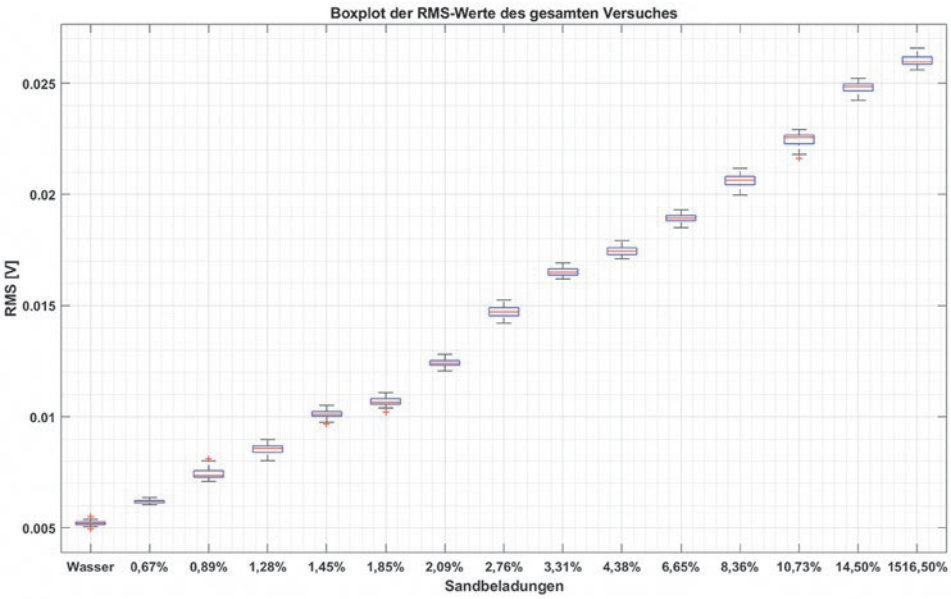

Fig. 9. RMS curves displayed as boxplot. // Bild 9. RMS-Verläufe als Boxplot dargestellt. Source/Quelle: AMT

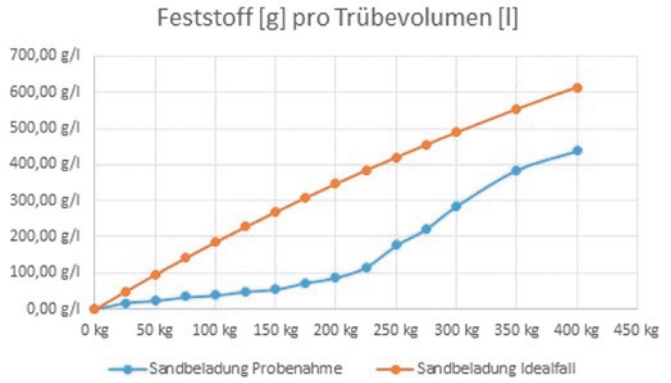

Fig. 10. Results of the turbidity measurement compared against theoretical sand content if no sedimentation of the sand in the tank occurs.
Bild 10. Trübedichte Untersuchung während der Versuchsdurchführung.
Source/Quelle: AMT

6 Achieved succes

For the investigation of the feasibility of distinguishing different sand contents of a hydraulic mass flow, it was proven that a dispersed hydraulic mass flow with increasing sand content increases the intensity of generated AE activities. This assumption could be provided by performing interval analysis of AE signals.

Linking this back to deep sea mining indicates that applying AE technology for material flow characterisation is feasible for the given set-up. As a next step the material flows occurring during manganese nodule mining with a harvester will be in the focus of research. Successfully applying the AE technology to characterising these more complex multiphase flows will be the goal of the upcoming steps.

gestellt. Dies ist sowohl in der Verlaufsgrafik in Bild 8 als auch im Boxplot in Bild 9 zu erkennen.

Eine Erklärung für diese leichte Überschneidung in den Ergebnissen kann die Darstellung der Trübedichteuntersuchung (Bild 10) geben. Eine Interpretation dieses Ergebnisses ist, dass es gerade zu Beginn der Versuchsreihe zu einer unzulänglichen Vermischung zwischen dem zugeführten Sand und dem Trägermedium Wasser kam. Besonders im Bereich von 100 kg (1,45 %) und 125 kg (1,85 %) zugeführtem Sand gab es nur eine geringfügige Änderung im Sandgehalt. Dies führt zu einem nur geringfügigen Anstieg der AE-Aktivitäten und könnte die beschriebenen Probleme in der Differenzierung der beiden unterschiedlichen Zwei-Komponentenmaterialströme erklären. Die Ursache für die Diskrepanz zwischen hinzugegebener und sich tatsächlich im hydraulischen Kreislauf befindlicher Sandmasse ist auf die Ablagerungen im Tank zurückzuführen.

6 Erreichter Erfolg

Für die Untersuchung der Machbarkeit einer Unterscheidung verschiedener Sandbeladungen eines hydraulischen Massenstroms wurde nachgewiesen, dass ein disperser hydraulischer Massenstrom mit steigender Sandbeladung eine Erhöhung der Intensität von erzeugten AE-Aktivitäten nach sich zieht. Diese Annahme konnte durch die Durchführung einer intervallbasierten Signalanalyse erbracht werden.

Für eine Anwendung im Tiefseebergbau und der hydraulischen Förderung von Rohstoffen bedeutet dieses Ergebnis, dass eine prinzipielle Machbarkeit einer möglichen Materialstromcharakterisierung mittels AE-Technologie bei einem wie hier beschriebenen Aufbau möglich ist. In einem nächsten Schritt müssen die Randbedingungen der Betriebszustände bei unterschiedlichen Materialbelastungen untersucht werden. Hierbei soll eine Klassifizierung der Hauptbetriebszustände der hydraulischen Förderung eines Tiefseebergbaufahrzeugs festgelegt werden, um darauffolgend weiter im Anwendungsfall auftretende Materialfraktionen im Förderström zu identifizieren und möglicherweise auch charakterisieren zu können.

References / Quellenverzeichnis

(1) Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Hummen, T.; Erdmann, L.; Tercero Espinoza, L. A.; Angerer, G.; Marwede, M.; Benecke, S.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin, 2016, ISBN 978-3-9435-6672-7.

(2) Herzig, P.: Mineralische Rohstoffe aus der Tiefsee – Entstehung, Potential und Risiken. GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Kiel, 2019.

(3) Schütte, P.: Kobalt - Information zur Nachhaltigkeit. Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2020.

(4) Gelpke, N.; Visbeck, M.: World ocean review – Rohstoffe aus dem Meer – Chancen und Risiken. maribus gGmbH, Hamburg, 2014, ISBN 978-3-86648-220-3.

(5) BLUE NODULES. Deliverable report D3.7. Design report model for an Acoustic Emission System. Institute for Advanced Mining Technologies, RWTH Aachen University, 2019.

(6) Nienhaus, K.; Wotruba, H.; Vraetz, T.; Baltes, R.; Boos, F. D.; Neubert, K.; Knapp, H.: Verfahren und Anordnung zur Analyse eines Stoffstroms. Patentveröffentlichungsnummer: PCT/DE2015/100504, 2015.

(7) Vraetz, T.; Boos, F. D.; Baltes, R.; Nienhaus, K.; Schropp, C.; Neubert, K.; Knapp, H.; Wotruba, H. (Hrsg.); Pretz, T. (Hrsg.): Material Stream Characterization with Acoustic Emission Technology. 7th Sensor-Based Sorting & Control 2016, Shaker Verlag, Aachen, 2016, ISBN 978–3–8440–4323–5.

(8) Vraetz, T.: Entwicklung und Anwendung eines innovativen Konzepts zur Inline-Charakterisierung von Stoffgemischen in kontinuierlichen Massenströmen mittels der Acoustic Emission Technologie. Dissertation, RWTH Aachen University, 2018, ISBN 978-9-41277-36-6.

(9) Gierloff-Emden, H.-G.: Geographie des Meeres – Ozeane und Küsten. Walter de Gruyter, Berlin, 1980, ISBN 3-11-002124-2.

(10) Mero, J. L.: Ocean-floor manganese nodules. Economic Geology, 1962.

(11) Parianos, J.; Lipton, I.; Nimmo, M.: NI 43-101 Technical Report TOML Clarion Clipperton Zone Project, Pacific Ocean. AMC Consultants Pty Ltd, Brisbane, 2016.

(12) Volkmann, S. E.; Lehnen, F.; Kukla, P. A.: Estimating the economics of a mining project on seafloor manganese nodules. Mineral Economics, Bd. 32, Nr. 3, S. 287–306, 2019.

(13) Baker, B.; Beaudoin, Y.: SPC, Deep Sea Minerals; Manganese Nodules, a physical, bio-logical, environmental, and technical review. Secretariat of the Pacific Community (SPC), 2013.

(14) Glasby, G. P.: Deep Seabed Mining: Past Failures and Future Prospects. Marine Georesources & Geotechnology, Bd. 20, Nr. 2, S. 161–176, 2002.

(15) Yamazaki, T.; Brockett, T.: History of Deep-Ocean Mining. Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering. J. Carlton, P. Jukes, and Y.-S. Choo Eds. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2017.

(16) Auswärtiges Amt: Internationales Seerecht – Das Übereinkommen der Vereinten Nationen zum Seerecht, Bereiche des Seevölkerrechts. www.auswaertiges-amt.de/de/aussenpolitik/themen/internationalesrecht/einzelfragen/seerecht/internationales-seerecht/213318 (zuletzt geprüft am 22.12.2020).

(17) Exner, A.; Held, M.; Kummerer, K.: Kritische Metalle in der Großen Transformation. Springer Verlag, Berlin, 2016.

(18) Hein, J. R.; Mizell, K.; Koschinsky, A.; Conrad, T. A.: Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. Ore Geology Reviews, Bd. 51, S. 1 – 14, 2013.

(19) Jaeckel, A.; Gjerde, K. M.; Ardron, J. A.: Conserving the common heritage of humankind – Options for the deep-seabed mining regime. Marine Policy, Bd. 78, S. 150–157, 2017.

(20) ISA: Draft regulations on exploitation of mineral resources in the Area (ISBA/25/C/WP.1). International Seabed Authority, Kingston, 2019.

(21) ISA: Status of contracts for exploration and related matters, including information on the periodic review of the implementation of approved plans of work for exploration (Twenty-sixth session, no. ISBA/26/C/4), International Seabed Authority, Kingston, 2019.

(22) Grima, M.; van Gelder, R. A. C.; Heeren, J.; Verichev, S. N.; van Wijk, J. M.: Into the deep: a risk based approach for research to deepsea mining. CEDA Dredging Days 2011: Dredging and Beyond, 2011.

(23) Blue Mining: Homepage of Blue Mining; https://bluemining.eu, zuletzt geprüft am 22.04.2021.

(24) Blue Nodules: Homepage of Blue Nodules; https://blue-nodules.eu, zuletzt geprüft am 13.03.2020.

(25) Blue Harvesting: Homepage of Blue Harvesting; https://blueharvesting-project.eu, zuletzt geprüft am 22.04.2021.

(26) Müller, W.: Mechanische Verfahrenstechnik und ihre Gesetzmäßigkeiten. Oldenbourg Wissenschatfsverlag, 2014.

(27) Fristam Pumpen KG (GmbH & Co.), www.fristam.de, zuletzt geprüft am 14.10.2020.

(28) Surek, D.; Stempin, S.: Angewandte Strömungsmechanik für Praxis und Studium. Vieweg+Teubner Verlag, 2007.

(29) Buhrke, H.; Kecke, H. J.; Richter, H.: Strömungsförderer: hydraulischer und pneumatischer Transport in Rohrleitungen. Vieweg+Teubner Verlag, 1989.

(30) Cai, B.: Untersuchung zum Einfluss der Partikelgrößenverteilung und Partikelform auf den Druckverlust bei horizontaler Fluid-Feststoff-Rohrströmung. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1992.

(31) Forkert Technology Services GmbH: Präsentation Strömungsoptimierung, www.forkert-t-s.com, zuletzt geprüft am 15.07.2017.

(32) Berg, J.: Entwicklung und prototypischer Einsatz eines Infrarotkamerasystems für Automatisierungslösungen im Rohstoffsektor. Dissertation, RWTH Aachen University, 2017, ISBN 978-3-941277-29-8.

Authors / Autoren

Sunny Schoone M.Sc., Maximilian Getz M.Sc. and
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen, Institute for Advanced Mining Technologies (AMT), RWTH Aachen, Aachen/Germany